

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Genie industriel

Présentée et soutenue par :

Mme ESSI AHOEFA DABLA

le vendredi 15 novembre 2019

Titre :

Approche bayesienne multiéchelle pour la modélisation de la fiabilité d'un module de puissance en environnement ferroviaire

---

Ecole doctorale :

Systèmes (EDSYS)

Unité de recherche :

Laboratoire Génie de Production de l'ENIT (E.N.I.T-L.G.P.)

Directeur(s) de Thèse :

M. FRANÇOIS PERES

MME CARMEN MARTIN LOREN

Rapporteurs :

M. BENOIT IUNG, UNIVERSITE LORRAINE

M. CHRISTOPHE BERENGUER, INP DE GRENOBLE

Membre(s) du jury :

M. NOUREDDINE ZERHOUNI, UNIVERSITE DE FRANCHE COMTE, Président

M. CLAIR FOURNIER, ALSTOM TRANSPORT SEMEAC, Invité(e)

M. FLORENT ANDRIANOELISON, ALSTOM TRANSPORT SEMEAC, Membre

M. FRANÇOIS PERES, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, Membre

MME CARMEN MARTIN LOREN, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TARBES, Membre

M. MICHEL PITON, ALSTOM TRANSPORT SEMEAC, Membre

M. ZOUBIR KHATIR, IFSTTAR, Membre

Remerciements

Mon travail de recherche est né d'une convention CIFRE entre l'entreprise ALSTOM TRANSPORT site de Séméac au travers du projet européen Shift2Rail et l'ENI de Tarbes. Je remercie le projet Shift2Rail pour le financement de cette thèse.

Je tiens à remercier Florent Andrianeolison, Michel Piton et Clair Fournier mes encadrants industriels. Merci Florent pour ta disponibilité sans faille, tes remarques, tes propositions, tes corrections, tes questions qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail. Merci Michel pour ta gentillesse, ton expertise et tes expériences que tu m'as apportées sur les composants de puissance, ainsi que tous les moyens financiers que tu as mis à ma disposition pour mener à bien ce travail. Merci Clair de m'avoir intégré au sein de l'équipe RAMS, d'avoir suivi ce travail de recherche jusqu'à la fin et de m'avoir fait confiance en me permettant de mettre le pied à l'étrier en tant qu'ingénieur RAMS.

Je remercie mon directeur de thèse François Pérès et mon co-directeur Carmen Martin de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire Génie de Production. Merci pour la confiance que vous m'avez témoignée, pour l'autonomie que vous avez su m'accorder, pour vos qualités humaines et votre accompagnement scientifique tout au long de ce travail. Merci également pour tous vos conseils professionnels et personnels.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à Christophe Berenguer et à Benoît Iung pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail, et pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer au jury de thèse en tant que rapporteurs. Leurs pertinentes remarques et leurs nombreuses questions m'ont permis d'améliorer ce travail et d'approfondir mes connaissances. Mes sincères remerciements vont également à Noureddine Zerhouni et Zoubir Khatir pour avoir accepté de faire partie de ce jury, merci pour l'intérêt porté à mon travail, pour vos remarques et vos questions.

Je remercie Johana Vally de m'avoir intégré au sein de l'équipe RAMS d'ALSTOM et de m'avoir permis de concilier ma thèse et mon nouveau poste d'ingénieur.

Toute ma gratitude à Maïder Estecahandy d'avoir travaillé avec moi, merci pour ta disponibilité, pour ton support scientifique sur les méthodes statistiques, pour toutes tes remarques et pour ta relecture de ce rapport.

Un grand merci à toutes les personnes collègues et ami(e)s que j'ai côtoyées tout au long de ce travail de recherche et qui ont participé directement ou indirectement à l'accomplissement de ce travail. Je pense à Frédéric Belmonte, Jean-François Servière, Vincent Escrouzailles, Jean-Louis Torrenta, Jean-Claude Seguin, Laurent Drouen, Emmanuel Batista, Jean-Sébastien Benoît, Marion Soussens, Damien Tisney-Grimaud, Brahim Boutkhamouine, Quan Liu,

Ayeley Tchangani, Améyovi Tongne, Pasteur Kelly Akarasis, Mathieu Tardivon, Mamie Nadette… (toutes mes excuses à toutes les personnes que j'aurai oublier de citer dans ces quelques lignes).

Je remercie aussi tout le personnel administratif du LGP, en particulier Eliane Casta, Marie Cécile De Barros, Marie Texiera, Pascal Maffre pour leurs accueils chaleureux et les multiples services réalisés tout au long de la thèse et la préparation de la soutenance.

Je tiens enfin à remercier mes parents et mes petits-frères, merci d'avoir eu confiance en moi, d'avoir prié pour moi, de m'avoir soutenu et encouragé durant toutes ces années. Merci à Maman Afi pour tes prières. Merci à mon mari d'avoir été un soutien sans faille, une source de motivation au quotidien. Sans toi, je n'en serais pas là. Merci pour tout.

Akpénami kaka… Merci dans ma langue maternelle

à papa et maman

à Kékéli

« Oui, je veux dire merci au Seigneur, sans oublier un seul de ses bienfaits » Psaumes 103 :2

Tables des matières

Remerciements v
Tables des matières xi
Liste des figures xvii
Liste des tableaux xxi
Notations générales xxiii
Introduction générale 25
I. Positionnement bibliographique sur la fiabilité des modules de puissance à IGBT 33
I.1. Interrupteurs de puissance IGBT 34
I.1.1. Historique de l'IGBT 34
I.1.2. Gamme d'IGBT 35
I.1.3. Description structurelle de l'IGBT 36
I.1.3.1. Boitier 37
I.1.3.2. Puce IGBT et diode 37
I.1.3.3. Substrat isolant métallisé 38
I.1.3.4. Connectiques de puissance 38
I.1.3.5. Semelle 38
I.1.3.6. Gel de silicone 38
I.2. Généralité sur la fiabilité 39
I.2.1. Définitions 39
I.2.2. Formulation mathématique des indicateurs fiabilistes 40
I.2.2.1. Fonction densité de probabilité 40
I.2.2.2. Fonction de répartition 40
I.2.2.3. Fonction de fiabilité 41
I.2.2.4. Temps moyen entre pannes 41
I.2.2.5. Fonction de risque instantanée ou taux de défaillance 42
I.2.2.6. Estimation d'indicateurs fiabilistes à partir de lois connues 43
I.3. Fiabilité de l'IGBT: état de l'art 44

I.3.1. Approches statistiques 46
I.3.1.1. Méthode « fréquentiste » 46
I.3.1.2. Recueils de fiabilité 47
I.3.2. Approches analytiques 47
I.3.2.1. Méthode basées sur l'étude physique 47
I.3.2.2. Méthode basée sur les essais 49
I.3.3. Avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes 50
I.4. Comparaison et choix de l'outil de modélisation 52
I.4.1. Critères de modélisation 52
I.4.1.1. Réseaux de Petri 52
I.4.1.2. Chaîne de Markov 53
I.4.1.3. Réseaux bayesiens 55
I.4.1.4. Réseaux de neurones 56
I.4.1.5. Comparaison 57
I.4.2. Méthode bayesienne pour l'estimation de la fiabilité de l'IGBT 58
Conclusion 59
II. Proposition d'un cadre de travail 61
II.1. Cadre de travail proposé : Approche «Cycle en U» 61
II.2. Application aux systèmes ferroviaires 63
II.2.1. Niveau Train : étude fonctionnelle 64
II.2.1.1. Chaîne de traction ferroviaire 65
II.2.1.2. Fonctions de la chaîne de traction ferroviaire 65
II.2.2. Niveau Convertisseur : étude fonctionnelle 66
II.2.2.1. Convertisseur d'entrée : fonctions et principe de fonctionnement 67
II.2.2.2. Convertisseur de sortie : l'onduleur 67
II.2.2.3. Hacheur 68
II.2.3. Niveau IGBT : étude fonctionnelle 68
II.2.4. Niveau IGBT : étude dysfonctionnelle 69
II.2.4.1. Décollement des fils de bonding 70
II.2.4.2. Fatigue des brasures 73
II.2.4.3. Corrosion de la terminaison de la puce 74
II.2.4.4. Rayonnement cosmique 76
II.2.4.5. Dépassement de l'aire de sécurité 77
II.2.4.6. Déformation des métallisations en surface des puces 80
II.2.4.7. Corrosion des fils de bonding 81

II.2.4.8. Fatigue des brasures des connectiques de puissance 82
II.2.4.9. La migration électrochimique (ECM) 83
II.2.4.10. Fissuration des fils de bonding 84
II.2.4.11. Décharges partielles dans les isolants 85
II.2.4.12. Vieillissement et défaillance des oxydes de grille 86
II.2.4.13. Claquage diélectrique du gel 87
II.2.4.14. Fissuration de la puce, du substrat et du boitier 87
II.2.4.15. Tableau récapitulatif des mécanismes de défaillance 88
II.2.5. Niveau Convertisseur : analyse dysfonctionnelle 89
II.2.6. Niveau Train : analyse dysfonctionnelle 89
Conclusion 89
III. Construction du modèle bayesien 91
III.1. Théorie des probabilités et théorie des graphes 92
III.1.1. Théorie des probabilités 92
III.1.1.1. Probabilité conditionnelle 92
III.1.1.2. Notions de probabilités totales 92
III.1.1.3. Formulation du théorème de Bayes pour un système complet d'événements 93
III.1.2. Théorie des graphes 93
III.1.2.1. Définition schématique du graphe causal orienté 93
III.1.2.2. Circulation de l'information dans un graphe causal 94
III.1.2.3. Notion de d-séparation (blocage) 95
III.2. Réseaux bayesiens, un modèle graphique probabiliste 95
III.2.1. Exemple de réseau bayesien 96
III.2.2. Notion d'inférence bayesienne 97
III.2.3. Etapes de construction d'un réseau bayesien 98
III.2.4. Apprentissage des paramètres 98
III.2.4.1. À partir de données complètes 99
A. Apprentissage statistique 99
B. Apprentissage bayesien 99
III.2.4.2. À partir de données incomplètes 100
Algorithme EM avec apprentissage statistique 100
A. Algorithme EM avec apprentissage bayesien 101
III.2.5. Détermination des TP à partir d'avis d'experts 101
III.2.6. Apprentissage de la structure 103
III.2.6.1. Approches basées sur les tests d'indépendance conditionnelle 103
A. Test du $\chi 2$ 104

B. Test du **G2** 104
C. Approches basées sur le score 105
D. Approches basées sur les avis d'experts 106
III.3. Construction du modèle bayesien pour l'évaluation de la fiabilité de l'IGBT 107
III.3.1. Phases de fonctionnement niveau IGBT 108
III.3.2. Contraintes de fonctionnement niveau IGBT 109
III.3.3. Phases de fonctionnement niveau Convertisseur 110
III.3.4. Contraintes de fonctionnement niveau Convertisseur 110
III.3.5. Phases de fonctionnement niveau Train 111
III.3.6. Contraintes de fonctionnement niveau Train 111
III.3.7. Mécanismes de défaillance 112
III.3.8. Structure du graphe dans Netica 113
III.4. Cadre idéal de détermination des TP 117
Conclusion 119
IV. Du modèle bayesien aux indicateurs de défaillance 121
IV.1. Vers des indicateurs globaux de fiabilité 122
IV.1.1. Schématisation symbolique 122
IV.1.2. Expression des Mécanismes de défaillance 123
IV.2. Expression du taux de défaillance 125
IV.2.1. Cas 1 : Pour les mécanismes de défaillance déjà décrits par un taux de défaillance 125
IV.2.2. Cas 2 : Pour les phénomènes exprimés à partir d'un Facteur d'Accélération AF 127
IV.2.2.1. Notion de Facteur d'Accélération (AF) 127
IV.2.2.2. Schématisation de la TP d'un mécanisme de défaillance donné par son AF 129
IV.2.2.3. Formalisation du taux de défaillance équivalent 130
IV.2.2.4. Déploiement dans le cadre de l'estimation du taux de défaillance 131
IV.2.2.5. Exemple illustratif de la méthode 132
IV.2.3. Cas 4 : phénomènes décrits par le nombre de cycles avant défaillance $\boldsymbol{Nf}$. 132
IV.2.4. Cas 3 : Pour les phénomènes exprimés en $\boldsymbol{Tf}$ 134
IV.3. Mécanismes de défaillance sans loi identifiée 134
Conclusion 134
V. Cas d'étude du métro de Chennai 135
V.1. Présentation du métro de Chennai 136
V.1.1. Convertisseurs du métro de Chennai 138
V.2. Collecte de données 139

V.2.1.1. Données environnementales 140
V.2.1.2. Données sur le fonctionnement 142
V.2.2. Reconstitution du profil journalier d'utilisation du métro de Chennai 144
V.3. Construction du réseau bayesien 145
V.4. Détermination des TPC 148
V.4.1. Capitalisation des connaissances sur les variables 148
V.4.2. Etude de la première catégorie de variables 150
V.4.2.1. Variable « Temp_amb_Train » 150
V.4.2.2. Variable Temp_amb_IGBT 151
V.4.3. Etude de la deuxième catégorie de variable 152
V.4.3.1. Variable Deplacement_Train 152
V.4.3.2. Variable Ucat_AC_Train 153
V.4.4. Etude de la troisième catégorie de variables 154
V.4.4.1. Variable Relief_Train 154
V.4.4.2. Variable HTBT_Train 155
V.4.5. Etude de la quatrième catégorie de variable 156
V.4.6. Difficultés rencontrées 158
V.4.6.1. Difficulté 1 : données non synchronisées et solutions apportées 158
V.4.6.2. Difficulté 2 : choix de la méthode d'apprentissage et solutions apportées 158
V.4.6.3. Difficulté 3 : classes de discrétisation et solutions apportées 159
V.5. Etablissement des TP 160
V.5.1. Relativement à la première catégorie de variables 160
V.5.2. Relativement à la deuxième catégorie de variables 161
V.5.2.1. Variable Déplacement_Train 162
V.5.2.2. Variable Vdc_Conv 163
V.5.2.3. Altitude 164
V.5.3. Exemple de la troisième catégorie de variables HTBT_Train 165
V.5.4. Exemple de la quatrième catégorie de variables 165
V.6. Passage des TP aux indicateurs de défaillance 166
V.6.1. Considérations sur les mécanismes de défaillance 166
V.6.2. Estimation du taux de défaillance pour les phénomènes dont l'équation du taux de défaillance est connue 167
V.6.2.1. Etude du phénomène de rayonnement cosmique 167
V.6.2.2. Etude du phénomène de RBSOA 168
V.6.3. Estimation du taux de défaillance pour les phénomènes décrits par un facteur d'accélération 169
V.6.3.1. Etude du phénomène de corrosion de la terminaison de la puce 170

V.6.3.2. Etude du phénomène de fatigue de la brasure 173
V.6.3.3. Etude du phénomène de décollement du fil de bonding 176
V.6.4. Taux de défaillance global de l'IGBT 178
V.6.5. Estimation de la durée de vie par phénomène 179
V.6.5.1. Durée de vie due au phénomène de décollement du fil de bonding 179
V.6.5.2. Durée de vie due au phénomène de fatigue de la brasure 180
V.6.6. Durée de vie globale de l'IGBT 181
V.7. Pré-validation du modèle 182
V.8. Exploitation du réseau bayesien en diagnostic et pronostic 184
V.8.1. Définitions du pronostic et du diagnostic 184
V.8.2. Exploitation du modèle bayesien de l'IGBT en pronostic 186
V.8.3. Exploitation du modèle bayesien de l'IGBT en diagnostic 190
Conclusion 192
Conclusion générale 195
Perspectives 199
Annexes 201
Annexe A : AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) de l'IGBT 201
Annexe B : Données disponibles sur chacun des variables du réseau dans le cas d'application de Chennai. 208
Annexe C : Hypothèses détaillées d'estimation des TP 226
Annexe D : Résultats de modélisation dans Netica 232
Annexes E : Démonstration de l'obtention de x et y pour le phénomène de corrosion de la puce 233
Références bibliographiques 241
Résumé 253
Abstract 255

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Evolution des interrupteurs de puissance en traction ferroviaire [Piton, 2015a] 35
Figure I.2: (a) Photo d'un IGBT 6500V (Taille 140 x 190); (b) Vue éclatée de l'IGBT. D'après Piton [2015a] 36
Figure I.3: (a) Schéma structurel d'un IGBT Perpiñà [2012] (b) Intérieur d'un IGBT Piton [2015a] ... 36
Figure I.4: Courbe en baignoire : taux de défaillance en fonction du temps 43
Figure I.5: Statistiques liées à la casse d'un IGBT [Piton, 2015b] 45
Figure I.6:Schéma synoptique des différentes méthodes usuelles pour la détermination de la durée de vie et du taux de défaillance 46
Figure I.7: Etapes de la prédiction de la durée de vie basée sur les profils de mission [Scheuermann, 2015] 50
Figure I.8: Exemple de réseau de Pétri avant et après franchissement de la transition [RNC-CNES-Q-30-504, 2008] 53
Figure I.9: Exemple de graphe Markov a) système de deux composants en parallèle sans réparation b)avec une réparation partielle 54
Figure I.10: Principe des réseaux de neurones [Benaddy, 2012] 56
Figure I.11: Synoptique de la mise en place du modèle bayesien pour l'estimation de la fiabilité 59
Figure II.1: Approche « Cycle en U» 62
Figure II.2: Application du « Cycle en U» au système Train-IGBT 64
Figure II.3: Chaîne de traction ferroviaire 66
Figure II.4: Convertisseurs de la chaîne de traction [Chapas, 2006] 66
Figure II.5: Principe de fonctionnement du PMCF [Chapas, 2006] 67
Figure II.6: Principe de fonctionnement de l'onduleur [Chapas, 2006] 68
Figure II.7: Schéma du hacheur [Chapas, 2006] 68
Figure II.8: Décollement du fil de bonding [Ciappa, 2002] 71
Figure II.9: Coefficients de la loi de Coffin-Manson [Ciappa, 2000] 72
Figure II.10: Délamination de la brasure [Ciappa, 2002] 73
Figure II.11: Absorption de l'eau par les IGBT [Servière, 2017] 74
Figure II.12: (a) processus de corrosion de l'aluminium (b) dissolution de la métallisation d'une puce diode d'un IGBT 1700 V/600 A [Zorn et Kaminski,2015a] 75
Figure II.13: Aire de sécurité de l'IGBT [Mitsubishi CM450DA-66X, 2016] 78
Figure II.14: Phénomènes rencontrées hors de l'aire de sécurité [Vallon, 2003] 78
Figure II.15: Déformation en surface de la métallisation [Ciappa, 2002] 80
Figure II.16 : Cassure d'un fil de bonding suite à la corrosion [Ciappa, 2002] 81
Figure II.17: (a) Principe de l'électromigration chimique (b) Formations de dendrites de cuivre [Zorn et Kaminski, 2015b] 83
Figure II.18: Fissuration du fil de bonding [Vallon, 2003] 85
Figure II.19: (a) Fissuration verticale dans le substrat (b) Fissuration dans le substrat initié par une non-homogénéité dans la soudure [Ciappa, 2000] 88
Figure III.1:(a) et (b) Exemples de graphes causaux 94
Figure III.2: Exemple de graphe pour illustrer la d-séparation 95
Figure III.3: Exemple de réseau bayesien 96
Figure III.4: TP du réseau bayesien 97
Figure III.5: Principe de l'algorithme EM 101

Figure III.6: Echelle de probabilité 102
Figure III.7: Structure multi-niveaux du réseau bayesien 107
Figure III.8: Structure du graphe bayesien; du niveau IGBT au niveau Convertisseur 115
Figure III.9: Structure du graphe bayesien; du niveau Convertisseur au niveau Train 115
Figure III.10: Structure du graphe bayesien; du niveau contraintes IGBT aux mécanismes de défaillance 116
Figure III.11: Illustration d'une table de données complète 117
Figure III.12: Illustration d'une table de données incomplètes 118
Figure IV.1: Du modèle bayesien aux indicateurs de défaillance 123
Figure IV.2: Passage des mécanismes de défaillance donnés par les TPC aux indicateurs globaux de défaillance 124
Figure IV.3: Exemple de TP du taux de défaillance (Lambda) 125
Figure IV.4: Principe du modèle accéléré 127
Figure IV.5: Schématisation d'une TP du facteur d'accélération 130
Figure IV.6: Utilisation de la somme de lois de Weibull pondérées 132
Figure V.1: Métro de Chennai en Inde 136
Figure V.2: Lignes du métro de Chennai 137
Figure V.3: Convertisseurs de la chaîne de traction du métro de Chennai 138
Figure V.4: Evolution de la température ambiante journalière niveau Train et IGBT sur un an 141
Figure V.5: Evolution de l'humidité relative moyenne journalière niveau Train et IGBT sur un an 141
Figure V.6: Interface de modélisation de CITHEL 142
Figure V.7: Fichiers Excel d'extraction de données de Cithel 143
Figure V.8: Détail du parcours journalier 144
Figure V.9: Détail du parcours journalier 144
Figure V.10: Structure du graphe bayesien du métro de Chennai 147
Figure V.11: Fiche descriptive générique associée à une variable 150
Figure V.12: Fiche descriptive de la variable Temp_amb_Train 151
Figure V.13: Fiche descriptive de la variable Temp_amb_IGBT 151
Figure V.14: Fiche descriptive de la variable Deplacement_Train 153
Figure V.15: Fiche descriptive de la variable Ucat_AC_Train 154
Figure V.16: Fiche descriptive de la variable Relief_Train 155
Figure V.17: Fiche descriptive de la variable HTBT_Train 156
Figure V.18: Fiche descriptive de la variable DureeVieCons_Dec_IGBT_Ond 157
Figure V.19: Renseignements sur la variable AF_Corrosion_Puce_Ond 157
Figure V.20: TP de la variable RH_amb_Train 161
Figure V.21: Profil de vitesse sur un parcours aller-retour 162
Figure V.22: TP de la variable Déplacement_Train 163
Figure V.23: Profil de l'altitude sur un parcours aller-retour 164
Figure V.24: TP de la variable "Altitude_Train" 164
Figure V.25: (a) Variable HTBT_Train et son parent (b) TPC de HTBT 165
Figure V.26: Illustration de l'utilisation de la simulation de Monte Carlo pour estimer les TPC 166
Figure V.27: Résultats de la TP du taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique (a) Cas de l'IGBT de l'onduleur (b) Cas de l'IGBT du PMCF 168
Figure V.28: TP du taux de défaillance dû au phénomène de RBSOA (a) Cas de l'IGBT de l'onduleur (b) Cas de l'IGBT du PMCF 169
Figure V.29: Différents scénarii de choix de discrétisation statique (a) 20 classes équiprobables (b) 100 classes équiprobables (c) 1000 classes équiprobables (d) 2500 classes équiprobables (e) discrétisation aléatoire (f)discrétisation exponentiellement équiprobable avec un nombre de classes choisi par la règle de Sturges 170

Figure V.30: TP du facteur d'accélération du phénomène de corrosion de la puce (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF 171
Figure V.31: Courbe du taux de défaillance de la corrosion de la puce de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF 173
Figure V.32: TP du facteur d'accélération du phénomène de fatigue de la brasure (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF 175
Figure V.33: Courbe du taux de défaillance de la fatigue de la brasure de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF 176
Figure V.34: Paramètres de Weibull accélérée [Scheuermann, 2012] 176
Figure V.35: TP du facteur d'accélération du phénomène de décollement du fil de bonding (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF 177
Figure V.36 : Courbe du taux de défaillance du décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF 178
Figure V.37: Evolution du taux de défaillance global de l'IGBT (a) Cas de l'IGBT de l'onduleur (b) Cas de l'IGBT du PMCF 179
Figure V.38: TP de la durée de vie consommée par l'IGBT dû au phénomène de décollement du fil de bonding (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF 180
Figure V.39: TP de la durée de vie consommée par l'IGBT dû au phénomène de fatigue de la soudure (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF 181
Figure V.40: Taux de défaillance opérationnel depuis la mise en service du train 182
Figure V.41: Taux de défaillance estimé sur 4 ans (IGBT du PMCF) 183
Figure V.42: Taux de défaillance estimé sur 4 ans hors corrosion 184
Figure V.43: Introduction d'une évidence Vdc_Conv=1800V et mise à jour des TP 187
Figure V.44: Taux de défaillance global de l'IGBT de l'onduleur estimé après introduction d'une évidence Vdc=1800 V 188
Figure V.45: Introduction des évidences Vdc_Conv=1800 V; Tj_IGBT_Ond=100 °C; RH_amb_IGBT= 46% et mise à jour des TP 189
Figure V.46: Courbe du taux de défaillance obtenue après intégration des évidences Vdc_Conv=1800 V; Tj_IGBT_Ond=100 °C; RH_amb_IGBT= 46% 190
Figure V.47: Introduction d'une évidence sur le taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique à 100 % et mise à jour des probabilités des variables parents 191
Figure V.48: Intégration d'un fonctionnement à Tj=125 °C et mise à jour des TP du modèle 192

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Grandeurs fiabilistes de quelques lois de distribution 44
Tableau I.2: Comparaison des méthodes 58

Chapitre II

Tableau II.1: Fonctions de l'IGBT 69
Tableau II.2: Estimation du taux de défaillance dans différentes conditions 80
Tableau II.3: Tableau récapitulatif des mécanismes de défaillance et lois associées 88

Chapitre III

Tableau III.1: Circulation de l'information dans un graphe causal 94
Tableau III.2: Phases de fonctionnement niveau IGBT 109
Tableau III.3: Contraintes de fonctionnement niveau IGBT 109
Tableau III.4: Phases de fonctionnement niveau Convertisseur 110
Tableau III.5: Contraintes de fonctionnement niveau Convertisseur 110
Tableau III.6: Phases de fonctionnement niveau Train 111
Tableau III.7: Contraintes de fonctionnement niveau Train 111
Tableau III.8: Variables au niveau mécanismes de défaillance 112

Chapitre IV

Tableau IV.1: Mécanismes de défaillance et modèles associés 124
Tableau IV.2: Paramètres caractéristiques de la TP 126

Chapitre V

Tableau V.1: Spécifications générales du métro 14 de Chennai 138
Tableau V.2: Valeurs minimales, maximales et moyennes des données environnementales 140
Tableau V.3: Variables éliminées ou gardées au différents niveaux du modèle bayesien 146
Tableau V.4: Catégories de variables 149
Tableau V.5: Catégories de variables et méthodes d'apprentissage 159
Tableau V.6: Catégorie de variables et classes de discrétisation 159
Tableau V.7: paramètres du facteur d'accélération de la corrosion de la puce 172

Notations générales

A	Ampère
AF	Acceleration Factor (en français Facteur d'accélération)
ALSiC	Aluminium Silicon Carbide
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité
CITHEL	CInématiques THermiques ELectriques
CTE	Coefficient d'Expansion Thermique
DBC	Direct Bonded Cuivre
ECM	Migration ElectroChimique
EM	Espérance Maximisation
FIT	Failure In Time (10^{-9}pannes/h)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
Ond	Onduleur
PMCF	Pont Monophasé à Commutation Forcée
RB	Réseaux Bayesiens
λ(t)	Taux de défaillance en fonction du temps
TP	Table de Probabilités
TPC	Table de Probabilités Conditionnelles
TPM	Table de Probabilités Marginales
HTBT	Haute Tension Basse Tension
RBSOA	Reverse Bias Safe Operating Area (en français Aire de sécurité)
MTTF	Mean Time To Failure (en français Temps Moyen de Fonctionnement avant Défaillance)
MTBF	Mean Time Between Failure (en français Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement)
RH	Relative Humidity (en français Humidité Relative)
MOSFET	Metal Oxyde Semiconductor Field Effet Transistor
COMFET	Conductivity Modulated Field Effect Transistor
IGT	Insulated Gate Transistor
V	Le Volt
MV	Maximum de Vraisemblance

Introduction générale

Contexte

ALSTOM[1], constructeur ferroviaire français, conçoit, fabrique et commercialise différentes gammes de trains à travers le monde. Sur son site à Tarbes en France, il conçoit et développe des chaînes de traction ferroviaires. Les chaînes de traction assurent la transmission de l'énergie électrique depuis la caténaire[2] jusqu'aux moteurs de traction. La maîtrise de la fiabilité des composants de puissance utilisés dans les chaînes de traction est une des grandes problématiques auxquelles fait face l'industrie ferroviaire. Cette fiabilité est fortement influencée par celle des composants de puissance à base d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) qui assurent les fonctions de commutation.

Depuis les débuts de l'électronique de puissance dans la traction ferroviaire, les IGBT participent à l'innovation puis l'amélioration des performances du système de traction et constituent aussi un contributeur majeur à sa fiabilité opérationnelle. Dès les années 1990, les convertisseurs d'électronique de puissance à base d'IGBT se sont imposés comme standard et couvrent aujourd'hui l'ensemble des gammes de produits ferroviaires (train à grande vitesse, train régional, tramway, métro, locomotive) développés par ALSTOM.

Des activités de recherches transverses sont menées depuis quelques années sur les problématiques de fiabilité et de sûreté de fonctionnement associées à ces modules de puissances à IGBT. Ces derniers sont amenés à fonctionner dans des environnements sous fortes contraintes (thermiques, électriques, mécaniques, hygrométriques) inhérentes à des environnements ferroviaires parfois sévères. Dans ces conditions de fonctionnement, il devient impératif de pouvoir mieux maîtriser leur fiabilité. C'est l'objectif principal de ce travail de recherche qui vise à améliorer le principe de détermination de la fiabilité prévisionnelle d'un IGBT. De nombreux travaux ont été menés ces dernières années sur la durée de vie des assemblages de puissance à IGBT soumis aux fortes contraintes de cyclage thermique et d'humidité : tenue au cyclage thermique des connectiques de puissance, des fils de bonding, des brasures, corrosion, tenue à l'humidité. Toutefois, on ne dispose pas aujourd'hui de modèle de fiabilité de l'IGBT permettant d'estimer sa fiabilité en fonction de son utilisation dans une

[1] **https://www.alstom.com/fr**
[2] La caténaire est un ensemble de câbles électriques permettant l'alimentation électrique du train

application donnée. Le travail envisagé dans le cadre de cette thèse est de mettre en place une démarche de sûreté de fonctionnement et plus spécifiquement une méthodologie d'évaluation de la fiabilité de l'IGBT en fonction de son profil d'utilisation dans son environnement ferroviaire. Ces travaux de recherche s'intègrent dans la préparation du projet européen Shift2Rail (S2R)[3] dont l'objectif est de développer des solutions innovantes de produits ferroviaires compétitifs, attractifs, respectueux de l'environnement, fiables, et à faibles coûts. Le projet réunit plusieurs acteurs du secteur ferroviaire dont BOMBARDIER, SIEMENS, CAF, DB et SNCF. Il est centré autour de cinq programmes d'innovation abordant les thèmes suivants:

- la rentabilité et la fiabilité des trains ;
- les systèmes avancés de gestion et de contrôle du trafic ;
- les infrastructures ferroviaires de grande capacité, fiables et rentables ;
- les solutions informatiques pour des services ferroviaires attractifs ;
- les technologies pour un réseau ferroviaire européen durable et attractif.

Dans ce projet, ALSTOM Tarbes est directement concerné par le premier programme d'innovation. Les travaux de ce premier programme d'innovation s'articule autour des axes recherches suivants : l'amélioration des performances en termes de fiabilité et de sécurité des différents sous-systèmes de train (chaînes de traction, systèmes de freinage, systèmes de commande, systèmes d'accès intelligents du train) ; l'amélioration de la capacité du train ; l'amélioration de l'attractivité et l'expérience client ; la réduction des coûts d'investissement ; la réduction des coûts de fonctionnement ; l'amélioration des normes et la simplification des certifications. Les travaux réalisés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'axe de recherche transversale, dédiée à la fiabilité de la chaîne de traction. Cet axe de recherche a pour objectif de développer des méthodologies et outils pour améliorer la prédiction de la fiabilité et la durée de vie des composants de la chaîne de traction.

Ce travail de recherche vise à se focaliser sur l'amélioration de la démarche d'évaluation de la fiabilité des IGBT, principaux contributeurs à la fiabilité des chaînes de traction.

Objectif de l'étude et problématique

Le monde de la traction électrique ferroviaire a connu de profonds changements dès les années 1985 avec l'émergence des interrupteurs de puissance IGBT. Ces composants jouent un rôle important dans la conversion de l'énergie électrique capturée par le train en la transformant en des formes d'énergies adaptées pour les moteurs de traction. Les conditions environnementales

[3] **[https://shift2rail.org/]**

rencontrées dans l'exploitation ferroviaire et les fortes exigences en termes de disponibilité imposent des niveaux de fiabilité et de maintenabilité élevés aux IGBT. On demande à un IGBT aujourd'hui une « bonne fiabilité » de l'ordre de 300 à 500 FIT (10^{-9} pannes/h) compatible avec une durée de vie de 30 ans. Une meilleure évaluation de la fiabilité de ses composants permettrait à ALSTOM une réponse mieux quantifiée et qualifiée lors de la réponse aux appels d'offres vis-à-vis des objectifs de fiabilité, du taux de défaillance, et conduirait à un dimensionnement de chaînes de traction disposant de la disponibilité attendue.

Les opérateurs ferroviaires sont confrontés aujourd'hui au manque de modèle permettant de prédire le taux de défaillance de l'IGBT en conditions réelles de fonctionnement. D'un côté, on calcule un taux de défaillance opérationnel à partir du retour d'expérience, de l'autre on estime la durée de vie à partir de tests de vieillissement accélérés en prenant en compte principalement des phénomènes dus au cyclage thermique. Le cyclage thermique, phénomène considéré comme le plus pertinent dans l'analyse de la fiabilité de l'IGBT a fait l'objet de nombreux articles dans la littérature scientifique du domaine. Depuis peu, on s'intéresse aussi à la caractérisation des phénomènes dûs à l'humidité par la mise en place d'essais de tenue à l'humidité. Ces calculs de taux de défaillance opérationnel et de durée de vie ne donnent pas une bonne visibilité de la réelle fin de vie de l'IGBT, d'autant qu'ils se basent sur des critères de défaillance qui ne sont pas forcément des critères de fin de vie de l'IGBT et ne prennent pas en compte des profils réels de fonctionnement de l'IGBT. Ces méthodes actuelles de calcul de durée de vie sont à améliorer : la problématique de ce travail de recherche ambitieux est la mise en place d'une méthode pouvant prendre en compte l'ensemble des mécanismes de défaillance et les profils de mission associés.

L'investigation effectuée sur les études existantes dans le domaine de la prédiction de la fiabilité de l'IGBT a révélé l'importance capitale du profil de mission de l'IGBT sur l'évolution des grandeurs fiabilistes. Le profil de mission désigne l'ensemble des conditions pertinentes dans lesquelles l'IGBT va être amené à fonctionner. La définition du profil de mission nécessite de collecter des données sur l'évolution des différentes grandeurs de fonctionnement au niveau du composant de puissance. ALSTOM est confronté à la difficulté de rassembler des données directement au niveau du composant. Ce manque d'information conduit à remonter le niveau d'analyse au niveau système assimilé au Train. Une autre difficulté majeure réside dans l'impossibilité de réunir l'ensemble des données nécessaires associées à un même projet, car le plus souvent les données accessibles ne sont pas synchronisées. La tâche de collecte de données a montré un manque de données qu'il faut caractériser pour décrire un profil de mission le plus réaliste.

Ce constat a amené à nous orienter vers une approche probabiliste capable de prendre en compte le manque et la dispersion des données. L'intérêt d'utiliser une approche probabiliste est de pouvoir modéliser les variables relatives au profil de mission en les catégorisant, en utilisant des processus aléatoires décrits par des lois statistiques et en combinant des hypothèses et avis d'experts. Le caractère probabiliste peut permettre de s'affranchir de la non existence d'une base de données de profil de mission du composant complète et synchronisée tout en caractérisant à chaque étape de la modélisation les incertitudes et le manque de données. On prend en compte ainsi dans un même modèle, d'un côté le profil de mission de l'IGBT et de l'autre les mécanismes de défaillance connus amenant à la défaillance du composant.

Cette approche probabiliste se base sur les réseaux bayesiens utilisés en sûreté de fonctionnement. L'intérêt des réseaux bayesiens est qu'ils permettent de représenter toute la connaissance d'un système pour prédire son comportement, diagnostiquer les causes d'un phénomène observé dans le système par exemple, de simuler le comportement du système, d'analyser les données relatives au système, et d'aider à la prise de décision. Ils sont un puissant outil de représentation visuelle des données certaines ou incertaines et permettent de raisonner à partir d'informations complètes ou incomplètes.

Afin d'aborder les problématiques énoncées précédemment, on propose de construire au travers de ce travail de recherche un modèle bayesien d'estimation de la fiabilité de l'IGBT en fonction de son profil de mission dans une application ferroviaire.

Guide de lecture

Ce rapport est scindé en cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à un état de l'art des études existant aujourd'hui dans le domaine de la prédiction de la fiabilité des composants de puissance. Cet état de l'art sera précédé de l'étude de l'IGBT et les notions fiabilistes en sûreté de fonctionnement. Les limites de ces études seront mises en évidence et le choix de l'approche bayesienne dans le cadre de cette thèse sera justifié.

Le deuxième chapitre abordera la mise en place d'une démarche nouvelle et originale nommée « Cycle en U». Elle sera appliquée à l'IGBT dans son environnement de fonctionnement. Cette approche qui allie le fonctionnel et le dysfonctionnel dans une logique descendante et ascendante permet de rassembler l'ensemble des variables pertinentes qui alimenteront le modèle bayesien dont l'objectif est l'estimation des indicateurs de fiabilité de l'IGBT.

On décrit, dans le troisième chapitre, le formalisme des réseaux bayesiens, l'apprentissage de structure et de paramètres. Les résultats de la structure du réseau bayesien d'estimation de la fiabilité de l'IGBT seront présentés également niveau par niveau. Il est à noter que cette

structure est générique et s'applique à tout type d'infrastructure ferroviaire (métro, tram, régional ou train à grande vitesse).

Le quatrième chapitre présente les développements mathématiques proposés pour passer des résultats probabilistes issus de la modélisation par réseaux bayesiens aux deux indicateurs de fiabilité que sont le taux de défaillance et la durée de vie. Différents cas de figure seront présentés en fonction des modèles qui régissent les différents mécanismes de défaillance.

Le cinquième chapitre présente l'application du modèle bayesien au métro de Chennai en Inde. On aborde l'ensemble des données recueillies sur ce métro notamment les données d'utilisation réelles, les données de dimensionnement, les données d'experts pour alimenter le réseau bayesien. Les analyses de données effectuées, les hypothèses prises pour remplir les TPC (Tables de Probabilités) seront également explicitées. Les résultats des indicateurs de défaillance notamment le taux de défaillance global et la durée de vie globale de l'IGBT seront présentés. Ces résultats prendront en compte les conditions d'utilisation de l'IGBT et l'ensemble des mécanismes de défaillance prépondérants retenus. La fin du chapitre illustrera l'utilisation du modèle en diagnostic et en pronostic.

En conclusion, on présentera une synthèse des résultats obtenus en mettant en relief l'originalité de l'approche « Cycle en U » couplé aux réseaux bayesiens pour la fusion des informations relatives à la physique de défaillance de l'IGBT et des données nécessaires à l'estimation de la fiabilité du composant. Cette partie est suivie par la proposition de perspectives visant à améliorer et à poursuivre le travail entrepris.

CHAPITRES

I. Positionnement bibliographique sur la fiabilité des modules de puissance à IGBT

Face aux nombreuses et importantes évolutions technologiques, ALSTOM travaille pour proposer des engins ferroviaires toujours plus performants, fiables, économiques et écologiques. ALSTOM Tarbes développe et fabrique des chaînes de traction ferroviaire et s'engage auprès de ses clients sur des objectifs de fiabilité. L'un des axes stratégiques concernés est la conception des engins avec des durées de vie toujours plus importantes et des faibles coûts de maintenance.

Le travail de recherche développé dans ce document s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la fiabilité des composants de puissance IGBT qui équipent les chaînes de traction et qui assurent des fonctions de commutation. Ils sont amenés à fonctionner sous de fortes contraintes (électriques, mécaniques, thermiques, hygrométriques, …), résultant elles-mêmes des conditions d'utilisation de l'engin de traction. L'engin de traction est lui aussi soumis à un environnement très variable : différents types et durées de sollicitations (démarrage, accélération, maintien de vitesse, freinage), différents types de chargement (charge remorquée, charge à bord), différentes conditions environnementales.

L'obtention de la fiabilité de l'IGBT nécessite alors de caractériser non seulement la sévérité de l'environnement immédiat auquel il sera soumis mais aussi son environnement indirect, car l'IGBT est un sous-système du convertisseur, ce dernier étant lui-même un sous-système du train. Dans ce cadre, il s'agit alors de mettre en place une démarche d'évaluation de la fiabilité intégrant toutes les connaissances de l'IGBT dans son environnement de fonctionnement.

Pour cela et afin de répondre à cet objectif industriel, il faudra répondre dans un premier temps à deux questions majeures :

1. quelles sont les méthodes utilisées aujourd'hui dans le domaine de la prédiction de la durée de vie ou plutôt de la fiabilité des composants de puissances ?
2. quelles sont les insuffisances de ces méthodes et quelles sont les alternatives possibles à leur utilisation ?

Dans ce chapitre, un état de l'art des approches utilisées dans l'évaluation de la fiabilité des composants de puissance sera établi et une justification sera donnée relative au choix des réseaux bayesiens comme outil de modélisation retenu pour ce travail de recherche. On présentera également une revue des IGBT et des notions de fiabilité.

I.1. Interrupteurs de puissance IGBT

Les interrupteurs de puissance IGBT sont des dispositifs semi-conducteurs utilisés comme interrupteurs électroniques dans les montages électroniques en traction électrique ferroviaire. Ils réalisent la fonction d'interrupteurs électroniques rapides. Ils sont aussi appelés modules IGBT ou modules de puissance IGBT.

I.1.1. Historique de l'IGBT

L'IGBT est né de l'association d'un transistor bipolaire et d'un transistor MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor). Il bénéficie des avantages de commande des transistors MOSFET et des performances de conduction des transistors bipolaires. L'idée d'intégrer sur une même puce un transistor bipolaire et un transistor MOSFET se développe dès les années 1979 afin de profiter au mieux des avantages des deux structures et de minimiser leurs inconvénients. Utilisés dans les applications moyennes et fortes puissances sous des fréquences allant jusqu'à 20 Khz, les IGBT concurrencent les GTO (Gate Turn Off) et les MOSFET dans certains domaines.

L'utilisation des interrupteurs électroniques dans la chaîne de traction ferroviaire débute à la fin des années 1960 (figure I.1).

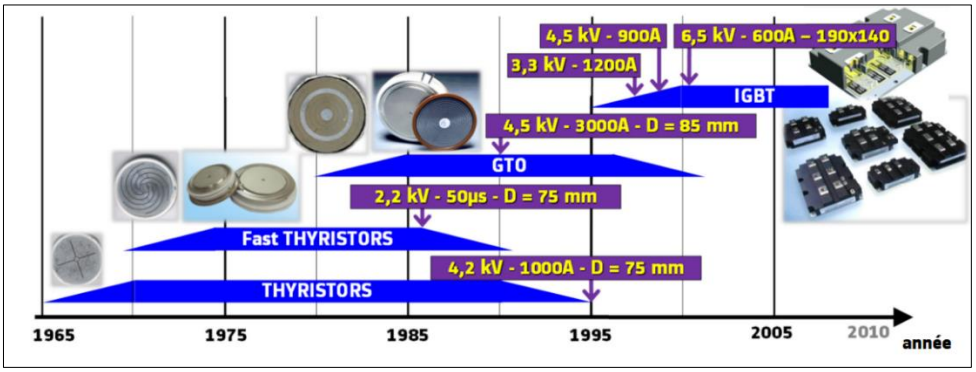


Figure I.1: Evolution des interrupteurs de puissance en traction ferroviaire [Piton, 2015a]

Les thyristors font leur apparition dans les années 1970, les GTO dans les années 1980 et les IGBT depuis 1995 dans la traction ferroviaire.

I.1.2. Gamme d'IGBT

Dans le domaine ferroviaire, les IGBT couvrent une large gamme de tension (1700 - 6500 V) pour des intensités allant jusqu'à 3600 A (De Maglie [2007], [Rabier [2007]). Ils se sont imposés dans le marché de la moyenne et de la haute puissance en s'adaptant à une large gamme d'applications. Couramment, les niveaux de tension utilisés sur les réseaux ferroviaires sont :

- 6500 V : utilisé en traction ferroviaire 3000 V[4] continu ;
- 3300 V : utilisé en traction ferroviaire 1500 V continu ;
- 1700 V : adapté à la connexion sur un réseau 660 V alternatif ;
- 1200 V : adapté à la connexion sur un réseau 400 V alternatif ;
- 600 V : adapté à la connexion sur un réseau 230 V alternatif.

Ils sont adaptés à plusieurs types de réseaux alternatifs ou continus. La figure I.2a montre un IGBT de 6500 V du fabricant allemand Infineon ainsi que sa vue éclatée montrant les différentes composantes de l'assemblage de puissance (figure I.2b). Plusieurs industriels fabriquent aujourd'hui l'IGBT, on peut citer ABB, Mitsubishi et Infineon.

[4] Tensions d'alimentation continue normalisées pour le ferroviaire

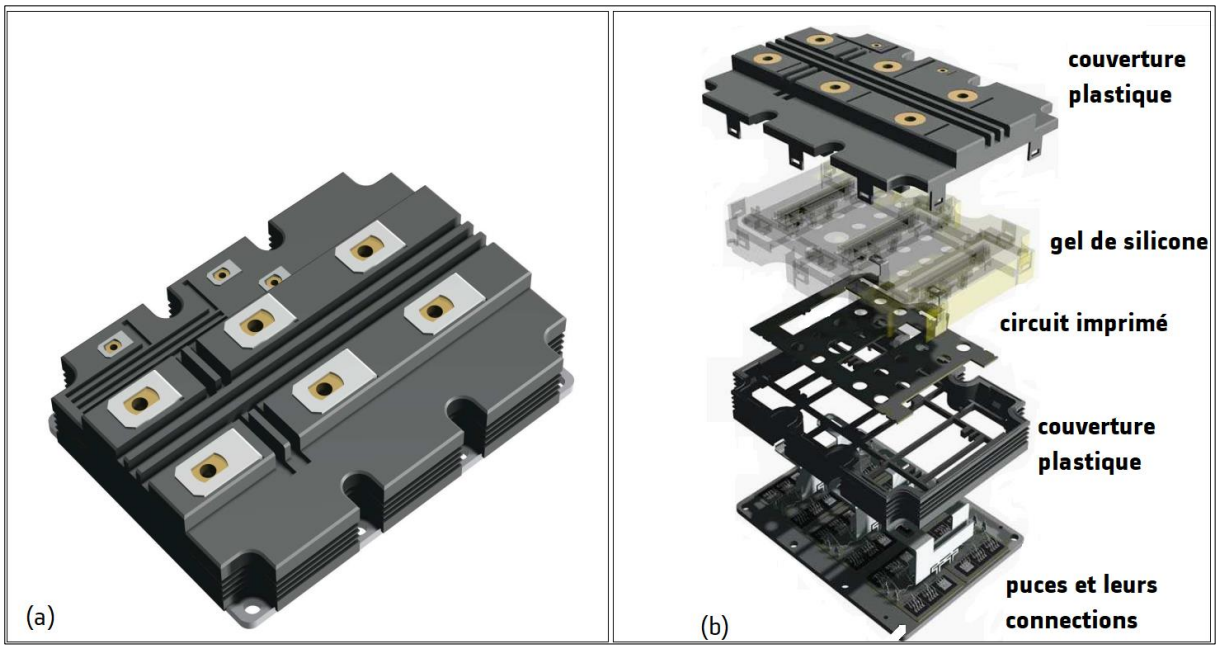


Figure I.2: (a) Photo d'un IGBT 6500V (Taille 140 x 190); (b) Vue éclatée de l'IGBT. D'après Piton [2015a]

I.1.3. Description structurelle de l'IGBT

L'IGBT se constitue d'un empilement de différentes couches de matériaux présentant une bonne conductivité thermique, de bonnes propriétés d'isolation et une bonne stabilité mécanique [Ciappa, 2002]. Il doit être robuste car il doit pouvoir supporter un environnement souvent sévère. La figure I.3a montre un schéma structurel de l'IGBT et la figure I.3b l'intérieur d'un IGBT avec ses différents composants. On y distingue les fils de bonding, les puces IGBT et diode, les substrats isolants, le gel, les connectiques de puissances, la semelle et le boitier.

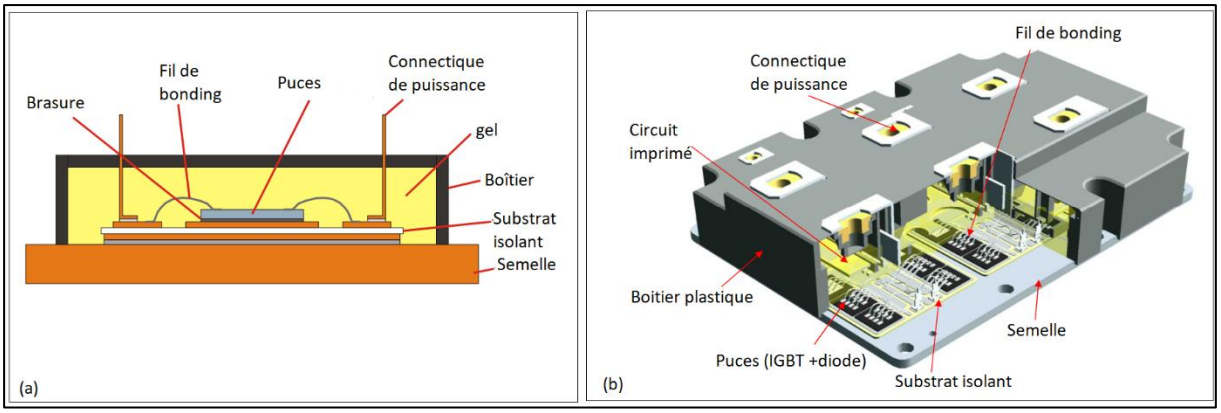


Figure I.3: (a) Schéma structurel d'un IGBT Perpiñà [2012] (b) Intérieur d'un IGBT Piton [2015a]

Les matériaux utilisés dans la fabrication des modules de puissance à IGBT doivent présenter de bonnes caractéristiques électriques et fonctionner sur de larges plages de températures allant de -55°C à 175°C. On utilise des céramiques, des plastiques, des métaux (cuivre, aluminium),

du gel de silicone et des matériaux composites. Chaque constituant de l'IGBT sera décrit par la suite.

I.1.3.1. Boitier

Fait en plastique, il renferme les puces IGBT, diodes et leurs assemblages. Il doit être mécaniquement stable et très résistant. Son rôle est [Dorkel, 2003] :

- de conférer à l'assemblage de puissance une rigidité mécanique nécessaire à son montage ;
- d'assurer de manière la plus fiable possible les connexions électriques de la puce avec l'environnement extérieur ;
- de protéger l'assemblage de puissance contre la poussière et des éventuels agents de corrosion extérieure.

Le boîtier est fabriqué en polymères plastiques isolants, le plus souvent en PPS (PolyPhenylene Sulphate) et en PBT (PolyButylene Terephthlate).

De par leur forte résistance thermique et leur grand coefficient de dilatation, les PPS peuvent supporter en utilisation continue jusqu'à 240 ˚C sans s'abimer. Ils ont la particularité également de supporter pendant un temps très court des températures pouvant atteindre 270 ˚C. Les PBT quant à eux supportent une plage de température de -50 ˚C `a 150 ˚C. Ils peuvent résister également à des températures allant jusqu'à 280˚C.

Dans le domaine des hautes tensions (2500 V à 6500 V) ce sont les PPA (Polyphthalamide), les PA (Polyamide), les PET (Polyethylene Terephthalate) qui sont les matériaux les plus utilisés pour fabriquer les boitiers [Volke, 2011].

I.1.3.2. Puce IGBT et diode

Pour former la puce IGBT, on crée par différents procédés quatre zones semi-conductrices dopées P et N sur une cristal de silicium. Les puces IGBT sont mises en parallèle pour atteindre les niveaux de courants élevés requis pour la traction ferroviaire. La diode est formée par la jonction de deux zones de semi-conductrices dopées N et P. Les deux zones sont métallisées sur leurs faces pour assurer le contact électrique. La zone dopée N est constituée d'une couche inférieure faiblement dopée et d'une couche fortement dopée, ceci en vue de tenir une tension importante à l'état bloqué. Montées en anti-parallèle, les diodes dans les IGBT doivent supporter une chute de tension minimale, accepter les mêmes tensions que les puces IGBT et avoir un recouvrement le plus faible possible pour minimiser les pertes à la fermeture de l'IGBT.

I.1.3.3. Substrat isolant métallisé

Le substrat comprend un isolant diélectrique en céramique, sur lequel le cuivre est appliqué et collé avec une grande force d'adhérence grâce à deux procédés : fusion à haute température et diffusion. De façon plus précise, la technique du DBC (Direct Bonded Cuivre) consiste à faire adhérer à haute température une couche de cuivre de faible épaisseur (environ 0,3 mm) sur chacune des faces d'une plaquette céramique dont l'épaisseur peut elle-même être comprise entre 0,4 et 0,7 mm. Dans certains cas, on peut rajouter une couche de nickel sur le substrat. Les principales céramiques utilisées sont : l'oxyde d'Aluminium (Al_2O_3), le nitrure d'Aluminium (AlN) ou le Nitrure de silicium (Si_3N_4) [Volke, 2011]. Le rôle du substrat est [Dorkel, 2003] :

- de fournir une bonne isolation électrique et un support mécanique rigide par rapport à l'environnement externe du composant de puissance ;
- de faciliter l'interconnexion électrique des composants ;
- d'assurer un transfert thermique convenable entre la puce qui engendre le flux de chaleur et le milieu environnant qui doit évacuer cette chaleur.

I.1.3.4. Connectiques de puissance

Les connectiques de puissances permettent de connecter l'IGBT à son circuit extérieur. C'est notamment la connexion au bus continu dont la tension se retrouve directement aux bornes de l'IGBT. Les connectiques réalisent deux fonctions : électrique en conduisant le courant et mécanique en limitant la transmission des contraintes mécaniques externes vers les joints des brasures.

I.1.3.5. Semelle

Elle est directement en contact avec le refroidisseur et est fabriquée à base de cuivre, ou à base de matériaux composites AlSiC. Elle garantit la rigidité mécanique de l'ensemble et le transfert thermique de l'intérieur vers l'extérieur du boîtier.

I.1.3.6. Gel de silicone

Les puces et leurs assemblages baignent dans du gel de silicone à l'intérieur du boitier. Le gel sert de protection électrique en renforçant la rigidité électrique du milieu ambiant et des différentes métallisations. Présentant un CTE (Coefficient Thermique d'Expansion) très élevé, il peut résister aux températures allant jusqu'à 200°C [Medjahed, 2012].

Les IGBT présentent de nombreux avantages pour leurs utilisations dans la traction ferroviaire. La mise en œuvre de leur circuit de commande est simple, avec une tension faible. De par leurs

performances dynamiques, ils ne nécessitent pas de circuit d'extinction auxiliaire, ou de circuit d'aide à la commutation d'où un encombrement réduit, une simplification des schémas électriques et un gain économique. Ils sont dotés d'une facilité de montage de par leur boitier moulés isolés et se montent directement sur des systèmes de refroidissement à air ou à eau. Le montage mécanique des packs IGBT dans les convertisseurs de puissance en traction ferroviaire se fait par simple vissage. L'IGBT se révèle être très robuste dans les applications de traction car est capable de gérer des courants de court-circuit. Dans la traction ferroviaire, les IGBT possèdent un fort potentiel industriel et économique et sont aujourd'hui incontournables dans les convertisseurs qui équipent les chaînes de traction de différentes gammes d'engins ferroviaires.

I.2. Généralité sur la fiabilité

Les études de fiabilité font partie intégrante de la sûreté de fonctionnement. Il est important dans notre étude de faire une revue sur les notions de fiabilité.

I.2.1. Définitions

La fiabilité est une composante majeure de la sûreté de fonctionnement (Villemeur [1988] ; Procaccia et Suhner [2003]) et est définie selon la norme AFNOR comme « l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps donnée ». Différentes terminologies sont utilisées en fiabilité des systèmes. On rappelle ici quelques-unes, centrales dans les développements qui suivront : la défaillance, le mode de défaillance, le mécanisme de défaillance et le critère de défaillance.

- la défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise [NF EN 13306, 2010]. La cause de la défaillance peut être intrinsèque (défaillance due à une mauvaise conception du bien ou à une fabrication non conforme) ou extrinsèque (cause externe comme une mauvaise utilisation, des fausses manœuvres, des défauts de manœuvre ou des contraintes externes) [Birolini, 1997] ;
- le mode de défaillance est la forme observable du dysfonctionnement d'un système [Pagetti, 2012] ;
- le mécanisme de défaillance se définit comme le processus physique, chimique ou autre qui entraîne une défaillance [Zwingelstein, 1995] ;
- le critère de défaillance est la limite d'une grandeur physique définissant le passage de la capacité d'un composant à accomplir une tâche à sa défaillance [Houasnia, 1999].

La fiabilité se décline sous trois angles : prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle [Lyonnet, 2006]. La fiabilité prévisionnelle consiste à prédire la fiabilité d'un système à partir

des simulations ou des bases de données de fiabilité des composants. Elle prévoit la fiabilité dès le début du projet à partir d'analyses quantitatives et/ou qualitatives. La fiabilité expérimentale consiste à définir des plans d'essai et à estimer le niveau de fiabilité à partir des résultats d'essais. La fiabilité opérationnelle se calcule à partir des données collectées sur le système en service.

I.2.2. Formulation mathématique des indicateurs fiabilistes

On considère des systèmes ou composants dont on étudie la fiabilité. On note *X* la variable d'intérêt qui caractérise la durée de vie du composant. Cette variable aléatoire *X* peut être caractérisée par différents indicateurs : la fonction densité de probabilité, la fonction de répartition, la fonction de survie, la fonction de risque instantané ou encore la fonction de durée de vie résiduelle. Le modèle probabiliste est décrit par l'une des fonctions précitées car toutes sont équivalentes.

Les formulations mathématiques de ces fonctions (Sidibe [2014] ; Lawless [2003]) sont décrites par la suite.

I.2.2.1. Fonction densité de probabilité

La fonction $f_X(t)$ définit la densité de probabilité de la durée de vie *X* du composant à un instant *t* donné. Elle est définie sur l'intervalle [0, ∞[mesurable et de mesure égale à l'unité. La probabilité de défaillance du composant entre l'intervalle [*t*, *t*+*dt*] est approximativement égale au produit $f_X(t)dt$. Elle est donnée par la relation I.1.

$$f_X(t) = \lim_{dt \to 0} \frac{P(t<X\leq t+dt)}{dt} \tag{I.1}$$

I.2.2.2. Fonction de répartition

Aussi appelée fonction cumulative ou fonction de distribution, elle définit la probabilité de défaillance du composant avant l'instant *t*. Elle s'écrit en fonction de la densité de probabilité (relation I.2).

$$F_X(t) = P(X \leq t)$$

$$F_X(t) = \int_0^t f(u)du \tag{I.2}$$

La fonction de répartition $F_X(t)$ est une fonction croissante et bornée régie par les relations I.3 et I.4 :

$$\lim_{t \to 0} F_X(t) = 0 \tag{I.3}$$

$$\lim_{t\to\infty} F_X(t) = 1 \tag{I.4}$$

I.2.2.3. Fonction de fiabilité

La fonction de fiabilité aussi appelée fonction de survie est la probabilité que le composant fonctionne sans défaillance jusqu'à l'instant *t* (relation I.5). Elle s'écrit aussi comme la probabilité complémentaire de la fonction de répartition (relation I.6) et s'exprime aussi en fonction de la densité de probabilité (relation I.7).

$$R_X(t) = P(X > t) \tag{I.5}$$

$$R_X(t) = 1 - F(t) \tag{I.6}$$

$$R_X(t) = \int_t^{\infty} f(u)du \tag{I.7}$$

Empiriquement, si on met en service N_o composants de même nature dans les mêmes conditions d'utilisation, la fiabilité de ces composants à l'instant *t* est le quotient du nombre de composants ayant survécu sur le nombre de composants initial (relation I.8) :

$$\hat{R}_X(t) = \frac{N(t)}{N_o} \tag{I.8}$$

où *N(t)* est le nombre de survivants à l'instant *t*.

Contrairement à la fonction de répartition, la fonction de survie est décroissante en fonction de la variable *t*. Elle vérifie les propriétés suivantes :

$$\lim_{t\to 0} R_X(t) = 1 \tag{I.9}$$

$$\lim_{t\to\infty} R_X(t) = 0 \tag{I.10}$$

I.2.2.4. Temps moyen entre pannes

Le temps moyen entre panne est la durée moyenne de bon fonctionnement et correspond à l'espérance mathématique (si elle existe) du temps de fonctionnement du matériel jusqu'à défaillance [Cocozza-Thivent, 1997]. Elle est donnée par la relation I.11.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \tag{I.11}$$

La notion de MTTF s'utilise beaucoup dans le cas des systèmes non réparables. On parle aussi de T_f qui est le temps de fonctionnement avant défaillance. Le MTBF (Mean Time Between Failure) représente la moyenne des temps de fonctionnement entre deux défaillances. Il s'utilise dans le cas des systèmes réparables.

I.2.2.5. Fonction de risque instantanée ou taux de défaillance

La fonction $\lambda_X(t)dt$ est la probabilité conditionnelle de défaillance d'un composant à un instant $t+dt$ sachant qu'il a survécu jusqu'à t sans défaillance. C'est une fonction positive définie par :

$$\lim_{dt\to 0} \lambda_X(t)dt = P(t < X \leq t + dt | X > t)$$

$$\lim_{dt\to 0} \lambda_X(t)dt = \frac{P(t<X\leq t+dt)}{P(X>t)} \quad \text{(I.12)}$$

Des relations I.1 et I.13, on en déduit l'expression de la fonction de risque instantané ou de taux de défaillance qui s'écrit :

$$\lambda_X(t) = \frac{f_X(t)}{R_X(t)} \quad \text{(I.13)}$$

La fonction taux de défaillance peut être constante, croissante, décroissante ou une combinaison. La fonction $\lambda_X(t)$ est en bijection avec la fonction de fiabilité ou de répartition sur leurs espaces respectifs. De surcroit si elle est strictement monotone la bijection s'étend à l'espace des temps. Par conséquent, $\lambda_X(t)$ permet de caractériser complètement le composant sur toute sa durée de vie. De l'équation I.13 et sachant la relation I.14, on obtient la relation I.15. On peut également établir une relation entre la fonction fiabilité et la fonction taux de défaillance (Equation I.16).

$$f_X(t) = \frac{-d(R_X(t))}{dt} \quad \text{(I.14)}$$

$$\lambda_X(t) = \frac{-dlog(R_X(t))}{dt} \quad \text{(I.15)}$$

L'intégration de l'équation précédente permet d'établir la relation entre $\lambda(t)$ et $\mathrm{R}(t)$ d'une part

$$R_X(t) = exp\left(-\int_0^t \lambda_X(u)du\right) \quad \text{(I.16)}$$

Le taux de défaillance s'exprime en FIT ($10^{-9}\ h^{-1}$). L'évolution du taux de défaillance sur la durée de vie d'un dispositif est représentée par la courbe de la figure I.4 dite courbe en baignoire. Elle comporte trois grandes périodes : la période de jeunesse, la période de vie utile et la période de vieillissement ou de fin de vie. La période de jeunesse correspond aux défaillances précoces dues soit à des erreurs de conception, soit à des composants mal utilisés ou des process mal maîtrisés. Cette période peut être réduite si la vérification des composants a été optimisée. Le taux de défaillance décroît dans cette période avec le temps. La période de

vie utile correspond à un taux de défaillance constant. La période de vieillissement est caractéristique de la fin de vie du composant et se caractérise par un taux de défaillance qui croît. Ce type de comportement est caractéristique des composants soumis à usure ou autres détériorations progressives.

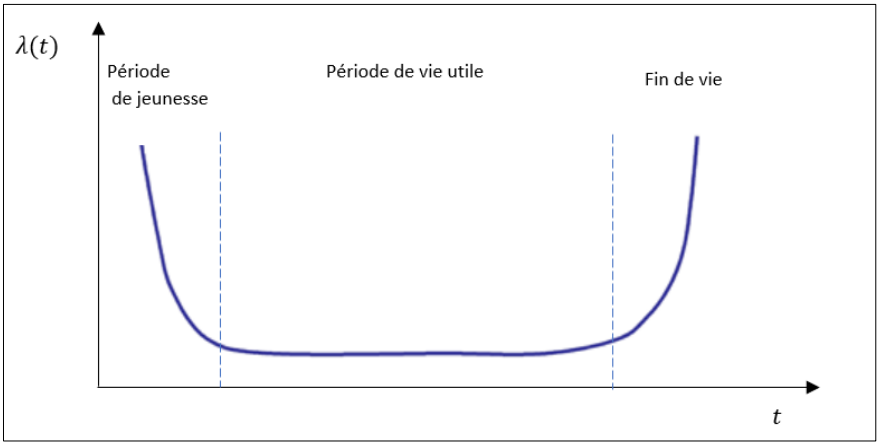


Figure I.4: Courbe en baignoire : taux de défaillance en fonction du temps

Dans le cas des composants électroniques, la première phase décroissante se justifie par l'élimination progressive des défauts dus aux processus de conception ou de fabrication mal maîtrisés ou à un lot de composants défectueux. La qualité des composants s'améliore au fil des années et la période de jeunesse se réduit. On peut utiliser la loi de Weibull pour modéliser cette partie de la courbe en baignoire avec le paramètre de forme ($\beta<1$) ou la loi log-normale d'écart type ($\sigma>1$). Dans la deuxième phase, le taux de défaillance est en théorie constant. L'apparition de pannes est liée aux phénomènes quasi-aléatoires. La troisième partie de la courbe est caractérisée par l'augmentation des phénomènes de vieillissement. Cette partie de la courbe peut être modélisée par une distribution de Weibull avec ($\beta>1$) ou une loi log-normale ($\sigma<1$).

I.2.2.6. Estimation d'indicateurs fiabilistes à partir de lois connues

Les modèles de fiabilité peuvent être caractérisés par différentes lois comme la loi exponentielle, la loi de Weibull ou la loi log normale. À titre d'exemple, les indicateurs de fiabilité de ces trois lois sont donnés par la suite. Le lecteur pourra se référer à [Mihalache, 2007] pour plus de détails sur d'autres lois.

- la loi exponentielle : elle est définie par un seul paramètre, le taux de défaillance λ constant. Elle est associée au processus poissonnien qui génère des évènements dont les occurrences sont identiquement distribuées et indépendantes. C'est une loi continue sans mémoire. Elle s'applique généralement aux composants électroniques et d'une façon générale aux matériels qui subissent des défaillances brutales, ou encore à des

systèmes complexes composés de plusieurs composants dont les lois de fiabilité élémentaires sont différentes [Procaccia et Morilhat, 1996] ;

- la loi de Weibull est une loi continue à 3 paramètres. Le paramètre de position noté γ représente le décalage qui existe entre le début de l'observation et le début du phénomène examiné (apparition du mode de défaillance). Le paramètre d'échelle η est lié au temps moyen de bon fonctionnement. Le paramètre de forme β est quant à lui lié à la cinétique du processus observé. La loi de Weibull est caractéristique des problèmes de déverminage des composants et des phénomènes de vieillissement. Elle est adaptée dans l'étude de la fiabilité des composants mécaniques et électroniques. Elle permet de modéliser de nombreuses situations d'usure de composant.
- la loi log-normale décrite par deux paramètres la moyenne μ et l'écart type σ. Elle est utilisée pour modéliser les variables de résistance mécanique des matériaux et est largement utilisée dans les études de fiabilité mécanique.

Le tableau donne les indicateurs pour trois distributions de probabilités connues.

Grandeurs \ Type de lois	Loi exponentielle	Loi de Weibull à 2 paramètres	Loi log-normale
Taux de défaillance $\lambda(t)$	λ	$\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$	$\frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}}{t\int_0^{\infty}\sigma\sqrt{2\pi}\,f(t)dt}$
Densité de probabilité $f(t)$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$	$\frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}$
Fiabilité $R(t)$	$e^{-\lambda t}$	$e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}}$	$1-\Phi\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)$

Tableau I.1: Grandeurs fiabilistes de quelques lois de distribution

I.3. Fiabilité de l'IGBT : état de l'art

La fiabilité est une branche de la sûreté de fonctionnement qui étudie les mécanismes allant de la dégradation des composants et systèmes à leurs pannes. Elle permet de comprendre, de modéliser et de prédire ces différents phénomènes. Elle a besoin de nombreux ingrédients pour sa mise en œuvre et les plus importants sont : la connaissance de la physique des phénomènes, des défauts intrinsèques, des imperfections technologiques, des contraintes de fonctionnement, des contraintes environnementales et des contraintes limites. Le champ de la fiabilité s'étend de la conception pour la fiabilité à la fiabilité prédictive en passant par la fiabilité opérationnelle.

Dans le cas des IGBT, l'analyse de défaillance est un défi. Plusieurs causes amènent à la casse du composant (figure I.5) mais dans 57 % des cas il est difficile d'identifier la cause racine. Généralement, l'expertise est difficile, car l'image du défaut est effacée et les éléments de contexte de la casse manquent.

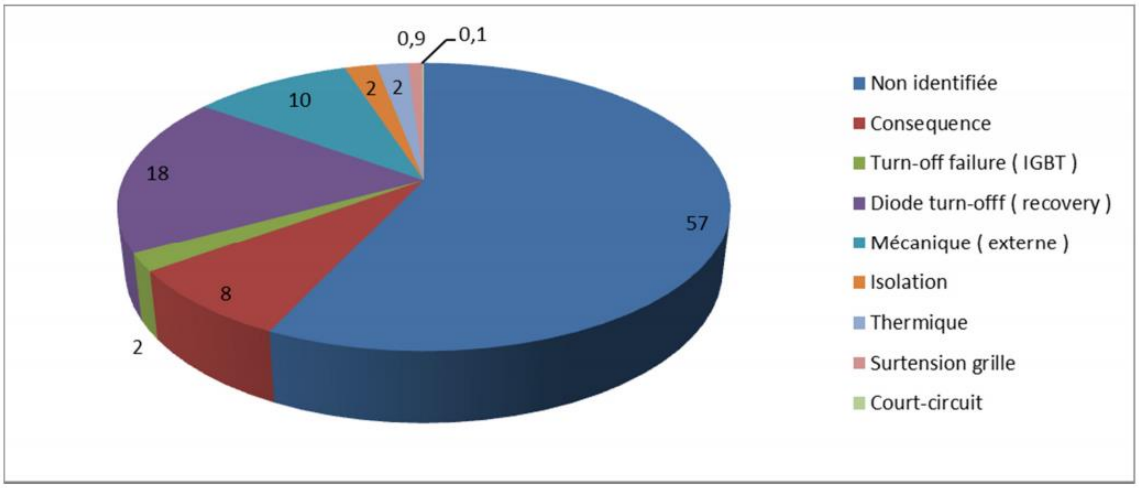


Figure I.5: Statistiques liées à la casse d'un IGBT [Piton, 2015b]

Aujourd'hui au niveau de l'IGBT, on ne dispose pas de modèle qui permette de prédire son taux de défaillance dans sa période de vie utile. Sur cette période de vie utile où le composant fonctionne en conditions réelles, un taux de défaillance opérationnel est estimé à partir des retours d'expérience. Sur la période de vieillissement et en phase de conception, on estime la durée de vie de l'IGBT à partir de tests de vieillissement accélérés en prenant en compte des phénomènes dus au cyclage thermique [Ciappa et Fichtner, 2000] ou à l'humidité (Kitajima et al., [2017] ; Kaminski et Zorn [2015]).

L'état de l'art a montré un certain nombre d'approches qui permettent d'estimer différents indicateurs de fiabilité des modules de puissance. Les indicateurs de fiabilité couramment utilisés sont le taux de défaillance, la durée de vie et le temps de fonctionnement avant défaillance. Dans l'évaluation de la fiabilité des composants électroniques, on distingue plusieurs méthodes qu'on classifiera sous deux approches : les approches statistiques et les approches analytiques. Les approches statistiques regroupent la méthode fréquentiste et les recueils de fiabilité et les approches analytiques rassemblent la méthode basée sur l'étude physique et la méthode basée sur les essais. La suite de ce paragraphe est consacrée à la revue de ces méthodes.

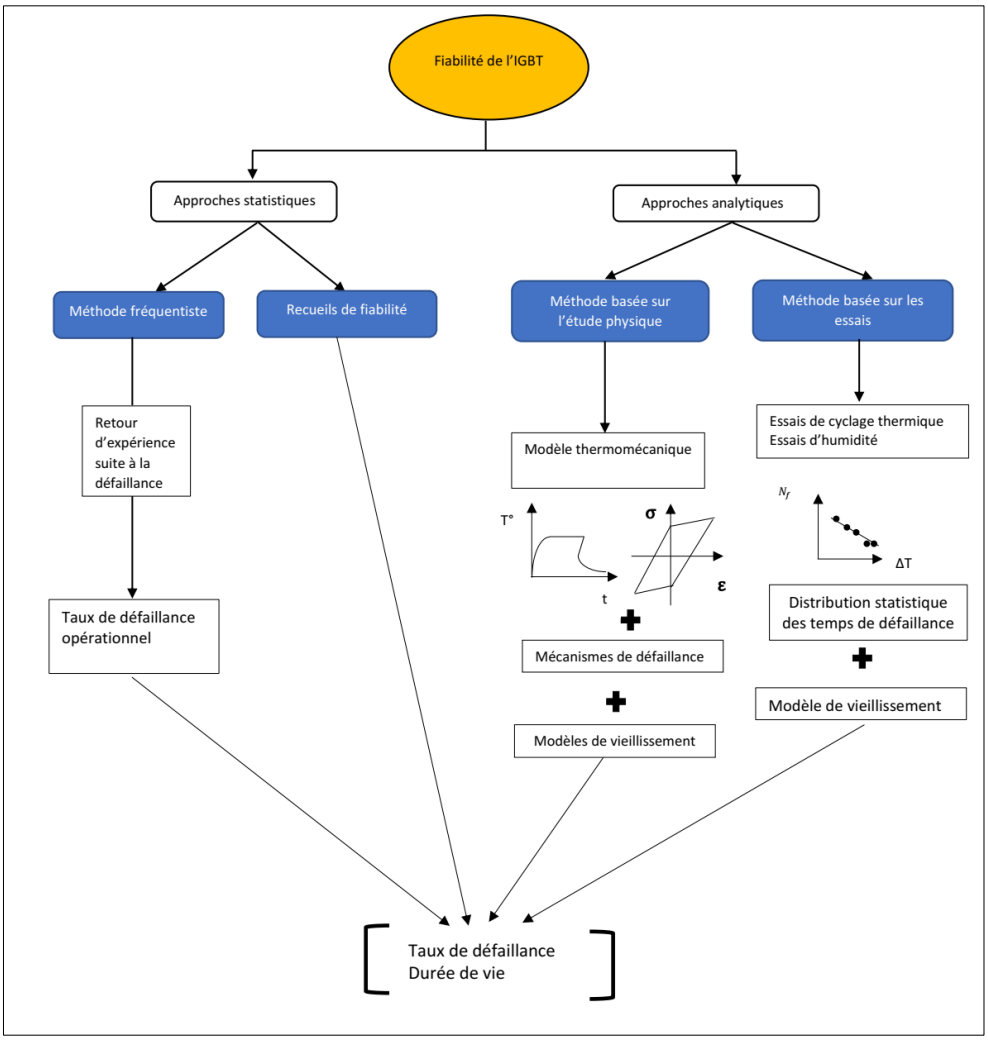


Figure I.6:Schéma synoptique des différentes méthodes usuelles pour la détermination de la durée de vie et du taux de défaillance

I.3.1. Approches statistiques

La méthode fréquentiste et les recueils de fiabilité sont basées sur l'analyse de données issues de retour d'expérience.

I.3.1.1. Méthode « fréquentiste »

Cette méthode consiste à collecter et à expertiser des composants ou équipements défaillants sur l'ensemble d'une population d'unités en fonctionnement normal sur le terrain. On estime ensuite le taux de défaillance opérationnel à partir de ce retour d'expérience. En faisant l'hypothèse que le taux de défaillance est constant, il se calcule à partir du nombre de pannes *n* cumulées sur une période de temps et le nombre d'heures *t* cumulées de fonctionnement. Il est considéré constant et est estimé par l'équation I.17:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n}{t} \qquad \text{(I.17)}$$

Cette méthode permet la création d'une base de données pour le suivi du taux de défaillance opérationnel des composants. Cependant, elle présente l'inconvénient majeur de ne pas être une méthode prédictive puisqu'elle intervient après l'apparition de la défaillance [Carubelli, 2003]. En réalité, on ne prédit pas la fiabilité du composant mais « on attend sa casse ». Cette méthode est utilisée par le service FMDS (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité Sécurité) d'ALSTOM pour l'estimation du taux de défaillance opérationnel de l'IGBT. Ce calcul a pour but de vérifier que les objectifs prévisionnels ont été atteints, de détecter les dérives et d'alimenter les études prévisionnelles. Ce calcul vient conforter ou corriger l'estimation du taux de défaillance sur lequel ALSTOM s'est engagé en livrant son produit.

I.3.1.2. Recueils de fiabilité

Ces recueils s'appuient sur des données recueillies par des industriels, des fabricants, des laboratoires et des organismes comme le Centre Nationale d'Etudes en Télécommunications ou l'armée américaine. Ces recueils utilisent l'hypothèse du taux de défaillance constant (pas d'effet de vieillissement). Dans ces types d'approches statistiques, on a aussi les recueils de retour d'expérience tels que : le guide FIDES [Guide Fides, 2009], le guide MIL-HDBK-217F [MIL-HDBK-217F, 1991], le recueil UTE-C 80-810 (RDF2000) [UTE, 2005].

Ces bases de données présentent l'avantage de répertorier un grand nombre de composants électroniques actifs comme passifs avec leurs taux de défaillance et certains paramètres intrinsèques. Cependant, ils présentent l'inconvénient de ne pas s'appliquer entièrement aux composants de forte puissance[5]. Certains recueils comme FIDES sont transposables à l'électronique de forte puissance mais ces études se dénombrent en moins grandes quantités.

I.3.2. Approches analytiques

Dans les approches analytiques, on retrouve la méthode basée sur l'étude physique et celle méthode basée sur les essais accélérés. Pour l'estimation d'indicateurs de fiabilité, la première se base sur une étude du comportement électrothermomécanique du composant et la deuxième nécessite des résultats des essais expérimentaux.

I.3.2.1. Méthode basée sur l'étude physique

Cette méthode cherche à comprendre les mécanismes physiques de la défaillance du composant. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une connaissance des matériaux constitutifs, des assemblages et des contraintes subies par le composant. L'étude physique nécessite généralement le modèle électrothermique (électrique et thermique), thermomécanique et le modèle de fatigue. Le

[5] il y a des paramètres connus comme pertinents pour les composants de puissance qui ne sont pas pris en compte par exemple le courant ; le composant de puissance est un système d'assemblage plus complexe…

modèle électrique représente le comportement électrique du composant. Le modèle thermique décrit l'évolution et la répartition de la température en prenant en compte les sources de chaleurs internes et les échanges avec l'extérieur. Il nécessite également la connaissance des principes de transfert de la chaleur dans les composants de puissance et les modèles de comportement thermique. On couple le modèle électrique au modèle thermique de l'assemblage de puissance. Le modèle thermique utilise en entrée la puissance dissipée dans le composant pour déterminer la distribution de température dans l'assemblage de puissance. La modélisation thermique peut se faire analytiquement à partir de modèles de comportement ou numériquement en simulant différents phénomènes physiques simultanément et en prenant en compte des géométries et conditions aux limites complexes [Moussodji, 2014] . La Méthode des Eléments Finis (FEM) fait partie des méthodes numériques qui permettent de déterminer numériquement la distribution de température dans les assemblages de puissance. Elle permet également de réaliser la modélisation thermomécanique c'est-à-dire qu'à partir des distributions de température on détermine numériquement les contraintes mécaniques sur les différentes couches de l'empilement de puissance. À partir de la modélisation multi-physique (électrique thermique et mécanique), on élabore les courbes contraintes déformations nécessaires à l'estimation de la durée de vie [Belmehdi, 2014]. L'estimation de la durée de vie est ensuite basée sur des lois empiriques donnant la durée de vie en nombre de cycles en fonction des contraintes ou des déformations appliquées.

Dans cette classe de méthode utilisant les modèles physiques, on retrouve les approches de fiabilité mécanique notamment les surfaces de réponses utilisées dans l'estimation de la durée de vie des composants de puissance [Zéanh, 2009]. La méthode surface de réponse couplée aux éléments finis fait partie des méthodes dites mécano-fiabilistes où on associe au modèle d'analyse de la fiabilité un modèle multiphysique du composant. Utilisée dans l'estimation de la fiabilité des composants de puissance, elle a pour but d'évaluer une probabilité de défaillance du composant en prenant en compte le comportement « réel » de différentes variables qui agissent sur le composant (Martin et al., [2017] ; Micol, [2007] ; Zéanh et al., [2008]). L'évaluation de la probabilité de défaillance considère un modèle mathématique capable de prendre en compte le scénario de défaillance et l'aléa sur les données. On n'étudie pas le composant réel mais sa représentation ou son modèle physique en prenant en compte un mécanisme de défaillance donné. La défaillance quant à elle s'évalue grâce à la méthode des éléments finis. Le modèle physique considère l'état de fonctionnement du système en fonction des sollicitations auxquelles il est soumis et s'exprime sous la forme d'une fonction d'état. Il se base sur les variables physiques de base qui contribuent à l'apparition du mode de défaillance.

I.3.2.2. Méthode basée sur les essais

Cette méthode consiste en la mise en place d'essais de vieillissement accélérés pour faire vieillir prématurément les composants de puissance jusqu'à l'apparition d'une défaillance connue et définie d'après des critères déterminés. Pour la mise en évidence du phénomène de décollement du fil de bonding, les tests de vieillissements accélérés ont été effectué sur des IGBT avec une période de cycles thermiques de 3s et des cycles ne dépassant pas 373K pour activer le mécanisme de défaillance (Cova et al., [1997]; Berg et Wolfgang [1998]). Différents programmes ont été consacrés à la fiabilité et à la prévision de la durée de vie des modules IGBT. Le programme LESIT (Leistung Elektronik Systemtechnik informations technologies) [Held et al., 1997] a conduit à la définition de la méthode d'essai accéléré et de prédiction de la durée de vie des IGBT utilisés dans la traction ferroviaire. Le programme RAPSDRA (fiabilité des dispositifs de semi-conducteurs de puissance avancée pour les applications de traction de chemin de fer) a prolongé l'approche basée sur les essais accélérés de cycle de puissance à la fiabilité de joints de soudure [Brite EuRam, 1995]. Le programme PORTES (fiabilité de puissance pour l'électronique de traction) [Perpinà et al., 2012] utilise la physique de défaillance dans le but de prévoir la durée de vie des composants de puissance. D'autres travaux ont également été entrepris en particulier (Mermet et Piton, [2010] ; Amro et Lutz [2004]) pour prévoir la durée de vie des modules IGBT. Les modèles de durées de vie utilisées dans ces programmes sont basées sur des essais accélérés. Le phénomène de décollement du fil de bonding est dû au cyclage thermique et à la différence de CTE (Coefficient of Thermal Expansion) entre l'aluminium (matériau constituant le fil de bonding) et le silicium (matériau constituant la puce sur lequel est soudé le fil de bonding). Lorsque l'IGBT est soumis à des cycles de températures, il se produit une déformation du fil de bonding qui progressivement amène au décollement de ce dernier. Le critère de défaillance qui a été supposé est un dépassement de 10% de la tension émetteur collecteur Vce de l'IGBT par rapport à sa valeur initiale [Ciappa, 2000]. Le choix du critère de défaillance est très important car on ne peut pas faire indéfiniment des tests. C'est donc la valeur au-delà de laquelle on considère la défaillance est apparue [Zhang, 2012]. Les essais accélérés ont permis de mettre en évidence plusieurs mécanismes de défaillance entre autres les phénomènes de décollement du fil de bonding [Ciappa, 2002] ; les phénomènes de corrosion (Kaminski et Zorn [2014] ; Kitajima et al., [2017] ; Kaminski et Zorn [2013] ;Tanaka et al., [2015]). Les modèles découlant de ses essais seront présentées dans le prochain chapitre. Une fois le modèle de vieillissement connu, la figure I.7 montre les étapes pour estimer la durée de vie sur une application donnée. On identifie le profil de mission en termes de couple ou de vitesse. Les données de profil de mission permettent ensuite de calculer les paramètres électriques du convertisseur en prenant en compte

les caractéristiques dynamiques de la charge. À partir de ce profil de mission électrique, les pertes sont évaluées en prenant en compte la datasheet (document constructeur qui résume les performances et les caractéristiques techniques d'un composant à un niveau suffisant de détail pour permettre de comprendre son fonctionnement) du module. Une fois que les pertes dissipées sont connues, une étape itérative permet d'évaluer les températures aux bornes de l'IGBT (température de jonction des puces, température de la semelle).

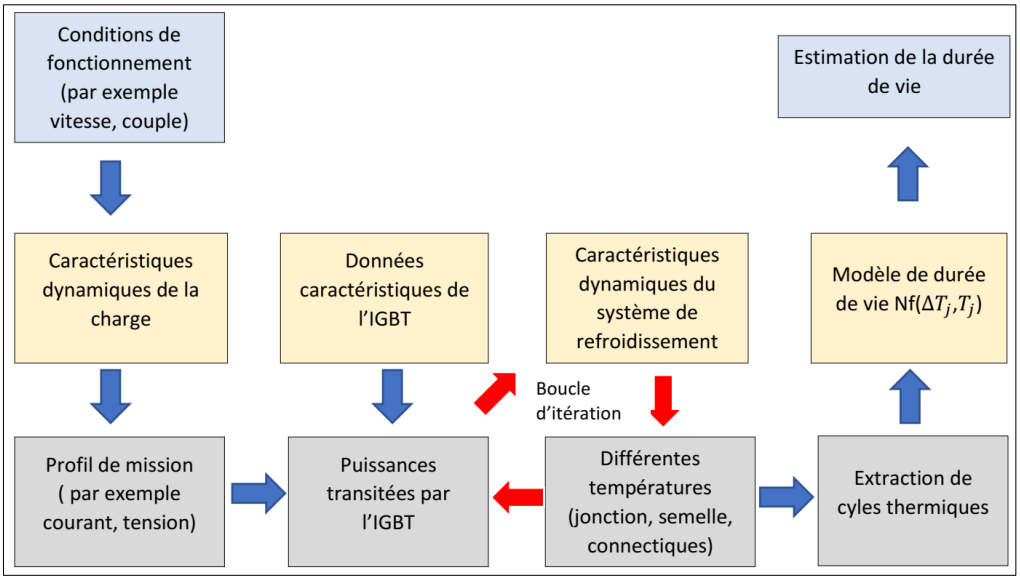


Figure I.7: Etapes de la prédiction de la durée de vie basée sur les profils de mission [Scheuermann, 2015]

Les cycles thermiques sont finalement extraits à partir du profil de température. Ces variations de cycles constituent les données d'entrée pour l'estimation de la durée de vie [Dabla et al., 2017]. Ce modèle permet d'estimer la durée de vie consommée en fonction du profil de mission considéré.

I.3.3. Avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes

La méthode fréquentiste permet un suivi de l'évolution du taux de défaillance en fonctionnement après la phase de dimensionnement. En termes d'inconvénients, il faut cumuler beaucoup de données, ce qui prend du temps et on est parfois limité à la période de garantie et aux expertises. Aussi, la méthode fréquentiste n'est pas prédictive. Elle devient inapplicable lorsque les modifications de conception, d'exploitation ou de maintenance risquent d'altérer les performances futures des matériels ou lorsque des informations nouvelles parviennent lors des opérations de maintenance préventive ou conditionnelle [Procaccia et Suhner, 2003].

Les recueils de fiabilité ont montré leurs intérêts pour les composants de petite et moyenne puissance, ils restent très peu adaptés à la forte puissance.

La méthode basée sur les essais permet pour un mécanisme de défaillance d'estimer les indicateurs de défaillance comme la durée de vie et le taux de défaillance. L'inconvénient de ces méthodes est la prise en compte d'un mécanisme de défaillance bien défini. Elles ne prennent pas en compte le couplage de plusieurs mécanismes de défaillance dans le modèle.

Les méthodes basées sur une étude physique sont utilisées en phase de conception et prennent en compte elles aussi un seul mécanisme de défaillance bien défini. Elles ne prennent pas en compte non plus les profils de mission réels. Certes, l'avantage est la prise en compte du comportement des matériaux par un modèle fidèle à la réalité et le couplage aux éléments finis, ce qui permet d'avoir une surface de réponse montrant les domaines de défaillance et de sûreté; mais la prise en compte d'un seul mécanisme de défaillance constitue un inconvénient non négligeable.

De l'analyse de ces différentes méthodes, les défis suivants sont à relever pour améliorer les modèles de fiabilité des modules IGBT :

- la capacité à prendre en compte plusieurs mécanismes de défaillance. Le cyclage thermique n'est pas la seule source de défaillance de l'IGBT. On distingue d'autres phénomènes entre autres la corrosion, le dépassement de l'aire de sécurité et le rayonnement cosmique ;
- la capacité à considérer des profils de mission complexes les plus réalistes avec la description des différentes grandeurs ayant un impact sur la fiabilité du composant ;
- la capacité à utiliser dans un même modèle les données issues de la physique de défaillance et les données de fonctionnement ;
- la capacité à tenir compte des aléas dans la description des profils de mission.

La recherche de solutions à l'ensemble de ces défis permet d'aller vers la mise en place d'un modèle qui permet de prendre en compte non seulement des profils de missions complexes mais aussi les lois de défaillance existant aujourd'hui dans le domaine de la prédiction de la fiabilité des IGBT. C'est l'objectif de ce travail de recherche qui vise à mettre en place cette démarche de modélisation de la fiabilité de l'IGBT. À ce stade, le choix d'un outil de modélisation est nécessaire. Pour cela, les paragraphes suivants décrivent l'ensemble des outils de modélisation retenus pour répondre à l'objectif de ce travail de recherche, la comparaison de ces outils et le choix de l'outil le mieux adapté aux besoins de modélisation.

I.4. Comparaison et choix de l'outil de modélisation

L'outil de modélisation doit permettre de prendre en compte simultanément les données du profil de mission de manière probabiliste, ses aléas (manque de données, données incomplètes) et la physique de défaillance (équation décrivant la dégradation ou la défaillance).

I.4.1. Critères de modélisation

La modélisation de la fiabilité de l'IGBT requiert le choix d'un outil de modélisation performant et adapté au mieux au problème. Le choix de l'outil de modélisation doit être basé sur les cinq critères identifiés ci-dessous, chacun d'eux ayant le même degré d'importance :

- la facilité de modélisation des systèmes complexes ;
- l'intégration de données de profils de mission complexes et probabilistes. Ces données peuvent être de différentes natures : quantitatives (continues, discrètes, équations) et qualitatives. Ce point intègre aussi la prise en compte d'incertitudes sur les données ;
- la capacité de modélisation multi-niveaux ;
- la prise en compte de conditions variables ;
- l'interprétabilité du modèle obtenu : c'est la capacité de l'outil à faciliter l'interprétation des résultats en permettant d'identifier les liens entre les différentes variables liées au profils de mission et à la physique de défaillance.

Parmi les outils de modélisation de la fiabilité des composants et systèmes, on a retenu les réseaux de pétri, les chaines de Markov, les réseaux bayesien et les réseaux de neurones. Chacun de ces outils est décrit par la suite avec pour but de déterminer celle qui répond le mieux aux critères de modélisation décrits.

I.4.1.1. Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri (RdP) sont des outils performants de représentation du comportement global des systèmes complexes. Ils sont des graphes orientés comportant des places, des transitions et des arcs liant les places et les transitions (Bourcerie [2011] ; Mihalache [2007]). Les places sont représentées par des cercles et contiennent des jetons. Les jetons associés aux différentes places constituent le marquage du réseau et correspondent à l'état du système modélisé. Les transitions sont représentées par des rectangles. Les arcs sont représentés par des flèches qui lient les places aux transitions et inversement. Dans la modélisation avec les réseaux de Petri deux parties se distinguent : la structure qui est la partie statique et la partie dynamique qui correspond aux franchissements des transitions. L'état du système change à chaque franchissement de transitions, ainsi son comportement est simulé par l'évolution des

marquages. Le franchissement des transitions ne peut s'effectuer que si chacune des places en amont de cette transition contient suffisamment de jetons [Birolini, 2007].

La figure I.8 présente à titre d'exemple un réseau de Petri de 5 places avec deux transitions. Avant transition, la place P_1 contient un jeton. Au franchissement de la transition 1 , le jeton se déplace à la place P_3.

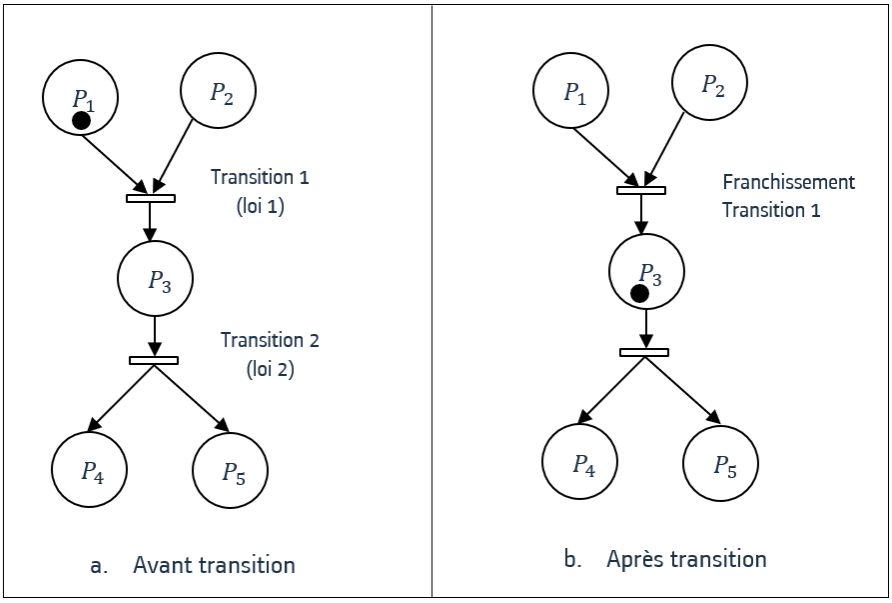


Figure I.8: Exemple de réseau de Pétri avant et après franchissement de la transition [RNC-CNES-Q-30-504, 2008]

Les réseaux de Petri présentent l'avantage d'analyser le comportement d'un système en présence ou non de défaillances. Cette modélisation dynamique permet d'obtenir différents indicateurs de fiabilité en assignant des valeurs numériques aux paramètres du modèle. Ils permettent de pouvoir modéliser d'une part le fonctionnement normal d'un système et d'autre part les occurrences de défaillances. Malgré leur pouvoir de modélisation de la fiabilité, ils ne sont pas adaptés à la prise en compte des incertitudes (dues à la variabilité des données).

I.4.1.2. Chaîne de Markov

Les chaînes de Markov sont des graphes d'états qui permettent la modélisation de systèmes complexes. Dans un processus de Markov, la prédiction du futur à partir du présent n'est pas rendue plus précise par des éléments d'information concernant le passé. Ils reposent sur la propriété de Markov : l'information utile pour la prédiction du futur est entièrement contenue dans l'état présent du processus et n'est pas dépendante des états antérieurs (le système n'a pas de « mémoire ») [Cocozza-Thivent, 1997].

Mathématiquement cette propriété de Markov s'écrit comme suit :

$$P(X_{n+1} = j | X_0 = i_0, X_1 = i_1, X_2 = i_2, \ldots . X_n = i_n) = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \qquad \text{(I.18)}$$

Les processus markoviens sont très intéressants car ils permettent de modéliser avec fidélité un grand nombre de systèmes et conduisent à des calculs simples lorsque le nombre d'états du système n'est pas trop grand [Pagès et Gondran, 1980].

Les processus de Markov peuvent être classifiés en quatre catégories : les processus à temps discret et à espace d'états discret, les processus à temps discret et à espace d'états continu, les processus à temps continu et à espace d'état discret et les processus à temps continu et à espace de temps continu. On représente dans un graphe de Markov le fonctionnement du système par un ensemble de composants chacun défini par un nombre donné d'états de fonctionnement et de panne. La représentation graphique permet de visualiser les différents états qui sont représentés par des cercles et reliés entre eux par des arcs orientés représentants les transitions (pannes, réparations par exemple) entre états. Une matrice de transition est associée à chaque graphe et contient les probabilités des transitions envisageables par le système.

La figure I.9 montre les exemples de graphe de Markov de deux composants A et B en parallèle tirés des travaux de [Mahboob et Zio, 2018] avec des taux de défaillance λ_A et λ_B respectivement. Dans le premier exemple (figure I.9a), on suppose qu'il n'y a pas de réparation. Les états du système sont numérotés de 1 à 4. L'état 1 est l'état initial où les composants A et B sont en bon état de fonctionnement. L'état 2 est la défaillance du composant A noté $\overline{A}$ en supposant qu'il n'y a pas de réparation pour le composant A alors que le composant B est en bon état de fonctionnement. L'état 3 considère la défaillance du composant B noté $\overline{B}$ et le bon fonctionnement du composant A. À l'état 4 les deux composants sont défaillants. Dans l'exemple de la figure I.9b, des réparations sont considérées aux états 2 et 3 avec un taux de réparation µ. À partir des matrices de transitions obtenues du graphe, les auteurs ont estimé le MTBF.

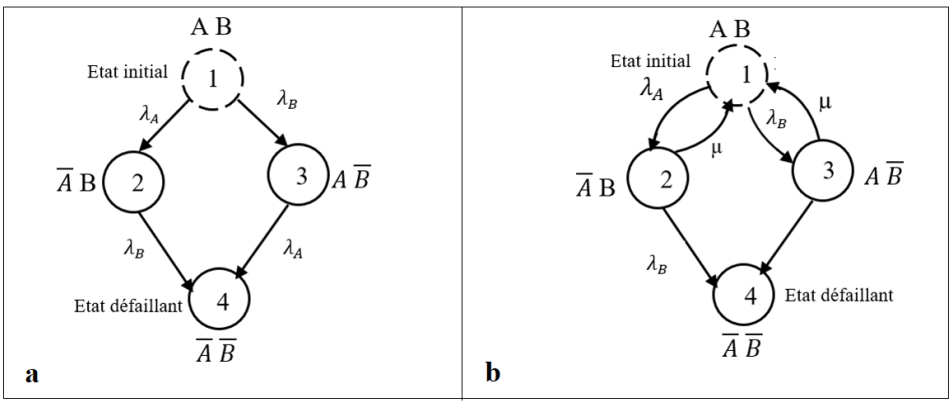


Figure I.9: Exemple de graphe Markov a) système de deux composants en parallèle sans réparation b) avec une réparation partielle

Les chaînes de Markov sont adaptées à la modélisation des systèmes réparables dynamiques et multi-états [Giraud, 2006]. Toutefois, elles ne sont donc pas idéales pour la modélisation des composants et systèmes non réparables comme les modules de puissance à IGBT. Aussi, un des problèmes majeurs est la difficulté à prendre en compte le vieillissement. Bien qu'ils puissent être employés pour la prise en compte de conditions variables, l'intégration d'une nouvelle variable peut être difficile et conduira à des erreurs vues leurs structures complexes [Tobon Mejia, 2011].

I.4.1.3. Réseaux bayesiens

Les réseaux bayesiens sont des modèles graphiques probabilistes utilisés dans la modélisation de la connaissance des systèmes complexes [Pearl, 1995]. Ils utilisent des outils naturels de la théorie des probabilités et de la théorie des graphes et permettent d'apporter des solutions efficaces à l'incertitude et à la complexité grandissante des systèmes actuels. La théorie des graphes apporte d'une part une interface intuitive pour modéliser le système comportant des variables interagissant entre elles et d'autre part un moyen de structurer les données. Dans la représentation des réseaux bayesiens, les nœuds représentent les variables et les liens les dépendances entre elles. Le formalisme des réseaux bayesiens permet de représenter de façon factorisée une distribution jointe de probabilité sur un ensemble de variables aléatoires.

Ainsi pour un ensemble de variables données $(X_1, X_2, \ldots . X_n)$, la distribution jointe de probabilité est donnée par :

$$P(X_1, X_2, \ldots X_n) = \sum_{i=1}^{n} P\left(X_i \middle| Pa(X_i)\right) \quad \text{(I.19)}$$

Où $Pa(X_i)$ désigne les parents de X_i. Le principe de fonctionnement des réseaux bayesiens est d'introduire des informations ou des observations dans le réseau qui les propage et met à jour les TPC. Ce processus s'appelle l'inférence et se base sur le théorème de Bayes qui est le soubassement du formalisme des réseaux bayesiens. Mathématiquement parlant la probabilité d'un ensemble de variables U du réseau bayesien dès l'apparition d'une observation ε est donné par le théorème de Bayes [Jensen et Nielsen, 2007] :

$$P(U|\varepsilon) = \frac{P(\varepsilon|U)P(U)}{P(\varepsilon)} \quad \text{(I.20)}$$

Où P(U) la distribution de probabilités sur cet ensemble. On parle aussi de probabilité à postériori.

Les réseaux bayesiens offrent la possibilité de capitaliser et de fusionner dans un même modèle des connaissances de différentes natures dans un même modèle. Ainsi dans un même modèle,

on peut avoir des données de retour d'expérience (données historiques ou empiriques), des avis d'experts (sous la forme de règles logiques ou de probabilités subjectives), des observations, des données de fonctionnement de systèmes ou de composants. Dans un contexte où les données sur un système peuvent être individuellement insuffisantes pour permettre une représentation précise et réaliste du système étudié, les réseaux bayesiens s'avèrent un outil puissant pour fusionner ces connaissances et permettre de mieux modéliser ces systèmes. Les réseaux bayesiens offrent une représentation graphique intuitive, explicite et compréhensible par un non-spécialiste ce qui facilite son utilisation, son interprétation, sa validation ou encore d'éventuelles évolutions du modèle. Ils sont des puissants outils d'aide à la décision car ils intègrent la notion d'incertitude, notion qui est très bien prise en compte par le formalisme probabiliste. Ils sont capables de prendre en compte aussi les conditions de fonctionnement variable en utilisant l'intégration d'évidences [Koller et Friedman, 2009]. Ils sont faciles à interpréter, flexibles pour les étendre à d'autres systèmes. Ils semblent adaptés à notre problématique.

I.4.1.4. Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont des systèmes de calcul basés sur le système biologique nerveux humain et se caractérisent par les modèles de neurones, les modèles de la structure d'interconnexion et l'algorithme d'apprentissage. Les réseaux de neurones sont utilisés dans la modélisation de systèmes où on dispose de données. Ils utilisent le principe d'apprentissage pour s'adapter au problème. Le réseau de neurone est l'association en un graphe plus ou moins complexe de neurones formels. Le neurone formel se constitue d'un intégrateur qui réalise la somme pondérée de ses entrées (figure I.10).

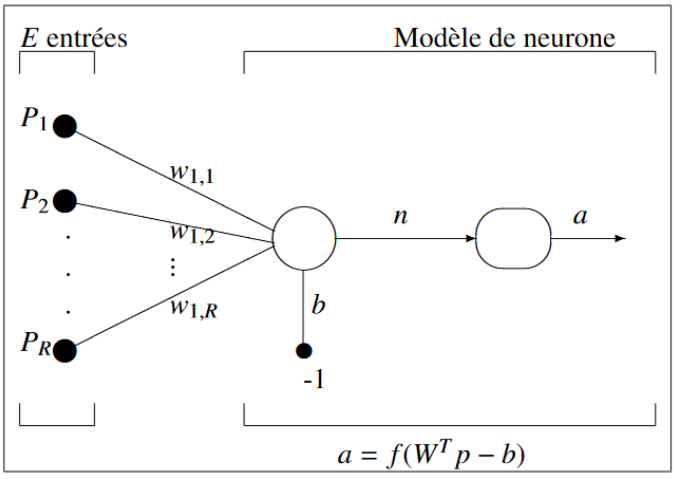


Figure I.10: Principe des réseaux de neurones [Benaddy, 2012]

Une fonction de transfert f permet de tranformer la sortie de cette somme en la sortie a du neurone. Le vecteur P=$[p_1, p_2, \dots p_n]$ correspond aux R entrées du neurone et leurs poids au vecteur $[w_{1,1}, w_{1,2}, \dots w_{1,R}]$.

La sortie n de l'intégrateur nommée aussi niveau d'activation du neurone est donnée par la relation I.21 :

$$n = \sum_{i=1}^{R} w_{1,j} p_j - b = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \cdots + w_{1,R} p_R - b \qquad \text{(I.21)}$$

La modélisation de la fiabilité des systèmes avec les réseaux de neurones requiert la définition d'une fonction de transfert multivariable, paramétrable [Lyonnet et al., 2014]. Cette fonction de transfert doit prendre en compte l'environnement du système, les facteurs de conceptions, les données disponibles. Les réseaux de neurones ont une faculté importante à extraire des règles et des tendances à partir de données compliquées, bruitées et imprécises. Ils peuvent s'utiliser pour extraire des modèles et détecter des tendances reposant sur des fonctions mathématiques compliquées qui sont trop difficiles, voire impossible, à modéliser à l'aide de techniques analytiques ou paramétriques traditionnelles. Les réseaux de neurones présentent aussi un avantage considérable dans la prédiction de la fiabilité car peuvent à partir de données sur l'historique de défaillance développer automatiquement un modèle interne du processus de défaillance et prédire le futur [Karunanithi et al., 1992].

Malgré leur capacité à prendre en compte des variables qualitatives et quantitatives grâce à leur aspect probabiliste, il pose généralement un problème d'interprétation des résultats. Les réseaux de neurones demeurent une boîte noire qui fournissent une réponse quand on lui présente une donnée, mais ne fournit pas de justificatif facile à lire sur la façon dont la réponse est obtenue [Kalakh, 2013]. Un autre inconvénient est qu'ils nécessitent aussi des données de retour d'expérience qui ne sont pas toujours disponibles.

I.4.1.5. Comparaison

Le tableau I.2 résume les comparaisons de chacune des méthodes par rapport aux critères définis par notre problématique. Le signe « + » désigne le fait que la méthode réponde au critère et le signe « - » signifie qu'elle ne réponde pas aux critères ou est moins adaptée. Le tableau de comparaison montre que les réseaux bayesiens répondent à tous nos critères. Ils possèdent un pouvoir important de modélisation de systèmes complexes couplés à une grande capacité d'intégration des aspects fonctionnels et dysfonctionnels. Les résultats issus de la modélisation sont aussi facilement interprétables et leur caractère probabiliste permet de prendre en compte les incertitudes liées aux données disponibles pour leur construction.

Critères / Méthodes	Facilité de modélisation de systèmes complexes	Intégration de données de différentes natures et d'incertitude	Modélisation multi-niveaux	Prise en compte de conditions variables	Interopérabilité du modèle
Réseau de Petri	+	-	+	+	+
Chaine de Markov	+	+	+	-	+
Réseau bayesien	+	+	+	+	+
Réseaux de neurones	+	+	+	+	-

Tableau I.2: Comparaison des méthodes

I.4.2. Méthode bayesienne pour l'estimation de la fiabilité de l'IGBT

La modélisation de la fiabilité des composants de puissance à base d'IGBT nécessite de coupler d'une part les modèles physiques qui régissent les défaillances de ces composants et d'autre part les données issues de leur exploitation ou encore appelées données de profil de mission. D'un côté, les modèles physiques sont représentés au travers d'équations qui décrivent la physique de la dégradation ou de la panne, de l'autre côté, les données d'exploitation qui sont issues de l'utilisation du composant dans son environnement sont continues ou discrètes. L'étude de la fiabilité de l'IGBT fait donc intervenir un grand nombre de variables dépendantes ou indépendantes dont les liens doivent être mises en évidence. Aussi, l'étude doit pouvoir prendre en compte les données manquantes, les hypothèses et les incertitudes qui y sont entachées. Les réseaux bayesiens se révèlent être de puissants outils d'expression de dépendance et d'indépendance complexes entre les variables avec une prise en compte de l'incertain, de la variabilité des données par l'aspect probabiliste dont ils sont dotés. La modélisation effectuée dans ce travail de recherche suit le schéma de la figure I.11. En entrée du modèle d'un côté, l'objectif est de capitaliser l'ensemble des connaissances sur le profil de mission de l'IGBT, de l'autre la physique de défaillance au travers d'analyses de type AMDE (Analyse des Modes de Défaillance, et de leurs effets). L'ensemble de ces connaissances capitalisées alimentera donc le modèle bayesien dont l'objectif est d'évaluer le taux de défaillance de l'IGBT ainsi que la durée de vie.

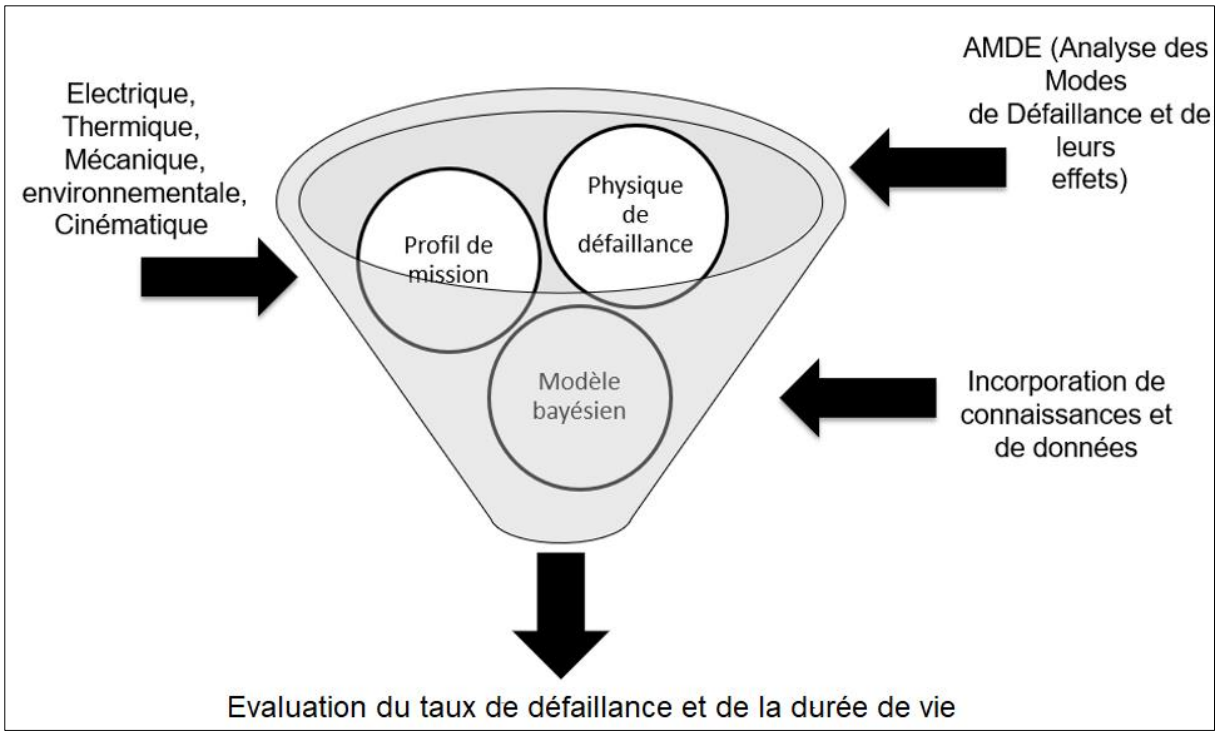


Figure I.11: Synoptique de la mise en place du modèle bayesien pour l'estimation de la fiabilité

L'ensemble de ces travaux est structuré autour de l'analyse « Cycle en U » développé dans le chapitre II ; de la mise en place du modèle bayesien présenté dans le chapitre III ; du passage des probabilités du réseau bayesien au indicateurs fiabilistes développé dans le chapitre IV et de l'application à un métro existant dans le dernier chapitre.

Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art des méthodes qui existent aujourd'hui dans le domaine de la prédiction de la fiabilité de l'IGBT. Après une brève présentation de la fiabilité de façon théorique, la suite du chapitre a été consacré aux méthodes statistiques et analytiques ainsi que leurs limites. Les critères de modélisation retenus dans le cadre de ce travail ont été exposés ainsi que les outils potentiels qui pourront répondre d'une manière ou d'une autre à un ou plusieurs de ces critères. Il est apparu que les réseaux bayesiens répondent à l'ensemble des critères. Leur formalisme permettra de mettre en place la démarche d'évaluation de la fiabilité de l'IGBT en fusionnant les données issues de l'utilisation de l'IGBT et les modèles issus de la physique de défaillance. La mise en place du modèle bayesien nécessitant de capitaliser l'ensemble de ces données, une nouvelle approche originale nommée « Cycle en U » est développée et fera l'objet du chapitre suivant.

II. Proposition d'un cadre de travail

Dans l'estimation de la fiabilité des semi-conducteurs tels que les IGBT, la connaissance des sollicitations subies par les composants est primordiale. Les IGBT sont soumis à de fortes contraintes dues aux sévères conditions en environnement ferroviaire dans lesquelles ils sont amenés à fonctionner. L'estimation de leur fiabilité nécessite de caractériser non seulement la sévérité de l'environnement immédiat auquel ils seront soumis, mais aussi leur environnement indirect et fonctionnel. En effet, l'IGBT est un sous-système du convertisseur, ce dernier étant lui-même un sous-système du train. Comment mettre en place une démarche d'évaluation de la fiabilité intégrant toutes les connaissances de l'IGBT dans son environnement de fonctionnement direct et indirect ?

L'évaluation des performances d'un composant de manière générale peut se faire en prenant en compte non seulement son environnement immédiat de fonctionnement mais aussi celui du système dans lequel il opère. Dans ce chapitre, une approche nouvelle et originale dénommée « Cycle en U » est proposée. Elle permet de mettre en place une démarche reliant les connaissances entre les différents niveaux d'un système. Cette démarche permet d'identifier et de mieux comprendre les interactions entre le système et ses composants. Le principe de la méthode sera présenté par la suite ainsi que son application aux systèmes ferroviaires. Les résultats de cette analyse permettront d'identifier l'ensemble des variables ayant un impact sur la fiabilité de l'IGBT.

II.1. Cadre de travail proposé : Approche « Cycle en U »

Les performances d'un composant peuvent être caractérisées non seulement par celles liées au composant lui-même mais aussi celles associées au système dans lequel il fonctionne. Dans le but de prendre en compte de manière conjointe les performances liées au système et au composant, une approche originale d'analyse systémique qu'on qualifiera de « Cycle en U » est proposée. Cette approche permet de combiner, dans le cadre d'une analyse matricielle, une vue architecturale reliant le système à ses composants sur une première dimension et une vue

comportementale associant les aspects fonctionnels et dysfonctionnels sur une autre. Ainsi, à chaque niveau système et composant, une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle est nécessaire.

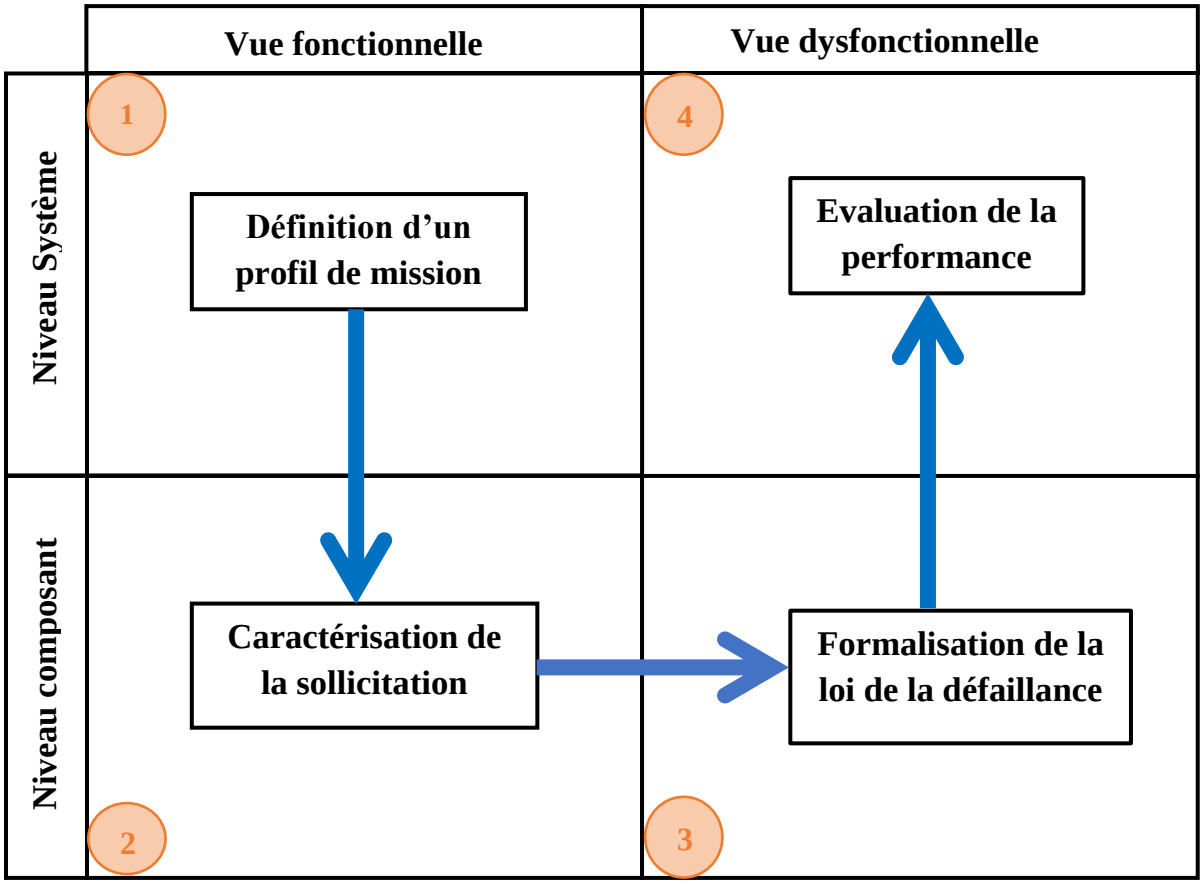


Figure II.1: Approche « Cycle en U »

L'analyse est centrée autour des 4 axes de travail principaux (figure II.1) décrits à la suite.

- axe 1 : niveau système, analyse fonctionnelle.

Cette analyse permet de caractériser l'environnement dans lequel le système fonctionne et d'identifier ses paramètres fonctionnels. Elle conduit également à la description quantitative des facteurs influents à travers la définition d'un profil de mission. Les données d'entrée pour la construction d'un profil de mission peuvent être obtenues via la récupération de connaissances ou de données chez les constructeurs, les équipementiers, les fournisseurs de composants, les données de retour d'expériences, les données de capteurs, les enquêtes d'usage, les centres de maintenance. Ces données peuvent être quantitatives ou qualitatives.

- axe 2 : niveau composant, analyse fonctionnelle

Cet axe correspond à la descente d'informations du niveau système vers le niveau composant. Il s'agit à ce niveau d'effectuer une traduction du profil de mission du système vers un profil de sollicitation du composant. Le profil de mission du système n'est pas celui du composant

pour des raisons fonctionnelles ou architecturales. Les profils de sollicitations peuvent être de différentes natures par exemple électriques, cinématiques, thermiques, mécaniques ou hygrométriques.

- axe 3 : niveau composant, analyse dysfonctionnelle

Cette étape consiste à traduire les paramètres de fonctionnement en contraintes pour le composant. Il s'agira de déterminer le niveau de dommage qui en résulte. Ces dommages peuvent être caractérisés par des mécanismes de dégradation ou de défaillance. Le déploiement d'analyses de type AMDEC (Analyse des Modes de défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité) peut être utile à ce niveau par leur propension, d'une part à anticiper les défaillances potentielles et leurs causes et, d'autre part, à évaluer leurs effets. On caractérise enfin les effets de ces différentes contraintes en termes de performance ou de fiabilité en utilisant la physique de défaillance. Différents indicateurs de fiabilité peuvent être estimés sur ce plan.

- axe 4 : niveau système, analyse dysfonctionnelle

Il s'agit finalement ici, d'opérer une remontée d'informations du niveau élémentaire vers les niveaux supérieurs. On passe ainsi de l'évaluation des indicateurs de performance niveau composant à l'évaluation des performances du niveau système. On réalise donc l'agrégation montante des informations à partir d'analyses, de combinaisons et d'interprétations dans le temps en prenant en compte les composants élémentaires, sous-systèmes et finalement système. Ainsi, à chaque niveau de décomposition, les sollicitations du niveau correspondant sont prises en compte. L'objectif est de passer de la fiabilité du composant à la fiabilité du système en considérant la performance nominale ou les modes de marche dégradée.

II.2. Application aux systèmes ferroviaires

L'application porte sur l'évaluation de la fiabilité de l'IGBT assimilé au composant dans son environnement de fonctionnement. L'objectif est de prédire la fiabilité de l'IGBT en fonction de son profil d'utilisation. L'ensemble des variables d'utilisation de l'IGBT est fonction de l'environnement ferroviaire dans lequel elles évoluent. Il est donc important pour la mise en place du modèle de regrouper toute la connaissance de l'IGBT dans tout son environnement de fonctionnement. Le constat est qu'il est difficile de collecter l'ensemble des données sur l'évolution des variables de fonctionnement directement au niveau du composant IGBT. L'analyse « Cycle en U » présentée sur la figure II.2 permet de remonter jusqu'au niveau Train pour identifier les variables induisant les variables de fonctionnement au niveau IGBT. Dans le cadre du système d'application considéré, on introduit un niveau intermédiaire assimilé au niveau « Convertisseur ». La justification de ce choix s'explique en premier lieu car il s'agit du

niveau direct fonctionnel de l'IGBT, et en second lieu parce que des variables de fonctionnement à ce niveau ont été identifiées comme ayant un impact sur la fiabilité de l'IGBT. Dans la suite, les six niveaux de l'approche « Cycle en U » appliqués au système ferroviaire seront développés.

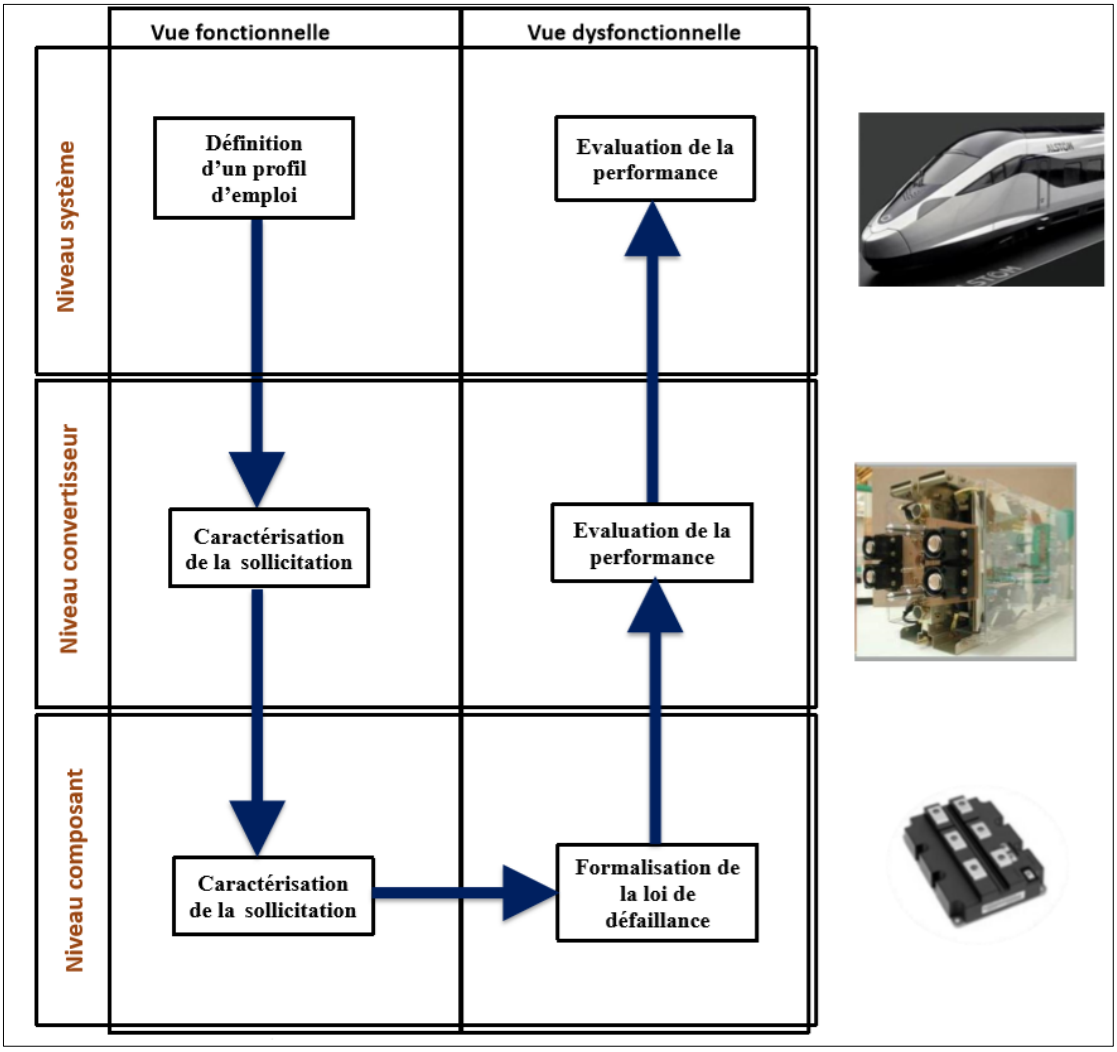


Figure II.2: Application du « Cycle en U » au système Train-IGBT

II.2.1. Niveau Train : étude fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle niveau Train consiste à définir d'un profil de mission afin de caractériser l'environnement de fonctionnement du train. Le profil de mission désigne l'ensemble des conditions pertinentes dans lesquelles le système va être amené à fonctionner. Le fonctionnement des modules IGBT est fortement influencé par le fonctionnement du train, par exemple les contraintes électriques subies par un train en phase de freinage ne sont pas identiques à celles d'un train en phase d'accélération. Cette analyse fonctionnelle permet d'identifier les variables et phases de fonctionnement au niveau du train. On s'intéressera à la chaîne de traction ferroviaire qui assure l'ensemble des fonctions de traction du train. Dans les paragraphes suivants, le fonctionnement et les fonctions de la chaînes de traction sont décrits.

II.2.1.1. Chaîne de traction ferroviaire

Sur son site à Tarbes, ALSTOM conçoit et fabrique des chaînes de traction ferroviaire pour une large gamme de trains : des locomotives, des métros, des trains régionaux et des trains à grande vitesse.

La chaîne de traction ferroviaire convertit l'énergie électrique de la source (réseau électrique) aux moteurs de traction qui font avancer le train [Debruyne, 2009]. Son principe de fonctionnement est le suivant : l'énergie électrique est captée en haute tension sur la caténaire par le pantographe[6]. La caténaire peut délivrer une tension alternative ou une tension continue [Chapas, 2012]. Un disjoncteur permet de protéger le circuit d'alimentation du train contre les éventuels défauts sur le réseau électrique.

II.2.1.2. Fonctions de la chaîne de traction ferroviaire

Les fonctions réalisées par la chaîne de traction du train sont les suivantes :

- collecter : le pantographe capte l'énergie électrique en haute tension par la caténaire. Cette énergie alimente les différents systèmes indispensables au bon fonctionnement du train ;
- protéger : le disjoncteur principal protège l'ensemble des composants contre d'éventuels défauts sur le réseau électrique ;
- convertir : les convertisseurs de puissance de la chaîne de traction convertissent l'énergie électrique captée par le train pour l'alimentation des moteurs de traction. Ces convertisseurs sont composés d'IGBT qui réalisent la fonction d'interrupteurs de puissance ;
- transformer : le moteur transforme l'énergie électrique transmise par les convertisseurs en énergie mécanique ;
- transmettre : le moteur transmet l'effort aux bogies moteurs pour faire avancer le train.

La figure II.3 montre les différentes composantes de la chaîne de traction. Différentes variables et phases de fonctionnement interviennent dans l'analyse fonctionnelle au niveau Train. Les phases de fonctionnement du train sont l'arrêt, l'accélération, le maintien de vitesse et le freinage. Les variables de fonctionnement quant à elles sont de différents types : cinématiques (vitesse, masse, relief) ; électriques (tension caténaire continue, tension caténaire alternative), environnementales (température ambiante, humidité relative ambiante, humidité absolue ambiante, altitude, rayonnement cosmique) ; mécaniques (fréquence vibratoire, fréquence de

[6] Le pantographe est un dispositif articulé qui permet au train de capter de l'énergie par frottement sur une caténaire.

choc). Les variables et phases de fonctionnement niveau Train se déclinent au niveau des convertisseurs puis au niveau du composant IGBT.

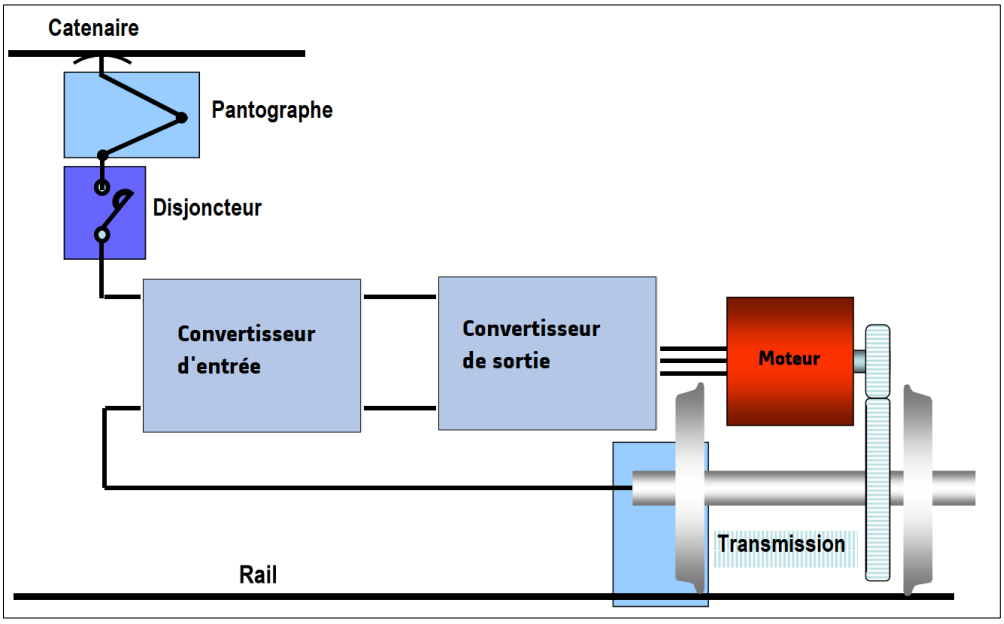


Figure II.3: Chaîne de traction ferroviaire

II.2.2. Niveau Convertisseur : étude fonctionnelle

Dans la chaîne de traction ferroviaire, on distingue trois types de convertisseurs : le convertisseur d'entrée ou redresseur aussi appelé PMCF (Pont Monophasé à Commutation Forcée) ; le convertisseur de sortie appelé onduleur et le hacheur de freinage rhéostatique. La figure II.4 montre en détail ces trois types de convertisseurs sur un schéma de la chaîne de traction ferroviaire. Ils permettent de convertir l'énergie électrique entre un générateur (réseau électrique) et un récepteur (moteur) avec un minimum de pertes. Le redresseur connecté au transformateur constitue le premier étage de conversion alternatif vers le continu et l'onduleur le deuxième étage de conversion du continu vers l'alternatif. Le hacheur quant à lui connecte le bus continu à une résistance dans laquelle l'énergie de freinage est dissipée.

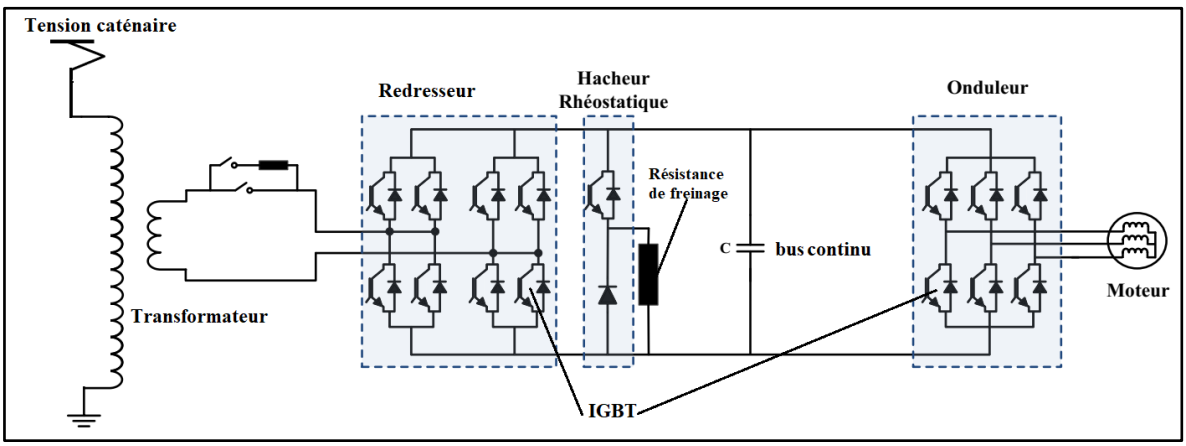


Figure II.4: Convertisseurs de la chaîne de traction [Chapas, 2006]

Les convertisseurs assurent la circulation du flux d'énergie en adaptant les formes et les caractéristiques de l'énergie électrique à différents niveaux de la chaîne de traction ferroviaire. Les fonctions et principes de fonctionnement des deux convertisseurs sont présentés par la suite.

II.2.2.1. Convertisseur d'entrée : fonctions et principe de fonctionnement

La principale fonction du convertisseur d'entrée (encore appelé redresseur ou PMCF) est la conversion du courant alternatif en courant continu. Outre cette fonction principale, il réalise aussi les fonctions secondaires suivantes : le maintien du facteur de puissance proche de l'unité ; la diminution des courants harmoniques renvoyés en ligne ; la compensation de l'instabilité basse fréquence du réseau ; le freinage électrique en récupération d'énergie. Leur principe de fonctionnement (figure II.5) consiste à régler par la commande forcée le fondamental de la tension d'entrée U_e en phase et en amplitude afin d'obtenir le courant de sortie I_s en phase avec la tension de sortie U_s. Cette commande forcée permet d'obtenir une tension continue stable qui alimentera l'onduleur par l'intermédiaire du bus continu.

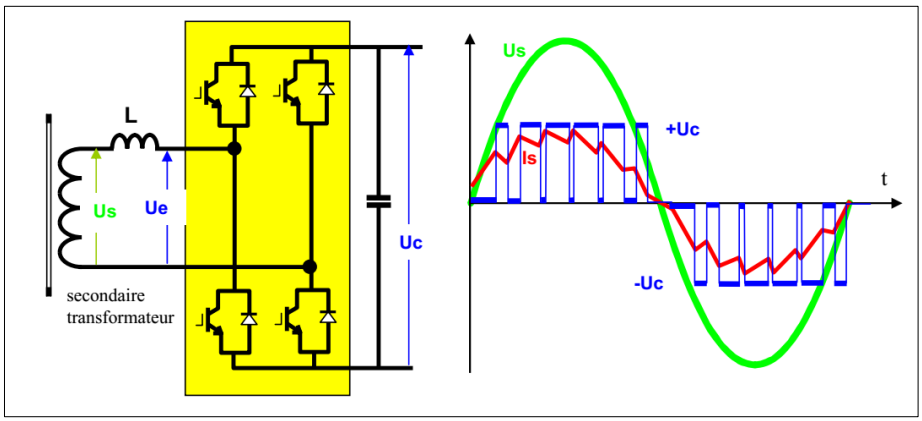


Figure II.5: Principe de fonctionnement du PMCF [Chapas, 2006]

II.2.2.2. Convertisseur de sortie : l'onduleur

Il est le cœur de la chaîne de traction ferroviaire. Il peut être alimenté directement par une tension continue dans le cas d'une caténaire continue ou par le convertisseur d'entrée dans le cas d'une caténaire alternative. Sa fonction principale est de réaliser une conversion continue alternative. Il fonctionne selon le principe de découpage de tension et permet de reconstituer un système de trois tensions déphasées de 120° aux bornes des phases du stator du moteur de traction. La valeur moyenne des signaux de sortie de l'onduleur est sinusoïdale. Le découpage engendre alors une variation de l'amplitude et de la fréquence de l'onde résultante appliquée au moteur. Ce procédé est appelé Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Son principe est résumé sur la figure II.6. Un des avantages des onduleurs de la traction électrique ferroviaire

est son aptitude à accepter un fonctionnement réversible permettant la récupération de l'énergie de freinage.

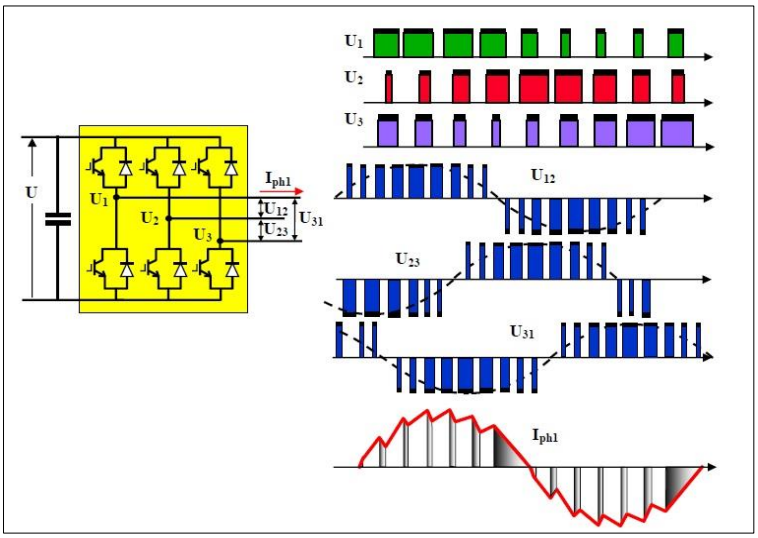


Figure II.6: Principe de fonctionnement de l'onduleur [Chapas, 2006]

II.2.2.3. Hacheur

Le hacheur s'utilise en freinage. Les moteurs de traction ont la propriété de fonctionner en moteur pour la traction des trains et en générateur pour le freinage. En se comportant en générateur, le moteur envoie de l'énergie vers l'onduleur de traction. Cette énergie de freinage se retrouve aux bornes du hacheur qui le dissipe dans la résistance R (figure II.7).

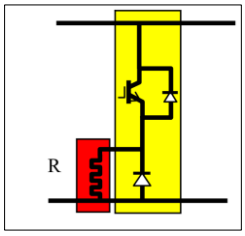


Figure II.7: Schéma du hacheur [Chapas, 2006]

Au travers de cette analyse au niveau Convertisseur on définit l'ensemble des contraintes. Elles sont électriques (la tension du bus continu, la puissance convertisseur, le couple délivré, les courants phases) ; environnementales (la température ambiante du convertisseur, l'humidité ambiante du convertisseur) et mécaniques (le niveau de vibration convertisseur et le niveau de choc).

II.2.3. Niveau IGBT : étude fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle consiste en la connaissance des différentes fonctions réalisées par l'IGBT dans son environnement de fonctionnement et en la déclinaison du profil de mission du niveau Train et Convertisseur vers le niveau IGBT. La fonction principale et les fonctions

contraintes de l'IGBT [Piton, 2015a] sont résumées dans le tableau II.1. On distingue une fonction principale et quatre fonctions contraintes. L'analyse fonctionnelle au niveau Train et au niveau Convertisseur a permis de mettre en évidence les variables et phases de fonctionnement à ces deux différents niveaux. Ces variables se déclinent elles aussi en contraintes et phases (blocage et commande) au niveau IGBT. Les contraintes de fonctionnement sont électriques (la tension du bus continu et le courant collecteur) ; thermiques (la température de jonction, la température de la semelle, la température des connectiques de puissance, amplitudes de cycles de température de jonction, amplitude de cycles de température de la semelle, amplitude de cycle de température des connectiques de puissance) ; environnementales (température ambiante et humidité relative ambiante) ; mécaniques (vibration, choc). On retrouve pour la plupart les mêmes variables de fonctionnement que le niveau Train ou le niveau Convertisseur mais les profils ne sont pas les mêmes.

Fonction principale	Fonction contraintes	Détail des fonctions contraintes
Commuter une puissance électrique	Fonction thermique : Evacuer les pertes	Assurer la stabilité mécanique[7]
		Assurer l'évacuation des calories dissipées par les puces
	Fonction isolation électrique	Assurer l'isolation électrique des puces et connexions
	Fonction mécanique : établir les connexions internes à l'IGBT	Etablir la connexion avec le circuit de puissance
		Etablir la connexion avec le circuit de commande
		Etablir les interconnexions avec les puces
		Assurer la stabilité mécanique des composants électroniques
	Fonction de protection : Protéger vis-à-vis des conditions environnementales	Protéger les puces et les connexions du milieu extérieur

Tableau II.1: Fonctions de l'IGBT

II.2.4. Niveau IGBT : étude dysfonctionnelle

À partir de la connaissance des contraintes subies par le composant, il est nécessaire de déterminer le niveau de dommage qui en résulte. Ce dommage peut être quantifié en termes de fatigue cumulée, de déformation plastique, de dégradation, de dérive de paramètres ou encore de casse du composant. À ce niveau, on définit également les lois de comportement intrinsèques

[7] La stabilité mécanique est la résistance aux contacts mécaniques

et les seuils de détérioration en utilisant la physique de défaillance [Belmehdi, 2014]. Il existe différents mécanismes de défaillance qui peuvent être dus aux conditions de fonctionnement ou à l'environnement [Vallon, 2003]. Ces mécanismes de défaillance sont de deux natures ; les contraintes et les défauts :

- les contraintes appliquées au composant durant son fonctionnement normal (tension, température, vibration, choc). Ces causes sont dites externes. Ces contraintes amènent le composant à des mécanismes de dégradation ou de vieillissement et peuvent le forcer à fonctionner hors de sa zone de sécurité ;
- les défauts intrinsèques au composant dus à des défauts de qualité des matériaux (malformation de l'oxyde de grille, impuretés dans les cristaux de silicium, défaut de packaging ou défauts dans le gel de silicone). Ces causes sont dites internes. Ces défauts intrinsèques peuvent être aggravés par les contraintes appliquées lors d'une utilisation normale de l'IGBT dans une application ferroviaire.

Une analyse AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) a été réalisée afin de mettre en évidence les différents mécanismes de défaillance. L'annexe A présente l'analyse complète sur les différentes composantes de l'IGBT : les fils de bonding, les soudures, les connectiques, le gel de silicone, la semelle, les puces IGBT et diode ainsi que leur métallisation. On détaillera par la suite les différents mécanismes de défaillance identifiés dans la littérature ayant un impact sur la fiabilité de l'IGBT ainsi que les modèles mathématiques existant qui les caractérisent.

II.2.4.1. Décollement des fils de bonding

Les phénomènes de décollement des fils de bonding sont des mécanismes de défaillance prépondérants qui ont été rapportés dans la littérature (Ciappa [2000] ; Coquery et al., [2003] ; Lefranc et al., 2000). Présents dans la partie active des modules IGBT et plus précisément à l'interfaçage avec les puces, les fils de bonding atteignent un nombre de 800 dans les applications moyenne et haute puissance avec des diamètres variant entre 100 et 500 µm. Les fils de bonding font transiter de forts courants et subissent de forts cyclages thermiques. Les fils sont dimensionnés pour des valeurs de distribution de densités de courant et des puissances de dissipation données. Lorsque ces limites viennent à être dépassées, des défaillances se produisent. L'indicateur de dégradation des fils de bonding est la tension V_{ce} (tension collecteur émetteur) des puces. Les fils sont soudés sur les puces IGBT et diodes initialement recouvertes d'une métallisation en Aluminium. Les puces soumises à de forts cyclages thermiques engendrent des fortes contraintes électromécaniques sur l'interface puce-fil de bonding. Cela s'explique par la différence notable de CTE (Coefficient d'Expansion Thermique) entre

l'Aluminium et le Silicium. On observe alors des microfissurations entre l'extrémité des fils de bonding et la métallisation à laquelle ils sont soudés. La fissure se propage au fil des cycles et progressivement le décollement du fil s'en suit. La figure II.8 montre un fil de bonding décollé de sa soudure.

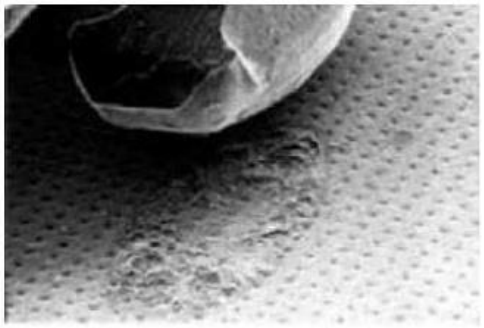


Figure II.8: Décollement du fil de bonding [Ciappa, 2002]

Les tests de vieillissement accélérés ont été effectués sur des IGBT pour mettre en évidence le phénomène de décollement du fil de bonding [Ciappa, 2000]. Les résultats sont donnés pour un seul fil de bonding, celui relié à l'émetteur. Le dispositif est soumis à des cycles périodiques de 3 s. Le point de fonctionnement de l'IGBT est réglé de telle sorte que la température maximale n'excède pas 373 K dans le but d'activer sélectivement le décollement du fil [Zehringer et Stuck 1996]. Le critère de défaillance est fixé à une baisse de *Vce*[8] de 10 % (Cova et al., [1997], Berg et Wolfgang [1998]). La déformation totale ε_{tot} du fil de bonding est donnée par :

$$\varepsilon_{tot} = L\,(\alpha_{Al} - \alpha_{Si})\,\Delta T \qquad \text{(II.1)}$$

où L est la longueur initiale du fil, ΔT les écarts de températures de tests, α_{Al} et α_{Si} les coefficients respectifs de dilatation de l'aluminium et du silicium. La déformation totale est la somme de la déformation dans la zone élastique ($\varepsilon_{elastic}$) et dans la zone plastique ($\varepsilon_{plastic}$). La déformation élastique est négligée ($\varepsilon_{elastic} \approx 0$).

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{elastic} - \varepsilon_{plastic} \approx \varepsilon_{plastic} \qquad \text{(II.2)}$$

Le nombre de cycles avant défaillance s'écrit alors à partir de la loi de Coffin-Manson basée sur la physique de défaillance :

$$N_f = a\,\Delta T^{-n} \qquad \text{(II.3)}$$

$$a = [L(\alpha_{Al} - \alpha_{Si})]^{-n} \qquad \text{(II.4)}$$

[8] *Vce est la tension collecteur émetteur de l'IGBT*

où N_f représente le nombre de cycles avant défaillance ; $\varepsilon_{plastic}$ la déformation plastique dans la zone de fatigue maximale ; a et n les coefficients du taux de fatigue estimés donnés par la figure II.9.

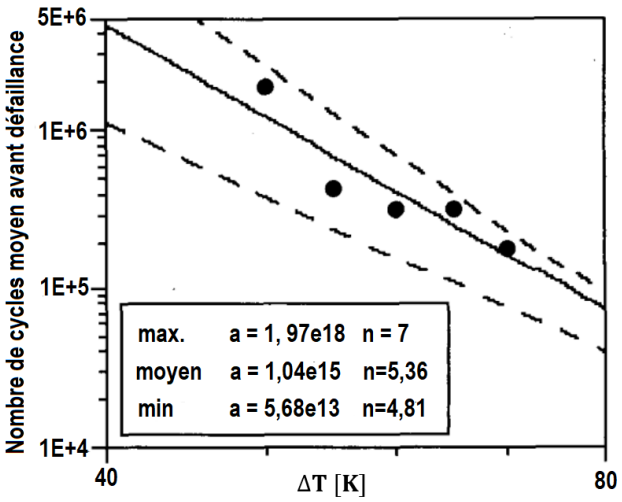


Figure II.9: Coefficients de la loi de Coffin-Manson [Ciappa, 2000]

Au regard de la large dispersion des données résultant de l'expérimentation, les courbes en pointillé correspondent à des valeurs maximales et minimales. Les valeurs moyennes correspondent à la courbe en trait plein.

Le modèle de Coffin-Manson est un modèle simplifié qui a été étendu pour prendre en compte la température de jonction maximum. Le modèle étendu est basé sur la loi empirique de Norris-Landzberg (Norris et Landzberg, [1969] ; Scheuermann [2012]) et est donné par la relation II.5.

$$AF_{decfilbond} = \left(\frac{\Delta Tj_{acc}}{\Delta Tj_{ref}}\right)^{n} Exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right)\left(\frac{1}{Tj_{max\,ref+273,15}} - \frac{1}{Tj_{max\,acc+273,15}}\right)\right] \qquad (II.5)$$

où

- $AF_{decfilbond}$ est le facteur d'accélération lié au phénomène de décollement du fil de bonding ;
- ΔTj_{acc}=110 K est l'amplitude de cycle de la température de jonction de l'IGBT dans les conditions accélérées ;
- $Tj_{max\,acc}$ =118°C est la température maximale de jonction de l'IGBT en conditions accélérées ;
- E_a = 0,8 eV est l'énergie d'activation ;
- k = 8,61E^{-5} eV K^{-1}est la constante de Boltzmann ;
- $Tj_{max\,ref}$ est la température de jonction maximale de l'IGBT en conditions de référence ;

- ΔTj_{ref} est l'amplitude de cycle de la température de jonction en conditions de référence ;
- n = 5 est une constante.

II.2.4.2. Fatigue des brasures

La brasure du substrat est soumise aux phénomènes de fatigue. Un effet de cisaillement provoqué par les variations de température finit par délaminer les brasures en commençant par les bords. La surface d'échange entre la puce et la brasure est ainsi diminuée et la résistance thermique de la brasure augmente. La figure II.10 montre les résultats obtenus après 43000 cycles accélérés par la microscopie acoustique d'un IGBT de caractéristiques 3000 V -1200 A.

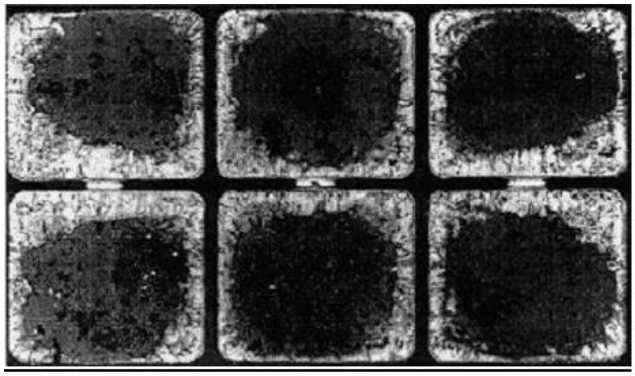


Figure II.10: Délamination de la brasure [Ciappa, 2002]

Le nombre de cycles limites avant délaminage de la brasure est donné par la formule de Coffin-Manson [Ciappa, 2002] :

$$N_f = \frac{1}{2}\left(\frac{L\,\Delta\alpha\,\Delta T_c}{\gamma\,\chi}\right)^{\frac{1}{c}} \qquad \text{(II.6)}$$

où N_f est le nombre de cycles thermiques avant défaillance ; L la dimension latérale de la brasure; $\Delta\alpha$ la différence de CTE des matériaux de la face supérieure et inférieure ; ΔT_c l'amplitude de cycle de la température de la semelle ; γ l'épaisseur de la brasure ; χ le facteur de ductilité ; c la constante qui dépend de la nature du matériau. Le critère de défaillance est 20% d'augmentation de la résistance thermique.

Le modèle de Coffin-Manson a été étendu pour prendre en compte d'autres paramètres tels que la température maximum de la semelle et le temps de cycle. Ce modèle est basé sur la loi de Norris et Landsberg. Le modèle de facteur d'accélération est donné par la relation (II.7) [Kaminski et Zorn, 2014].

$$AF_{fat_{soud}} = \left(\frac{\Delta T_{c\,acc}}{\Delta T_{c\,ref}}\right)^{n}\left(\frac{t_{Tc\,acc}}{t_{Tc\,ref}}\right)^{m} exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right)\left(\frac{1}{Tc_{\max ref}+273{,}15}-\frac{1}{Tc_{\max acc}+273{,}15}\right)\right] \qquad \text{(II.7)}$$

où

- $\Delta T_{c\,acc}$=30 K est l'amplitude maximale du cycle de température de la semelle de l'IGBT dans les conditions accélérées ;
- $t_{Tc\,acc}$= 30s est le temps du cycle de température de la semelle de l'IGBT dans les conditions accélérées ;
- $Tc_{\,max\,acc}$=120°C est la température maximale de la semelle de l'IGBT dans les conditions accélérées.
- *n* et *m* sont des coefficients empiriques ;
- E_a= 0,66 eV est l'énergie d'activation ;
- k= 8,61.10^{-5} Ev/K est la constante de Boltzmann ;
- t_{Tcref} est le temps du cycle de la température de la semelle en conditions de référence ;
- $Tc_{\,max\,ref}$ est le temps du cycle de la température de la semelle dans les conditions de référence ;
- $\Delta Tc_{\,ref}$ est l'amplitude du cycle de la température de la semelle en conditions de référence. Les conditions de référence sont les conditions réelles de fonctionnement sur une application.

II.2.4.3. Corrosion de la terminaison de la puce

Les modules IGBT ne sont pas étanches, l'eau pénètre dans le boîtier. Lors d'une campagne d'investigations aux bancs de tests à ALSTOM TARBES, il est apparu que les IGBT absorbaient sensiblement de l'eau. L'essai a consisté à mettre un lot d'IGBT de tension 3300 V de quatre fabricants sous tension permanente dans une étuve à 65°C, 65% d'humidité relative. La durée du test est de 1000 heures. Le lot d'IGBT a subi tous les essais avec un séchage forcé (≥ 100°C/± 12 heures) entre deux séances. Dans ces conditions, l'absorption d'humidité est complètement réversible [Servière, 2017].

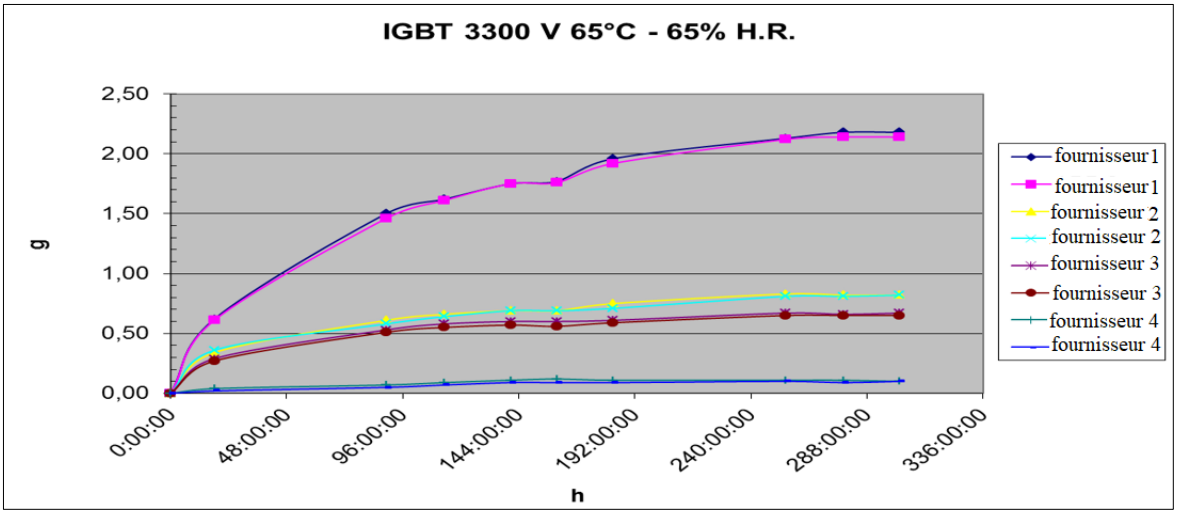


Figure II.11: Absorption de l'eau par les IGBT [Servière, 2017]

Les résultats de ces essais (figure II.11) sont donnés pour 8 IGBT dont 2 de chaque fournisseur. Ils montrent que les IGBT ont pris des grammes d'eau en quelques dizaines d'heures. Il y'a une variabilité dans la quantité d'eau retenue par chaque IGBT en fonction de sa technologie. L'humidité pénètre donc dans le boîtier, est diffusé dans le gel de silicone et atteint les puces semi-conductrices et leurs assemblages. Quand l'humidité atteint la puce, il se produit un phénomène de corrosion qui conduit graduellement à la baisse des performances électriques pouvant résulter à une défaillance de l'IGBT.

En présence d'humidité dans le boîtier de l'IGBT, Zorn et Kaminski [2015a] ont montré que la région la plus critique où apparaît le phénomène de corrosion est la terminaison de la puce. L'aluminium de la puce en contact avec l'eau crée une couche d'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$ à sa surface. À l'anode, l'hydroxyde d'aluminium est oxydé pour former des ions positifs Al^{3+} (relation II.8).

$$Al(OH)_3 + 3H^+ \leftrightarrows Al^{3+} + 3H_2O \qquad \text{(II.8)}$$

Ces ions migrent vers la cathode où ils régissent avec les ions hydroxyde pour former des ions aluminate $[Al(OH)_4]^-$ (relation II.9).

$$Al(OH)_3 + OH^- \rightleftarrows [Al(OH)_4]^- \qquad \text{(II.9)}$$

Le processus de formation et de migration des ions aluminate est donné par la figure II.12a. La figure II.12b montre une image de la terminaison de la puce d'une diode corrodée sur un IGBT de caractéristiques 1700V/600A.

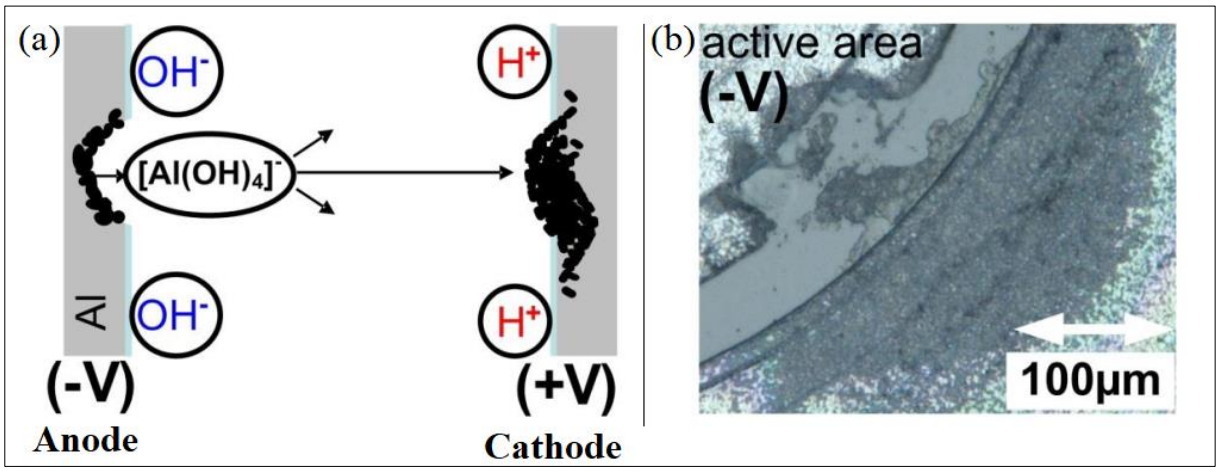


Figure II.12: (a) processus de corrosion de l'aluminium (b) dissolution de la métallisation d'une puce diode d'un IGBT 1700 V/600 A [Zorn et Kaminski,2015a]

Des tests de vieillissement accélérés ont été mis en place pour mettre en évidence le phénomène de corrosion de la puce [Kitajima et al., 2017].

Le modèle dépend de trois paramètres : l'humidité, la tension du bus continu et la température. Il s'écrit :

$$AF_{cor_{puce}} = \left(\frac{RH_{acc}}{RH_{ref}}\right)^{x} \left(\frac{Vdc_{acc}}{Vdc_{ref}}\right)^{y} \exp\left[\left(\frac{Ea}{k}\right)\left(\frac{1}{Tj_{ref}+273,15} - \frac{1}{Tj_{acc}+273,15}\right)\right] \quad \text{(II.10)}$$

où

- $T_{j_{acc}}$=85°C est la température de jonction dans les conditions accélérées.
- RH_{acc}=85% est l'humidité relative de l'IGBT dans les conditions accélérées.
- Vdc_{acc}=2000 V est la tension dans les conditions accélérées.
- x et y sont des exposants empiriques.
- RH_{ref} est l'humidité relative de l'IGBT dans les conditions de référence.
- Vdc_{ref} est la tension appliquée à l'IGBT dans les conditions de référence.
- Tj_{ref} est la température de jonction de l'IGBT dans les conditions de référence.
- E_a=0,79 eV est l'énergie d'activation.
- k=8,617.10^{-5}eV K^{-1} est la constante de Boltzmann.

II.2.4.4. Rayonnement cosmique

Les rayons cosmiques sont des particules de très haute énergie essentiellement des protons qui se trouvent dans l'espace et qui pénètrent l'atmosphère. Ces rayons n'atteignent pas la surface de la terre directement mais entrent en collision avec des particules atmosphériques. La plupart des particules générées à la suite de cette collision sont inoffensifs pour les semi-conducteurs mais certains, en particulier les neutrons, peuvent provoquer la casse de composants électroniques. Au début des années 1990, des défaillances dues aux rayons cosmiques ont été détectées dans les dispositifs à semi-conducteurs fort courant et haute tension. Le rayonnement cosmique affecte aussi les IGBT [Zeller, 1997]. Le déclenchement de cette panne s'opère sans signe précurseur en quelques nanosecondes. Aujourd'hui, les dispositifs à semi-conducteur fort courant et haute tension sont conçus de telle sorte que les taux de défaillance liés aux rayons cosmiques soient réduits à des niveaux acceptables. Les défaillances dues aux rayons cosmiques peuvent être prises en compte dans les calculs de fiabilité des dispositifs électroniques de puissance. Le concepteur d'IGBT ABB fournit un modèle de calcul du taux de défaillance dû aux rayons cosmiques [ABB, 2013]. Ce modèle a été admis dans la communauté de la fiabilité des composants de puissance pour mettre en évidence le phénomène de rayonnement cosmique. Ce modèle permet d'estimer le taux de défaillance, d'ajuster les paramètres, notamment la tension du bus continu V_{DC} ou de choisir le meilleur dispositif pour une application donnée.

La formule du taux de défaillance est donnée par la relation II.11 :

$$\lambda(V_{DC}, T_j, h) = C_3\, exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DC}}\right)\, exp\left(\frac{25 - T_j}{47{,}6}\right)\, exp\left(\frac{1-\left(1-\frac{h}{44300}\right)^{5{,}26}}{0{,}143}\right) \qquad \text{(II.11)}$$

Le modèle dépend de trois facteurs. Le premier facteur $C_3 \exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DC}}\right)$ dépend de la tension continue V_{DC} qui doit être supérieur à la constante C_1 dans des conditions de température de 25°C et h une altitude au niveau de la mer et est exprimée en mètres. Le second $\exp\left(\frac{25-T_j}{47{,}6}\right)$ dépend de la température de la jonction en °C et vaut 1 lorsque la température de jonction T_j est égal à 25°C. Des expériences ont montré que les taux de défaillances diminuent exponentiellement avec la température et indépendamment de la nature du dispositif. Le dernier terme $\exp\left(\frac{1-\left(1-\frac{h}{44300}\right)^{5{,}26}}{0{,}143}\right)$ dépend de l'altitude (h est exprimé en m, le niveau de la mer étant pris comme altitude nulle). Ce terme vaut 1 si le dispositif est à une altitude de 0 m (niveau de la mer). Ce terme suppose une projection des rayons cosmiques et est donc basé sur la formule barométrique. Les dispositifs sont affectés de la même manière, donc ce terme ne dépend pas de ces paramètres. Les paramètres C_1, C_2, C_3 sont des constantes. Par exemple, pour un IGBT de caractéristiques 1500 V, 3300 V, les paramètres sont : C_1=1221 V ; C_2 = 14388 ; et C_3= 10^9.

Les défaillances dues aux rayons cosmiques dans le cas des IGBT ont pour effet l'abaissement de la tension seuil du composant ce qui la rend plus sensible aux perturbations. L'indicateur de dégradation est l'augmentation du courant de fuite de ces puces à l'état bloqué [Vallon, 2003].

II.2.4.5. Dépassement de l'aire de sécurité

L'aire de sécurité appelée encore RBSOA (Reverse Bias Safe Operating Area) désigne un ensemble de conditions particulières de fonctionnement définies par le fournisseur de l'IGBT. C'est une zone de sécurité dans laquelle l'IGBT peut fonctionner sans subir de dommage. Concrètement, elle est définie dans un plan courant tension (courant collecteur versus tension collecteur émetteur). La figure II.13 montre l'aire de sécurité de l'IGBT CM450DA-66X (3300 V- 450A) du fournisseur Mitsubishi.

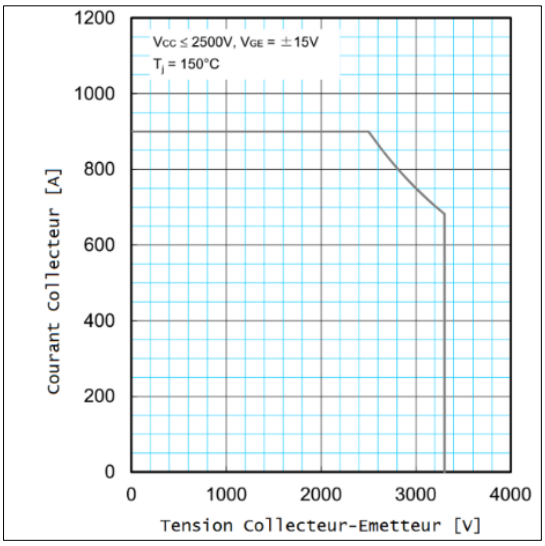


Figure II.13: Aire de sécurité de l'IGBT [Mitsubishi CM450DA-66X, 2016]

Lorsque l'IGBT sort de cette zone, des phénomènes électriques ou thermiques peuvent apparaitre induisant la casse immédiate du composant. Le passage entre un régime de fonctionnement normal et un régime de fonctionnement au-delà de l'aire de sécurité (régime extrême) peut être due à [Leturc, 2000]:

- des contraintes statiques trop importantes (tension à l'état bloqué, courant à l'état passant, températures des puces) ;
- des contraintes dynamiques trop élevées.

Parmi les régimes extrêmes, on a les limites thermiques locales (fonctionnement à des températures dépassant les spécifications). Les phénomènes électriques tels que le latch up, l'avalanche, le claquage de la grille peuvent apparaitre lorsque le composant est amené à fonctionner au-delà de sa zone de sécurité. La figure II.14 montre les phénomènes se produisant au-delà de l'aire de sécurité.

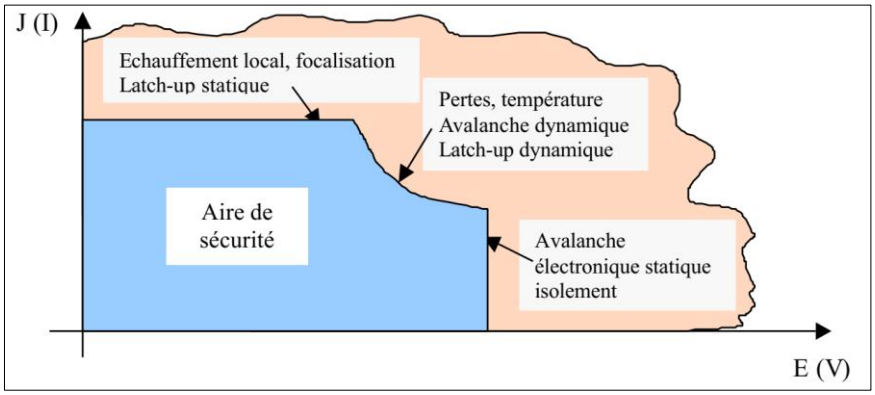


Figure II.14: Phénomènes rencontrées hors de l'aire de sécurité [Vallon, 2003]

Le phénomène de Latch-up se crée lors de la formation d'une structure NPNP parasite résultant de la proximité de deux transistors bipolaires (réels et parasites) l'un NPN et l'autre PNP

[Rabier, 2007]. On distingue le latch-up statique et le latch-up dynamique. Ces phénomènes ne se manifestent pas un effondrement soudain de la tension collecteur-émetteur du composant et lorsqu'ils se produisent, empêchent l'IGBT d'être commandable par la grille. Le mode de défaillance observé lorsque ces phénomènes se produisent est un court-circuit de la base, de l'émetteur et du collecteur de l'IGBT. Le latch-up dynamique découle de la présence simultanée d'un fort courant et d'une forte tension dans le composant, généralement lors d'une commutation ou d'un court-circuit. Le champ électrique est élevé par la même occasion. Le latch-up statique est lié à la mise en conduction du transistor parasite intrinsèque à l'IGBT. Un fort courant traverse la résistance parasite de la couche P+ prise entre les couches N- et N+. Ce courant génère une chute de tension importante entraînant donc la mise en conduction du transistor parasite $N^+P^+N^-$.

Le phénomène d'avalanche apparaît lorsque le champ électrique à l'intérieur du silicium de la puce est suffisamment important pour accélérer les électrons jusqu'au point où lorsqu'ils percutent des atomes de silicium, ils libèrent d'autres électrons. Le nombre d'électrons libres augmente alors rapidement car les nouveaux électrons libres en entraînent à nouveau d'autres. Ce processus de multiplication entraîne le claquage de la puce au-delà d'un certain seuil. La tension de claquage par avalanche dans la puce représente une limite à ne pas dépasser en statique comme en dynamique [Vallon, 2003].

Le claquage de la grille apparaît lorsque la tension entre grille et émetteur trop importante et induit un champ électrique important dans l'oxyde de grille.

Le fabricant d'IGBT MITSUBISHI a développé un modèle permettant de prédire le taux de défaillance dû au dépassement de l'aire de sécurité. On retient ce modèle pour la suite de notre travail car il a été admis pour l'étude du phénomène de dépassement de l'aire de sécurité dans le domaine de la prédiction de la fiabilité de l'IGBT.

Le modèle donnant le taux de défaillance dû au phénomène de RBSOA [S. Iura et I. Umezaki, 2005] est donné par l'équation suivante :

$$\lambda_P = \lambda_b \ \pi_T \ \pi_A \ \pi_R \ \pi_S \ \pi_Q \ \pi_E \qquad \text{(II.12)}$$

où λ_P est exprimé en pannes/10^6h. λ_b est le taux de défaillance de base d'un transistor. π_T est le facteur de température ; $\pi_T = \exp\left[-2114\left(\frac{1}{T_j+273,15} - \frac{1}{298}\right)\right]$; T_j étant la température de jonction. π_A est le facteur d'application égal à 0,7. π_R est le Power rating factor ; $\pi_R = {P_R}^{0,37}$; P_R désigne les pertes joules dans le convertisseur. π_S est Voltage Stress Factor; $\pi_S = \frac{V_{cc}}{V_{ces}}$. π_Q est le facteur de qualité égal à 1. π_E est le facteur environnemental égal à 9 pour les applications

de transport. Les estimations du taux de défaillance pour l'IGBT CM600HG-130 H pour des conditions données sont résumées dans le tableau II.2 :

Tj	Vcc	Ic	Pr*	λb	πT	πA	πR	πS	πQ	πE	λP x 10^3[FIT]
25	3000	100	282	7.4.E-04	1.0	0.7	8.1	0.21	1	9	**7.9**
25	3000	1350	3386	7.4.E-04	1.0	0.7	20.2	0.21	1	9	**19.8**
25	4000	1200	3352	7.4.E-04	1.0	0.7	20.2	0.39	1	9	**36.6**
125	3000	100	323	7.4.E-04	5.9	0.7	8.5	0.21	1	9	**49.0**
125	3000	1350	3944	7.4.E-04	5.9	0.7	21.4	0.21	1	9	**123.6**
125	4000	1200	3941	7.4.E-04	5.9	0.7	21.4	0.39	1	9	**229.5**

Tableau II.2: Estimation du taux de défaillance dans différentes conditions

Les cinq phénomènes décrits précédemment (décollement du fil de bonding, fatigue de la brasure, corrosion de la terminaison de la puce, rayonnement cosmique et dépassement de l'aire de sécurité) sont les phénomènes prépondérants rencontrés dans l'étude de la fiabilité des IGBTs où des essais et des tests de vieillissement ont été réalisés pour déterminer les paramètres des modèles. D'autres mécanismes ont été identifiés comme ayant un impact sur la fiabilité de l'IGBT, des modèles ont été proposés dans certains cas pour les étudier. Dans une démarche de mettre en place un modèle bayesien le plus exhaustif possible intégrant tous les mécanismes de défaillance connus amenant à la dégradation et à la casse de l'IGBT, l'état de l'art a été prolongé à ces autres mécanismes de défaillance décrit par la suite.

II.2.4.6. Déformation des métallisations en surface des puces

Ce phénomène est aussi connu sous le nom de reconstruction de l'aluminium [Ciappa et Malberti, 1996]. La métallisation en surface des puces subit des phénomènes périodiques de traction et de compression lors des cyclages thermiques. La différence de CTE entre l'Aluminium et le Silicium entraîne des contraintes thermomécaniques qui dépassent la limite de déformation élastique admissible par le contact métallisation/Silicium. Le silicium est un matériau avec un faible coefficient de dilatation thermique et une forte résistance à la déformation comparativement à l'aluminium, qui a, en outre, une limite élastique relativement basse.

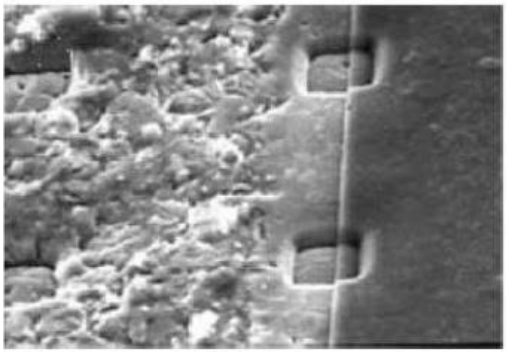


Figure II.15: Déformation en surface de la métallisation [Ciappa, 2002]

Lorsque la couche de métallisation est soumise à une température supérieure à 110 °C, elle atteint sa limite élastique et se retrouve dans la zone de déformation plastique. Par conséquent, des relaxations de contraintes peuvent avoir lieu sous forme de déplacement de dislocations ou encore de glissements de joints de grains. Cette "reconstruction" de l'aluminium modifie la structure en surface de la métallisation (figure II.15), fragilise les connexions [Bouarroudj-Berkani, 2008], réduit sa section active [Schubert et al., 2003] et entraîne une augmentation de la résistance superficielle [Lutz et al., 2008]. Cette dégradation entraîne une augmentation de la résistance de la métallisation jusqu'à destruction de la puce. Il n'existe pas dans la littérature de modèle mathématique qui décrit ce phénomène.

II.2.4.7. Corrosion des fils de bonding

Dans le cas des fils de bonding, l'aluminium en contact avec de l'oxygène contenu dans l'atmosphère forme une couche de Al_2O_3 suivant l'équation II.13:

$$4\,Al + 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3 \qquad \text{(II.13)}$$

La couche d'oxyde d'aluminium formée provoque la passivité du métal. Cette passivation s'opère également en présence d'eau pure. L'oxyde d'aluminium se transforme alors en une couche très soluble d'hydroxyde d'aluminium ($Al(OH)_3$). En présence d'un électrolyte, l'aluminium est corrodé [Ciappa, 2002]. La figure II.16 montre l'impact de la corrosion sur un fil d'aluminium. Le fil s'est rompu.

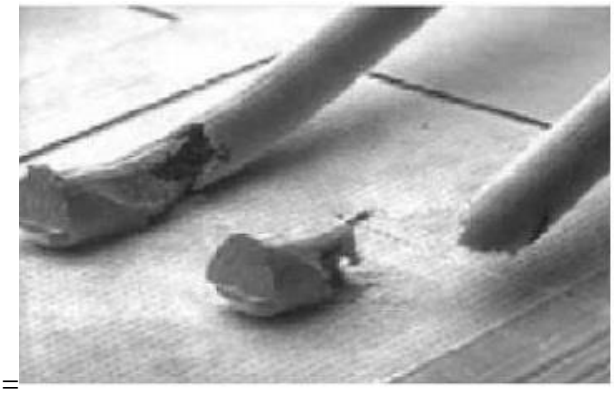
=

Figure II.16 : Cassure d'un fil de bonding suite à la corrosion [Ciappa, 2002]

Des tests permettent d'accélérer les mécanismes de défaillance dus à la corrosion par exemple le test 85/85 (85°C et 85% d'humidité). Les résultats des tests sont extrapolés à des modèles. Le premier modèle est un modèle exponentiel nommé Reciprocal Exponential Model qui donne le temps de fonctionnement avant défaillance comme suit [Blish et al., 2000] :

$$T_f = C_0 \ \exp\left(\frac{b}{RH}\right)\ f(V)\ exp\left(\frac{E_a}{k\,T_j}\right) \qquad \text{(II.14)}$$

Le second modèle est celui de Peck :

$$T_f = A_0\, RH^{-N}\, f(V)\, exp\left(\frac{E_a}{k*T_j}\right) \quad \text{(II.15)}$$

Le troisième modèle est le modèle exponentiel :

$$T_f = B_0 \exp(-a\, RH\, f(V) \exp\left(\frac{E_a}{k\, T_j}\right) \quad \text{(II.16)}$$

Le quatrième est celui de Lawson :

$$T_f = C_0\, RH^2\, f(V)\ \exp\left(\frac{E_a}{k\, T_j}\right) \quad \text{(II.17)}$$

Dans ces quatre expressions, f(V) est une fonction de la tension appliquée à l'IGBT, RH est l'humidité relative au niveau de l'IGBT exprimé en % (100% si saturé). C_0 , A_o , B_o , a et b sont des constantes, k est la constante de Boltzmann, et T_j est la température de jonction de l'IGBT.

II.2.4.8. Fatigue des brasures des connectiques de puissance

Les brasures des connectiques de puissance sont également soumises à des cyclages thermiques. Les deux modèles présentés pour la fatigue de la brasure restent valables pour modéliser la fatigue des brasures des connectiques de puissance à la différence qu'il faut prendre en compte les températures et les amplitudes de cycles des connectiques de puissance. Ainsi le modèle de durée de vie des connectiques de puissance est donné par la relation II.18 et leur modèle étendu par la relation II.19.

$$N_f = \frac{1}{2}\left(\frac{L\, \Delta\alpha\, \Delta T_{connect}}{\gamma\, \chi}\right)^{\frac{1}{c}} \quad \text{(II.18)}$$

$$AF_{fat_{connec}} = \left(\frac{\Delta T_{connect\ acc}}{\Delta T_{connect\ ref}}\right)^n \left(\frac{t_{Tconnect\ acc}}{t_{Tconnec\ ref}}\right)^m exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right)\left(\frac{1}{Tconnect_{\max ref}+273{,}15} - \frac{1}{Tconnec_{\max acc}+273{,}15}\right)\right] \quad \text{(II.19)}$$

où

- $\Delta T_{connect}$ (K) est l'amplitude de cycle de la température des connectiques de puissance ; $\Delta T_{connect\ acc}$ est l'amplitude de cycle de la température des connectiques de puissance en conditions accélérées ;
- $\Delta T_{connect\ ref}$ (K) est l'amplitude de cycle de la température des connectiques de puissance en conditions de référence ;
- $Tconnec_{\ max\, acc}$ (°C) est la température maximale de la connectique de l'IGBT dans les conditions accélérées.
- *n* et *m* sont des coefficients empiriques obtenus par des essais accélérés ;

- E_a est l'énergie d'activation en eV.
- k = 8,61E^{-5} Ev/K est la constante de Boltzmann ;
- $t_{Tconnectacc}$ est le temps du cycle de la température de la connectique de puissance en conditions de référence en seconde (s) ;
- $t_{Tconnecref}$ est le temps du cycle de la température de la connectique de puissance dans les conditions de référence en seconde (s).

Dans la littérature, on ne dispose pas de tests de vieillissement accélérés pour estimer les paramètres des modèles présentés pour le phénomène de fatigue des brasures des connectiques de puissance.

II.2.4.9. La migration électrochimique (ECM)

C'est une des causes racines des phénomènes de défaillances observés sur les modules de puissance à IGBT car elle réduit considérablement les capacités d'isolations entre les matériaux conducteurs [Bumiller et Hillmann, 2006]. L'électromigration chimique est régie par 3 processus : la corrosion de la cathode, la migration des ions métalliques et le dépôt de métaux à l'anode. Le phénomène de migration électrochimique découle du phénomène de corrosion lui-même causé par l'humidité [Zorn et Kaminski, 2015a]. Par la formation d'une fine couche d'eau à la surface de l'isolant reliant deux conducteurs portés à des potentiels différents, des ions (hydroxyde OH- et hydrogène H+) issus et de la décomposition de l'eau (figure II.17a) vont migrer de l'anode vers la cathode sous l'effet du champ électrique. La couche de la métallisation de la puce en cuivre en argent ou en aluminium se décompose en ions métalliques M^{n+} migrent vers l'anode. À la rencontre de ces ions sous l'effet du champ électrique, il se forme alors des dendrites (oxydations métalliques) qui ont une structure arborescente (figure II.17 b). Ces dendrites détériorent les capacités d'isolation des isolants entre conducteurs et finalement conduisent à une rupture de la puce.

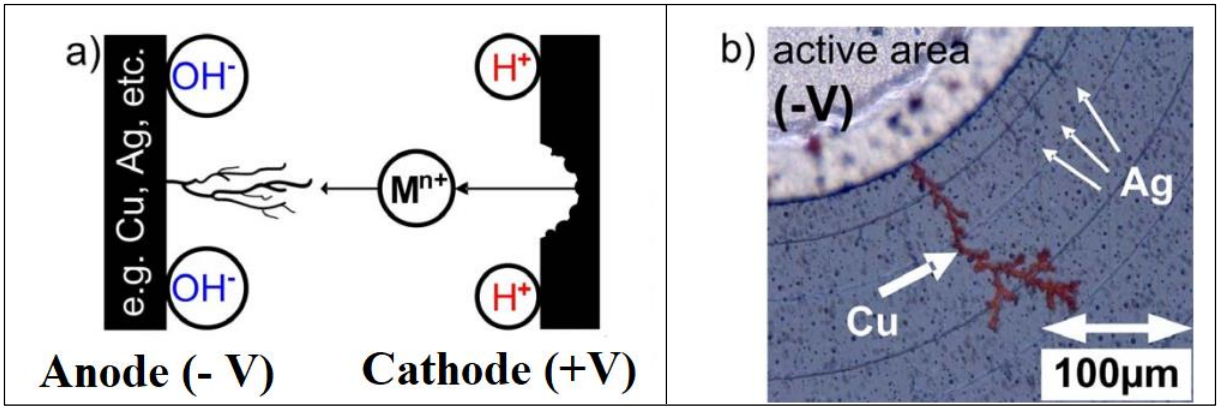


Figure II.17: (a) Principe de l'électromigration chimique (b) Formations de dendrites de cuivre [Zorn et Kaminski, 2015b]

Les facteurs ayant une influence sur la migration électrochimique sont la température, l'humidité relative, la tension de polarisation, la nature du matériau, la distance entre conducteurs.

Des modèles sont identifiés dans la littérature pour estimer le temps de fonctionnement avant défaillance en fonctionnement dû au phénomène d'électromigration chimique. Le premier modèle, celui d'Arrhenius donne le temps de fonctionnement avant défaillance comme suit :

$$T_f = A_1 \, exp\left(\frac{E_a}{k \, T_j}\right) \tag{II.20}$$

A_1 est un paramètre d'ajustement ; E_a est l'énergie d'activation de la réaction chimique ; k est la constante de Boltzmann ; T_j est la température de jonction. Il est à noter que le modèle d'Arrhenius inclut seulement les contraintes temporelles, ce qui exclut la possibilité de modéliser les interactions avec d'autres contraintes.

Le modèle d'Eyring répond à cette insuffisance en ajoutant l'effet des autres contraintes (humidité relative, tension).

$$T_f = A_2 \, T^{\alpha} \, exp\left(\frac{E_a}{k \, T_j} + \left[\beta + \frac{\chi}{T}\right] \, S_1\right) \tag{II.21}$$

A_2 est un paramètre d'ajustement ; α, β, χ sont des constantes représentant les interactions entre contraintes ; $S_1, S_2, \ldots \, S_n$ représentent les n différentes contraintes qui peuvent être considérées (humidité relative, tension). Ainsi le modèle d'Eyring reformule celui d'Arrhenius avec plus de détails et avec l'inconvénient d'une complexité et d'une incertitude en additionnant des contraintes supplémentaires.

Le modèle de Peck donne le temps de bon fonctionnement avant défaillance par :

$$T_f = A_0 \, RH^{-N} \, f(V) \, exp\left(\frac{E_a}{k \, T_j}\right) \tag{II.22}$$

où A_o est une constante dépendant du matériau, RH l'humidité relative, n est une constante déterminée empiriquement, E_a est l'énergie d'activation, k est la constante de Boltzmann, T_j est la température de jonction. Ces modèles présentés ne sont pas retenus pour l'étude du phénomène de migration électrochimique.

II.2.4.10. Fissuration des fils de bonding

Ce sont des défaillances qui ont une faible occurrence sur les modules de nos jours. Néanmoins elles apparaissent après des essais d'endurance longs spécialement dans le cas où la soudure

ultrasonique n'a pas été optimisée. La cause majeure est la variation de température et des cycles thermiques qui entraînent des contraintes thermomécaniques.

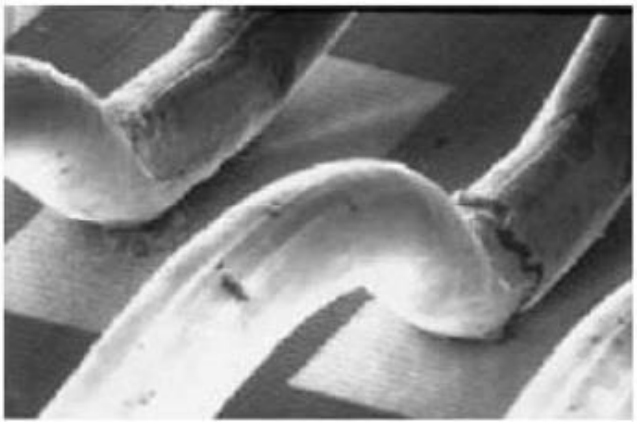


Figure II.18: Fissuration du fil de bonding [Vallon, 2003]

Après un certain nombre de cycles, le fil est dilaté, il se produit une flexion au niveau de ces extrémités, qui conduit à sa fissuration (figure II.18). Pour un fil mesurant 1 cm et subissant un δ = 50 ˚C, la boucle se déplace de 10 µm ce qui conduit une variation d'angle entre le fil et la métallisation d'environ 0,05˚ [Ciappa, 2002]. Des modèles analytiques permettent de prédire le nombre de cycles thermiques avant fissuration des fils de bonding. Le modèle de Schafft donne le nombre de cycles avant défaillance par la formule suivante :

$$N_f = A\ {\varepsilon_f}^{-n} \tag{II.23}$$

Où A et n sont des constantes dépendant du matériau. Les valeurs de A = $3{,}9.10^{10}$ et n =-5,13 sont rencontrées dans les applications micro-électroniques pour des diamètres de fil inférieurs à 100 µm [Ciappa, 1994]. ε_f est l'effort du fil donné par la relation :

$$\varepsilon_f = \frac{r}{\rho_o}\left(\frac{arcos((\cos\psi_o)(1-\Delta\alpha\Delta T))}{\psi_o} - 1\right) \tag{II.24}$$

où Δα représente la différence de coefficient d'expansion thermique entre l'Aluminium et le Silicium. r, ψ_0, ρ_0 sont des paramètres géométriques du fil de bonding.

Le modèle décrit pour l'étude la fissuration du fil de bonding ne sera pas retenu.

II.2.4.11. Décharges partielles dans les isolants

Une décharge partielle est une décharge électrique localisée qui court-circuite partiellement l'intervalle isolant entre deux conducteurs sous l'effet d'une tension élevée. Ce phénomène est causé par des inclusions gazeuses qui peuvent être contenues dans les matériaux isolants. Ces inclusions sous l'effet de la tension créent des micro-décharges très localisées généralement au voisinage des discontinuités du champ électrique. Ces décharges, lorsqu'elles sont répétitives

vont générer la carbonisation de l'isolant, le dégagement local de température et l'émission de rayonnement à haute température, qui vont modifier les caractéristiques de l'isolant. Les inclusions gazeuses s'agrandissent et perforent l'isolant. Le phénomène de contamination de l'ion active lui aussi le phénomène de décharges partielles dans les isolants. La contamination ionique résulte du déplacement d'ions mobiles en présence de champ électrique et de la tension. Il se forme alors un canal conducteur dans l'isolant par claquage diélectrique. Les phénomènes de décharges partielles se produisent dans tous les isolants. L'intensité de décharge dépend de la qualité du matériau isolant et de la densité du champ électrique [Lhommeau, 2007]. Dans le cas du substrat isolant et de l'oxyde de grille, ils perdent leurs propriétés diélectriques et le courant de fuite se voit augmenté [Zéanh, 2009]. Ce phénomène est couramment observé en microélectronique où l'épaisseur (Manca et Wondrak [2000] ; Pompl et Röhner [2005]) est de quelques nanomètres.

II.2.4.12. Vieillissement et défaillance des oxydes de grille

Les oxydes de grille jouent le rôle de diélectrique dans les modules IGBT. Les défaillances intervenant dans l'oxyde de grille sont dues aux mouvements de charge au sein du diélectrique ou à l'interface entre le diélectrique et le semi-conducteur. Le champ électrique appliqué aux oxydes de grille participe à l'injection de charges à travers l'interface. L'oxyde de grille perd alors de ses propriétés d'isolant électrique. Un canal conducteur apparaît et entraine la destruction locale du diélectrique par des phénomènes thermiques induits par le composant en court-circuit [Micol, 2007]. L'oxyde de grille claque lorsque l'accumulation de défauts atteint un niveau critique. On parle alors de claquage du diélectrique dépendant du temps (en anglais TDDB pour Time Dependent Dielectric Breakdown). Deux modèles mettent en évidence ce phénomène : l'E-model et le 1/E model.

L'E-model montre une dépendance exponentielle au champ électrique traversant le diélectrique [McPherson et Mogul, 1998] :

$$T_f = A_0 \, exp(-\gamma \, E_{ox}) \, exp\left(\frac{E_a}{k \, T_j}\right) \tag{II.25}$$

où A_o est une constante dépendant du matériau et du process ; γ est le paramètre d'accélération du champ dépendant de la température. E_{ox} est le champ électrique traversant le diélectrique en MV/cm. E_a est l'énergie d'activation. T_j est la température de jonction de l'IGBT et k est la constante de Boltzmann. Pour les défauts intrinsèques dans l'oxyde de silicium avec les isolants d'épaisseur <100 picomètres, le paramètre d'accélération du champ γ est compris entre 2,5 et 3,5. L'énergie d'activation E_a quant à lui est compris entre 0,6 et 0,9.

Le 1/E Model [Schuegraf et Hu, 1993] se nomme 1/E car le temps de fonctionnement avant défaillance montre une dépendance exponentielle à l'inverse du champ électrique E_{ox} dans le diélectrique.

$$T_f = \tau_o(T)\ \exp\left(\frac{G(T)}{E_{ox}}\right) \tag{II.26}$$

où $\tau_o(T)$ est un facteur dépendant de la température. Il prend une valeur sensiblement égale à $10^{-11} sec$. G est un paramètre d'accélération du champ, égal à 350 MV/cm. E_{ox} est le champ électrique à travers le diélectrique en MV/cm.

II.2.4.13. Claquage diélectrique du gel

Le gel de silicone présent dans les IGBT permet la tenue diélectrique de ses composants internes. Il joue un rôle de protection de ses composants contre les agressions de l'environnement telles que les contaminants chimiques ou l'humidité. Le gel est exposé au phénomène de décharges partielles [Hong et al., 1998] amenant à son claquage [Mitic et Lefranc, 2002]. Les claquages diélectriques sont généralement localisés à l'interface céramique-gel entre deux métallisations de potentiels électriques différents et les bulles de gaz emprisonnés dans le gel lors de la mise en place du gel. La littérature ne présente pas de modèle d'indicateurs de défaillance dûs au phénomène de claquage du gel.

II.2.4.14. Fissuration de la puce, du substrat et du boitier

Les matériaux utilisés dans le processus de fabrication de l'IGBT sont des matériaux fragiles. L'une des principales hypothèses de la mécanique de la rupture des matériaux fragiles est que la forte concentration de contraintes lors de dommages préexistants entraîne la rupture sous l'influence de contraintes mécaniques externes. Une rupture fragile ultime peut se produire soudainement sans aucune déformation plastique, lorsqu'une fissure initiale est présente, dont la longueur dépasse une taille critique, caractéristique de chaque matériau fragile. Les défaillances dues à la fissuration sont généralement observées immédiatement après le montage ou la mise sous tension de l'appareil. Cependant, même si la fissure initiale n'atteint pas la longueur critique, elle peut se développer par propagation des fissures sous l'influence des contraintes appliquées, jusqu'à ce que le seuil de rupture fragile soit dépassé. Cela se traduit généralement par des défaillances précoces sur le terrain, comme dans le cas des courts-circuits, qui sont dues à la propagation d'une fissure à travers le polyoxyde à la suite d'un pré-endommagement introduit lors du soudage par fil. Des défauts préexistants peuvent être générés, par des problèmes de traitement (par exemple lors du découpage en dés), par des problèmes d'assemblage (par exemple une liaison par fil dur) ou par une soudure (par exemple des vides dans des alliages de soudure). La figure II.19a montre les fissures verticales

provoquées sur un substrat en céramique Al_2O_3 par la contrainte de traction horizontale. Sur la figure II.19b, une fissure similaire est représentée mais se propage à partir du bord d'un grand vide dans la couche de soudure entre le substrat en céramique et la plaque de base. Les fissures sur le substrat en céramique sont particulièrement insidieuses, car elles peuvent se transformer avec le temps en ruptures d'isolement, ce qui peut considérablement altérer les propriétés de décharge partielle de l'IGBT.

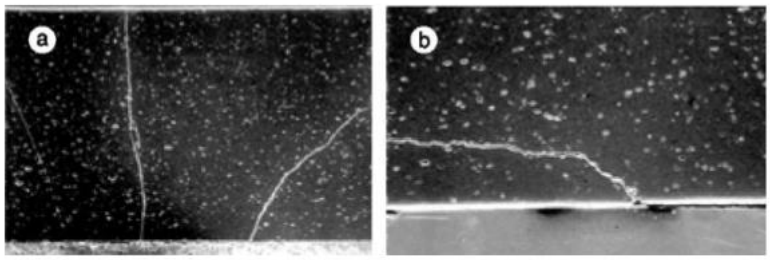


Figure II.19: (a) Fissuration verticale dans le substrat (b) Fissuration dans le substrat initié par une non-homogénéité dans la soudure [Ciappa, 2000]

II.2.4.15. Tableau récapitulatif des mécanismes de défaillance

Le tableau I.2 récapitule synthétiquement quelques mécanismes de défaillance, les causes et les différentes lois associées.

Mécanisme de défaillance	Localisation de la défaillance	Causes de défaillances	Modèle de défaillance	Expressions mathématiques des lois de défaillance
Fatigue thermique	Soudure	Δ T, Δ H, Δ V		$N_f = \frac{1}{2}\left(\frac{L\Delta\alpha\Delta T}{\gamma\chi}\right)$
	Décollement du fil de bonding		Loi de Coffin - Manson	$N_f = a\,\varepsilon_{plastic}^{n}$
	Fissuration du fil de bonding		Modèle de Schafft	$N_f = A\epsilon_f^{n}$
Corrosion	Métallisation de la puce	RH, V, T	Loi d'Eyring	$AF_{cor_{puce}} = \left(\frac{RH_{acc}}{RH_{ref}}\right)^{x}\left(\frac{Vdc_{acc}}{Vdc_{ref}}\right)^{y}\exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right)\left(\frac{1}{Tj_{ref}+273{,}15}-\frac{1}{Tj_{acc}+273{,}15}\right)\right]$
électro migration	Métallisation	T, RH, V	Loi d'Eyring	$t_f = A_o RH^{-n} f(V)\exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)$
Décharges partielles	Oxyde de grille	T	Loi d'Arrhenius	$t_f = A_o\exp[-\gamma E_{ox}]\exp\left[\frac{E_a}{kT}\right]$
Rayonnement cosmique	Puce	T, V	Loi exponentielle	$\lambda = C_3\exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DC}}\right)\exp\left(\frac{25 - T_{vj}}{47{,}6}\right)$

Tableau II.3: Tableau récapitulatif des mécanismes de défaillance et lois associées

II.2.5. Niveau Convertisseur : analyse dysfonctionnelle

Cette partie n'a pas été traitée dans la thèse. Elle consiste à remonter les défaillances IGBT vers le niveau Convertisseur en prenant en compte l'impact de la défaillance de l'IGBT sur la défaillance du composant. On identifie aussi les composants autre que les IGBT susceptibles également de conduire à la défaillance du convertisseur.

II.2.6. Niveau Train : analyse dysfonctionnelle

L'analyse dysfonctionnelle niveau Train passe par la remontée d'informations du niveau IGBT au niveau Train. Cela passe par l'agrégation d'informations à partir :

- d'analyses, de combinaisons et d'interprétations de la performance dans le temps
- de la prise en compte des composants élémentaires, sous-systèmes et finalement système en fonction des sollicitations caractéristiques de chaque niveau de décomposition

Cette analyse ne sera pas réalisée dans le cadre de ce travail de thèse.

Conclusion

Dans ce chapitre une approche originale qualifiée de « Cycle en U » a été proposée pour l'analyse des performances d'un composant en prenant en compte le système dans lequel il fonctionne. Le principe de l'approche est de combiner dans une même analyse, non seulement le niveau système et le niveau composant mais aussi la vue fonctionnelle et la vue dysfonctionnelle. L'approche a été ensuite appliquée aux systèmes ferroviaires. On s'est intéressé au composant IGBT dans son environnement de fonctionnement et en particulier dans sa relation directe avec le convertisseur de puissance et, à travers lui, avec le train dont il est un sous-système. L'analyse « Cycle en U » a donc été déployée du niveau Train au niveau IGBT pour la vue fonctionnelle et uniquement au niveau IGBT pour la vue dysfonctionnelle. Au niveau de l'IGBT on étudie les modes de dégradations, les phénomènes de défaillance ainsi que les paramètres associés. L'analyse dysfonctionnelle n'a pas été remontée aux niveaux convertisseurs et train dans la mesure où elle ne fait pas partie du cadre de ce travail de recherche. L'agrégation des informations sur le profil d'utilisation du train, son impact sur le fonctionnement et le dysfonctionnement de l'IGBT, permettront d'alimenter et de connaître l'ensemble des paramètres influents. Cette analyse amorce la première étape de la modélisation qui doit conduire à l'identification de l'ensemble des paramètres influents sur le système étudié.

L'objectif principal est d'évaluer la fiabilité de l'IGBT sur sa période de vie utile. Il s'agit donc d'estimer prévisionnellement son taux de défaillance en fonction de l'environnement réel dans

lequel le composant sera inséré. Le chapitre suivant vise à définir la structure du graphe associé au réseau bayesien modélisant le comportement dysfonctionnel du système. Plusieurs interrogations devront être levées et en particulier celles relatives :

- à l'identification des mécanismes de défaillance conduisant à la casse ou à la baisse de performances de l'IGBT et à leur représentation sous la forme d'un réseau bayesien
- à la nature de leurs causes (causes internes ou externes au fonctionnement de l'IGBT, lien avec le niveau Convertisseur et le niveau IGBT).

III. Construction du modèle bayesien

Les réseaux bayesiens se sont avérés être un outil puissant pour modéliser et analyser des systèmes dans différents domaines tels que la sureté de fonctionnement (Boudali et Dugan, [2005] ; Dabla et al., [2018]) ; l'analyse des risques [Liu et al., 2015] ; la médecine [Lamine et al., 2013], la génétique, la gestion des catastrophes naturelles, la géotechnique, la robotique, l'informatique (Big data et data mining), le marketing. Ils sont de plus en plus utilisés en sureté de fonctionnement pour prendre en compte les aspects de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité (Weber et al., [2012] ; Langseth et Portinale [2007]). Cette tendance est due à leur capacité à modéliser des systèmes complexes, leur capacité à contrôler, prédire et simuler le comportement d'un système, leur capacité à analyser des données liées à un système ou encore leur aptitude à pronostiquer ou à diagnostiquer. Dans la prédiction de la fiabilité des systèmes, les réseaux bayesiens permettent de calculer avec précision la probabilité d'occurrence d'un événement en connaissant les conditions dans lesquelles celui-ci se produit et à mettre à jour cette probabilité dès que de nouvelles évidences apparaissent.

Le formalisme des réseaux bayesiens est utilisé pour modéliser des systèmes complexes en utilisant une représentation graphique et un raisonnement à partir de données (Pearl [1985] ; Villeneuve et al., [2011]). Ils fournissent un cadre de modélisation qui permet d'intégrer des connaissances provenant de diverses sources et de générer une interprétation cohérente de ces données. Dans le cas particulier de la mise en place du modèle pour l'évaluation de la fiabilité, l'analyse basée sur l'approche « Cycle en U » présentée dans le chapitre II a conduit à capitaliser des connaissances sur les variables de fonctionnement et les phases de fonctionnement de l'IGBT dans son environnement global de fonctionnement. L'ensemble de ces connaissances va permettre d'alimenter la structure du modèle bayesien qui sera présentée dans ce chapitre.

La première partie de ce chapitre sera consacrée aux réseaux bayesiens : définitions, formalismes mathématiques, apprentissage des paramètres et de structures. La deuxième partie abordera la construction de la structure du modèle bayesien pour l'évaluation de la fiabilité de l'IGBT.

III.1. Théorie des probabilités et théorie des graphes

Les réseaux bayesiens sont des modèles graphiques probabilistes utilisés dans la représentation de données certaines ou incertaines. Ils s'appuient sur deux champs théoriques respectivement associés à la théorie des graphes (Meek [1997] ; Cowell et al., [1999]) et la théorie des probabilités. Ces deux champs sont décrits succinctement par la suite.

III.1.1. Théorie des probabilités

L'approche bayesienne est fondée sur des notions de probabilité conditionnelle et d'indépendance utilisées en théorie des probabilités. Un bref rappel de ces notions essentielles est proposé à la suite.

On considère (Ω, β, P) un espace probabilisé : Ω est l'univers ou l'ensemble de toutes les éventualités ou l'ensemble des résultats possibles d'une expérience ; β est l'ensemble des événements ; $P \in [0,1]$ est la probabilité d'un événement.

III.1.1.1. Probabilité conditionnelle

Soient A et B deux événements dans β tels que $P(B) \neq 0$. La probabilité conditionnelle de A sachant B est le réel :

$$P(A|B) = P_B(A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \; avec \; P(B) \neq 0 \qquad \text{(III.1)}$$

Les événements A et B sont indépendants si et seulement si :

$$P(A|B) = P(A) \qquad \text{(III.2)}$$

Théorème de Bayes

Soient A et B deux événements dans β tels que $P(B) \neq 0$ et $P(A) \neq 0$.

$$P(A|B) = P_B(A) = \frac{P(B|A)\,P(B)}{P(B)} \qquad \text{(III.3)}$$

Cette dernière équation peut être généralisée comme suit :

Si $n \geq 2$ et A_1, A_2, ..., A_n sont des événements dans β tels que $P(\bigcap_{k=1}^{n-1} A_k) \neq 0$ on a alors :

$$P(\bigcap_{k=1}^{n-1} A_k) = P(A_1)\,P(A_2|A_1)\,P(A_3|A_1 \cap A_2) \; \ldots \; P(A_n|\bigcap_{k=1}^{n-1} A_k) \qquad \text{(III.4)}$$

III.1.1.2. Notions de probabilités totales

Les probabilités totales font intervenir la notion de système complet d'événements. On appelle système complet d'événements, tout ensemble A_i (avec $i \in \beta$) fini ou dénombrable d'événements 2 à 2 compatibles et dont la réunion fait Ω. A_i est un système complet d'événements si et seulement si :

1. Pour $i \neq j$, $A_i \cap A_j = \emptyset$
2. $\bigcup_{i \in I} A_i = \Omega$

On dit également que A_i, i∈ β *est* une partition dénombrable de Ω.

Théorème des probabilités totales

Si A_1, A_2, … A_n est un système d'événements dans β tels que $P(A_k) \neq 0$ pour tout k compris entre 1 et n on a alors pour tout événement $A \in \beta$.

$$P(A) = \sum_{k=1}^{n} P(A|A_k)P(A_k) \quad \text{(III.5)}$$

III.1.1.3. Formulation du théorème de Bayes pour un système complet d'événements

Si $A_1, A_2, \ldots A_n$ est un système complet d'événements dans β tels que $P(A_k) \neq 0$ pour tout k compris entre 1 et n on a alors pour tout événement $B \in \beta$ de probabilité non nulle et pour tout entier j compris entre 1 et n :

$$P(A_j|B) = \frac{P(B|A_j)\,P(A_j)}{\sum_{k=1}^{n} P(A_k)\,P(B|A_k)} \quad \text{(III.6)}$$

Cette formule est fondamentale pour la réalisation des calculs d'inférence bayesienne.

III.1.2. Théorie des graphes

La théorie des graphes étudie les graphes contenant des nœuds ou sommets et des liens. Les graphes peuvent être interprétés comme une description des relations entre paires d'éléments.

III.1.2.1. Définition schématique du graphe causal orienté

Les réseaux bayesiens font partie de la catégorie des graphes causaux orientés. Dans ces types de graphe, on distingue les nœuds :

- racines : nœuds à partir desquels partent des arcs mais vers lesquels aucun arc ne pointe ;
- parents : nœuds à partir desquels partent des arcs ;
- enfants : nœuds vers lesquels pointent des arcs ;
- feuilles : nœuds vers lesquels pointent des arcs mais à partir desquels aucun arc ne part.

La notion d'arc orienté vient du fait que la relation entre le nœud parent et le nœud enfant est unidirectionnelle contrairement aux graphes non orientés où les liens peuvent être bidirectionnels. La figure III.1a présente un exemple de graphe orienté. Les nœuds A et B et D sont des nœuds racines et aussi des nœuds parents. Le nœud C est un nœud parent du nœud E. Le nœud D est un nœud feuille et enfant.

Un graphe causal représente l'influence des événements, des faits ou d'une variable sur une autre (représentée par une flèche orientée reliant la cause à l'effet).

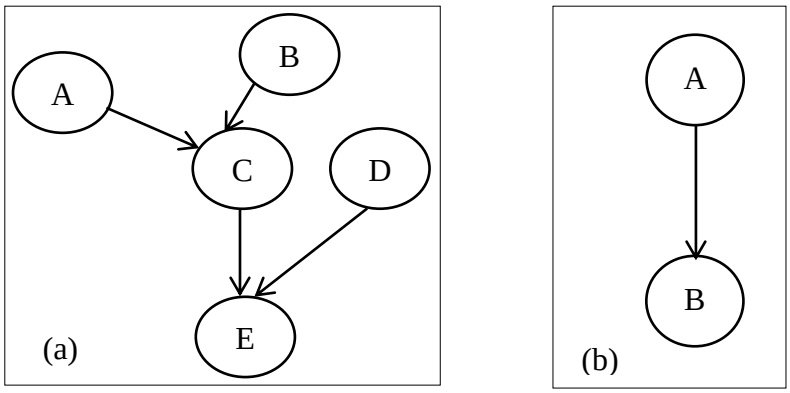


Figure III.1:(a) et (b) Exemples de graphes causaux

Sur la figure III.1b, les nœuds A et B sont des variables qui peuvent être observées ou non, vraies ou fausses. Ce graphe peut se lire : « la connaissance de A détermine celle de B ». Mais en réalité, on distinguerait plusieurs cas :

- sachant que A est vraie, on peut déterminer B avec certitude ;
- si A est connue avec certitude, la connaissance sur B est modifiée sans que B puisse être pour autant déclarée vraie ou fausse ;

En conclusion, s'il existe une relation causale de A vers B, toute information sur A peut modifier la connaissance relative à B, et, réciproquement, toute information sur B peut modifier la connaissance de A même si l'arc est orienté.

III.1.2.2. Circulation de l'information dans un graphe causal

Le tableau III.1 représente les trois cas qui décrivent l'ensemble des situations possibles faisant intervenir trois événements [Naïm et al, 2004] applicables aux réseaux bayesiens.

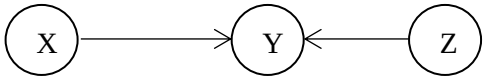
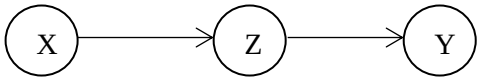
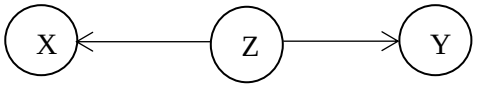
	**Connexion convergente : X et Z causent Y** L'information ne peut circuler de X à Z que si Y est connu. Si Y est observé X et Y sont dépendants
	**Connexion en série : X cause Y, Z cause Y** L'information ne peut circuler de X à Y que si Z n'est pas connu. Si Z est observé X et Y sont indépendants.
	**Connexion divergente : Z cause X et Y** L'information ne peut circuler de X à Y que si Z n'est pas connu. Si Z est observé, X et Y sont indépendants

Tableau III.1: Circulation de l'information dans un graphe causal

III.1.2.3. Notion de d-séparation (blocage)

Cette notion définit les conditions dans lesquelles l'information entre un nœud X et un nœud Y est bloquée [Zhang, 2008].

On dit que le nœud X et le nœud Y sont « d-séparés » par le nœud Z si pour tous les chemins entre X et Y, l'une au moins des deux conditions suivantes est vérifiée :

- le chemin converge en un nœud W, tel que W≠Z, et W n'est pas une cause directe de Z
- le chemin passe par Z, et est soit divergent, soit en série au nœud Z.

À partir du graphe de la figure III.2, on donne quelques exemples pour illustrer la notion de d-séparation. L'ensemble de variables {A, B, C} forme une connexion série. A et C sont d-séparés par B. La connexion entre A et C est bloquée quand B est connue. L'ensemble de variables {B, A, D} est une connexion divergente. B et D sont d-séparés par A.

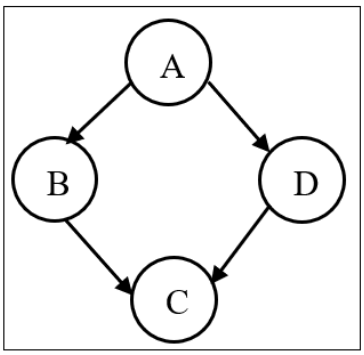


Figure III.2: Exemple de graphe pour illustrer la d-séparation

III.2. Réseaux bayesiens, un modèle graphique probabiliste

Les réseaux bayesiens sont des graphes acycliques dans lesquels les nœuds représentent les variables, et les arcs les dépendances directes ou indirectes entre les variables (Dabla et al., [2017] ; Godichaud et al., [2010]). La force de ces dépendances est quantifiée par des probabilités conditionnelles. Les connaissances modélisées dans le cadre des réseaux bayesiens peuvent être de diverses natures : de l'expertise, des données de retour d'expérience, des données issues de capteurs, des règles logiques, des équations décrivant la physique des phénomènes, des relations entre les variables ou bien encore des observations.

La construction d'un réseau bayesien inclut donc :

- un graphe acyclique dont les nœuds représentent des variables aléatoires (X_1, X_2, … X_n). Dans ce graphe, les nœuds sont connectés par liens orientés ; on parle aussi d'arcs orientés ;

- des TPM (Tables de Probabilités Marginales) pour les nœuds racines ;
- des TPC (Tables de Probabilités Conditionnelles) de chaque nœud conditionnellement à ses causes (parents). On associe donc à chaque variable la probabilité P $(X_i, |\text{Pa}\ (X_i))$; Pa (X_i) désigne les parents. Les TPC sont aussi qualifiées de paramètres.

Le principe de base des réseaux bayesiens s'appuie sur la règle de Bayes [Corset, 2003] donnée par la relation III.3. La sémantique des réseaux bayesiens détermine la distribution jointe de probabilité complète [Pearl, 1985]. Elle est définie comme suit :

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^{n} P\big(X_i | P_a(X_i)\big) \qquad \text{(III.7)}$$

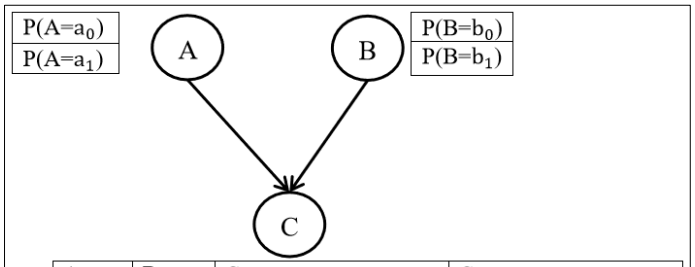
La marginalisation quant à elle consiste à déterminer la probabilité d'une variable à partir de la distribution jointe de l'ensemble des variables. Elle s'écrit formellement :

$$P(X_i) = \sum_{X_1,\dots X_n \setminus X_i} P(X_1, X_2, \dots, X_n) \qquad \text{(III.8)}$$

où i va de 1 à n ; n étant le nombre de variables ; la notation $X_1, \dots . X_n \setminus X_i$ signifie que la sommation se fait sur l'ensemble des variables sauf X_i. Chaque variable X_i prend des valeurs possibles appelées les modalités de la variable. r_i est une modalité de la variable X_i. La variable décrite par un nœud peut être discrète ou continue (lois de probabilités, variables catégorielles continues) et contient une description de la variable sous la forme d'une équation déterministe de ses nœuds parents, soit sous la forme de TPC [Dabla et al., 2017].

III.2.1. Exemple de réseau bayesien

La figure III.3 montre l'exemple d'un réseau bayesien de 3 variables discrètes. A et B sont des nœuds racine ; C est un nœud enfant. A prend ses modalités dans l'ensemble $\{ a_0, a_1 \}$, B dans l'ensemble $\{ b_0, b_1 \}$, et C dans l'ensemble $\{ c_0, c_1 \}$.



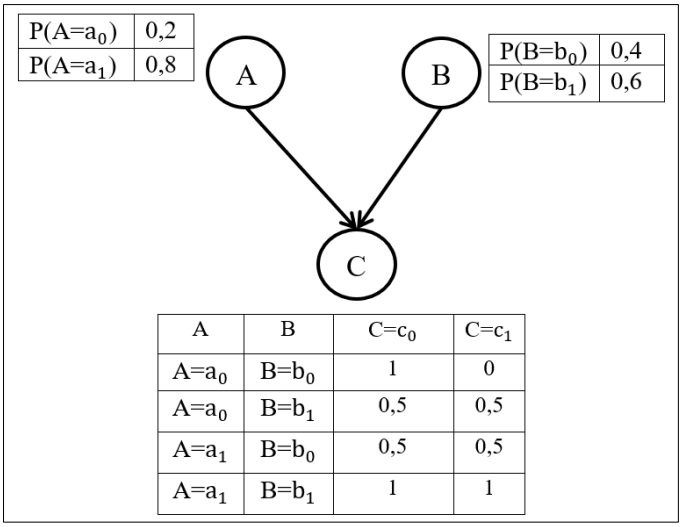
A	B	C=c_0	C=c_1
A=a_0	B=b_0	P (C=c_0 | B=b_0, A=a_0)	P (C=c_1 | B=b_0, A=a_0)
A=a_0	B=b_1	P (C=c_0 | B=b_1, A=a_0)	P (C=c_1 | B=b_1, A=a_0)
A=a_1	B=b_0	P (C=c_0 | B=b_0, A=a_1)	P (C=c_1 | B=b_0, A=a_1)
A=a_1	B=b_1	P (C=c_0 | B=b_1, A=a_1)	P (C=c_1 | B=b_1, A=a_1)

Figure III.3: Exemple de réseau bayesien

Les réseaux bayesiens permettent de fusionner des données de différentes sources et de natures diverses dans un même modèle. Le principe des réseaux bayesiens est d'introduire des informations ou des observations dans le réseau qui les propage et met à jour la probabilité associée à chaque variable [Hassen et al., 2012]. On parle aussi de propagation d'évidence. Les réseaux bayesiens sont utilisés pour répondre aux requêtes probabilistes [Yap et al., 2007], par exemple mettre à jour la connaissance de l'état d'une variable lorsque d'autres variables sont observées. Ce processus est appelé inférence et consiste à calculer la distribution postérieure des variables données [Huang et Darwiche, 1994]. Le mécanisme d'inférence est développé dans le paragraphe suivant.

III.2.2. Notion d'inférence bayesienne

L'inférence bayesienne autorise l'exploitation mathématique du réseau bayesien. Elle permet de calculer les probabilités d'événements associées à certaines variables cibles. Elle est réalisée à partir de combinaisons d'opérations de marginalisation à partir de l'utilisation de la loi de probabilités jointes (relations III.7 et III.8).



A	B	C=c_0	C=c_1
A=a_0	B=b_0	1	0
A=a_0	B=b_1	0,5	0,5
A=a_1	B=b_0	0,5	0,5
A=a_1	B=b_1	1	1

Figure III.4: TP du réseau bayesien

En reprenant l'exemple du réseau bayesien du paragraphe précédent, on calcule la probabilité de l'événement C. La figure III.4 reprend l'exemple précédent avec les TP.

$$P(C) = \sum_{A,B} P(A,B,C) \quad \text{(III.9)}$$

$$P(C) = \sum_{A,B} P(C|A,B)\, P(A)\, P(B) \quad \text{(III.10)}$$

$$P(C) = \sum_{A} P(A) \sum_{A} P(B)\, P(C|A,B) \quad \text{(III.11)}$$

$$P(C) = \sum_{A} P(A\,[P(B)\, P(C|A,B) + P(\bar{B})\, P(C|A,\bar{B})]) \quad \text{(III.12)}$$

$$P(C) = P(A)\,P(B)P\big(C|A,B) + P(A)P(\bar{B})P(C|A,\bar{B}) + P(\bar{A})P(B)P(C|\bar{A},B) + P(\bar{A})P(B)P(C|\bar{A},\bar{B})\big) \quad \text{(III.13)}$$

$$P(C) = 0{,}2\times0{,}4\times1 + 0{,}2\times0{,}6\times0{,}5 + 0{,}8\times0{,}4\times0{,}5 + 0{,}8\times0{,}6\times0 \quad \text{(III.14)}$$

$$P(C) = 0{,}3 \quad \text{(III.15)}$$

Le calcul de l'inférence devient rapidement complexe lorsque le nombre de variables du réseau devient grand. Des algorithmes d'inférence ont donc été développés et se distinguent par leur facilité d'implémentation et leur performance de calcul (Murphy [2002] ; Huang et Darwiche [1994]).

III.2.3. Etapes de construction d'un réseau bayesien

La modélisation par réseau bayesien passe par trois étapes [Pérès, 2005] :

- étape descriptive : il s'agit de répondre à la question, quelles sont les variables intéressantes et pertinentes pour l'étude ?
- étape structurelle : il s'agit de mettre en place le graphe du réseau. Cela peut se faire en utilisant l'apprentissage de structure ou les avis d'experts ;
- étape relationnelle : il s'agira de déterminer les TPC pour chaque nœud du graphe. Pour cette étape on peut se baser sur les avis d'experts ou sur l'apprentissage des paramètres.

Différentes techniques sont possibles dans l'apprentissage des réseaux bayesiens selon la disponibilité des données du sujet à traiter, ou d'experts dans le domaine ([Cornuéjols et Miclet, 2002], [Christophersen et al, 2018]). Dans les lignes suivantes nous présentons les formulations dans chaque cas. Le lecteur pourra se référer à Leray [2006] pour plus d'informations.

III.2.4. Apprentissage des paramètres

L'apprentissage des paramètres permet d'estimer les distributions de probabilités (marginales et conditionnelles) à partir de données pour chaque nœud du réseau. Elle suppose que le graphe du réseau bayesien est connu et que l'on veut construire les TP. Elle permet de rendre compte des données observées.

Notations générales :

- le réseau bayesien est constitué de n nœuds $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$;
- D est une base d'exemples constituée de la mesure de chacune des X_i pour un certain nombre d'exemples N ;

- si X_i est un nœud, on note r_i le nombre de ses états possibles ;
- C_i l'ensemble de ses parents ;
- q_j le nombre d'états possibles des parents
- $\theta_{i,j,k}$ la probabilité que X_i soit dans l'état k conditionnellement au fait que l'ensemble de ses parents soit dans l'état j.

La détermination des paramètres se fait à partir de données complètes ou incomplètes en utilisant l'apprentissage statistique ou l'apprentissage bayesienne.

III.2.4.1. À partir de données complètes

Les méthodes présentées dans ce paragraphe permettent d'estimer les TP du réseau bayesien à partir de lignes de données complètes (Jordan [1998] ; Ben Salem [2008]).

A. Apprentissage statistique

L'apprentissage statistique a pour objectif d'estimer les TP en se basant sur les données disponibles sur chacune des variables. La base de données doit être complète (toutes les variables sont observées). L'apprentissage statistique se base sur les règles classiques de probabilités conditionnelles. Le principe de l'approche est le suivant : la probabilité d'apparition d'un événement est estimée par sa fréquence d'apparition dans la base de données. Elle est aussi nommée Maximum de Vraisemblance (MV) et se formule ainsi :

$$\hat{P}\left(X_i = x_k |\, Pa(X_i) = x_j\right) = \hat{\theta}_{i,j,k}^{M,V} = \frac{N_{i,j,k}}{\sum_k N_{i,j,k}} \qquad \text{(III.16)}$$

$N_{i,j,k}$ est le nombre d'événements dans la base de données D pour lesquels la variable X_i est dans l'état x_k et ses parents notés $pa(X_i)$ dans l'état x_j. $\theta_{i,j,k}$ est la probabilité conditionnelle que la variable X_i soit dans l'état x_k sachant que ses parents sont dans l'état x_j.

La base de données peut être générée aléatoirement en utilisant la simulation de Monte Carlo à partir de lois de distributions connues. La loi de distribution peut être déterminée par le meilleur ajustement à l'ensemble des données dont on dispose.

B. Apprentissage bayesien

Contrairement à l'apprentissage statistique, l'apprentissage bayesien s'utilise lorsque l'on dispose de certaines connaissances préalables. Il permet, en particulier, d'estimer les TPC en prenant en compte la distribution à priori sur les variables. On estime donc les paramètres les plus probables en utilisant des a priori sur les paramètres (on suppose que la probabilité de θ suit telle ou telle distribution) sachant que les données ont été observées. L'apprentissage

bayesien distingue deux approches : l'approche par Maximum À Posteriori (MAP) et l'approche d'Espérance À Posteriori (EAP) [Robert, 1994].

Approche par Maximum À Posteriori (MAP)

Le principe est d'estimer les paramètres θ_{ijk} en cherchant à maximiser la probabilité de la variable X connaissant ses parents. La probabilité conditionnelle s'écrit par la relation III.17.

$$\hat{P}\left(X_i = x_k \mid Pa(X_i) = x_j\right) = \hat{\theta}_{i,j,k}^{MAP} = \frac{N_{i,j,k}+\alpha_{i,j,k}-1}{\sum_k (N_{i,j,k}+\alpha_{i,j,k}-1)} \quad \text{(III.17)}$$

Où $\alpha_{i,j,k}$ sont les paramètres de la distribution de Dirichlet associée à la loi à priori p $(X_i = x_k \left| pa(X_i) = x_j \right.)$. Un des avantages de la distribution de Dirichlet est qu'il est possible d'exprimer facilement la loi à posteriori des paramètres.

Approche d'Espérance À Posteriori (EAP)

Le principe est de calculer l'espérance à postériori des paramètres $\theta_{i,j,k}$.

$$\hat{p}\left(X_i = x_k \left| pa(X_i) = x_j \right.\right) = \hat{\theta}_{i,j,k}^{EAP} = \frac{N_{i,j,k}+\alpha_{i,j,k}}{\sum_k (N_{i,j,k}+\alpha_{i,j,k})} \quad \text{(III.18)}$$

Les estimations évoquées : maximum de vraisemblance, maximum à posteriori, espérance à posteriori ne sont valables que lorsque la base de données est complète et toutes les données observées.

III.2.4.2. À partir de données incomplètes

Dans de nombreuses applications, les bases de données sont souvent incomplètes. C'est le cas lorsque les variables sont observées partiellement ou lorsqu'il n'existe très peu voire pas de données sur elles. L'algorithme EM (Expectation-Maximisation) proposé dans [Dempster et al., 1977] est appliqué pour estimer les paramètres du réseau bayesien à partir de données incomplètes [Cowell et al., 1999] et a été étendu aux grandes bases de données [Thiesson et al., 2001]. L'objectif de l'algorithme EM est d'estimer les paramètres du réseau bayesien lorsqu'on est en présence d'une base de données incomplète. C'est un algorithme itératif qui a pour principe de calculer les paramètres en effectuant une étape d'espérance et une étape de maximisation jusqu'à la convergence selon un critère d'arrêt établi. On peut l'utiliser différemment selon qu'on est en apprentissage statistique ou en apprentissage bayesien.

A. Algorithme EM avec apprentissage statistique

L'ensemble des données observées sera noté $\chi_v = \{x_v^{(l)}\}$ avec $1 \leq l \leq$ n. On note $\theta^{(t)} = \{\theta_{i,j,k}^{(t)}\}$ les paramètres du réseau obtenus à chaque itération (t). L'algorithme EM combine la méthode d'espérance et de maximisation pour rechercher les paramètres manquants, en répétant

l'algorithme jusqu'à la convergence. À l'étape d'espérance, on estime les paramètres $N_{i,j,k}$ à partir de la formule III.19 Leray [2006]:

$$N^*_{i,j,k} = E\left[N_{i,j,k}\right] = \sum_{l=1}^{N} p\left(X_i = x_k | Pa(X_i) = x_j, \chi_v^{(l)}, \theta^{(t)}\right) \quad \text{(III.19)}$$

La maximisation vise à déterminer les nouveaux paramètres $\theta_{i,j,k}^{(t+1)}$. Sa formulation est la suivante :

$$\theta_{i,j,k}^{(t+1)} = \frac{N^*_{i,j,k}}{\sum_k N^*_{i,j,k}} \quad \text{(III.20)}$$

Le détail de l'algorithme est donné par la figure III.5 [Naïm et al., 2004] avec la phase d'initialisation, la phase d'espérance, la phase de maximisation ainsi que le critère d'arrêt.

- Initialiser $\theta^{(0)}$
- t← 0
- Répéter
  - t← $t+1$
  - $N^*_{i,j,k} \leftarrow \sum_{l=1}^{N} p(X_i = x_k | pa(X_i) = x_j, \chi_v^{(l)}, \theta^{(t-1)})$
  - $\theta_{i,j,k}^{(t+1)} = \frac{N^*_{i,j,k}}{\sum_k N^*_{i,j,k}}$

  Tant que $|\theta^{(t)} - \theta^{(t-1)}| \geq \varepsilon$ (critère d'arrêt)

Figure III.5: Principe de l'algorithme EM

B. Algorithme EM avec apprentissage bayesien

Dans l'apprentissage bayesien, l'algorithme EM est le même sauf pour l'étape de maximisation où les paramètres sont donnés par l'équation III.21. Cette formulation reste valable lorsqu'on dispose d'a priori sur les variables.

$$\theta_{i,j,k}^{(t+1)} = \frac{N^*_{i,j,k} + \alpha_{i,j,k}}{\sum_k N^*_{i,j,k} + \alpha_{i,j,k}} \quad \text{(III.21)}$$

Des heuristiques ont été proposées pour accélérer ou améliorer la convergence de l'algorithme EM [Neale et Hinton, 1998].

III.2.5. Détermination des TP à partir d'avis d'experts

Dans le cas où on ne dispose pas de données ou très peu de données, les TP sont déterminées à partir d'avis d'experts (Christophersen et al, [2018] ; Constantinou et al [2016]). Les experts du domaine tentent d'estimer les probabilités d'occurrence des événements en fonction de leurs connaissances du domaine d'étude.

Quatre cas suivants sont à considérer lors de la réalisation d'une évaluation par expertise :

1. l'estimation de la probabilité d'un événement par un expert sans aucune donnée. On utilise l'échelle de probabilité [Renooij, 2001] de la figure III.6 qui attribue une probabilité à l'événement qu'il soit certain, probable, ou encore impossible. À titre d'exemple si l'expert affirme que l'événement est attendu, la probabilité est de 75%.

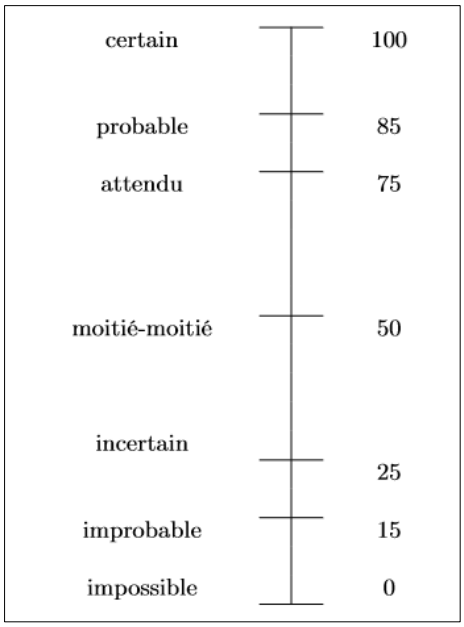


Figure III.6: Echelle de probabilité

2. l'estimation de la probabilité d'un événement conditionnellement à un certain nombre de variables. Une méthode est proposée dans [Naïm et al., 2004] qui consiste à remplacer la probabilité conditionnelle par un OU bruité. Dans le modèle, le calcul de la probabilité P(Y|X_i) où X_i est un ensemble de variable revient à faire deux hypothèses. La première hypothèse impose à l'expert de faire une estimation de la probabilité que X_i cause Y lorsque les autres variables X_j sont absentes. Dans la deuxième hypothèse, le fait que X_i cause Y est indépendant des autres variables X_j.

   Le modèle OU bruité se résume ainsi [Pearl, 1985] : Si une des variables X_i est vraie, alors la variable Y est presque toujours vraie (avec la probabilité p_i) ; si plusieurs variables X_i sont vrais alors la probabilité que la variable Y soit vraie est donnée par la relation suivante.

$$p(y|\chi) = 1 - \prod_{i|X_i \in \chi_p} (1 - p_i) \qquad \text{(III.22)}$$

   où χ_p est l'ensemble des X_i vrais.

3. l'estimation des probabilités dans le cas où on a plusieurs experts. On parle de sources multiples. On utilise, le cas échéant, des méthodes basées sur des mélanges d'experts [Jacobs et al., 1991].

Les estimations données par des experts peuvent être combinées à des estimations de probabilités obtenues grâce à des données [Populaire et al., 2002]. Tout dépend du problème à résoudre et de la disponibilité des données.

4. l'évaluation qualitative en utilisant les fonctions de croyance (belief networks). Les fonctions de croyance sont un moyen de représentation de l'information experte. On distingue par exemple les FCT (Fonctions de Croyances Transférables) où la représentation de l'opinion d'un agent rationnel se base uniquement sur la croyance ou l'état de connaissance de l'individu même si celle-ci est imprécise [Villeneuve et al., 2011].

III.2.6. Apprentissage de la structure

L'apprentissage de la structure permet de déterminer la structure du réseau bayesien (Delaplace [2007] ; Leray [2006]). Trois cas de figures se présentent comme pour le cas de l'apprentissage des paramètres : à partir de données complètes, à partir de données incomplètes et de l'avis d'experts. Que ce soit dans le cas des données complètes ou incomplètes, il existe deux approches. La première approche consiste à rechercher à partir des données les différentes relations d'indépendance entre deux variables conditionnellement à un ensemble de variables. Il existe un ensemble de tests d'indépendances qui sont utilisés à cet effet. La deuxième approche est de quantifier l'adéquation d'une structure au problème à résoudre en associant un score à chaque structure. Cette approche suppose que plusieurs structures de réseaux bayesiens (cas de structures concurrentes par exemple) peuvent être proposées et l'objectif recherché est de trouver la structure qui donnera le meilleur score. Il faut rappeler que le nombre de structures possibles à partir d'un certain nombre n de nœuds est exponentiel et suit la formule suivante ou NS est le nombre de structures et n le nombre de nœuds [Robinson, 1977] :

$$NS(n) = \begin{cases} 1 & ,n = 0 \; ou \; 1 \\ \sum_{i=1}^{n} (-1)^{i+1} \binom{n}{i} 2^{i(n-1)} \; NS(n-1) \, , n > 1 \end{cases} \qquad \text{(III.23)}$$

Ainsi par exemple, pour 5 nœuds le nombre de structures possibles est NS (5) =29281 ; pour dix nœuds NS (10) =$4{,}2.10^{18}$.

III.2.6.1. Approches basées sur les tests d'indépendance conditionnelle

Le principe de ces tests est de déterminer à partir des données les relations d'indépendance conditionnelle entre deux variables conditionnellement à un ensemble de variables en utilisant des tests statistiques d'indépendance classiquement utilisés.

La démarche de détermination de la structure du réseau bayesien suit les étapes suivantes :

- construire un graphe non dirigé contenant les relations entre les variables, à partir de tests d'indépendance conditionnelle ;
- détecter les V-structures (en utilisant aussi des tests d'indépendance conditionnelle ;
- propager les orientations de certains arcs ;
- prendre éventuellement en compte les causes artificielles dues à des variables latentes.

La mise en œuvre de ces approches impose de passer en revue les notions de tests statistiques d'indépendance conditionnelle ainsi que les algorithmes utilisés [Bouchiba, 2013].

A. Test du χ^2

On considère deux variables discrètes X_a et X_b de taille r_a et r_b. Soit N_{ab} le nombre d'occurrences de $\{X_A{=}x_a \text{ et } X_B{=}x_b\}$ dans la base de données, N_a le nombre d'occurrences de $\{X_a = x_a\}$ et N_b le nombre d'occurrences de $\{X_b = x_b\}$.

On distingue deux modèles mis en évidence par le test du χ^2.

- le modèle observé $p_0 = P(X_A,X_B)$ représenté par les occurrences observées (relation III.24)

$$O_{ab} = N_{ab} \tag{III.24}$$

- le modèle théorique $p_t = P(X_A)P(X_B)$ représenté par les occurrences théoriques

$$T_{ab} = \frac{N_a * N_b}{N} \tag{III.25}$$

Soit la statistique suivante (de degré de liberté $df = (r_A\text{-}1)\,(r_B - 1)$). On a:

$$\chi^2 = \sum_{a=1}^{r_A}\sum_{b=1}^{r_B}\frac{(O_{ab}-T_{ab})^2}{T_{ab}} = \sum_{a=1}^{r_A}\sum_{b=1}^{r_B}\frac{\left(N_{ab}-\frac{N_a N_b}{N}\right)^2}{\frac{N_a N_b}{N}} \tag{III.26}$$

L'hypothèse d'indépendance entre X_A et X_B est vérifiée si et seulement si $\chi^2 < \chi^2_{théorique}(d_f, 1\text{-}\alpha)$, α étant le seuil de confiance. Cette formulation est valable pour $T_{ab} > 10$. Dans le cas contraire, il faut remplacer le terme $\frac{(O_{ab}-T_{ab})^2}{T_{ab}}$ par $\frac{(|O_{ab}-T_{ab}|-0.5)^2}{T_{ab}}$.

B. Test du G^2

On peut également utiliser le rapport de vraisemblance G^2 qui suit une loi du χ^2 de degré de liberté $df = (r_A - 1)(r_B - 1)$:

$$G^2 = 2\sum_{a=1}^{r_A}\sum_{b=1}^{r_B} O_{ab}\, ln\left(\frac{O_{ab}}{T_{ab}}\right) = 2\sum_{a=1}^{r_A}\sum_{j=1}^{q_B} N_{ab}\, ln\left(\frac{N_{ab}\, N}{N_a\, N_b}\right) \quad \text{(III.27)}$$

Ce rapport de vraisemblance, très proche de l'information mutuelle entre les deux variables X_A et X_B interviendra également dans la méthode basée sur le score. L'utilisation de ces tests pour la recherche de structure dans les réseaux bayesiens nécessite une adaptation pour les tests d'indépendance conditionnelle entre deux variables X_A et X_B conditionnellement à un ensemble quelconque de variables χ_c. Pour cela le principe ne change pas, il faut mettre en concurrence les deux modèles suivants :

- le modèle observé $p_0 = P(X_a, X_b|\chi_c)$ représenté par les occurrences observées $O_{abc} = N_{abc}$ où N_{abc} est le nombre d'occurrences de $\{X_a = x_a\ ;\ X_b = x_b\ et\ \chi_C = x_c\}$
- le modèle théorique $p_t = P(X_A|\chi_c)\ P(X_B|\chi_c)$, représenté par les occurrences théoriques $T_{abc} = \frac{N_{ac} * N_{bc}}{N_c}$

Soit la statistique suivante (de degré de liberté $df = (r_A - 1)(r_B - 1)r_C)$:

$$\chi^2 = \sum_{a=1}^{r_A}\sum_{b=1}^{r_B}\sum_{c=1}^{r_C} \frac{(O_{abc} - T_{abc})^2}{T_{abc}} \quad \text{(III.28)}$$

L'hypothèse d'indépendance entre X_A et X_B conditionnellement à χ_C est vérifiée si et seulement si $\chi^2 < \chi^2_{théorique}(d_f, 1\text{-}\alpha)$, pour un seuil de confiance α donné.

Les tests d'indépendance conditionnelle permettent de déterminer une série de contraintes sur la structure recherchée : une indépendance entre deux variables se traduit par l'absence d'arc entre les deux variables, une dépendance se traduit par la présence d'un arc. C'est ainsi qu'on construit le graphe bayesien représentant toutes les indépendances et dépendances.

Lorsque le nombre de nœud du réseau est grand, un nombre exponentiel de tests d'indépendance conditionnelle est requis. Pour cela, d'autres approches ont été développées. C'est notamment le cas des algorithmes PC [Spirtes et al., 1993] et IC (Inductive Causation) et leurs améliorations qui prennent en compte les variables latentes (Pearl [2000] ; Pearl et Verma, [1991]). Trois nouvelles approches ont aussi été considérées récemment : l'algorithme QFCI (Quantitative Fast Casual Inference), l'algorithme NPC (Necessary Path Condition) (Kebaili et Aussem [2007] ; Saryazdi et al., [2017]) et l'algorithme RAI (Recursive Autonomy Identification) [Yehezkel et Lerner, 2005].

C. Approches basées sur le score

Le principe des approches basées sur le score est de quantifier l'adéquation d'une structure donnée au problème à résoudre en associant un score à chaque structure et en choisissant la

structure qui a le meilleur score dans l'espace des graphes acycliques dirigés. Pour ce faire, le score d'une structure est décomposé en scores locaux au niveau de chaque nœud. Plusieurs techniques existent et en particulier les méthodes BIC (Bayesian Information Criterion) [Schwartz,1978], AIC (Akaike Information Criterion) [Akaike, 1998], BD (Bayesian Dirichlet) [Cooper et Herskovits, 1992], ou bien encore MDL (Minimum Description Length) [Suzuki, 1999].

Le mode de calcul des scores correspondant à ces différentes techniques est donné à la suite :

$$ScoreAIC(\beta, D) = logL(D|\theta^{MV}, \beta) - Dim(\beta) \quad \text{(III.29)}$$

$$ScoreBIC(\beta, D) = logL(D|\theta^{MV}, \beta) - \frac{1}{2} Dim(\beta) logN \quad \text{(III.30)}$$

$$ScoreMDL(\beta, D) = log\, L(D|\theta^{MV}) - |A_\beta| logN - cDim(\beta) \quad \text{(III.31)}$$

Où $|A_\beta|$ est le nombre d'arcs dans le graphe β et c est le nombre de bits utilisés pour stocker chaque paramètre numérique, D correspond aux données, L correspond à la vraisemblance.

Avec

$$Dim(\beta) = \sum_{i=1}^{n} Dim(X_i, \beta) = \sum_{i=1}^{n} (r_i - 1) q_i \quad \text{(III.32)}$$

Dim(β) est le nombre de paramètres pour décrire toutes les distributions de probabilité du réseau β. r_i est la taille du réseau.

Le choix d'une approche dépend de la priorité à accorder soit à la réduction de l'espace de recherche à un sous-espace particulier (l'espace des arbres) soit à l'ordonnancement des nœuds pour ne chercher les parents d'un nœud que parmi les autres nœuds.

D. Approches basées sur les avis d'experts

Cette approche se base sur les connaissances de l'expert sur le problème à résoudre. Les experts fournissent la structure du réseau ou participent à sa construction. Il peut arriver que les données expertes soient partielles, on rajoute soit de l'intuition ou du bon sens pour construire le graphe bayesien [Gonzalès et Wuillemin, 1998], soit on utilise comme le propose Cheng [Cheng et al., 2002] une liste de connaissances a priori à compléter avec les données pour trouver la structure du réseau bayesien. Ce cas de figure fait intervenir aussi l'apprentissage de structure dans le cadre de la classification et l'apprentissage de structure lorsque les variables latentes sont définies explicitement.

III.3. Construction du modèle bayesien pour l'évaluation de la fiabilité de l'IGBT

La construction du modèle pour l'évaluation de la fiabilité de l'IGBT nécessite la description des variables importantes du modèle. La structure a été construite en s'appuyant sur l'analyse « Cycle en U» réalisée dans le chapitre II et sur l'avis des experts dans le domaine de l'électronique de puissance à ALSTOM TARBES pour établir les liens entre les variables de l'analyse. La structure multi-niveaux est présentée sur la figure III.7.

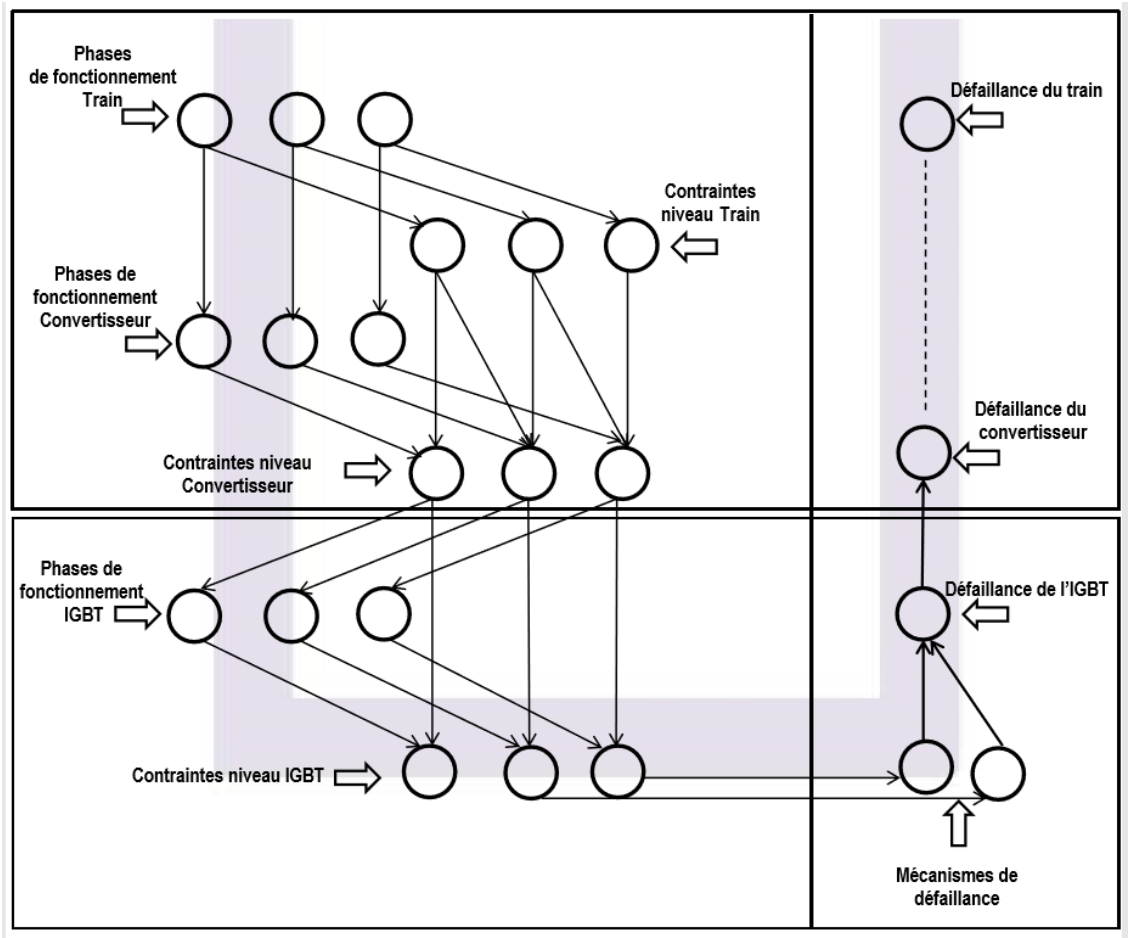


Figure III.7: Structure multi-niveaux du réseau bayesien

La mise en place de la structure du graphe bayesien a été réalisée en suivant les étapes suivantes :

- niveau IGBT : on décrit à ce niveau élémentaire de l'étude les phases de fonctionnement et des contraintes induites sur le composant. Toutes les phases, contraintes et mécanismes de défaillance sont représentés par des variables dans le réseau bayesien.
- niveau Convertisseur : on décrit à ce niveau intermédiaire les phases de fonctionnement et les contraintes. Par convertisseur, on fait référence aux deux types de convertisseurs : le convertisseur d'entrée et le convertisseur de sortie. On représente aussi ces variables

dans la structure du réseau bayesien. Les liens entre les variables phases Convertisseur et les variables phases IGBT sont établis. On procède identiquement pour caractériser les liens entre les variables contraintes Convertisseur et les variables contraintes IGBT. Dans un troisième temps les liens sont créés entre les variables phases et les variables contraintes aux deux niveaux convertisseur et IGBT respectivement.

- niveau Train : on remonte les phases et contraintes niveau Convertisseur vers leurs causes au niveau supérieur (Train). Les liens sont établis entre les variables phases Train et les variables phases Convertisseur puis entre les variables contraintes Train et les variables contraintes Convertisseur et enfin entre les variables phases Train et Convertisseur respectivement avec les contraintes Train et Convertisseur.

De ces trois étapes détaillées ci-dessus, on construit une première partie de l'analyse « Cycle en U » relative à l'analyse fonctionnelle à différents niveaux : IGBT, Convertisseur et Train. Comme évoqué dans le chapitre II, le modèle qui fait objet de l'étude dans ce travail de recherche s'arrête à l'analyse dysfonctionnelle et à l'évaluation des indicateurs de fiabilité au niveau IGBT. La partie 4 de la figure III.7 du « Cycle en U » n'est donc pas traitée dans cette thèse. La description des variables se fait en fonction de l'analyse détaillée dans le chapitre précédent. La traduction de cette analyse en modèle bayesien inclut la description des principes de causalité liant les variables pertinentes menant à la défaillance du composant. Dans la partie 3 de la figure III.7, dans un premier temps, on décrit les mécanismes de défaillance au niveau IGBT par des variables du réseau bayesien et on établit les liens avec les contraintes IGBT qui engendrent ces mécanismes de défaillance. Dans un deuxième temps, on établit les liens entre ces variables de mécanismes de défaillance et les indicateurs de défaillance représentés par le taux de défaillance et la durée de vie. Cette partie fera l'objet du chapitre suivant.

On détaille par la suite les différents niveaux et les variables descriptives. On met en exergue, en particulier, les phases de fonctionnement du train, du convertisseur et de l'IGBT, ainsi que les contraintes de fonctionnement. La prise en compte des phases et des contraintes de fonctionnement vient du fait que les variables de fonctionnement du train sont dépendantes du mode de fonctionnement du train. Les noms des variables sont notés avec des guillemets.

III.3.1. Phases de fonctionnement niveau IGBT

On a identifié une phase de fonctionnement niveau IGBT qui se décline à l'IGBT présent sur l'onduleur et l'IGBT présent sur le convertisseur d'entrée PMCF. Cette phase de fonctionnement est liée à la fonction principale de commande de l'IGBT [Sabaté, 1998]. Les données sur ce type de variable peuvent être des informations logiques ou des connaissances expertes. Le tableau III.2 montre ces deux variables ainsi que leurs définitions.

Phase de fonctionnement niveau IGBT	Définition
HT_Cmde_IGBT_PMCF	IGBT du PMCF alimenté et commandé
HT_Cmde_IGBT_Ond	IGBT de l'onduleur alimenté et commandé

Tableau III.2: Phases de fonctionnement niveau IGBT

III.3.2. Contraintes de fonctionnement niveau IGBT

Les contraintes de fonctionnement au niveau de l'IGBT sont d'ordre électrique, thermique, mécanique et hygrométrique.

Contraintes niveau IGBT	Définition
Choc_IGBT	Choc subi par l'IGBT du PMCF ou de l'onduleur
DeltaTj_IGBT_Ond	Amplitude de cycle de jonction de l'IGBT de l'onduleur
DeltaTj_IGBT_PMCF	Amplitude de cycle de jonction de l'IGBT du PMCF
DeltaTc_IGBT_Ond	Amplitude de cycle de jonction de l'IGBT de l'onduleur
DeltaTc_IGBT_PMCF	Amplitude de cycle de température de la semelle de l'IGBT du PMCF
DeltaTconnec_Puis_IGBT_Ond	Amplitude de cycle de température des connectiques de puissance de l'IGBT de l'onduleur
DeltaTconnec_Puis_IGBT_Ond	Amplitude de cycle de température des connectiques de puissance de l'IGBT de l'onduleur
I_Collecteur_IGBT_Ond	Courant collecteur de l'IGBT de l'onduleur
I_Collecteur_IGBT_PMCF	Courant collecteur de l'IGBT du PMCF
RH_amb_IGBT	Humidité relative ambiante de l'IGBT de l'onduleur ou du PMCF
Tc_IGBT_Ond	Température de la semelle de l'IGBT de l'onduleur
Tc_IGBT_PMCF	Température de la semelle de l'IGBT du PMCF
Temp_amb_IGBT	Température ambiante de l'IGBT de l'onduleur ou du PMCF
Tension_Isol_IGBT	Tension d'isolement de l'IGBT du PMCF ou de l'onduleur
Tconnect_Puis_IGBT_Ond	Température de la connectique de puissance de l'IGBT de l'onduleur
Tconnect_Puis_IGBT_PMCF	Température de la connectique de puissance de l'IGBT du PMCF
Tj_IGBT_Ond	Température de jonction de l'IGBT de l'onduleur
Tj_IGBT_PMCF	Température de jonction de l'IGBT du PMCF
Vdc_IGBT	Tension du bus continu de l'IGBT du PMCF ou de l'onduleur
Vibrat_IGBT	Vibration subie par l'IGBT du PMCF ou de l'onduleur

Tableau III.3: Contraintes de fonctionnement niveau IGBT

Elles regroupent l'ensemble des variables de fonctionnement dans l'environnement immédiat de l'IGBT. Sur le plan des contraintes électriques, on distinguera la tension du bus continu [EN50163, 2004], la tension d'isolement, les courants phases [Chapas et Petit, 2004]. Les contraintes mécaniques sont liées aux chocs et vibrations subis par le composant [CEI 61373, 2011]. Les contraintes environnementales quant à elles se réfèrent à la température et à l'humidité relative ambiante du composant. Les contraintes thermiques sont les températures et les amplitudes de cycles de jonction, de la semelle et des connectiques de puissance [Piton, 2015b]. Le tableau III.3 détaille l'ensemble de ces contraintes de fonctionnement au niveau IGBT avec leurs définitions respectives.

III.3.3. Phases de fonctionnement niveau Convertisseur

On distingue la phase d'alimentation et la phase de commande du convertisseur [Colombo et al., 2012]. Les deux types de convertisseurs sont alimentés de la même façon. De ce fait, les alimentations en tension de l'onduleur et du PMCF sont désignées par la même variable « HTBT_Conv ». Sur la phase de commande, les deux convertisseurs ne sont pas sollicités identiquement, de facto les deux variables « PMCF_Cmde » et « Ond_Cmde » dont distinctes. Les trois phases de fonctionnement identifiées au niveau Convertisseur ainsi que leurs définitions sont résumées dans le tableau III.4.

Phases de fonctionnement niveau Convertisseur	Définition
HTBT_Conv	Convertisseur alimenté
Ond_Cmde	Onduleur commandé
PMCF_Cmde	PMCF commandé

Tableau III.4: Phases de fonctionnement niveau Convertisseur

III.3.4. Contraintes de fonctionnement niveau Convertisseur

Les deux convertisseurs sont soumis à des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et hygrométriques.

Contraintes niveau Convertisseur	Définition
Choc_Conv	Choc subi par le convertisseur Onduleur ou PMCF
Iph_Conv_Ond	Courant Phase Onduleur
Iph_Conv_PMCF	Courant Phase PMCF
RH_amb_Conv	Humidité relative ambiante convertisseur
Tension_Isol_Conv	Tension d'isolement du convertisseur
Temp_amb_Conv	Température ambiante convertisseur
Vdc_Conv	Tension aux bornes du convertisseur
Vibrat_Conv	Vibration subie par le convertisseur Onduleur ou PMCF

Tableau III.5: Contraintes de fonctionnement niveau Convertisseur

Dans les contraintes électriques, on distinguera les courants phases qui en fonctionnement traversent les convertisseurs et leur tension d'alimentation (EN50163 [2004] ; Sabaté [1998]). La tension d'alimentation est la même sur les deux types de convertisseur, donc une seule variable « Vdc_Conv » est retenue pour désigner cette tension. Cette variable porte aussi le nom de tension du bus continu. Les courants phases, n'étant pas identiques on séparera en revanche les variables « Iph_Conv_Ond » et « Iph_Conv_PMCF ». L'humidité relative ambiante reste la seule contrainte hygrométrique. Cette variable reste la même pour les deux convertisseurs car en termes de disposition dans le coffre de traction, ils s'inscrivent dans un même environnement hygrométrique. Il en est de même pour la température ambiante convertisseur. Le tableau III.5 retrace l'ensemble de ces contraintes.

III.3.5. Phases de fonctionnement niveau Train

Dans les phases de fonctionnement niveau Train, on distinguera le déplacement du train et l'alimentation du train (tableau III.6). La phase de déplacement du train regroupe les phases d'accélération, de maintien de vitesse, de freinage et d'arrêt (arrêt sous tension et arrêt au dépôt). L'alimentation du train inclut l'alimentation en roulage et à l'arrêt.

Phases de fonctionnement niveau Train	Définition
Deplacement_Train	Déplacement du train
HTBT_Train	Train alimenté

Tableau III.6: Phases de fonctionnement niveau Train

III.3.6. Contraintes de fonctionnement niveau Train

Elles sont électriques, mécaniques, cinématiques, thermiques et hygrométriques. Elles décrivent l'environnement direct de fonctionnement du train. Le train est alimenté par la tension caténaire [Chapas, 2003] qui peut être alternative ou continue. La norme [EN 50125-1, 2014] couvre les définitions et gammes des paramètres cinématiques et environnementaux de l'environnement fonctionnel du train. Parmi ces paramètres, on retrouve la vitesse, la masse, le relief, l'altitude, les chocs, les vibrations, la température ambiante et l'humidité relative ambiante du train (Tableau III.7).

Contraintes de fonctionnement niveau Train	Définition
Altitude_Train	Altitude du train
Choc_Train	Choc subi par le train
Masse_Train	Masse du train
Relief_Train	Relief de la zone où le train roule
RH_amb_Train	Humidité relative ambiante du Train
Temp_amb_Train	Température ambiante du train
Ucat_AC_Train	Tension caténaire du train
Vitesse_Train	Vitesse du train
Vibrat_Train	Vibration subie par le train

Tableau III.7: Contraintes de fonctionnement niveau Train

III.3.7. Mécanismes de défaillance

Au niveau mécanismes de défaillance, les variables du graphe du réseau bayesien sont données dans le tableau III.8.

Mécanismes de défaillance	Définition
Lambda_RBSOA_Ond	Taux de défaillance dû au dépassement de l'aire de sécurité de l'IGBT de l'onduleur
Lambda_RBSOA_PMCF	Taux de défaillance dû au dépassement de l'aire de sécurité de l'IGBT du PMCF
Lambda_LTDS_Ond	Taux de défaillance dû au rayonnement cosmique de l'IGBT de l'onduleur
Lambda_LTDS_PMCF	Taux de défaillance dû au rayonnement cosmique de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_Dec_Fil_IGBT_Ond	Durée de vie consommée par décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_Dec_Fil_IGBT_Ond	Durée de vie consommée par décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_Rec_Alu_PMCF	Durée de vie consommée par reconstruction de l'Aluminium de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_Rec_Alu_PMCF	Durée de vie consommée par reconstruction de l'Aluminium de l'IGBT du PMCF
DureVieCons_Fat_Bras_Ond	Durée de vie consommée par fatigue de la brasure de la puce de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_Fat_Bras_PMCF	Durée de vie consommée par fatigue de la soudure de l'IGBT du PMCF
DureVieCons_Fat_Conn_Ond	Durée de vie consommée par fatigue des connectiques de puissance de l'IGBT de l'onduleur
DureVieCons_Fat_Conn_PMCF	Durée de vie consommée par fatigue des connectiques de puissance de l'IGBT du PMCF
DureeVieCons_Fis_Conn_IGBT_Ond	Durée de vie consommée par fissuration de la connectique de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_Fis_Conn_IGBT_PMCF	Durée de vie consommée par fissuration de la connectique de l'IGBT du PMCF
DureeVieCons_Subs_IGBT_Ond	Durée de vie consommée par fissuration du substrat de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_Subs_IGBT_PMCF	Durée de vie consommée par fissuration du substrat de l'IGBT du PMCF
DureeVieCons_Fis_Fil_IGBT_Ond	Durée de vie consommée par fissuration du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_ Fis_Fil_IGBT_PMCF	Durée de vie consommée par fissuration du fil de bonding de l'IGBT du PMCF
DureeVieCons_Fis_Puce_IGBT_Ond	Durée de vie consommée par fissuration de la puce de l'IGBT de l'onduleur
DureeVieCons_ FisPuce_IGBT_PMCF	Durée de vie consommée par fissuration de la puce de l'IGBT du PMCF
DureeVieCons_Fis_Boitier	Durée de vie consommée par la fissuration du boitier
DureeVieCons_Dec_Boitier	Durée de vie consommée par le décollement du boitier
DureeVieCons_ClaqDiel_Substrat	Durée de vie consommée par Claquage diélectrique du substrat de l'IGBT
DureeVieCons_ClaqDiel_Gel	Durée de vie consommée par Claquage diélectrique du gel de l'IGBT
AF_Cor_Fil_Bond_Ond	Facteur d'accélération due à la corrosion du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
AF_Cor_Fil_Bond_PMCF	Facteur d'accélération due à la corrosion du fil de bonding de l'IGBT du PMCF
AF_Cor_Puce_Ond	Facteur d'accélération due à la corrosion de la puce de l'IGBT de l'onduleur
AF_Cor_Puce_PMCF	Facteur d'accélération due à la corrosion de la puce de l'IGBT du PMCF
AF_Electromigration_Ond	Facteur d'accélération due à Electromigration de l'IGBT de l'onduleur
AF_Electromigration_PMCF	Facteur d'accélération due à l'électromigration de l'IGBT du PMCF
AF_Contamination_Ion_Ond	Facteur d'accélération due à la contamination de l'ion de l'IGBT de l'onduleur
AF_Contamination_Ion_PMCF	Facteur d'accélération due à la contamination de l'ion de l'IGBT du PMCF
AF_Fat_Conn_Ond	Facteur d'accélération due à la fatigue des connectiques de l'IGBT de l'onduleur
AF_Fat_Conn_Pmcf	Facteur d'accélération due à la fatigue des connectiques de l'IGBT du PMCF
AF_Dec_Fil_Bond_Ond	Facteur d'accélération due au décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
AF_Dec_Fil_Bond_PMCF	Facteur d'accélération due au décollement du fil de bonding de l'IGBT du PMCF

Tableau III.8: Variables au niveau mécanismes de défaillance

Les équations qui régissent les mécanismes de défaillance sont soit données par le Nombre de Cycle avant Défaillance (N_f), le Temps de fonctionnement avant défaillance (T_f), le Temps Moyen de fonctionnement avant défaillance (MTTF) ou le taux de défaillance (λ). Les équations mathématiques qui les régissent ainsi que les références bibliographiques ont été développées dans le chapitre II. Dans la structure du graphe, les mécanismes de défaillance exprimés en (λ) vont être représentés par un nœud donnant le taux de défaillance et des arcs orientés vont relier ces nœuds avec leurs nœuds parents (causes). Par exemple, la variable « Lambda_RBSOA_Ond » désigne le taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique. Pour les mécanismes de défaillance exprimés en N_f, la variable les modélisant est la durée de vie consommée (à partir du profil, quel pourcentage de durée de vie a été consommée). Enfin pour les mécanismes de défaillance exprimé en (T_f), ils sont modélisés par leur facteur d'accélération dans la structure.

III.3.8. Structure du graphe dans Netica

La structure du modèle d'évaluation de la fiabilité de l'IGBT a été implémentée dans l'outil de modélisation par réseaux bayesiens nommé Netica[9]. Netica est un logiciel développé depuis 1992 et commercialisé depuis 1995 par la société canadienne Norsys. Il dispose d'une interface graphique autorisant la création et le positionnement des nœuds, l'établissement des liens entre eux et le remplissage des TP à partir de connaissances, de données ou d'équations. Netica permet aussi de faire de l'apprentissage de TP à partir de données complètes ou incomplètes. Il offre la possibilité de les apprendre à partir de fichiers textes, de fichiers Excel ou de bases de données ODBC (Open Data Base Connectivity). En termes d'apprentissage des paramètres, Netica utilise les algorithmes d'apprentissage bayesien, statistique et l'algorithme EM (Expectation Maximisation). L'apprentissage de structure y est également disponible. Netica se prête remarquablement bien au domaine industriel, étant donné sa puissance de calcul, sa facilité de déploiement opérationnel et sa capacité à intégrer des données d'experts. La représentation graphique qu'elle offre est simple, expressive et la visualisation des résultats sous la forme d'histogrammes facilite la lecture du réseau bayesien par les industriels ou encore les non-initiés. Netica permet d'appréhender les Réseaux Bayesiens Dynamiques (RBD) par intégration de la dimension temporelle dans la modélisation.

La structure du réseau bayesien pour l'évaluation de la fiabilité de l'IGBT a été construite entièrement sous le logiciel Netica ; d'une part à partir des variables phases et contraintes de fonctionnement aux différents niveaux Train, Convertisseur et IGBT ainsi que des mécanismes de défaillance et, d'autre part, en fonction des liens entre ces variables. La structure a été

[9] http://www.norsys.com/

construite et validée par les experts d'ALSTOM Tarbes. La structure mise en place est générique et a l'avantage de s'appliquer à tout type d'engin du ferroviaire (train à grande vitesse, métro, tram, locomotive, train régional). L'apprentissage des paramètres en données diffèrera en fonction de l'application ferroviaire et des données disponibles sur le projet.

Pour une meilleure lisibilité, la structure est schématisée par morceaux. Les figures III.8, III.9 et III.10 montrent différentes parties de la structure du graphe bayesien respectivement du niveau IGBT au niveau Convertisseur, du niveau Convertisseur au niveau Train, du niveau IGBT au niveau mécanismes de défaillance. Toutes ces parties imbriquées forment la structure générique du graphe bayesien pour l'évaluation de la fiabilité de l'IGBT.

La lecture du graphe se fait comme suit : les phases et contraintes niveau convertisseur engendrent des phases et contraintes niveau IGBT (figure III.8) ; les phases et contraintes niveau Train causent des phases et contraintes niveau convertisseur (figure III.9) ; les contraintes niveau IGBT engendrent les mécanismes de défaillance (figure III.10). On retrouve donc la représentation multi-niveaux avec des codes couleurs associés à chaque niveau. On peut constater la complexité du réseau avec plus de 80 variables et plus d'une centaine de liens entre elles.

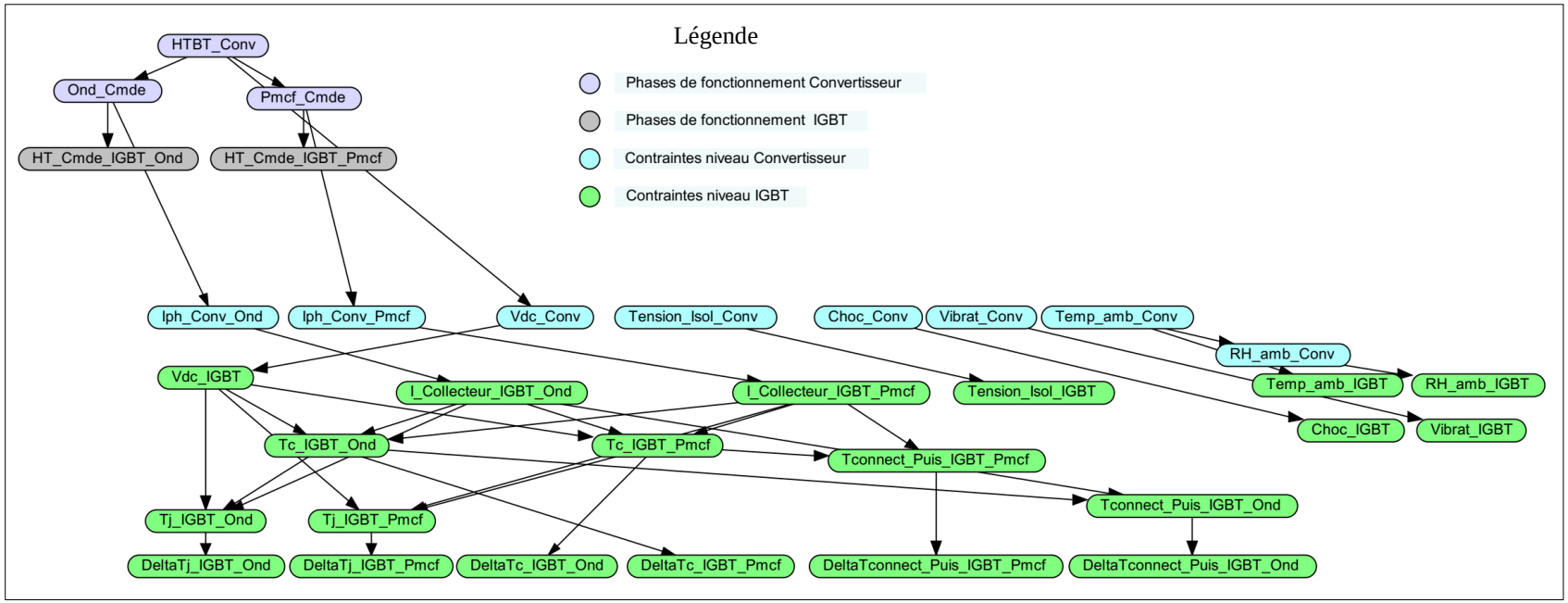


Figure III.8: Structure du graphe bayesien; du niveau IGBT au niveau Convertisseur

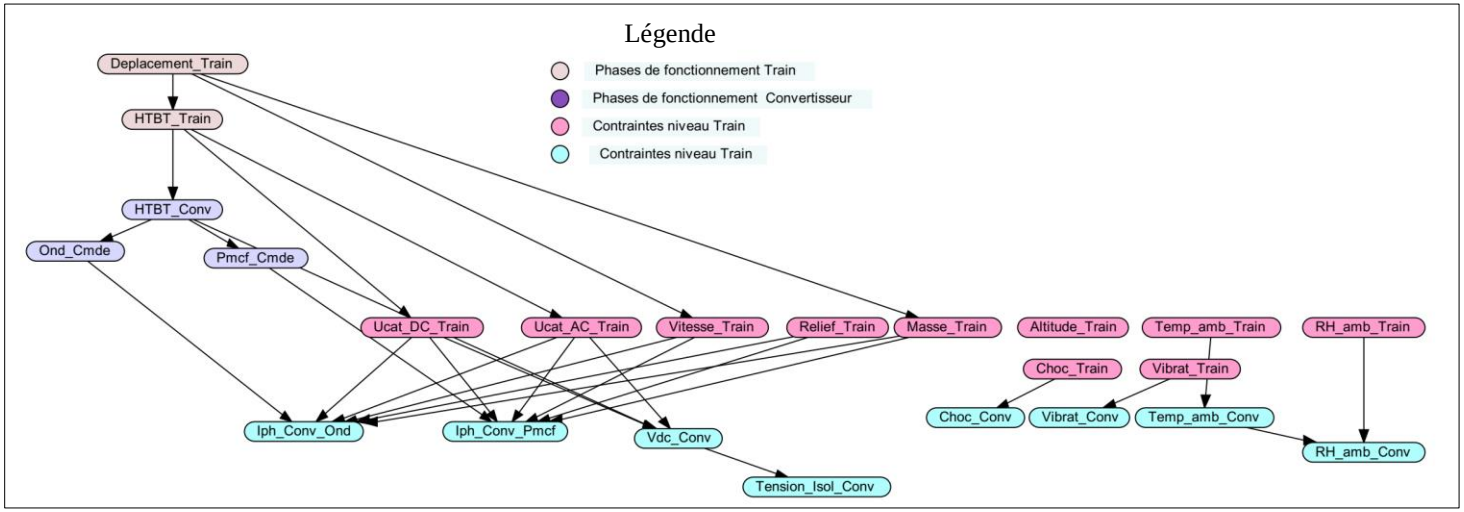


Figure III.9: Structure du graphe bayesien; du niveau Convertisseur au niveau Train

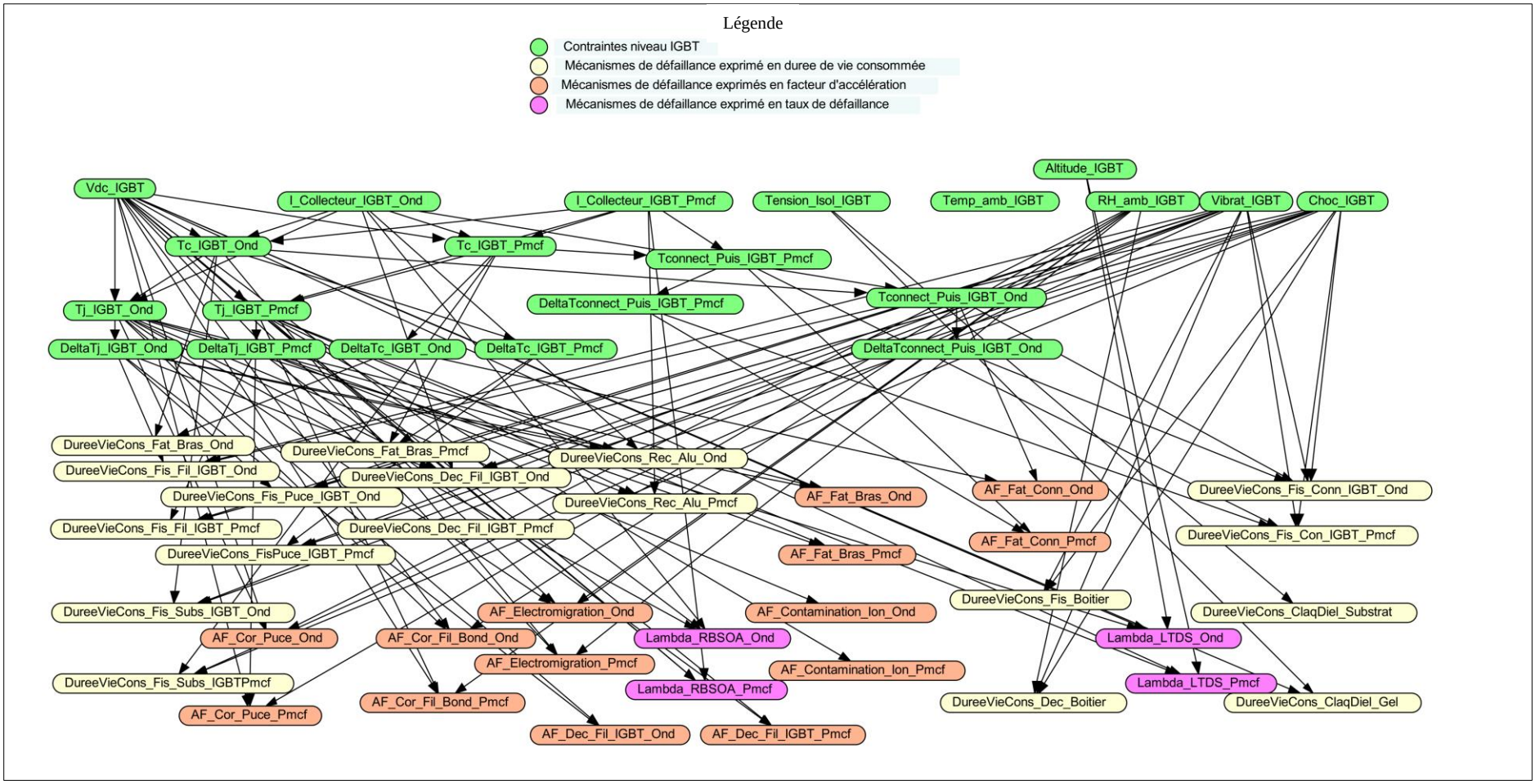


Figure III.10: Structure du graphe bayesien ; du niveau contraintes IGBT aux mécanismes de défaillance

III.4. Cadre idéal de détermination des TP

Dans cette partie, on décrit le cadre idéal pour apprendre les tables de probabilité des variables du réseau bayesien d'estimation de la fiabilité de l'IGBT. Le modèle s'alimente à partir de données recueillies sur l'ensemble des variables. Ces données peuvent être complètes ou incomplètes et les méthodes d'apprentissage ont été présentées dans chaque configuration. L'idéal pour alimenter le réseau bayesien serait donc d'avoir une table de données complète ou incomplète mais synchronisée. Ces données doivent être synchronisées c'est-à-dire que chacune des variables doit être prise aux mêmes instants et dans les mêmes conditions. Toutes les variables phases et contraintes de fonctionnement aux différents niveaux train, convertisseur et IGBT devraient donc être synchronisées. Si l'on prend l'exemple de trois variables : l'humidité, la tension et le courant pour illustrer cette synchronisation, il faudrait qu'à une tension corresponde exactement le courant et l'humidité à un instant t donné dans les mêmes conditions de fonctionnement.

Formalisation

Soient $(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ représentant les *n* variables de la structure du graphe bayesien. Ces variables peuvent être discrètes ou continues. On suppose que les données sur ces variables sont synchronisées c'est-à-dire à un $x_i(t)$ on associe un $x_j(t)$ qui lui corresponde ou encore les variables $(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ ont été enregistrées dans les mêmes conditions et aux mêmes instants. La base de données complète est représentée par la figure III.11.

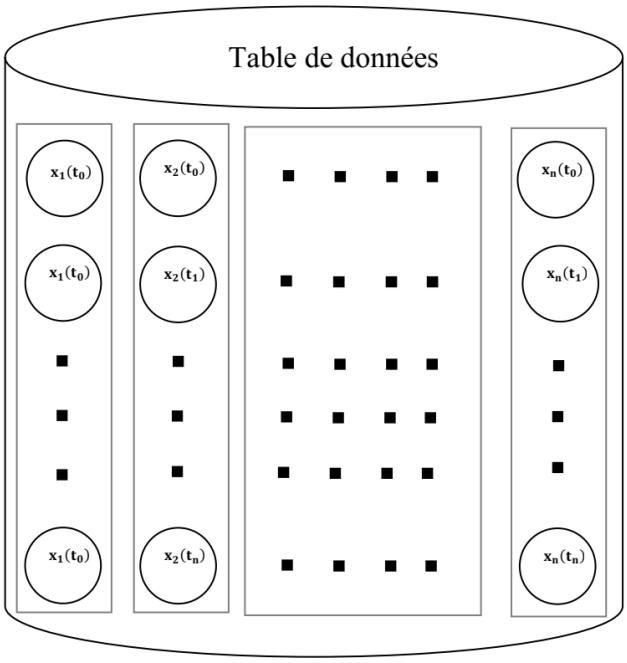


Figure III.11: Illustration d'une table de données complète

Lorsque la table de données est complète et les données synchronisées, on pourrait utiliser une des méthodes d'apprentissage des paramètres à partir de données complètes pour estimer les TP : la méthode de maximum de vraisemblance, la méthode du maximum à posteriori ou la méthode de l'espérance à posteriori.

On imagine cette fois ci que la base de données est incomplète mais synchronisée. L'enregistrement de données est faîte sur l'ensemble des variables, néanmoins quelques trous (manque de données) subsistent dans la base de données (dus par exemple à des bugs d'enregistrement). La représentation est celle de la figure III.12 où les données manquantes sont représentées par des points d'interrogation. Dans ce cas de figure on pourrait utiliser l'Algorithme EM (Expectation Maximisation) pour l'apprentissage des TPC.

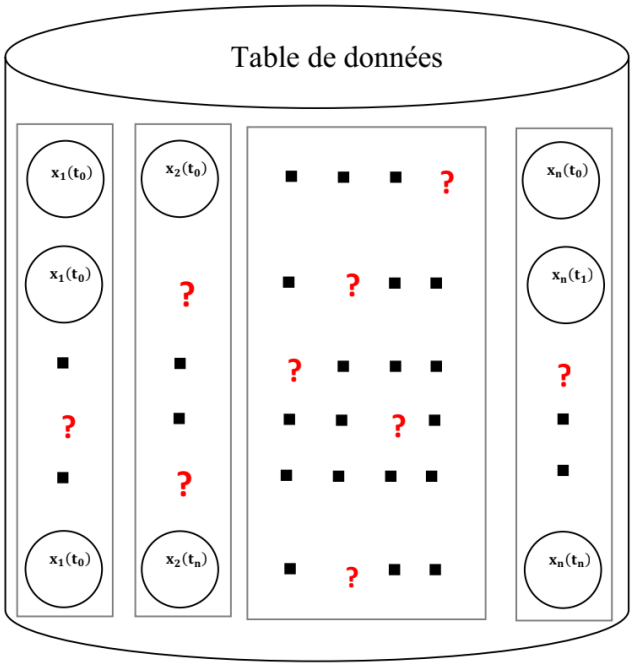


Figure III.12: Illustration d'une table de données incomplètes

Il est très difficile de se retrouver dans l'un des cas décrits précédemment dans l'état actuel des connaissances et données récupérées sur des projets ferroviaires à ALSTOM. On ne dispose donc pas de données synchronisées sur l'ensemble des variables de la structure du graphe bayesien c'est-à-dire une table de données dans laquelle toutes les variables sont observées aux mêmes instants. Dans la mesure où les données de défaillance ne sont pas synchronisées avec le fonctionnement réel des composants, on ne dispose pas non plus de données de contexte de la défaillance.

Pour pallier cette difficulté de synchronisation de données, on s'oriente vers des « alternatives » pour établir les TP du modèle. Ces alternatives se décrivent en deux volets :

- on s'affranchit de la dimension temporelle dans le modèle bayesien et on décrit le profil de mission relatif à chaque variable sur un même intervalle de temps (par exemple une journée). Les TPC sont ensuite établies soit à partir d'analyse statistique de données, soit l'utilisation du théorème de Bayes ou encore l'utilisation d'équations (les détails de cette détermination sont donnés dans le chapitre V) ;
- on développe un certain nombre d'approches qui permettent de passer des mécanismes de défaillance aux indicateurs de défaillance (taux de défaillance et durée de vie). Pour cela le chapitre IV va être consacré au passage des TP aux indicateurs de défaillance.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les réseaux bayésiens au travers des formalismes tels que la théorie des probabilités et des graphes, l'apprentissage des paramètres et de structure. L'apprentissage de structure permet de déterminer la structure tandis que l'apprentissage des paramètres permet d'estimer les paramètres du réseau. L'apprentissage des paramètres ou de structures peut se faire à partir de données complètes ou incomplètes. Les avis d'experts sont aussi utilisés pour établir la structure du réseau bayesien ou pour estimer les TPC. Les méthodes utilisées dans ces deux types d'apprentissage ont été évoquées dans ce chapitre.

Après la description des notions relatives à la modélisation via l'utilisation de réseaux bayesiens, la structure du graphe générique d'estimation de la fiabilité de l'IGBT a été établie. Le cadre idéal qui aurait permis d'alimenter le modèle en données, de faire de l'inférence et de l'exploiter a été décrit en fin de chapitre. Malheureusement il est très difficile aujourd'hui de réunir les conditions permettant de rentrer dans ce cadre. Le prochain chapitre propose alors un ensemble de « méthodes alternatives » autorisant le passage des TP aux indicateurs de défaillance.

IV. Du modèle bayesien aux indicateurs de défaillance

L'analyse dysfonctionnelle effectuée au chapitre II a permis d'identifier l'ensemble des mécanismes de défaillance susceptibles d'amener à la dégradation ou à la casse de l'IGBT. Le chapitre III a permis de mettre en place la structure du graphe bayesien mettant en évidence, de façon descendante, l'ensemble des paramètres influents sur la fiabilité de l'IGBT.

L'ensemble des mécanismes de défaillance est modélisé sous la forme de nœuds dans la structure du graphe bayesien. Les modèles décrivant les différents mécanismes de défaillance sont exprimés de différentes manières en fonction des tests ou des études précédentes effectuées dans le domaine de la prédiction de la fiabilité des IGBT. On retrouve donc des mécanismes de défaillance exprimés en Nombre de Cycles avant défaillance (N_f), d'autres sous la forme de facteur d'accélération entre deux niveaux de contraintes (AF), ou sous la forme de Temps de fonctionnement avant défaillance (T_f) et ceux directement formulés sous la forme de Taux de défaillance (λ). Dans le modèle bayesien, l'ensemble de ces mécanismes de défaillance est modélisé sous la forme de TP.

Le cadre du modèle bayesien de prédiction de la fiabilité de l'IGBT va de la modélisation du profil de mission niveau Train aux mécanismes de défaillance niveau IGBT en passant par la modélisation des contraintes aux niveaux intermédiaires : Convertisseur et IGBT. On intègre donc dans le modèle bayesien l'ensemble des connaissances du profil de mission du train, du convertisseur et de l'IGBT sous forme de TP. On déroule ce processus jusqu'au niveau des mécanismes de défaillance, niveau le plus bas de la structure du graphe bayesien. Pour répondre au besoin d'ALSTOM de pouvoir disposer d'une estimation chiffrée de la durée de vie et une courbe représentative du taux de défaillance en fonction du temps, ce chapitre vise à mettre en lumière les outils et méthodes autorisant le passage des mécanismes de défaillance exprimés sous la forme de TP à un taux de défaillance global et à une durée de vie globale de l'IGBT. La

tentative de réponse à cet objectif s'est appuyée sur plusieurs principes mathématiques rappelés à la suite.

IV.1. Vers des indicateurs globaux de fiabilité

Au terme de la modélisation bayesienne, la connaissance construite et récupérée concerne la probabilité d'apparition de chaque mécanisme de défaillance. Quatre cas sont à traiter :

1. cas des phénomènes décrits directement par le taux de défaillance, le modèle bayesien aboutit à la détermination de la répartition du taux de défaillance de l'IGBT ;
2. cas des modèles de facteur d'accélération, le modèle bayesien conduit à la détermination de la répartition de ce facteur d'accélération en fonction de l'environnement de fonctionnement de l'IGBT ;
3. cas des phénomènes exprimés sous la forme de Temps de Fonctionnement avant défaillance (T_f), le modèle conduit à la détermination de la répartition de ce temps en fonction de l'environnement de l'IGBT ;
4. cas des phénomènes exprimés en nombre de cycles avant défaillance (N_f), la sortie du modèle est la TP décrivant la répartition de la durée de vie consommée par l'IGBT dans son environnement de fonctionnement.

La finalité de notre travail est double :

- passer de la modélisation d'un mécanisme de défaillance sous la forme de TP à l'estimation du taux de défaillance ou de la durée de vie dû(e) à ce phénomène ;
- estimer le taux de défaillance global et la durée de vie globale de l'IGBT en fonction des mécanismes de défaillance étudiés étant donné que chacun de ces mécanismes de défaillance contribue de manière conjointe aux indicateurs de défaillance globaux de l'IGBT.

IV.1.1. Schématisation symbolique

On s'intéresse au passage des mécanismes de défaillance (niveau le plus bas de la structure du graphe bayesien) aux indicateurs de défaillance. La figure IV.1 montre de façon schématique le lien entre le modèle bayesien et le passage vers les indicateurs de fiabilité que sont le taux de défaillance et la durée de vie de l'IGBT. La construction du modèle est entièrement réalisée via le logiciel Netica. Le passage du modèle bayesien aux calculs des indicateurs de défaillance est fait extérieurement au modèle bayesien par utilisation du logiciel Matlab.

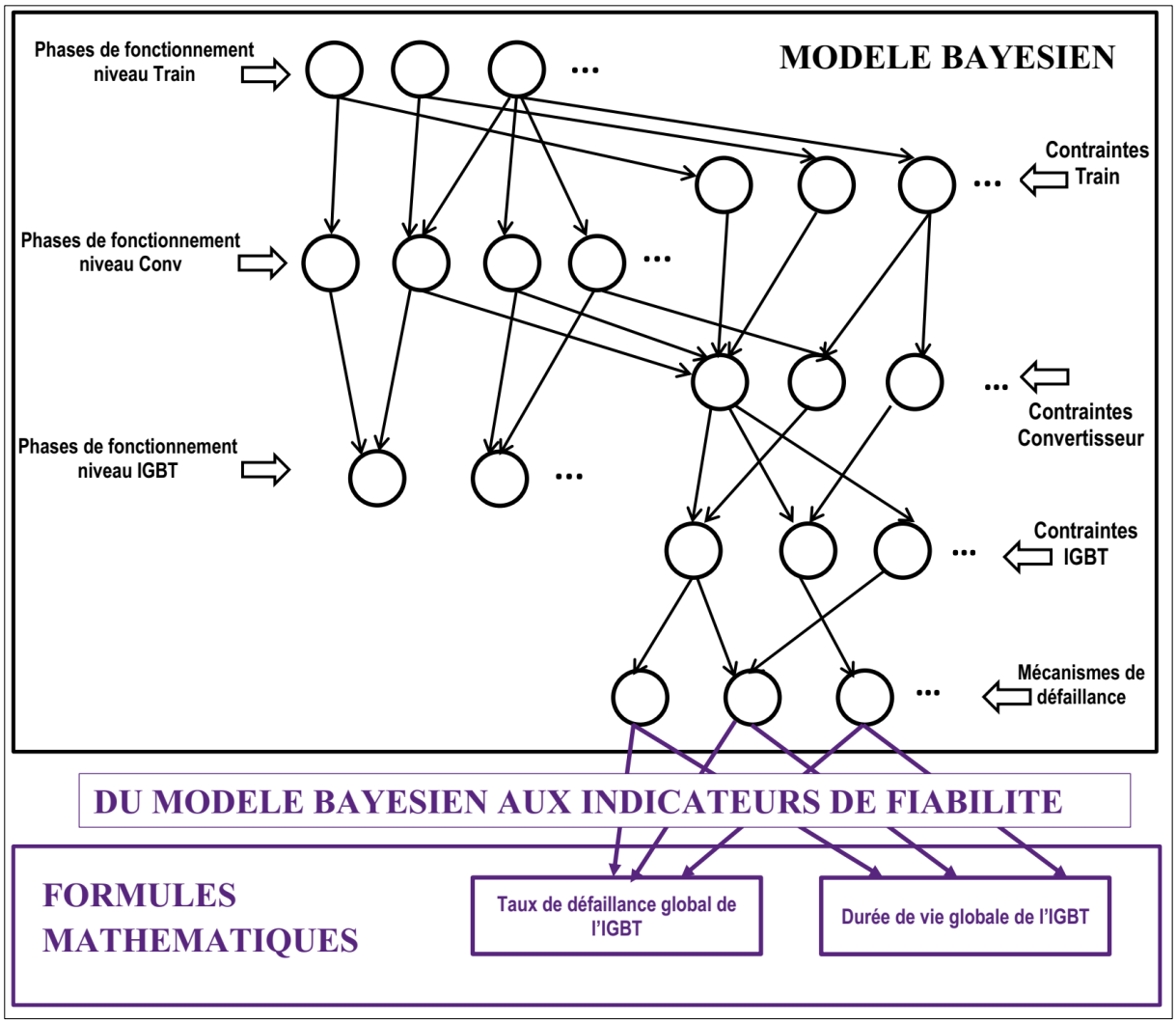


Figure IV.1: Du modèle bayesien aux indicateurs de défaillance

IV.1.2. Expression des Mécanismes de défaillance

Le tableau VI.1 montre quelques mécanismes de défaillance et les modèles disponibles. Une fois les indicateurs de défaillance déterminés pour chaque mécanisme de défaillance, il faut alors passer aux indicateurs de défaillance globaux de l'IGBT.

La durée de vie globale de l'IGBT est le minimum de la durée de vie associée à chaque mécanisme de défaillance.

$$DureeDeVie_{globale_{IGBT}} = \min(DureeDeVie_i) \quad \text{(IV.1)}$$

où $DureeDeVie_{\ i}$ est la durée de vie relative à un mécanisme de défaillance i.

Le taux de défaillance global de l'IGBT est la somme des taux de défaillance imputables à chacun des mécanismes de défaillance.

$$\lambda_{global_{IGBT}} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \quad \text{(IV.2)}$$

où λ_i est le taux de défaillance relatif à un mécanisme de défaillance *i*.

Dans la suite de ce chapitre, on détaillera les méthodes mathématiques proposées pour passer de la distribution probabiliste des mécanismes de défaillance au taux de défaillance global et à la durée de vie globale de l'IGBT dans les quatre cas de figures précédemment énoncés et correspondant aux phénomènes respectivement décrits par λ, AF, Tf ou Nf.

Exemple de mécanismes de défaillance	Sous quelle forme est-il exprimé ?
• Décollement du fil de bonding • Fissuration du fil de bonding • Fatigue de la brasure	Nf (nombre de cycles avant défaillance)
• Corrosion du fil de bonding • Electromigration • Corrosion de la métallisation de la puce • Claquage du diélectrique dépendant du temps • Contamination de l'ion • Migration électrochimique	Facteur d'Accélération (AF) ou Tf (temps de fonctionnement avant défaillance)
• Rayonnement cosmique • Dépassement de l'aire de sécurité	Taux de défaillance (λ)

Tableau IV.1: Mécanismes de défaillance et modèles associés

La figure IV.2 montre une illustration du passage des mécanismes de défaillance au taux de défaillance global et à la durée de vie globale de l'IGBT. Les indices *i, j, k* et *l* désignent les mécanismes de défaillance.

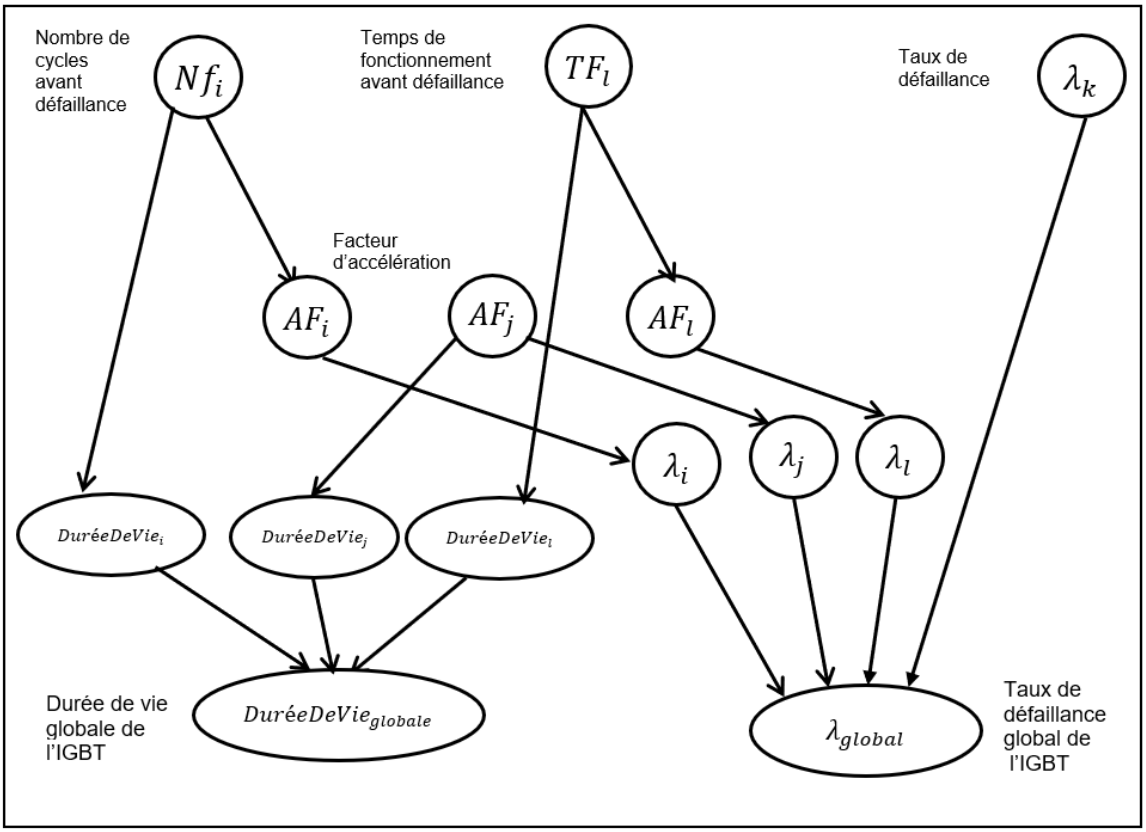


Figure IV.2: Passage des mécanismes de défaillance donnés par les TPC aux indicateurs globaux de défaillance

Les mécanismes de dégradation exprimés en Nf et en Tf participent à la détermination du taux de défaillance global de l'IGBT (et non uniquement à l'estimation de durée de vie).

IV.2. Expression du taux de défaillance

Dans cette partie, on étudie les différents scénarii pour passer des tables de probabilités à l'estimation du taux de défaillance.

IV.2.1. Cas 1 : Pour les mécanismes de défaillance déjà décrits par un taux de défaillance

Dans ce cas de figure, le taux de défaillance est donné par une équation, fonction des paramètres influant sur la dégradation de l'IGBT. C'est notamment le cas des phénomènes de rayonnement cosmique et des phénomènes de dépassement de l'aire de sécurité (RBSOA). Le chapitre II a permis de décrire ces phénomènes. Le taux de défaillance est donc constant et les temps de défaillance suivent une loi exponentielle. L'expression du taux de défaillance est modélisée dans le réseau bayesien en prenant en compte le profil de mission c'est-à-dire les conditions de fonctionnement du composant dans son environnement. On obtient donc une TP du taux de défaillance induit par ce phénomène.

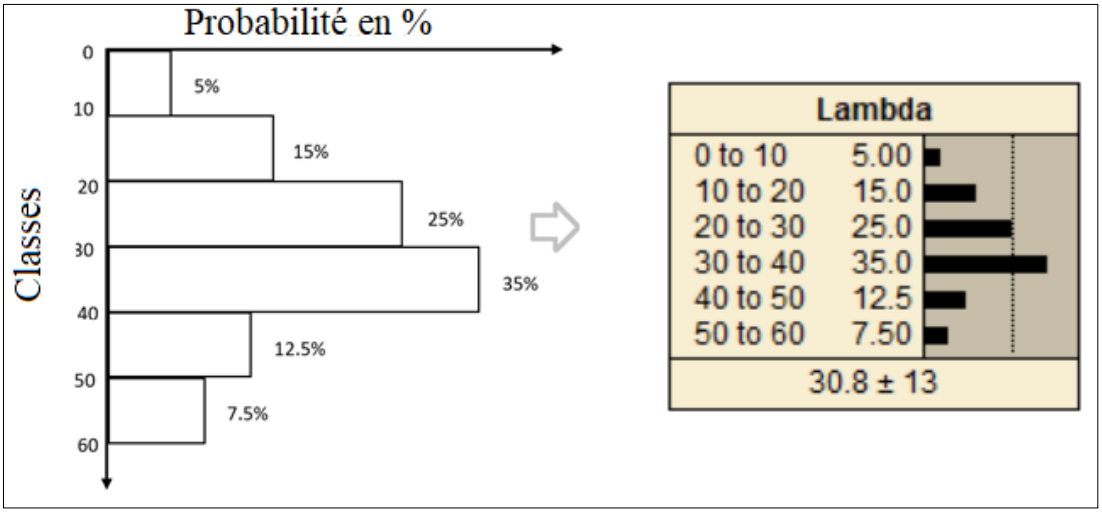


Figure IV.3: Exemple de TP du taux de défaillance (Lambda)

La TP de la variable taux de défaillance se présente comme celle de la figure IV.3 et est caractérisée par :

- la classe notée c_i $[c_{min}, c_{max}]$, avec c_{min} et c_{max} représentant les bornes de l'intervalle d'appartenance, i représentant le numéro de la classe ;
- le milieu de la classe i noté c_{m_i} ;
- la probabilité d'appartenance de chaque classe notée p_i.

Pour estimer le taux de défaillance, on propose de faire l'analogie avec le modèle FIDES [Guide Fides, 2009]. Le modèle FIDES prédit un taux de défaillance horaire exprimés en heure calendaire et basés sur la prise en compte d'un profil de vie annuel. Pour obtenir un taux équivalent, le taux de défaillance de chaque phase $\lambda_{phase-i}$ est pondéré par la durée de la phase :

$$\lambda_{Physique} = \sum_{i}^{Phases} \frac{Temps_{annuel\,phase-i}}{8760} \lambda_{phase-i} \quad \text{(IV.3)}$$

Dans l'analogie, puisque l'on raisonne en probabilité dans le modèle bayesien, on propose de pondérer le taux de défaillance de chaque classe de la TP du taux de défaillance par sa probabilité d'apparition p_i. On fait également l'hypothèse que le taux de défaillance de chaque classe est la moyenne de la classe notée C_{m_i}.

$$\lambda_{mecanisme} = \sum_{i}^{n} p_i \, C_{m_i} \quad \text{(IV.4)}$$

où *n* est le nombre total de classes.

La formule (IV.5) permet de calculer un nombre de défaillance par unité de temps sur la durée de la mission, ce qui diffère de la formulation au sens limite de la notion de taux de défaillance utilisée en fiabilité.

Pour illustrer la méthode, on reprend l'exemple de la figure IV.3 et on réalise un calcul du nombre de défaillance par unité de temps sur la durée de la mission. Le tableau IV.2 synthétise les moyennes des classes ainsi que les probabilités correspondantes intervenant dans ce calcul.

$$\lambda_{moy} = 5 \times 0{,}05 + 15 \times 0{,}15 + 25 \times 0{,}25 + 35 \times 0{,}35 + 45 \times 0{,}125 + 55 \times 0{,}075 \quad \text{(IV.5)}$$

$$\lambda_{moy} = 30{,}75 \quad \text{(IV.6)}$$

c_{min}	c_{max}	c_{m_i}	p_i
0	10	5	0,05
10	20	15	0,15
20	30	25	0,25
30	40	35	0,35
40	50	45	0,125
50	60	55	0,075

Tableau IV.2: Paramètres caractéristiques de la TP

Dans cet exemple particulier, le nombre de défaillance par unité de temps est égal à 30,75.

IV.2.2. Cas 2 : Pour les phénomènes exprimés à partir d'un Facteur d'Accélération AF

Dans la modélisation bayesienne, le résultat obtenu pour la modélisation des mécanismes de défaillance caractérisés par une loi de facteur d'accélération est décrit par une TP qui montre l'évolution du facteur d'accélération AF en fonction de l'environnement de fonctionnement de l'IGBT. On propose également d'utiliser l'analogie au modèle de FIDES pour estimer le taux de défaillance. Avant de passer à la formulation de cette méthode, une revue de la notion de facteur d'accélération est proposée.

IV.2.2.1. Notion de Facteur d'Accélération (AF)

La notion de Facteur d'Accélération fait intervenir deux conditions de fonctionnement : les conditions normales d'utilisation ou conditions de référence et les conditions accélérées. Dans les essais accélérés, les composants sont soumis à des contraintes plus sévères que celles de leur vie opérationnelle afin de réduire la durée des essais. Les essais accélérés font intervenir les mêmes phénomènes de dégradation que ceux que subissent les composants en opération. Les modèles accélérés font l'hypothèse que le paramètre d'échelle de la loi de fiabilité est modifié par le stress et que la forme de la distribution des défaillances n'est pas changée (figure IV.4). Le facteur d'accélération définit donc le rapport des durées de vie en conditions accélérées et en conditions de référence. Il permet donc de passer d'une durée de fonctionnement en conditions accélérées vers une durée de fonctionnement en conditions de référence.

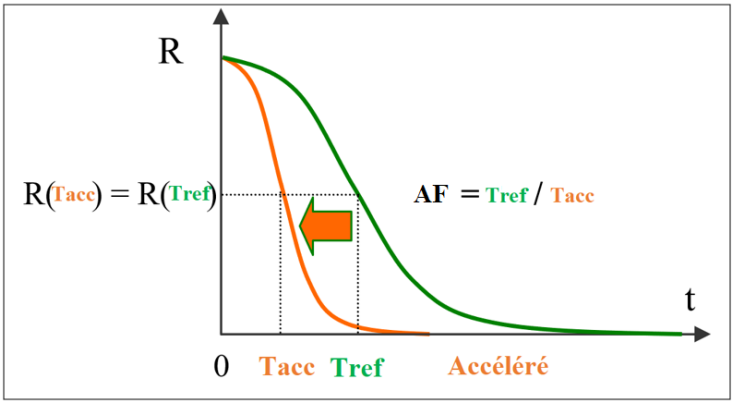


Figure IV.4: Principe du modèle accéléré

Les relations suivantes caractérisent le principe du modèle accéléré :

$$AF = \frac{T_{ref}}{T_{acc}} \tag{IV.7}$$

Où T_{ref} est la durée de fonctionnement en conditions de référence et T_{acc} la durée de vie en conditions accélérées.

Dans ce travail, on fait aussi l'hypothèse que les mécanismes de défaillance autres que les phénomènes de rayonnement cosmique et de RBSOA (taux de défaillance constant) suivent une distribution de Weibull. Cette hypothèse est validée par l'ensemble des partenaires du projet porteur de ce travail de recherche [PNT-WP04-D-SIE-083-01, 2018]. Pour un mécanisme de défaillance avec une distribution de Weibull à deux paramètres dans les conditions accélérées, la loi de Weibull accélérée s'écrit :

$$X_{acc} \sim W(\alpha_{acc}, \beta_{acc}) \tag{IV.8}$$

où α_{acc} est le paramètre d'échelle dans les conditions accélérées et β_{acc} est le paramètre de forme dans ces mêmes conditions. Pour passer des conditions accélérées en conditions de référence on écrit les relations suivantes [PNT-WP04-D-SIE-083-01, 2018]:

$$\alpha_{ref} = AF \text{ x } \alpha_{acc} \tag{IV.9}$$

$$\beta_{ref} = \beta_{acc} \tag{IV.10}$$

où α_{ref} est le paramètre de forme dans les conditions de référence et β_{ref} est le paramètre de forme dans les conditions de référence.

Le taux de défaillance en conditions de référence est donné par :

$$\lambda_{X_{ref}}(t) = \frac{1}{AF}\lambda_{X_{acc}}\left(\frac{1}{AF}t\right) \tag{IV.11}$$

Démonstration des relations (IV.9), (IV.10)

Par définition, le taux de défaillance peut s'écrire en fonction de la dérivée de la fonction de répartition et de la fonction de survie :

$$\lambda_X(t) = \frac{d(F_X(t))}{dt}\frac{1}{S_X(t)} \tag{IV.12}$$

Considérons X_{acc} la variable aléatoire désignant le temps de fonctionnement durant les tests de vieillissement accélérés. X_{acc} est supposée être décrite par une distribution de Weibull.

$$X_{acc} \sim W(\alpha_{acc}, \beta_{acc}) \tag{IV.13}$$

En conditions accélérées, on peut donc exprimer les fonctions de répartition ainsi que le taux de défaillance, respectivement donnés par les équations IV.14 et IV.15.

$$F_{X_{acc}}(t) = P(X_{acc} \leq t) = 1 - exp\left(-\frac{t}{\alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}} \tag{IV.14}$$

$$\lambda_{X_{acc}}(t) = \frac{d(F_X(t))}{dt}\frac{1}{S_X(t)} = \frac{\frac{\beta_{acc}}{\alpha_{acc}}\left(\frac{t}{\alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}-1} exp\left(-\frac{t}{\alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}}}{exp\left(-\frac{t}{\alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}}} = \frac{\beta_{acc}}{\alpha_{acc}}\left(\frac{t}{\alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}-1} \quad \text{(IV.15)}$$

On revient en conditions de référence pour recalculer le taux de défaillance. Le facteur d'accélération doit être supérieur à 1 avec $X_{ref} = AF\ X_{acc}$.

$$F_{X_{ref}}(t) = P\left(X_{ref} \leq t\right) = P(AF\ X_{acc} \leq t) = P\left(X_{acc} \leq \frac{t}{AF}\right) \quad \text{(IV.16)}$$

$$F_{X_{ref}}(t) = 1 - \exp\left(\frac{-t}{AF\ \alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}} \quad \text{(IV.17)}$$

$$\frac{d\left(F_{X_{ref}}(t)\right)}{dt} = \frac{\beta_{acc}}{AF\ \alpha_{acc}}\left(\frac{t}{AF\ \alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}-1} exp\left(-\frac{t}{AF\ \alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}} \quad \text{(IV.18)}$$

$$S_{X_{ref}}(t) = 1 - F_{X_{ref}}(t) = exp\left(-\frac{t}{AF\ \alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}} \quad \text{(IV.19)}$$

$$\lambda_{X_{ref}}(t) = \frac{\beta_{acc}}{AF*\alpha_{acc}}\left(\frac{t}{AF\ \alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}-1} \quad \text{(IV.20)}$$

Or l'expression du taux de défaillance de la loi de Weibull en conditions de référence $X_{ref} \sim W\left(\beta_{ref}, \alpha_{ref}\right)$ s'écrit :

$$\lambda_{X_{ref}}(t) = \frac{\beta_{ref}}{\alpha_{ref}}\left(\frac{t}{\alpha_{ref}}\right)^{\beta_{ref}-1} \quad \text{(IV.21)}$$

En faisant l'équivalence des relations IV.20 et IV.21, on retrouve bien le résultat exprimé par les relations IV.9 et IV.10.

IV.2.2.2. Schématisation de la TP d'un mécanisme de défaillance donné par son AF

La figure IV.5 illustre une TP de la variable AF (Facteur d'accélération). Elle fait intervenir deux composantes :

- la classe notée AF_i avec $[AF_{min}, AF_{max}]$, avec AF_{min} et AF_{max} représentant les bornes de l'intervalle d'appartenance de AF et *i* correspondant au numéro de la classe ;
- AF_{moy_i} la moyenne de la classe *i* ;
- la probabilité d'appartenance de chaque classe notée p_i.

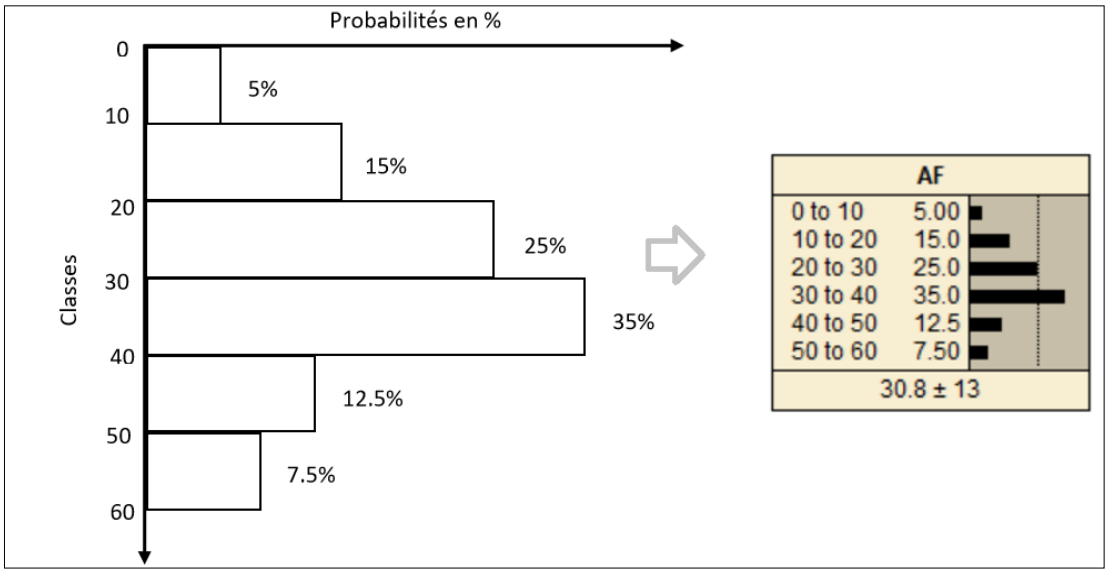


Figure IV.5: Schématisation d'une TP du facteur d'accélération

Dans le tableau, on peut lire, par exemple, que la probabilité d'appartenance de la classe [0, 10] est de 5%.

IV.2.2.3. Formalisation du taux de défaillance équivalent

Pour calculer un taux de défaillance équivalent, on pondère comme pour le modèle FIDES, le taux de défaillance de chaque classe par sa probabilité d'apparition. On propose de nommer cette formulation somme pondérée de lois de Weibull.

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^{n} p_i \, \lambda_i(t) \tag{IV.22}$$

où p_i est le poids de chaque classe et $\lambda_i(t)$ le taux de défaillance de chaque classe. La somme des poids est égale à 1.

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1 \tag{IV.23}$$

En le réécrivant en fonction des paramètres de Weibull on obtient :

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^{n} p_i \, \frac{\beta_i}{\alpha_i} \left(\frac{t-\gamma_i}{\alpha_i}\right)^{\beta_i - 1} \tag{IV.24}$$

β_i , α_i et γ_i sont respectivement les paramètres de forme, d'échelle et de position de chaque distribution *i*.

Cette méthode fonctionne pour des lois exponentielles. Pour les lois de Weibull, la recherche d'un facteur d'accélération équivalent à l'ensemble des classes pourrait être nécessaire.

IV.2.2.4. Déploiement dans le cadre de l'estimation du taux de défaillance

À partir de la TP du facteur d'accélération, l'objectif est de déterminer le taux de défaillance correspondant au mécanisme associé. En utilisant l'analogie au modèle de FIDES pour effectuer cette traduction de TP au taux de défaillance, les considérations et hypothèses suivantes sont prises en compte :

- les conditions de référence sont les conditions environnementales modélisées dans le réseau bayesien. Le modèle bayesien modélise le profil de mission qui caractérise les conditions environnementales en fonctionnement normal ;
- la valeur du facteur d'accélération dans chaque classe est la moyenne de la classe. On le notera AF_{moy_i} , i se référant au numéro de la classe. Par exemple, au lieu de prendre en compte toute la classe [0, 10], on considère que la valeur du facteur d'accélération est égale à 5 ;
- chaque classe de la TP de AF est décrite par une distribution de Weibull de paramètres d'échelle α_i, de forme β_i et de poids p_i. Le poids est la probabilité d'apparition de chaque classe ;
- le facteur de position est nul car on considère que le composant commence à se dégrader dès sa première utilisation ;
- les classes sont indépendantes ;
- les paramètres de Weibull de chaque distribution se calculent en fonction des paramètres de Weibull accélérés et sont donnés par les équations IV.25 et IV.26.

$$\alpha = AF_{moy}\ \alpha_{acc} \tag{IV.25}$$

$$\beta = \beta_{acc} \tag{IV.26}$$

On note α et β les paramètres d'échelle et de forme dans les conditions de référence ; α_{acc} et β_{acc} respectivement les paramètres d'échelle et de forme de la Weibull accélérée (loi de Weibull obtenue à partir des résultats des tests de vieillissement accélérés qui ont permis de mettre en évidence le mécanisme de défaillance donné). Le nombre de distributions de Weibull à sommer revient au nombre de classes de la TP de AF. Ces hypothèses permettent d'obtenir les paramètres autorisant l'utilisation des principes associés à la somme pondérée des lois de Weibull. À partir de ces hypothèses et de la formalisation de la somme pondérée de lois de Weibull, on peut écrire la relation mathématique facilitant le passage de la TP du facteur d'accélération au taux de défaillance.

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^{n} p_i\ \lambda_i(t) \tag{IV.27}$$

où *n* est le nombre de classes. En développant la relation précédente, on obtient l'équation IV.28 qui est l'expression du taux de défaillance à partir de la somme pondérée des lois de Weibull.

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^{n} p_i \frac{\beta_{acc}}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}} \left(\frac{t}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}-1} \quad \text{(IV.28)}$$

IV.2.2.5. Exemple illustratif de la méthode

On reprend ici l'exemple précédent de la figure IV.3 pour montrer l'utilisation du taux de défaillance équivalent. Dans l'exemple, on a 6 classes et les moyennes sont données par AF_{moy_i}= [5 ; 15 ; 25 ; 35 ; 45 ; 55] ; le paramètre de forme est β_{acc}=5 et la paramètre d'échelle α_{acc}=10 années. On somme donc 6 distributions de Weibull pour obtenir le taux de défaillance. On utilise la relation IV.29 pour tracer l'évolution du taux de défaillance (figure IV.6).

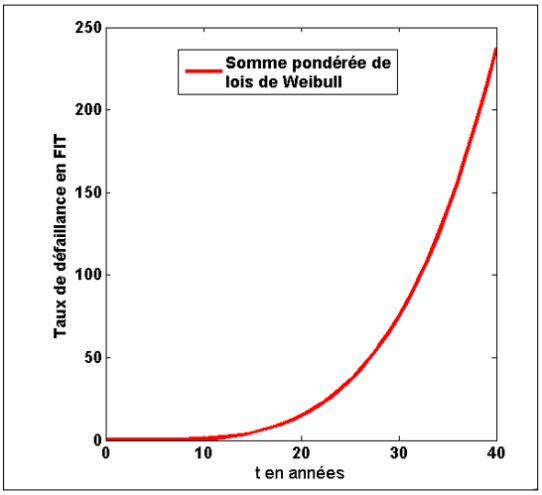


Figure IV.6: Utilisation de la somme de lois de Weibull pondérées

Dans la somme pondérée de lois de Weibull, on considère l'impact de chaque classe dans l'estimation du taux de défaillance.

IV.2.3. Cas 4 : phénomènes décrits par le nombre de cycles avant défaillance N_f

Pour ces phénomènes, la finalité est de calculer la durée de vie. On a vu dans le chapitre II que ces phénomènes sont liés au phénomène de fatigue (fatigue des soudures, fatigue des fils de bonding), résultant de contraintes en cyclage thermique, de contraintes en tension ou encore de l'humidité. Le calcul de dommage causé par un profil de contrainte est réalisé avec l'hypothèse d'une accumulation linéaire de la fatigue. La règle de Palmgren-Miner [Nieslony, 2016] utilisée, considère le dommage comme une fraction de la durée de vie consommée par un profil de contraintes sur une période de temps.

Le dommage total ou durée de vie consommée s'écrit alors comme la somme des dommages causés par chaque cycle.

$$DureeDeVie_{cons} = \sum_{i=1}^{n} DureeDeVie_{\ i} \quad \text{(IV.29)}$$

où *n* est le nombre de cycles extraits du profil de contraintes.

Le dommage occasionné par chaque cycle s'écrit alors :

$$DureeDeVie_{\ i} = \frac{N_{c_i}}{N_{f_i}} \quad \text{(IV.30)}$$

avec *i*=1…*n*, *i* étant le nombre de cycles

- N_{c_i} est le nombre de cycle réels ;
- N_{f_i} est de nombre de cycles avant défaillance calculés à partir de la loi de *Nf*.

L'expression de la durée de vie consommée s'écrit ainsi :

$$DureeDeVie_{cons} = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{c_i}}{N_{f_i}} \quad \text{(IV.31)}$$

La défaillance apparaît lorsque le composant arrive à 100% de sa durée de vie. Cette règle est la règle de Palmgren Minor [Chamund, 2013] :

$$DureeDeVie_{\ cons} = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{c_i}}{N_{f_i}} \geq 100 \quad \text{(IV.32)}$$

La modélisation dans le réseau bayesien se fait jusqu'au niveau de la durée de vie consommée. Une fois sa TP calculée, on propose d'utiliser la moyenne arithmétique pondérée pour avoir une valeur chiffrée de la durée de vie. La TP est caractérisée par :

- la classe notée c avec $[c_{min}, c_{max}]$, avec c_{min} et c_{max} représentant les bornes de l'intervalle d'appartenance, i représente numéro de la classe
- le milieu de la classe c_m
- la probabilité d'appartenance de chaque classe notée p_i

$$\mu_{DureeDeVie_{cons}} = \sum_{i=1}^{n} p_i \, c_m \quad \text{(IV.33)}$$

La durée de vie quant à elle est calculée en fonction du dommage causé dans l'intervalle de temps T du profil de mission d'étude [Chamund, 2013].

$$DureeDeVie = \frac{1}{T\,\mu_{DureeDeVie_{cons}}} \quad \text{(IV.34)}$$

Pour passer de la durée de vie consommée moyenne à l'estimation de la durée de vie, il faut ramener la durée de vie consommée sur un certain temps en année.

IV.2.4. Cas 3 : Pour les phénomènes exprimés en T_f

Pour les phénomènes exprimés en T_f (Temps de fonctionnement avant défaillance), l'idée est de passer par le facteur d'accélération. Ce cas de figure rejoint le cas des phénomènes exprimés par le facteur d'accélération et décrits dans le paragraphe précédent.

IV.3. Mécanismes de défaillance sans loi identifiée

Lorsque la loi n'est pas connue, il est très difficile d'estimer les indicateurs de défaillance. On a recours aux avis d'experts pour estimer une probabilité de défaillance en fonction de l'environnement de fonctionnement. Toutefois, il est difficile aux experts d'estimer les probabilités de défaillance car ce sont des phénomènes qui ont un faible impact sur la fiabilité de l'IGBT et qui n'ont pas été énormément investigué dans la littérature.

Au terme de tous ces développements et après avoir estimé les indicateurs de défaillance liés à chacun des mécanismes de défaillance, on utilise les relations (IV.1) et (IV.2) pour estimer les indicateurs globaux de l'IGBT.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux méthodes proposées pour estimer les indicateurs de fiabilité à partir des résultats obtenus du modèle bayesien. À partir de celui-ci, les mécanismes de défaillance initialement exprimés sous la forme de Nf (Nombre de Cycles avant défaillance), AF (facteur d'accélération), T_f (Temps de Fonctionnement avant défaillance) ou λ (taux de défaillance) sont modélisés sous forme de TP. Ces TP décrivent l'évolution de ces différents indicateurs de façon probabiliste.

Au terme de ces résultats exprimés sous forme probabiliste, il était important de pouvoir exprimer un taux de défaillance global et une durée de vie globale de l'IGBT. À ces fins, ce chapitre a permis de voir dans chaque cas de figure comment passer du mécanisme de défaillance en question aux indicateurs de défaillance.

Le chapitre V reviendra sur un cas d'application ; le métro de Chennai. Après la récupération des données pour la détermination des TP, les méthodes développées dans ce chapitre permettront de déterminer le taux de défaillance global et la durée de vie de l'IGBT.

V. Cas d'étude du métro de Chennai

Ce chapitre a pour ambition d'appliquer à un cas réel les développements des chapitres précédents ayant successivement présenté la construction du modèle bayesien pour l'évaluation de la fiabilité des IGBT et le passage du modèle bayesien aux indicateurs de défaillance. Le cas retenu est celui du métro de Chennai en Inde. La démarche déroulée tout au long de ce travail de recherche pour l'amélioration de la fiabilité de l'IGBT est structurée en quatre grandes étapes. Les trois premières étapes concernent la modélisation par réseaux bayesiens. Elles ont conduit à l'identification des variables pertinentes de l'étude, la construction de la structure du modèle et la détermination des TPC. Ces trois grandes étapes ont ensuite été complétées par une quatrième correspondant au passage des TPC aux indicateurs de défaillance. La première étape sur la détermination des variables pertinentes a été développée dans le chapitre II au travers de l'approche « Cycle en U » ayant permis d'identifier l'ensemble des variables impliquées dans l'obtention de la fiabilité de l'IGBT. Cette analyse va des phases de fonctionnement niveau « train », « convertisseur » et « IGBT » aux mécanismes de défaillance en passant par les contraintes à ces différents niveaux. La deuxième étape sur la construction de la structure du graphe bayesien a été développée dans le chapitre III et a abouti à la mise en place d'une structure d'un réseau bayesien générique pour la modélisation de systèmes de traction ferroviaires. L'étape suivante relative à la détermination des TPC a été présentée dans le chapitre III consacré à la présentation générale des méthodes d'apprentissage utilisées pour remplir les TP en fonction des données et connaissances disponibles. La dernière étape, détaillée dans le chapitre IV visait à estimer les indicateurs de défaillance à partir des TP des mécanismes de défaillance caractérisant les niveaux bas de la structure du réseau bayesien.

Ce chapitre détaille l'ensemble des étapes suivantes dans le cas d'application du métro de Chennai :

- première étape : les variables identifiées ayant un impact sur la fiabilité de l'IGBT restent les mêmes pour tout système ferroviaire. Par conséquent, l'analyse « cycle en

U » développée dans le chapitre II reste valable. Cette étape ne sera donc pas développée dans le présent chapitre ;

- deuxième étape : la structure du modèle bayesien générique s'applique entièrement au métro de Chennai. Néanmoins, elle sera volontairement réduite aux seules variables ayant un impact significatif sur la défaillance et les indicateurs de fiabilité de l'IGBT ;
- troisième étape : la détermination des TP s'appuiera sur les données et connaissances disponibles concernant le projet Chennai. Avant de les déterminer, on détaillera les sources de données utilisées pour la caractérisation de chacune des variables puis les méthodes d'apprentissages utilisées ;
- quatrième étape : le passage des mécanismes de défaillance aux indicateurs de défaillance conduira au calcul du taux de défaillance et la durée de vie.

Avant d'aborder ces étapes on présente le métro de Chennai ainsi que la collecte de données.

V.1. Présentation du métro de Chennai

Le métro de Chennai (figure V.1) est un métro qui roule dans la ville de Chennai en Inde. Chennai est la quatrième plus grande métropole du pays en termes de population. Chennai fait partie de l'état de Tamil Nadu. La ville est bordée sur toute sa longueur Ouest par « la baie du Bengal » partie nord-ouest de l'océan indien. Avec une population de 6 millions d'habitants, la ville bénéficie d'un relief plat avec une élévation de 60 mètres par rapport au niveau de la mer et d'une superficie de 426,7 km^2. La ville profite d'un climat tropical de savane chaud et humide une bonne partie de l'année avec des températures qui dépassent 40°C l'été.



Figure V.1: Métro de Chennai en Inde

La ville de Chennai dispose d'un réseau de transport ferroviaire de 2 lignes de métro. Les deux lignes sont construites sur la première phase du projet desservant une grande partie de la ville : une première ligne (en rose sur la figure V.2) qui relie la station Washermanpet à la station

Chennai Airport et une deuxième ligne (en vert puis en bleu sur la figure V.2) qui relie la station Central Metro à la station St Thomas Mount Metro. La deuxième phase du projet qui concerne la station Washermenpet à la station Thiruvottiyur est en phase d'étude (en orange sur la figure V.2). Les métros ont été mis en service le 01/07/2015 avec une flotte de 7 trains au départ. Depuis Septembre 2018, la flotte a été portée à 42 trains dont 39 en service. Sur ces deux lignes, il existe une partie aérienne et une partie souterraine.



Figure V.2: Lignes du métro de Chennai

Le choix de l'étude porte sur un métro de la flotte roulant sur la ligne 1 qui a l'avantage de disposer de la plus grande quantité de données sur une durée d'enregistrement d'un an de fonctionnement. Ce métro dessert 17 stations (de la station de Washermenpet à la station Chennai Airport). Les caractéristiques générales du métro et de la ligne 1 sont données dans le tableau V.1.

Longueur de la ligne 1	23,1 km
Longueur du métro	98 m
Masse statique	241,15 tonnes
Distance en aérien	8,8 km
Distance en souterrain	14,3 km
Réseau d'alimentation	25 kV
Heures de service	De 5h à 24h
Nombre de stations	36
Nombre de jours de fonctionnement	365 jours
Distance parcourue par an	150 000 km
Vitesse limite	80 km/h
Vitesse moyenne en service	34 km/h
Température ambiante maximale	44°C
Température ambiante minimale	16°C
Humidité relative maximale	100%
Durée de vie du matériel roulant spécifiée dans le contrat	30 ans

Tableau V.1: Spécifications générales du métro 14 de Chennai

Après une description des caractéristique générales, le paragraphe suivant va être destiné à la présentation des 2 convertisseurs qui équipent la chaîne de traction du métro de Chennai.

V.1.1. Convertisseurs du métro de Chennai

La chaîne de traction du métro de Chennai comporte 2 convertisseurs montrés sur la figure V.3: le convertisseur d'entrée ou « PMCF » et le convertisseur de sortie ou Onduleur. Sur la fonction « PMCF », on distingue 4 IGBT dont les caractéristiques tension et courant sont respectivement de 3300V et de 1500A. Sur la fonction Onduleur, on retrouve 6 IGBT de caractéristiques 3300V, 1000A. Le convertisseur d'entrée est alimenté par le transformateur et l'onduleur commande le moteur de traction.

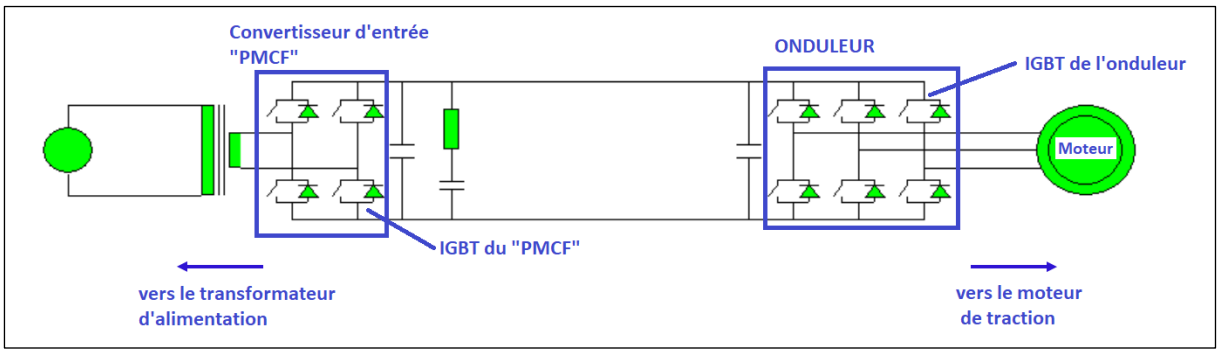


Figure V.3: Convertisseurs de la chaîne de traction du métro de Chennai

V.2. Collecte de données

Dans la recherche de données de profil de mission en conditions réelles de fonctionnement des trains et leurs incidences au niveau Convertisseur puis au niveau IGBT, deux problèmes se posent :

- le premier est le manque de données. Il est imputable soit au non-enregistrement de données sur une certaine période de temps, soit aux pertes de données. La perte de données est souvent due à la non récupération des données sur le terrain par des opérateurs ;
- le deuxième est la non-synchronisation des données sur l'ensemble des variables phases et contraintes aux différents niveaux Train, Convertisseur et IGBT du modèle bayesien. Aucune base de données ne fournit l'état de toutes les variables à chaque instant d'observation. Les projets ferroviaires ne disposent pas aujourd'hui de données à la fois environnementales et opérationnelles enregistrées sur un même train. Les données environnementales désignent les données d'humidité et de température en fonctionnement sur le terrain, et les données opérationnelles désignent les données de fonctionnement sur le terrain qu'elles soient électriques, thermiques, cinématiques ou mécaniques.

Le métro de Chennai a été choisi car on dispose sur ce train de données environnementales et de données de spécifications techniques. Outre les données disponibles, son profil de mission est simple, un métro roule sur une seule ligne. Les hypothèses prises pour reconstituer le profil de mission sont proches de la réalité. Le choix a porté sur ce métro aussi car on a recueilli des données de température et d'humidité ambiante, ce qui ne se faisait pas traditionnellement sur les autres projets.

Les données de spécification technique sont issues d'études de modélisation de la chaîne de traction ferroviaire via le logiciel CITHEL (CInématiques THermiques ELectriques) et sont générées en phase de conception avant la mise en service du train. CITHEL est un outil interne développé par ALSTOM. Avec le parcours représentatif d'un train, il calcule différentes grandeurs, entre autres les puissances, les courants phases des convertisseurs, les pertes dans les composants de puissance, les températures de jonction. Les résultats issus du logiciel CITHEL constituent donc une source de données non négligeable. On fait donc l'hypothèse que les conditions en phase de dimensionnement sont identiques à ce que le train rencontrera en phase d'exploitation. Cette hypothèse se justifie dans la mesure où elle correspond à l'engagement d'ALSTOM auprès de ses clients. L'ensemble de ces données, combinées à des hypothèses, à des avis d'experts et à des normes constituera une base de données et de

connaissances importantes pour la détermination des TPC du modèle bayesien dans le cas du métro de Chennai. On détaille l'ensemble des données environnementales et spécifications techniques disponibles dans les paragraphes suivants.

V.2.1.1. Données environnementales

Des données de température et d'humidité ont été enregistrées sur deux métros en service commercial par des capteurs de température et d'humidité avec une plage de température variant entre -20°C et 85°C et une plage d'humidité relative variant entre 0 et 100%. Les mesures sont enregistrées toutes les 5 min. La période d'enregistrement s'étend de Mai 2016 à Avril 2017 soit un an d'enregistrement de données. Les capteurs sont positionnés à l'extérieur du train (niveau Train) et dans le coffre (à côté de l'IGBT). Pour la suite, on considèrera que la température et l'humidité relative dans le coffre au plus proche de l'IGBT correspondent respectivement à la température ambiante et l'humidité relative ambiante de l'IGBT. Pour ces deux variables, on a fait le choix qu'il n'y avait pas de distinction entre l'IGBT qui alimente le convertisseur d'entrée (PMCF) et celui qui alimente le convertisseur de sortie (Onduleur).

Une première analyse de ces données environnementales permet de connaître les plages de variation de ces grandeurs. Le tableau V.2 permet de montrer leurs valeurs minimales, maximales et moyennes. Le métro roule dans un environnement chaud et humide avec des températures atteignant 41,5 °C et un taux d'humidité relative de 97,6 %. Au plus près des composants de puissance à IGBT, les taux d'humidité relative atteignent 64,6 % avec des températures allant jusqu'à 47,5 °C.

Grandeurs	**Niveaux**	**Valeurs**
Température ambiante minimale	Train	21,6 °C
	IGBT	24,1 °C
Température ambiante maximale	Train	41,5 °C
	IGBT	47,5 °C
Température ambiante moyenne	Train	30 °C
	IGBT	34 °C
Humidité relative ambiante minimale	Train	20,7 %
	IGBT	19,7 %
Humidité relative ambiante maximale	Train	97,6 %
	IGBT	64,6 %
Humidité relative ambiante moyenne	Train	63,35 %
	IGBT	39,48 %

Tableau V.2: Valeurs minimales, maximales et moyennes des données environnementales

Une deuxième analyse permet de tracer l'évolution comparative de ces différentes grandeurs. La figure V.4 montre l'évolution des températures moyennes journalières ambiantes aux

niveaux IGBT et Train sur une durée d'enregistrement d'un an. Sur toute cette période d'enregistrement, la température moyenne journalière ambiante de l'IGBT est supérieure à celle au niveau du train. La température au plus proche de l'IGBT est donc plus élevée que la température ambiante extérieure.

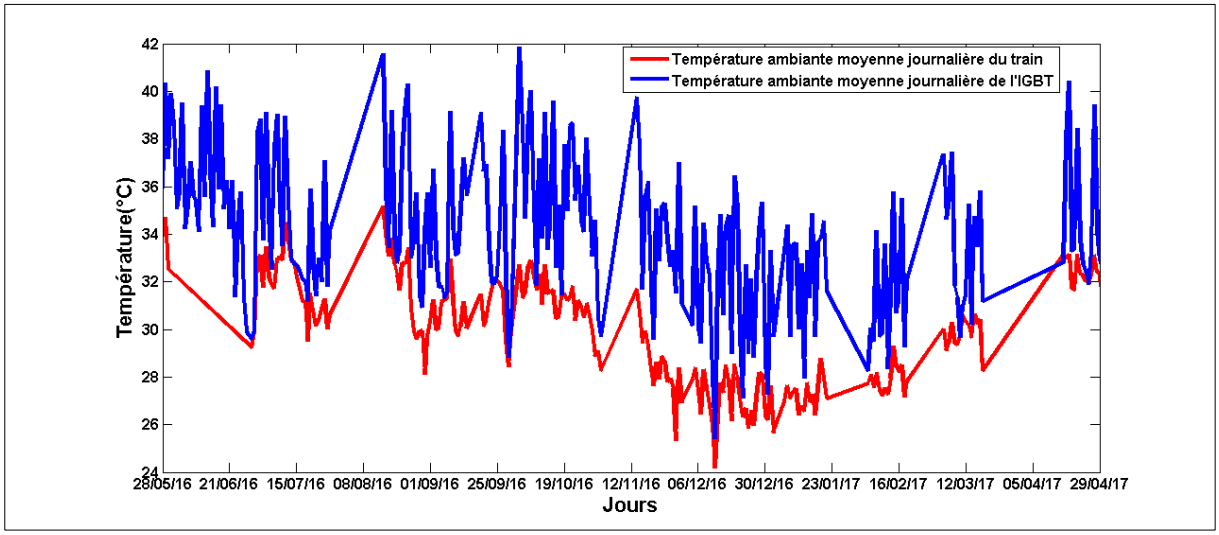


Figure V.4: Evolution de la température ambiante journalière niveau Train et IGBT sur un an

La figure V.5 montre la répartition de l'humidité relative moyenne journalière ambiante du train et de l'IGBT. Le taux d'humidité relative est globalement plus bas au niveau du composant de de puissance en comparaison avec les niveaux enregistrés au niveau Train.

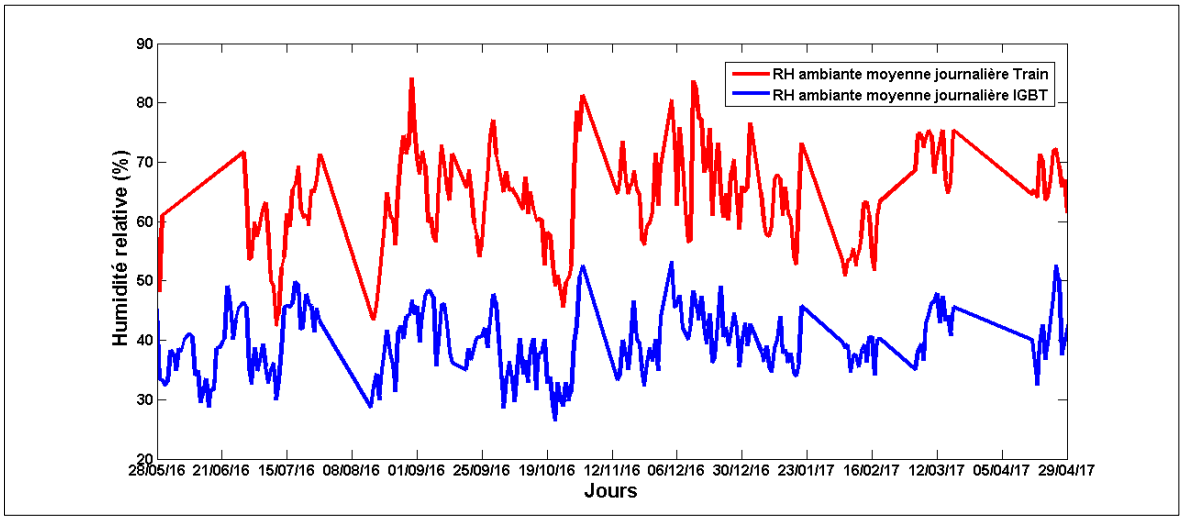


Figure V.5: Evolution de l'humidité relative moyenne journalière niveau Train et IGBT sur un an

L'atténuation de l'humidité au niveau du composant de puissance est due en partie à l'étanchéité des convertisseurs et à l'échauffement interne des composants de puissance. Ces données recueillies permettront de remplir les TP des variables température et humidité relative ambiantes aux différents « niveaux Train » et « IGBT ».

V.2.1.2. Données sur le fonctionnement

On ne dispose pas sur le métro de Chennai des enregistrements sur les variables de fonctionnement autres que l'humidité et la température. Les données de fonctionnement ont été donc extraites des données de spécification technique.

Les données de spécifications techniques sont des données de dimensionnement des chaînes de traction ferroviaires. Les études de conception et de dimensionnement sont effectuées en amont de la mise en service des trains pour chaque projet à l'aide de l'outil CITHEL. Cet outil permet de simuler les différentes grandeurs électriques, cinématiques et thermiques à partir du parcours défini pour un train. La figure V.6 montre l'interface de modélisation de l'outil CITHEL.



Figure V.6: Interface de modélisation de CITHEL

L'outil est basé sur un ensemble de règles de conception approuvées par les experts ALSTOM concernant toutes les composantes de la chaîne de traction et, en particulier, les moteurs, les transformateurs et les modules de puissances.

CITHEL version	V3.05.00	Calculation Case Name	CHN 100% AW4 ALL Corridor 1 Old Line_A-R		
Project Name	CHENNAI	Profile Name	CHN 50%mot AW4 ALL Corridor 1 A-R_50510		
Designer		Power Scheme Name	CHN_new_module_100%_verc		
Customer		Line voltage	22500(V)/25000(V)		
Calculation ID	CTL-CI2-2017-5-3-15-5	Speed calculation step	5.(km/h)		
Date	2017 May 03,15h05m25s	Handle calculation step	5.(%)		
temps (s)	Vitesse(km/h)	Udc_pmcf(V)	Ucat_AC_Train (V)	T_jonction_Igbt (°C)	T_semelle_Igbt (°C)
0	0	1800	22500	46,48479451	45
1	2,20739916	1800	22500	59,05399027	47,39094101
2	4,792427678	1800	22500	68,24604844	50,71481339
3	8,945801449	1800	22500	69,51046618	52,86597182
4	13,09623236	1800	22500	72,86846865	54,81643891
5	17,24360395	1800	22500	75,15792297	56,46749189
6	21,38473724	1800	22500	76,40435838	57,75523275
7	25,45309943	1800	22500	78,15945216	58,98502153
8	29,19381667	1800	22500	74,93654326	59,23279128
9	32,4741052	1800	22500	73,70792818	59,31026628
10	35,43748596	1800	22500	72,91450087	59,35199629
11	38,15831802	1800	22500	71,0084667	59,09636542
12	40,68407046	1800	22500	69,18161769	58,70665601
13	43,05464703	1800	22500	67,69499793	58,32900342
14	45,29098532	1800	22500	66,27842947	57,95590567
15	47,41442091	1800	22500	64,917882	57,56901494
16	49,44042446	1800	22500	63,59054156	57,17065583
17	51,37708134	1800	22500	62,87172409	56,91126994
18	53,23934501	1800	22500	62,47660273	56,79046799
19	55,03078977	1800	22500	62,17636473	56,75111568
20	56,75922132	1800	22500	62,12248048	56,78332605
21	58,43225328	1800	22500	62,1128256	56,8570063
22	60,0516166	1800	22500	62,13098661	56,95460626
23	61,62270283	1800	22500	62,21066337	57,07531812
24	63,15059493	1800	22500	62,30434048	57,20890215
25	64,63642862	1800	22500	62,40590278	57,34927285

Figure V.7: Fichiers Excel d'extraction de données de Cithel

Les données simulées peuvent être récupérées sous la forme de classeurs Excel. La figure V.7 montre une extraction d'un classeur Excel de récupération de données sur le parcours élémentaire. Sur les premières lignes de ce fichier, on peut observer les caractéristiques générales de simulation notamment la date de simulation, le profil de la ligne et le pas de simulation. Après ces descriptions et à partir de la huitième ligne, on retrouve les colonnes de données correspondant aux différentes variables. Ces données recueillies seront donc traitées et interviendront dans les calculs de probabilités. Différents résultats issus de la simulation peuvent être affichés sur l'interface de CITHEL. Pour notre étude, on a ainsi récupéré les fichiers de simulation du métro de Chennai et calculé différentes grandeurs. L'utilisation de CITHEL sur le projet Chennai, a permis de générer des données sur différentes variables du modèle notamment :

- au niveau Train : la vitesse, le relief, l'altitude, la tension caténaire ;
- au niveau Convertisseur : le courant de phase de l'onduleur, le courant phase du PMCF, la tension du bus continu.
- au niveau IGBT : le courant collecteur de l'IGBT du PMCF, le courant collecteur de l'IGBT de l'onduleur, la température de jonction de l'IGBT de l'onduleur, la température de jonction de l'IGBT du PMCF, la température de la semelle de l'IGBT de l'onduleur, la température de jonction de l'IGBT du PMCF, la différence de température de l'IGBT de l'onduleur, la température de jonction de l'IGBT du PMCF.

Il faut noter que les données recueillies au travers de CITHEL sont simulées sur un parcours aller-retour du métro. On détaillera par la suite les hypothèses et considérations prises pour

reconstituer un profil journalier. Ces données récupérées s'ajouteront aux données environnementales pour former la base de données qui alimentera le modèle bayesien d'estimation de la fiabilité de l'IGBT dans le cas d'application du métro de Chennai.

V.2.2. Reconstitution du profil journalier d'utilisation du métro de Chennai

Comme mentionné précédemment, les données de spécifications techniques sont simulées sur un parcours élémentaire aller-retour. On reconstruit un profil journalier à partir des données de mise en service et hors service du métro et d'hypothèses décrites par la suite. Les spécifications générales permettent d'écrire que le métro est en service de 5 h à 24 h et il est hors service de 0 h à 5 h.

Hypothèse 1 : Le train fait 17 parcours élémentaires dans la journée entre 5 h et 24 h. Le détail du parcours journalier est donné par la figure V.8.

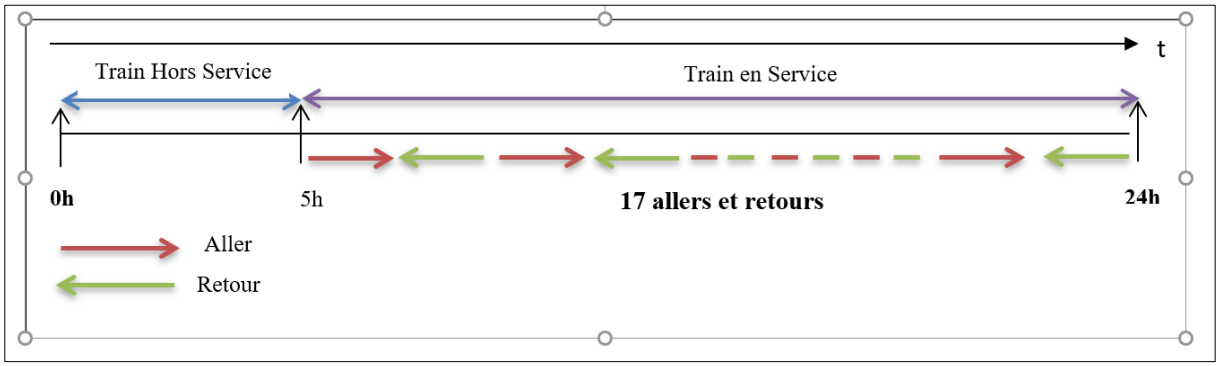


Figure V.8: Détail du parcours journalier

Hypothèse 2 : le temps entre deux trajets (aller, retour) ou temps de retournement est de 120 s. La figure V.9 illustre le parcours aller-retour. Un parcours aller-retour du métro fait 3894 s soit 1 h 4 min 54 s. On désigne par t_{s_i} les temps passés entre deux stations ; par t_i les temps passés en interstations et t_r est le temps de retournement (supposé constant à chaque fin de parcours).

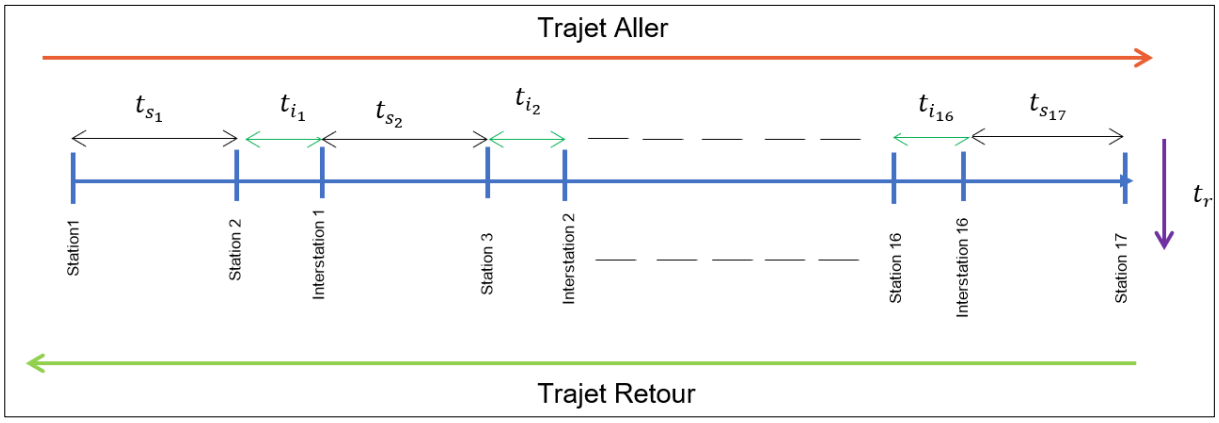


Figure V.9: Détail du parcours journalier

L'étude détaillée du profil permet de déterminer les temps passés en phases d'accélération, de freinage, de maintien de vitesse et d'arrêt (arrêt interstation et arrêt en bout de ligne). On rappelle que pour la détermination des TP, un profil de mission journalier est considéré pour toutes les contraintes et phases de fonctionnement aux différents niveaux train, convertisseur et IGBT. On prend également l'hypothèse que le profil de mission journalier du train ne change pas d'un jour à l'autre. Pour la suite de nos calculs, le train est supposé être en service 289 jours dans l'année.

V.3. Construction du réseau bayesien

La structure du modèle développé dans le chapitre III est générique et s'applique à tout engin ferroviaire. Elle s'applique donc entièrement au cas du métro de Chennai. Toutefois, dans la structure retenue pour le métro de Chennai, le modèle est réduit à un certain nombre de variables dont le détail est donné dans le tableau V.3.

Globalement les phases de fonctionnement restent les mêmes pour tous les trois niveaux train, convertisseur et IGBT. Au niveau contraintes de fonctionnement train, la tension caténaire continue est éliminée car n'est pas applicable ; le métro de Chennai est alimenté par une tension caténaire alternative. À ce niveau Train également, les fréquences vibratoires et de choc sont éliminées car interviennent dans les mécanismes de défaillance éliminés. Les fréquences vibratoires au niveau Convertisseur et IGBT sont aussi éliminées car ne sont que la déclinaison de celles du train qui sont aussi éliminées. Les températures et amplitudes de cycle des connectiques de puissance niveau IGBT sont aussi éliminées car interviennent dans des mécanismes de défaillance non gardés.

Niveaux	Variables	Variables éliminées ou gardées
Train	Phases de fonctionnement	Pas de variables éliminées
	Contraintes de fonctionnement	• Tension caténaire continue éliminée • Fréquence vibratoire éliminée • Fréquence de choc éliminée
Convertisseur	Phases de fonctionnement	Pas de variables éliminées
	Contraintes de fonctionnement	• Fréquence vibratoire éliminée • Fréquence de choc éliminée
IGBT	Phases de fonctionnement	Pas de variables éliminées
	Contraintes de fonctionnement	• Fréquence vibratoire • Fréquence de choc • Température des connectiques de puissance éliminée • Amplitude de cycle des températures de connectiques de puissance éliminée
	Mécanismes de défaillance	• Corrosion de la puce gardée • Décollement du fil de bonding gardé • Fatigue de la brasure gardée • Dépassement de l'aire de sécurité gardé • Rayonnement cosmique gardé

Tableau V.3: Variables éliminées ou gardées aux différents niveaux du modèle bayesien

Au niveau des mécanismes de défaillance, seuls la corrosion de la puce, la fatigue de la soudure, le dépassement de l'aire de sécurité, le décollement du fil de bonding et de rayonnement cosmique sont gardés dans le modèle. Ces phénomènes sont prépondérants dans la fiabilité de l'IGBT. Les autres mécanismes de défaillance ont un impact négligeable sur la fiabilité de l'IGBT. Ce constat est validé par les experts IGBT d'ALSTOM Tarbes. Les autres phénomènes de reconstruction de l'aluminium, de contamination de l'ion, de fissuration du boitier, d'électromigration, de fatigue des connectiques de puissance, de fissuration des connectiques de puissances, de décollement du boitier, de claquage diélectrique du substrat, de claquage diélectrique du gel sont donc éliminés du modèle de Chennai comme mentionnés dans le chapitre II.

Les phénomènes de dépassement de l'aire de sécurité et de rayonnement cosmique sont exprimés directement sous forme d'équation donnant le taux de défaillance associé à ces mécanismes de défaillance en fonction des variables causes. Les phénomènes de délamination de la brasure et de décollement du fil de bonding sont exprimés soit sous la forme de nombre de cycles avant défaillance, soit sous la forme d'un facteur d'accélération. Le phénomène de corrosion de la puce est aussi exprimé sous la forme d'un facteur d'accélération. La figure V.10 montre la structure du réseau retenue dans le cas du métro de Chennai.

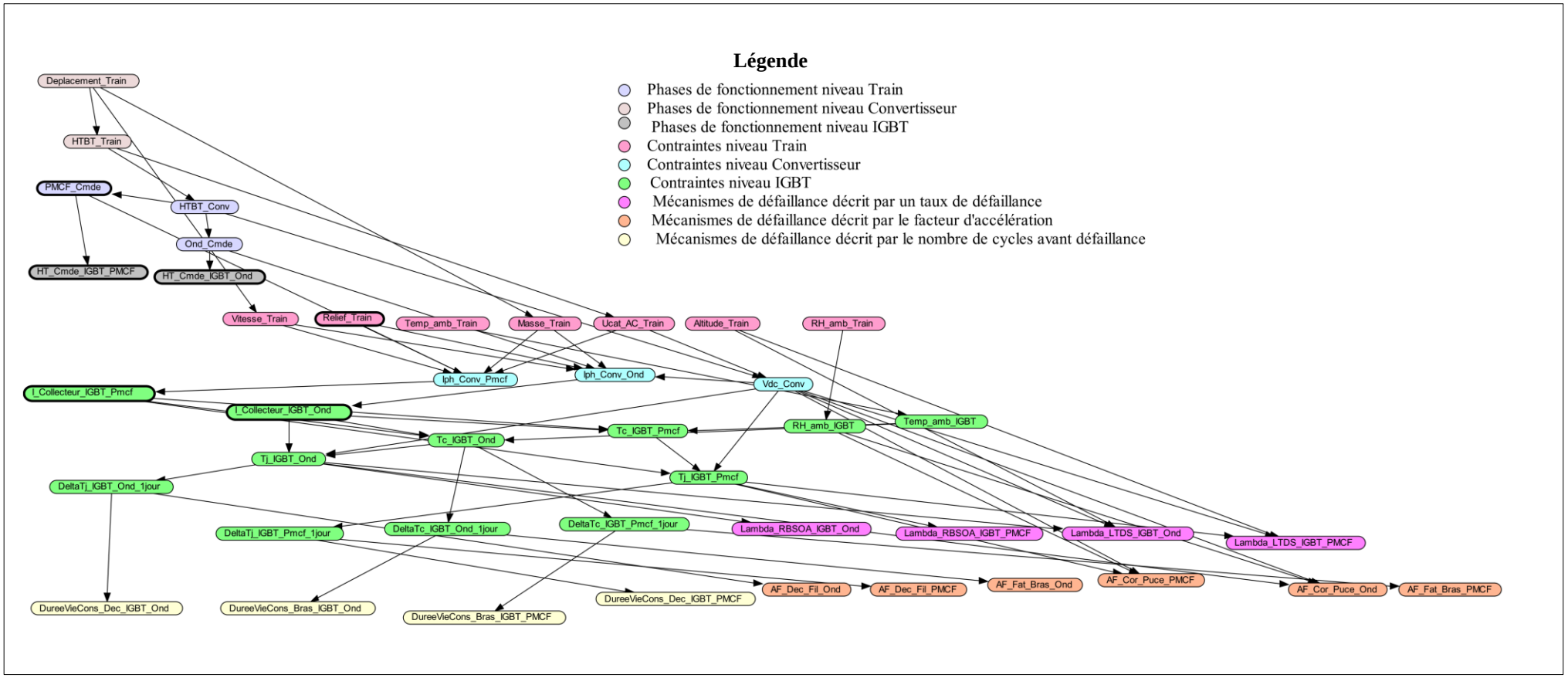


Figure V.10: Structure du graphe bayesien du métro de Chennai

V.4. Détermination des TPC

Cette partie va être consacrée à la détermination des TPC en prenant en compte les connaissances et données recueillies sur le métro de Chennai. On détaillera les connaissances dont on dispose sur chacune des variables, les difficultés rencontrées, les solutions proposées et le calcul des TPC.

V.4.1. Capitalisation des connaissances sur les variables

La recherche de données sur le métro de Chennai a permis de capitaliser l'ensemble des connaissances et données disponibles sur les variables afin d'alimenter le modèle bayesien. Cette capitalisation met en évidence les données environnementales directement récoltées sur le train, les données de dimensionnement, les normes, les équations, les avis d'experts. Au terme de cette capitalisation, on regroupe les connaissances sur les variables en quatre catégories :

- la première catégorie concerne les variables pour lesquelles on dispose de lignes de données suffisantes pour estimer les TP ;
- la deuxième catégorie fait référence aux variables pour lesquelles on dispose de lignes de données incomplètes. Ces données seules ne suffisent pas à estimer les TP. Pour cela, il faut rajouter des hypothèses ou des données normatives pour compléter les informations existantes.
- dans la troisième catégorie, on retrouve les variables pour lesquelles on ne dispose pas de lignes de données mais juste d'informations sous forme de valeurs fixes que prend la variable ou sous forme de connaissances logiques ou intuitives.
- la quatrième et dernière catégorie porte sur les variables décrites par une équation. On a remarqué que seuls les mécanismes de défaillance appartenaient à cette catégorie.

Le tableau V.4 permet d'associer les variables aux différentes catégories auxquelles elles appartiennent.

Catégories	Variables concernées
Catégorie 1 : variables pour lesquelles on dispose de lignes de données suffisantes.	Temp_amb_Train RH_amb_Train Temp_amb_IGBT RH_amb_IGBT
Catégorie 2 : variables pour lesquelles on dispose de lignes de données incomplètes, insuffisantes pour remplir les TP	Deplacement_Train Ucat_AC_Train Vitesse_Train Altitude_Train Iph_Conv_PMCF Iph_Conv_Ond Vdc_Conv I_Collecteur_IGBT_PMCF I_Collecteur_IGBT_Ond Tj_IGBT_Ond Tj_IGBT_PMCF Tc_IGBT_Ond Tc_IGBT_Ond DeltaTj_IGBT_Ond DeltaTj_IGBT_PMCF DeltaTc_IGBT_Ond DeltaTc_IGBT_PMCF
Catégories 3 : variables pour lesquelles on ne dispose pas de lignes de données mais des informations qualitatives ou quantitatives.	Relief_Train Masse_Train HTBT_Train HTBT_Conv PMCF_Cmde Ond_Cmde HT_Cmde_IGBT_Ond HT_Cmde_IGBT_PMCF
Catégorie 4 : variables décrites par des équations. Ce sont les mécanismes de défaillance	DureeVieCons_Dec_IGBT_Ond DureeVieCons_Dec_IGBT_PMCF DureeVieCons_Soud_IGBT_Ond DureeVieCons_Soud_IGBT_PMCF AF_Cor_Puce_Ond AF_Cor_Puce_PMCF AF_Dec_Fil_Ond AF_Dec_Fil_PMCF AF_Fat_Bras_PMCF AF_Fat_Bras_Ond Lambda_LTDS_IGBT_Ond Lambda_LTDS_IGBT_PMCF Lamdda_RBSOA_IGBT_Ond Lambda_RBSOA_IGBT_PMCF

Tableau V.4: Catégories de variables

Pour avoir une vision globale sur chacune des variables, une cartographie de chacune des variables a été réalisée afin d'identifier la connaissance effectivement disponible. Cette cartographie se présente sous la forme de fiches descriptives. La figure V.11 montre une fiche témoin avec l'ensemble des éléments recueillis sur chacune des variables. Chaque fiche précise les renseignements suivants : la définition, le type de variable (continue ou discrète), nature de la TP (marginale ou conditionnelle), les données existantes (lignes de données, connaissances expertes), la méthode de détermination des TP, le niveau de confiance sur la méthode, le niveau

de confiance sur les données, les besoins (les sources futures d'amélioration de la connaissance de ces variables) et les références bibliographiques.

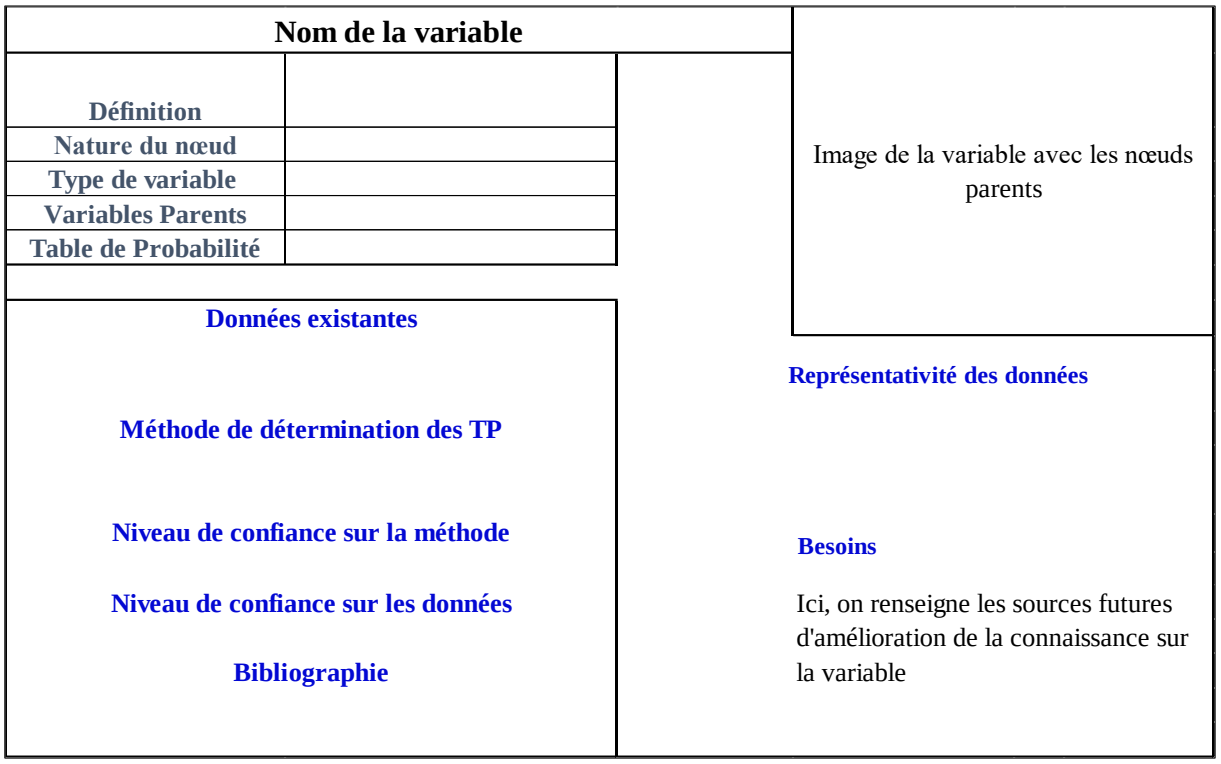


Figure V.11: Fiche descriptive générique associée à une variable

Un code couleur distingue chaque catégorie. Ainsi, on a opté pour une couleur verte pour la catégorie 1, la couleur orange pour la catégorie 2, la couleur jaune pour la catégorie 3 et la couleur bleue pour la catégorie 4.

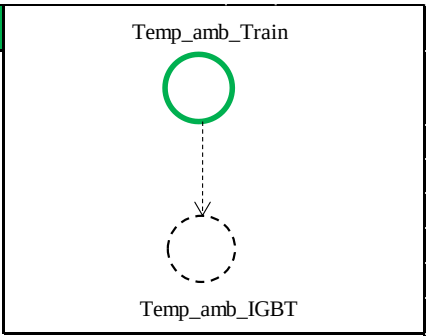
V.4.2. Etude de la première catégorie de variables

On retrouve ici deux cas de figures : les variables racines (Temp_amb_Train et RH_amb_Train) décrites par des probabilités marginales et les variables enfants (Temp_amb_Train et RH_amb_Train) décrites par des probabilités conditionnelles. Pour cela, on détaille en suivant la variable Temp_amb_Train (variable racine) et la variable Temp_amb_IGBT (variable enfant). Les autres sont explicitées en annexe B.

V.4.2.1. Variable « Temp_amb_Train »

La figure V.12 regroupe l'ensemble des renseignements sur la variable « Temp_amb_Train ». Les données recueillies sont représentatives d'un profil de mission annuel. Les probabilités marginales sont calculées à partir de la probabilité d'appartenance de la variable sur chacune de ses modalités. En termes de besoin pour avoir des données sur la variable, il serait sans doute intéressant d'instrumenter les trains avec des capteurs afin de récupérer des données sur le contexte ambiant de fonctionnement.

Temp_amb_Train	
Définition	Température ambiante du train
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continue
Variables Parents	Temp_amb_IGBT
Table de Probabilité	Marginale



Données existantes

Données enrégistrées en fonctionnement du train à partir de capteurs

Méthode de détermination des TP

Calcul classique de probabilités d'une variable sur chaque modalité de la variable

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Rossini, 2016], [Saiz,2016]

Représentativité des données

Données représentatives du profil annuel

Besoins

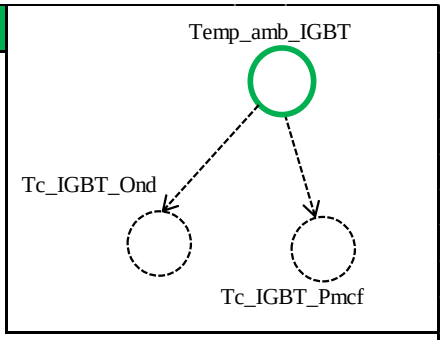
Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

Figure V.12: Fiche descriptive de la variable Temp_amb_Train

V.4.2.2. Variable Temp_amb_IGBT

La variable « Temp_amb_IGBT » est une variable représentée par un nœud enfant. Elle est décrite en figure V.13.

Temp_amb_IGBT	
Définition	Température ambiante de l'IGBT
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	Tc_IGBT_Ond; Tc_IGBT_Pmcf
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données enrégistrées en fonctionnement du train à partir de capteurs

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique avec la méthode du Maximum de Vraisemblance

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Rossini, 2016], [Saiz,2016]

Représentativité des données

Données représentatives du profil annuel

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

Figure V.13: Fiche descriptive de la variable Temp_amb_IGBT

C'est une variable à laquelle est associée une TPC. L'apprentissage statistique avec la méthode du Maximum de Vraisemblance a permis d'estimer sa TP. Cette méthode utilise la fréquence d'apparition de la variable dans la base de données. À l'avenir, pour recueillir les données de température ambiante au plus proche des composants de puissance à IGBT, il faudra continuer à instrumenter les trains par des capteurs à installer au niveau de ces composants.

V.4.3. Etude de la deuxième catégorie de variable

Dans cette catégorie, on retrouve les variables pour lesquelles les seules données disponibles sont insuffisantes pour pouvoir estimer les TP. Pour pallier ce manque, il est donc nécessaire de rajouter des informations supplémentaires permettant de compléter les vides. Deux cas de figure ont été considérés dans le cadre de ce travail : un premier cas ayant conduit à ajouter des hypothèses sur le parcours et un deuxième cas où les données normatives ont été utilisées complémentairement aux informations disponibles.

V.4.3.1. Variable Deplacement_Train

Cette variable décrit les phases de déplacement d'un train : phases d'accélération, de freinage, de maintien de vitesse et d'arrêt. La phase d'arrêt inclut les phases d'arrêt en bout de ligne et les phases d'arrêt en interstation. Pour le calcul des probabilités, on s'appuie sur le profil de vitesse du train en posant des hypothèses supplémentaires pour pouvoir disposer d'un profil de vitesse journalier. Les données de vitesse sont disponibles sur un parcours typique. La variable Deplacement_Train est une variable racine dans le modèle, variable à laquelle est donc associée une TPM. À partir des données de vitesse sur le parcours typique et des hypothèses, on calcule à l'aide de règles de probabilités classiques les probabilités d'apparition de chacune des phases.

Deplacement_Train	
Définition	Le train se déplace
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	-
Table de Probabilité	Marginale

Données existantes

Probabilités marginales déterminées à partir de la fréquence d'apparition de chaque phase sur le profil de vitesse

Méthode de détermination des TP

Probabilités marginales déterminées à partir de la fréquence d'apparition de chaque phase sur le profil de vitesse

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] [Chapas et Petit, 2004]

Deplacement_Train



Représentativité des données

Données semi-complètes (plus hypothèses). Hypothèses sur les temps d'arrêt entre parcours

Besoins

Installer des Capteurs pour enregistrer la vitesse réelle

Figure V.14: Fiche descriptive de la variable Deplacement_Train

La figure V.14 montre les renseignements recueillis sur cette variable. En termes de besoin à l'avenir, il serait judicieux d'installer des capteurs afin de récolter les données de vitesse sur toute la durée de fonctionnement du train.

V.4.3.2. Variable Ucat_AC_Train

La tension caténaire a été dimensionnée constante et égale à 22500 V sur le parcours typique aller-retour. Cette valeur est donnée dans les documents de spécifications techniques. Dans la réalité, sur un train en service, cette tension fluctue. En l'absence de mesures réelles, on fait l'hypothèse que la tension caténaire varie dans une plage conforme à la norme ferroviaire sur les tensions d'alimentation. La norme [EN 50163, 2004] définit une plage de variation de la tension caténaire entre 15000 V et 26500 V. Avec la connaissance de la fluctuation de cette tension, on reconstitue un profil de tension qui permettra de calculer les TP. Dans le modèle bayesien, la tension caténaire est une variable enfant à laquelle est donc associée une TPC. On détermine les valeurs de probabilités conditionnelles à partir du théorème de Bayes. La figure V.15 montre la fiche de renseignements de la variable étudiée.

L'ensemble des renseignements sur les autres variables de la catégorie 2 se trouve dans l'annexe B.

Ucat_AC_Train	
Définition	Tension d'alimentation du train
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	HTBT_Train
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL + Norme EN50163

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

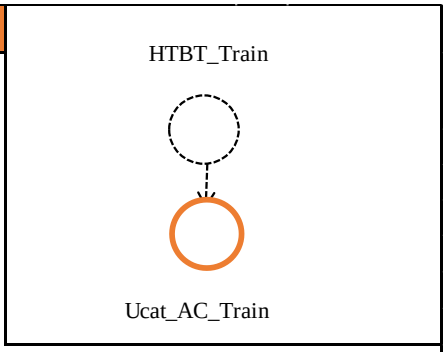
Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[EN50163,2004]; [Allenbach,2013] [Chapas et Petit, 2004];[Chapas, 2012] www.railway-technical.com



Représentativité des données

Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

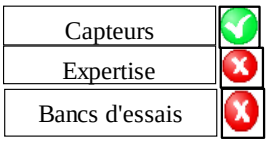


Figure V.15: Fiche descriptive de la variable Ucat_AC_Train

V.4.4. Etude de la troisième catégorie de variables

Dans cette catégorie, on n'a pas de réelles lignes de données sur les variables. On a des informations logiques, des évidences et des avis d'experts. On donne deux exemples dans cette catégorie.

V.4.4.1. Variable Relief_Train

La variable Relief_Train est une variable racine disposant d'une TPM. Le relief est plat dans la ville de Chennai. Les deux modalités de la variable étant « plat » et en « Côte », la TPM de la variable « Relief_Train » indiquera que dans 100% des cas le relief est plat. La fiche descriptive de cette variable est celle de la figure V.16.

Relief	
Définition	**Le relief du train**
Nature du nœud	**Racine**
Type de variable	**Discrèt**
Variables Parents	**-**
Table de Probabilité	**Marginale**

Données existantes

Connaissances sur le relief de Chennai mais pas de lignes de données existantes

Méthode de détermination des TP

Informations évidentes et logiques + connaissances sur le relief de la ville

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012]

Relief_Train

Représentativité des données

Pas de données.
Le relief est plat sur Chennai

Besoins

Pas de besoin-la connaissance du relief de la ville ou circule le métro est suffisante

Figure V.16: Fiche descriptive de la variable Relief_Train

V.4.4.2. Variable HTBT_Train

La variable HTBT_Train est une variable discrète enfant qui indique que le train est alimenté. On ne dispose pas de données sur cette variable mais des connaissances évidentes. Lorsque le train est en déplacement, il est alimenté, et lorsqu'il est à l'arrêt en stockage, il n'est pas alimenté. Il est cependant alimenté quand il est à l'arrêt en interstation. À partir de ces informations, on estime les différentes probabilités conditionnelles de la variable HTBT_Train. En termes de besoin à l'avenir, on pourra collecter dynamiquement les informations sur les trains pour pouvoir disposer des niveaux de tension en fonctionnement, cela permettra d'améliorer la précision du calcul des TP. La fiche descriptive de la variable est donnée par la figure V.17. L'ensemble des renseignements sur les autres variables de la catégorie 3 se trouve en annexe B.

HTBT_Train	
Définition	**Train alimenté**
Nature du nœud	**Enfant**
Type de variable	**Discrèt**
Variables Parents	**Deplacement_Train**
Table de Probabilité	**Conditionnelle**

Données existantes

Informations évidentes et logiques + connaissances expertes

Méthode de détermination des TP

Estimation sans données à partir de connaissance expertes et d'informations logiques

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

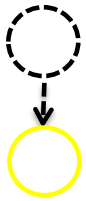
Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] ; [Sabate 1998]

Deplacement_Train



HTBT_Train

Représentativité des données

Données représentatives de la connaissance experte sur la variable

Besoins

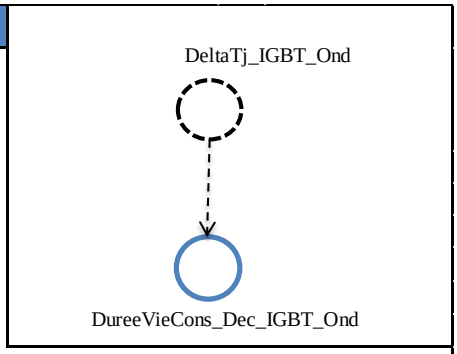
Installer des capteurs pour mesurer la tension d'alimentation du train. Ainsi les résultats pourront permettre de savoir quand le train est alimenté ou pas

Figure V.17: Fiche descriptive de la variable HTBT_Train

V.4.5. Etude de la quatrième catégorie de variable

Dans cette dernière catégorie, on retrouve les mécanismes de défaillance décrites par des équations. Dans l'application de Chennai, toutes les variables décrites par des équations sont continues et caractéristiques de mécanismes de défaillance auxquels sont donc associées des TPC. Les renseignements récoltés sur ces types de variables montrent une grande similarité sur la méthode d'apprentissage retenue, les données existantes et le besoin en termes d'amélioration à l'avenir de la connaissance sur les variables.

DureeVieCons_Dec_IGBT_Ond	
Définition	Duree de vie consommée par le décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	DeltaTj_IGBT_Ond
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant le phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique + Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Ciappa, 2002], [Chamund, 2013]

Représentativité de l'équation

Equation représentant le phénomène

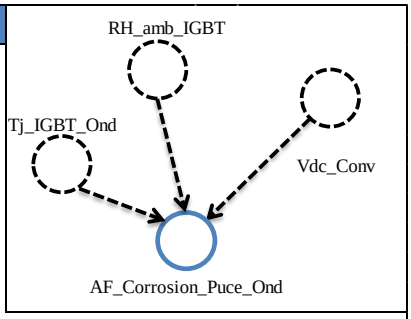
Besoins

Mécanisme de défaillance très bien exploré dans la littérature- Pas de besoin

Figure V.18: Fiche descriptive de la variable DureeVieCons_Dec_IGBT_Ond

En référence au premier cas, la figure V.18 décrit la variable DureeVieCons_Dec_IGBT_Ond (durée de vie consommée par le phénomène de décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur). Relativement au deuxième cas, la variable AF_Corrosion_Puce_Ond représente le facteur d'accélération imputable au phénomène de corrosion de la puce de l'IGBT de l'onduleur. Sa fiche est donnée en figure V.19.

AF_Corrosion_Puce_Ond	
Définition	Facteur d'accélération dû à la corrosion du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Blish et Durrant,2000]; [Kitajima et al, 2017];[Tanaka et al, 2015]; [Honda et al, 2016]; [Zorn et Kaminski, 2015]

Représentativité de l'équation

Equation représentant le phénomène.

Besoins

Affiner les paramètres des modèles en augmentant le nombre d'échantillons d'IGBT testés

Figure V.19: Renseignements sur la variable AF_Corrosion_Puce_Ond

La description des autres variables entrant dans cette catégorie est présentée en annexe B.

V.4.6. Difficultés rencontrées

La récolte de données et connaissances sur le métro de Chennai a mis en lumière trois difficultés majeures décrites dans les paragraphes suivants.

V.4.6.1. Difficulté 1 : données non synchronisées et solutions apportées

Les données recueillies sur le métro de Chennai montrent que l'on ne dispose pas de la même base temporelle pour toutes les variables. Cette difficulté concerne les catégories 1, 2 et 3. Les données sur les variables du profil de mission sont désynchronisées. Les données environnementales sont enregistrées sur une période de 1 an alors que les données électriques ont été établies sur un parcours élémentaire. Pour résoudre ce problème, on a fait le choix de choisir une base temporelle d'une journée commune pour chaque variable. Ce travail de définition du profil de mission sur une journée permet d'avoir un modèle bayesien décrivant parfaitement l'ensemble des variables de manière probabiliste. Toutes les variables aux différents niveaux du réseau bayesien sont calées sur cette périodicité. Lors du passage aux indicateurs de fonctionnement, on prend en compte le nombre de jours de fonctionnement dans l'année sous l'hypothèse que le train effectue le même profil de mission tous les jours de l'année.

V.4.6.2. Difficulté 2 : choix de la méthode d'apprentissage et solutions apportées

L'apprentissage des paramètres constitue une étape majeure de la modélisation après la construction de la structure du graphe bayesien. Les renseignements sur les variables dans le cas d'application de Chennai montrent qu'il existe une diversité dans le type de variables dans la structure retenue du graphe bayesien d'application au métro de Chennai. Ainsi, dans le réseau bayesien plusieurs configurations ressortent :

- des variables continues ayant des parents discrets ;
- des variables discrètes avec des parents continus ;
- des équations en fonction des variables parents.

Toutes ces combinaisons compliquent l'utilisation d'une même méthode d'apprentissage. La solution apportée est de remplir les TP variable par variable. Leur remplissage a été réalisé dans le sens descendant des phases de fonctionnement c'est-à-dire du niveau Train jusqu'au niveau des mécanismes de défaillance de l'IGBT. Le tableau V.4 montre les choix des techniques d'apprentissage pour les quatre catégories de variables.

Catégories	détermination des TP
Catégorie 1 : Variables pour lesquelles on dispose de lignes de données suffisantes	• Détermination des TPM à partir de règles classiques de théorie des probabilités pour les variables racines ; • Utilisation du théorème de Bayes pour calculer les TPC pour les variables enfants.
Catégorie 2 : Variables pour lesquelles on dispose de lignes de données incomplètes	• Calcul classique de probabilités dans le cas des variables racines ; • Apprentissage statistique + TPC calculées directement à partir du théorème de Bayes pour les variables enfants.
Catégories 3 : Variables pour lesquelles on ne dispose pas de lignes de données mais des informations quantitatives	Estimation des probabilités à partir de connaissances expertes et d'informations logiques et évidentes pour toutes les variables concernées.
Catégorie 4 : variables décrites par des équations fonction des parents	Apprentissage statistique avec génération de données à partir de l'équation en utilisant la simulation de Monte-Carlo. Il s'agit évidemment ici de variables enfants.

Tableau V.5: Catégories de variables et méthodes d'apprentissage

V.4.6.3. Difficulté 3 : classes de discrétisation et solutions apportées

Relativement aux variables continues, le choix des classes et de leurs intervalles se pose. En discrétisation statique, on choisit un certain nombre de classes uniformément réparties puis on divise la plage de variation de la variable par le nombre de classes retenues. La discrétisation uniforme a l'inconvénient qu'elle ne colle pas forcément avec la physique de la variable (certains intervalles ayant de faibles probabilités d'apparition pourraient être regroupés avec des intervalles voisins). En outre, le nombre d'intervalles ne doit pas être trop grand au risque d'être confronté au problème d'explosion combinatoire. Sur la base de ce constat, on a donc opté pour un choix de discrétisation statique non uniforme afin que les phénomènes physiques étudiés soient correctement décrits. Au regard de la non-homogénéité dans les types de données disponibles, il était quasi-impossible de mettre en place une règle de discrétisation fixe pour toutes les variables. On a donc opté pour une solution de discrétisation statique variable par variable. Le tableau V.6 montre pour chaque catégorie de variable le choix des classes.

Catégories	Variables concernées
Catégorie 1 : Variables pour lesquelles on dispose de lignes de données suffisantes Catégorie 2 : Variables pour lesquelles on dispose de lignes de données incomplètes Catégories 3 : Variables pour lesquelles on ne dispose pas de lignes de données mais des informations quantitatives	Pour les variables discrètes, on définit les modalités en fonction de notre connaissance des états que peut prendre la variable. Exemple de modalités : « oui » et « non » ou pour la masse les 2 modalités sont « en charge » et « à vide ». Pour les variables continues, on effectue une discrétisation statique en fonction de la connaissance experte qu'on a de la variation de la variable, des données disponibles et du retour d'expérience.
Catégorie 4 : variables décrites par des équations	Discrétisation statique en fonction de la physique de la défaillance et des données disponibles. Ces variables sont toutes continues

Tableau V.6: Catégorie de variables et classes de discrétisation

Une alternative possible serait de procéder à une discrétisation dynamique [Neil et al., 2007] qui consiste à trouver un ensemble optimal d'intervalles de discrétisation. La mise en place d'une discrétisation dynamique suit les étapes suivantes [Marquez et al., 2010] :

- choisir une discrétisation initiale pour toutes les variables ;
- calculer les TPC pour toutes les variables pour cette discrétisation initiale et propager les évidences au travers du réseau bayesien ;
- interroger le réseau pour obtenir les probabilités marginales a posteriori de chaque nœud et diviser les intervalles ;
- itérer le processus en recalculant les probabilités conditionnelles ; en propageant le réseau et en interrogeant le réseau pour obtenir les probabilités marginales et en divisant les intervalles jusqu'à ce que le modèle converge vers un niveau acceptable de précision.

La discrétisation dynamique n'est pas mise en œuvre dans ce travail de recherche.

V.5. Etablissement des TP

Dans cette partie, des exemples d'établissement de TP sont données par catégorie. L'annexe C retrace les différentes hypothèses prises pour toutes les autres variables.

V.5.1. Relativement à la première catégorie de variables

La première catégorie regroupe les données environnementales : température et humidité relative ambiante niveau Train et niveau IGBT. En raison de la non synchronisation des données du métro de Chennai, il n'est pas possible de faire apprendre les données directement pour la définition des TP. On est dans un raisonnement où on se focalise sur chacune des variables séparément et son lien avec ses parents potentiels. Dans cette première catégorie, l'idée est de faire un traitement statistique afin de définir des densités de probabilités qui ajustent mieux ces données. Un ajustement des données permet de déterminer des paramètres indicateurs notamment la moyenne et l'écart type. À partir de ces deux paramètres indicateurs de la distribution de la variable, on a fait le choix délibéré, validé par les avis d'experts, de définir trois classes : une classe centrée autour de la moyenne, une en-dessous et une au-dessus.

Formalisation

Notons μ la moyenne de la distribution de la variable, σ son écart type. On désigne par $min_{possible}$ et $max_{possible}$ respectivement les valeurs minimale et maximale possible de cette variable. Les trois classes créées sont définies ainsi :

- première classe : $[min_{possible} , \mu-\sigma [$;

- deuxième classe : [μ- σ, μ+ σ [;
- troisième classe : [μ+ σ, $max_{possible}$].

Le calcul des probabilités marginales de ces variables se calcule donc en fonction de la probabilité d'appartenance de chaque classe.

Exemple d'utilisation sur la variable humidité relative ambiante du train

Sur la variable « humidité relative ambiante train », les données ont été recueillies directement avec des capteurs installés sur le train. L'analyse statistique des données, synthétisée précédemment dans le tableau V.2, a permis de montrer que la moyenne de l'humidité relative ambiante du train est de 63,35 % avec un écart type de 12,03 %.

Dans la modélisation probabiliste du profil de l'humidité relative ambiante, il y a donc 3 classes. Les probabilités se calculent en fonction de la probabilité d'appartenance à chaque classe. La valeur minimale possible de l'humidité relative est de 0 %, celle maximale est de 100 %. On obtient donc les résultats suivants :

- dans 15 % des cas l'humidité relative ambiante appartient à la classe [0, 51] % ;
- dans 70 % des cas, elle est autour de la moyenne]51, 71] % ;
- dans 15 % des cas, elle appartient à l'intervalle]75, 100] %.

Sa TPM est donnée par la figure V.20.

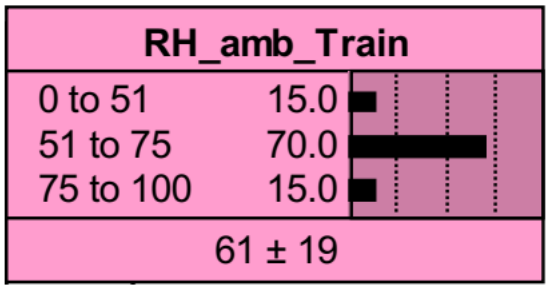


Figure V.20: TP de la variable RH_amb_Train

Le principe est le même pour l'établissement des TP relatives aux autres variables de cette catégorie.

V.5.2. Relativement à la deuxième catégorie de variables

Dans la deuxième catégorie, les données sont insuffisantes pour estimer les TP. Pour ce faire, on rajoute des informations complémentaires comme les données de parcours, les normes et les avis d'experts.

V.5.2.1. Variable Déplacement_Train

La détermination de cette TP est basée sur les hypothèses prises relativement au profil journalier d'utilisation du métro et sur les données de vitesse associées au profil de Chennai. Le choix des modalités de la variable a été fait sur la connaissance du fonctionnement d'un train dans les phases de roulage et de non roulage. On a distingué alors 4 phases essentielles de fonctionnement qui sont celles d'un train classique : une phase d'accélération, une phase de freinage, une phase de maintien de vitesse et une phase d'arrêt.

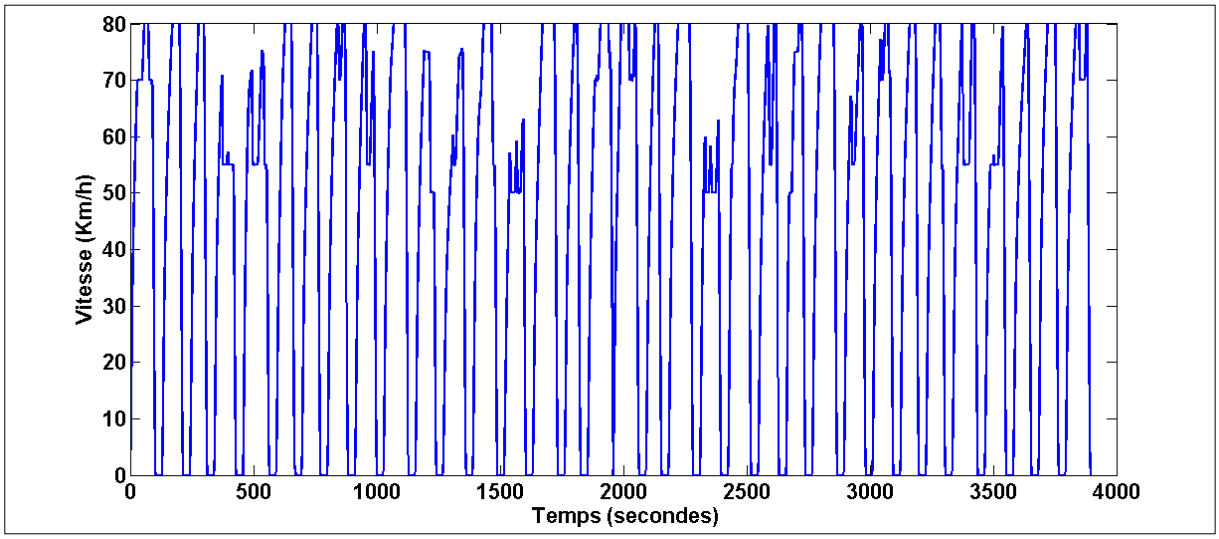


Figure V.21: Profil de vitesse sur un parcours aller-retour

Cette dernière phase comprend les instants d'arrêt entre station, les instants d'arrêt en bout de ligne et les instants d'arrêt au dépôt. À ces quatre phases classiques, on fait correspondre les quatre classes ou modalités de la TP de la variable « Déplacement_Train ». La vitesse du train est un élément important pour savoir dans quelle phase de fonctionnement se trouve le véhicule. On dispose des données de vitesse sur un parcours élémentaire aller-retour. La figure V.21 montre l'évolution de la vitesse sur un parcours de ce type. On voit l'allure qui témoigne de l'utilisation du métro : à l'arrêt en station la vitesse est nulle ; au départ d'une station, la vitesse augmente se stabilise, puis diminue due au freinage.

Pour la détermination de la TP de la variable « Déplacement du train », on reconstruit le profil de vitesse journalier à partir de trois hypothèses suivantes :

1. le train est en service de 5 h à 24 h ce qui correspond à 19 h de temps et hors service 5 h de temps par jour ;
2. le train fait 17 aller-retours dans la journée ;
3. en retournement (lorsque le train est en bout de ligne et doit faire une manœuvre pour repartir) la vitesse du train ne dépasse pas les 20 km/h.

À partir de ces hypothèses et du profil de vitesse du parcours de la figure V.21, on reconstruit un profil de vitesse journalier. Ce profil permet de calculer la probabilité d'appartenance de chaque modalité de la variable « Deplacement_Train ».

- la probabilité que le train accélère

$$P\ (Deplacement_Train=Acc_Train) = 28,4\ \% \qquad (V.1)$$

- la probabilité que le train freine

$$P\ (Deplacement_Train=Freinage\ Train) = 12,3\ \% \qquad (V.2)$$

- la probabilité que le train maintienne sa vitesse

$$P\ (Deplacement_Train=MaintV_Train) = 19,6\ \% \qquad (V.3)$$

- la probabilité que le train soit à l'arrêt. Cela inclut l'arrêt complet du train en fin de journée, l'arrêt du train en bout de parcours aller-retour (2202 s) et l'arrêt du train entre les stations (14531 s).

$$P\ (Deplacement_Train=Arret_Train) = 40\ \% \qquad (V.4)$$

La TP de la variable « Déplacement_Train » est donnée par celle de la figure V.22. C'est une variable racine, elle n'a donc pas de parents.

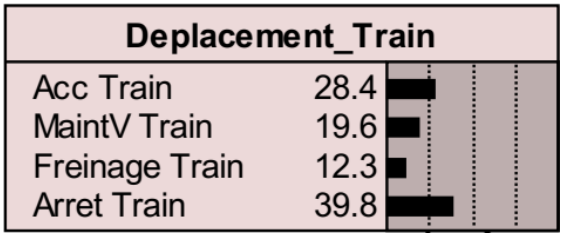


Figure V.22: TP de la variable Déplacement_Train

V.5.2.2. Variable Vdc_Conv

La tension du bus continu est donnée constante et égale à 1800 V sur un parcours aller-retour. Cette valeur est donnée dans les données de spécification technique. Dans la réalité sur un train en service, cette tension continue fluctue. En l'absence de mesures, on fait l'hypothèse que la fluctuation de tension du bus est comprise dans une plage conforme à la norme ferroviaire sur les tensions d'alimentation. La norme [EN 50163, 2004] définit une plage de variation de la tension du bus continu entre 1000 V et 1950 V. Avec la connaissance de la fluctuation de cette tension on fait l'hypothèse que lorsque le train est en service, la tension du bus continu suit une loi normale de moyenne 1800 V et d'écart type de 5 % (soit 90 V). Lorsque le train est hors

service, la tension du bus continu est nulle. On distingue 4 classes : une classe autour de la moyenne, une en dessous, une au-dessus et une où la tension est nulle.

L'analyse probabiliste sur le profil journalier a montré que :

- dans 20,1 % des cas la tension du bus continu est nulle ;
- dans 12 % des cas, elle appartient à l'intervalle]1000 V, 1710 V] ;
- dans 55,9 % des cas, elle appartient à l'intervalle]1710 V, 1890 V] ;
- dans 12 % des cas, elle appartient à l'intervalle]1890 V, 2200 V].

V.5.2.3. Altitude

Dans le cas de l'altitude, on dispose de données sur le parcours aller-retour. Le parcours est le même. Les données recueillies permettent de tracer le profil de l'altitude sur le parcours élémentaire aller-retour (figure V.23). On remarque des valeurs négatives de l'altitude signifiant que la ligne du métro est quasiment à 50 % souterraine.

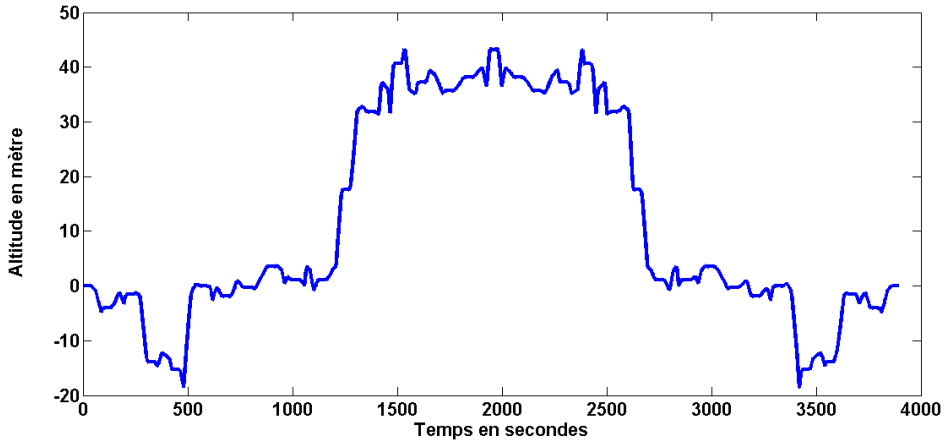


Figure V.23: Profil de l'altitude sur un parcours aller-retour

On utilise la discrétisation statique pour choisir 10 classes uniformément réparties entre la valeur minimale et la valeur maximale de l'altitude. La TP de la variable Altitude_Train est celle de la figure V.24.

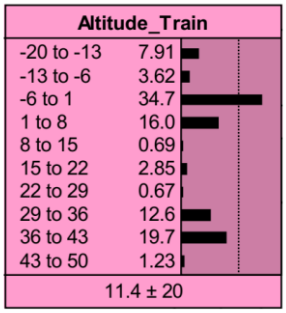


Figure V.24: TP de la variable "Altitude_Train"

V.5.3. Exemple de la troisième catégorie de variables HTBT_Train

La variable HTBT_Train (Train alimenté) a deux modalités « Oui » et « Non ». Pour déterminer la TP de cette variable, on pose l'hypothèse que lorsque le train roule, il est alimenté et lorsqu'il ne roule pas, il est 50% du temps alimenté (manœuvres à l'arrêt sous tension du train) et 50 % du temps non alimenté (arrêt hors tension). Les phases de roulage comprennent les phases d'accélération, de freinage, de maintien de vitesse et d'arrêt sous tension. La traduction de ces informations qualitatives en termes de probabilités est donnée par la relation V.5.

$$\begin{cases} P(HTBT\ Train = Oui | Deplacement\ Train = Acc\ Train) = 100\% \\ P(HTBT\ Train = Non | Deplacement\ Train = Acc\ Train) = 0\% \\ P(HTBT\ Train = Oui | Deplacement\ Train = Freinage\ Train) = 100\% \\ P(HTBT\ Train = Non | Deplacement\ Train = Freinage\ Train) = 0\% \\ P(HTBT\ Train = Oui | Deplacement\ Train = MaintV\ Train) = 100\% \\ P(HTBT\ Train = Non | Deplacement\ Train = MaintV\ Train) = 0\% \\ P(HTBT\ Train = Oui | Deplacement\ Train = Arret\ Train) = 50\% \\ P(HTBT\ Train = Oui | Deplacement\ Train = Arret\ Train) = 50\% \end{cases} \quad \text{(V.5)}$$

La TPC qui en découle est proposée en figure V.25 b. Netica effectue la marginalisation pour déterminer les probabilités marginales de la variable. Ainsi, la probabilité que le train soit en HTBT est de 79,9% et de 20,1% lorsqu'il ne l'est pas (figure V.25 a).

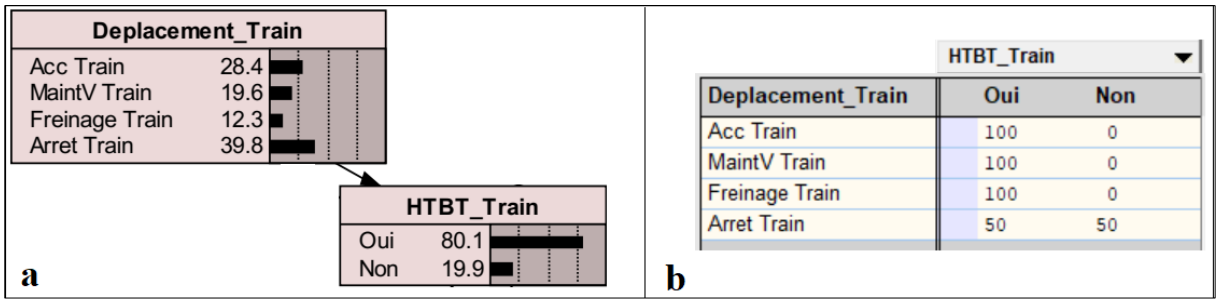


Figure V.25: (a) Variable HTBT_Train et son parent (b) TPC de HTBT

V.5.4. Exemple de la quatrième catégorie de variables

Ce sont des variables décrites par des équations. Pour transformer l'équation en TP, on utilise la génération de données à partir de la simulation de Monte-Carlo. La génération de données est également disponible via la fonction « Equation To Table » de l'outil Netica. La figure V.26 illustre la génération de données. On crée une base de cas à partir de chacune des variables. Pour chaque combinaison des variables parents on évalue l'équation. On utilise ensuite la méthode du maximum de vraisemblance pour calculer les TPC.

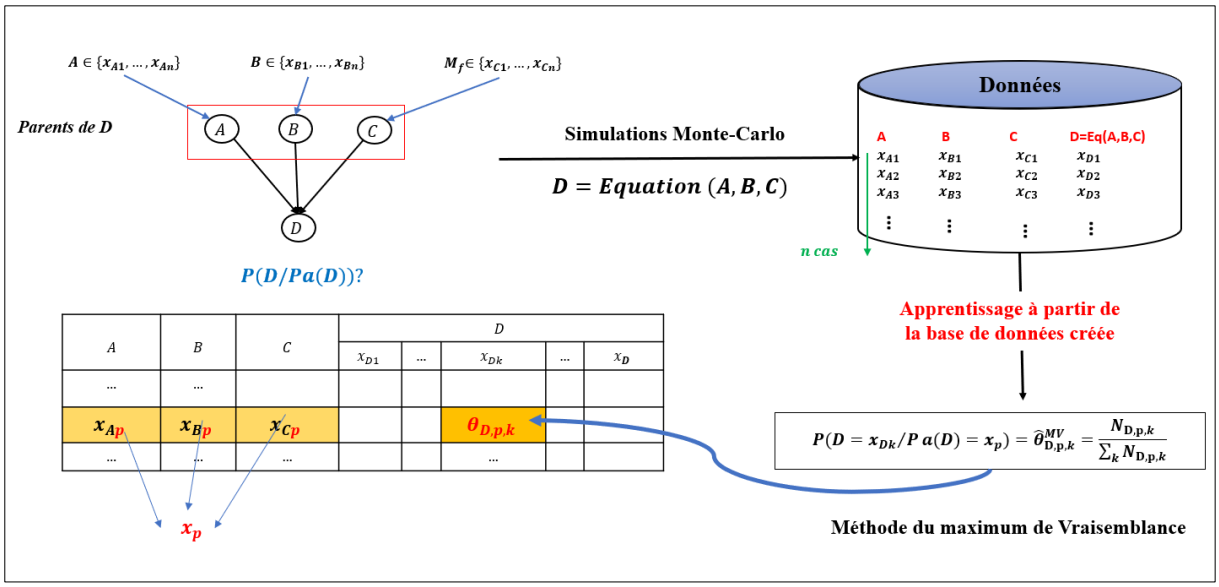


Figure V.26: Illustration de l'utilisation de la simulation de Monte Carlo pour estimer les TPC

V.6. Passage des TP aux indicateurs de défaillance

Les mécanismes de défaillance étudiés sont pour la plupart exprimés sous forme d'équations qui lient les mécanismes aux variables qui les causent. On a vu précédemment que les TP du réseau bayesien pouvaient être déterminées à partir des données, des équations, des hypothèses, des normes et des avis d'experts. Une fois les tables construites, il s'agit de passer des mécanismes de défaillance aux indicateurs de défaillances. Les indicateurs de défaillance estimés sont le taux de défaillance et la durée de vie. On présentera les résultats uniquement pour le niveau mécanisme de défaillance sachant que le modèle complet sera donné dans l'annexe D.

V.6.1. Considérations sur les mécanismes de défaillance

Les mécanismes de défaillance étudiés sont indépendants. Cette considération a été validée dans un rapport du projet Shift2Rail, projet pilote de ce travail de recherche [PNT-WP04-D-SIE-083-01, 2018]. Ainsi chaque phénomène est traité séparément. Aucun couplage n'est pris en compte. Sur la base de l'expérience des partenaires du projet, cette hypothèse semble réaliste et les effets de couplage potentiels sont secondaires. Les phénomènes de dépassement de l'aire de sécurité et de rayonnement cosmique sont des phénomènes purement aléatoires. Ils sont donc décrits par des taux de défaillance constants. Les phénomènes de corrosion de la puce, de décollement du fil de bonding et de fatigue de la soudure sont modélisés par des distributions de Weibull de paramètre de forme supérieur à 1 ce qui correspond à un taux de défaillance croissant.

Une autre considération est de limiter certaines valeurs de contraintes pour le mécanisme de corrosion de la puce. Concrètement, sur la base de l'expertise des spécialistes IGBT d'ALSTOM et celle des fournisseurs, on peut poser comme hypothèse qu'en dessous de certaines valeurs des contraintes, le mécanisme de défaillance n'est pas activé. Les limites adoptées sont les suivantes :

- les températures de jonction inférieures à 15 °C n'activent pas l'apparition du phénomène de corrosion de la puce. On commence donc la plage de variation des températures de jonction à 15 °C au lieu de 0 °C ;
- concernant l'humidité relative ambiante de l'IGBT, au lieu de prendre des valeurs plausibles c'est-à-dire une plage de variation de 0 à 100 %, on commence la plage de variation par l'humidité minimale enregistrée sur Chennai qui est de 20 % ;
- pour la tension du bus continu Vdc, on la limite à 80 V au lieu de 0 V ; les tests accélérés mettant en évidence l'humidité se font avec un minimum de 80 V de tension. En dessous de cette valeur de la tension le phénomène de corrosion n'est pas constaté.

Les lois mathématiques qui régissent les différents mécanismes de défaillance ont été étudiées en détail dans le chapitre II. Néanmoins, pour chaque mécanisme, on rappelle les équations avant de passer aux TP puis aux indicateurs de défaillance. Les définitions des paramètres intervenant dans les équations sont entièrement données dans le chapitre II.

V.6.2. Estimation du taux de défaillance pour les phénomènes dont l'équation du taux de défaillance est connue

Ce sont les phénomènes de rayonnement cosmique et de dépassement de l'aire de sécurité. Le taux de défaillance est constant pour ces mécanismes.

V.6.2.1. Etude du phénomène de rayonnement cosmique

Le taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique noté λ_{LTDS} est donné par l'expression V.6 [ABB, 2013].

$$\lambda_{LTDS} = C_3\, Exp\left(\frac{C2}{C_1 - V_{DC}}\right) Exp\left(\frac{1-\left(1-\frac{h}{44300}\right)^{5,26}}{0,43}\right) \qquad (V.6)$$

où C_1 =1221, C_2 =14388, C_3 =10^9sont des constantes. V_{dc} la tension du bus continu, T_j la température de jonction et h l'altitude sont les parents de λ_{LTDS} exprimé en FIT (1 panne pour 10^9 h).

La modélisation bayesienne permet d'obtenir la répartition probabiliste du taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique en fonction du profil de mission de l'IGBT (cas de l'onduleur et cas du PMCF). La figure V.27 montre ces tables.

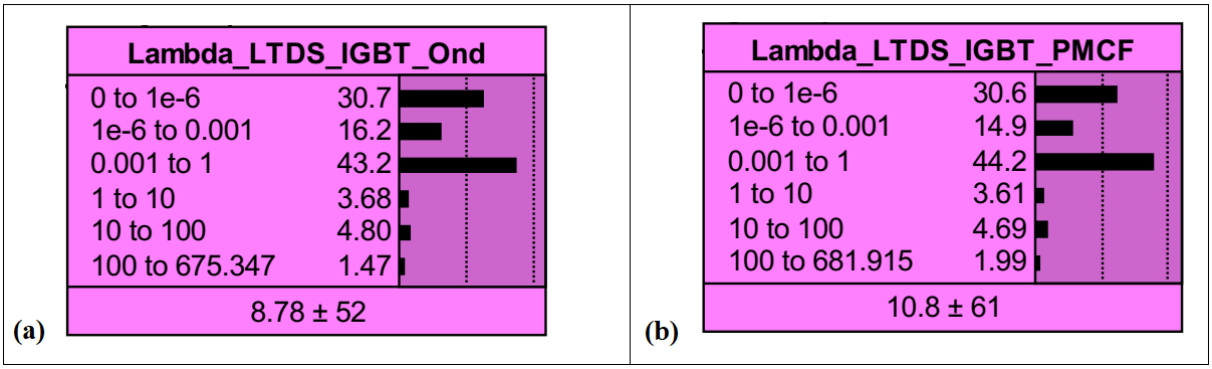


Figure V.27: Résultats de la TP du taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique (a) Cas de l'IGBT de l'onduleur (b) Cas de l'IGBT du PMCF

Comme décrit dans le chapitre IV pour les phénomènes décrits par le taux de défaillance, on calcule le nombre de défaillance par unité de temps sur la durée de la mission qu'on appelle par abus de langage taux de défaillance à partir de l'équation V.7 :

$$\lambda_{LTDS} = \sum_i^n p_i \, C_{m_i} \tag{V.7}$$

Après ces calculs on obtient les résultats suivants qui représentent les taux de défaillance moyens dus aux phénomènes de rayonnement cosmique. Le taux de défaillance moyen dû au phénomène de rayonnement cosmique est de 8,78 FIT pour l'IGBT de l'onduleur et de 10,8 FIT pour l'IGBT du PMCF.

V.6.2.2. Etude du phénomène de RBSOA

L'expression du taux de défaillance dû au phénomène de dépassement de l'aire de sécurité ou RBSOA est donnée par la relation V.8.

$$\lambda_{RBSOA} = 10^3 \, \lambda_b \, \pi_T \, \pi_A \, \pi_R \, \pi_S \, \pi_E \tag{V.8}$$

Le détail de l'équation est donné dans le chapitre II. Les résultats de la TP sont donnés par la figure V.28.

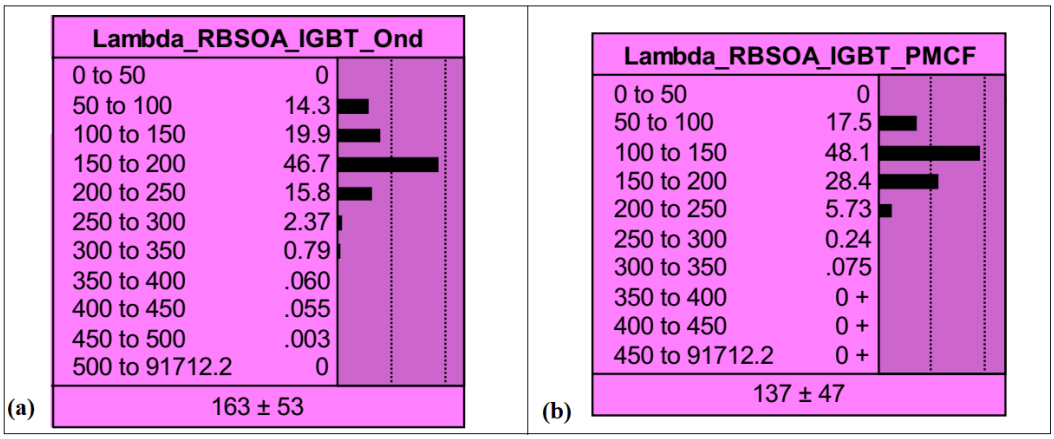


Figure V.28: TP du taux de défaillance dû au phénomène de RBSOA (a) Cas de l'IGBT de l'onduleur (b) Cas de l'IGBT du PMCF

On se retrouve dans le cas 1 des mécanismes de défaillance déjà exprimés en taux de défaillance. Pour avoir une estimation chiffrée de la valeur du taux de défaillance dû à ce phénomène, on calcule sa moyenne. On obtient le taux de défaillance de l'IGBT de l'onduleur dû au phénomène de RBSOA est égal à 163 FIT, celui de l'IGBT du PMCF est de 137 FIT.

V.6.3. Estimation du taux de défaillance pour les phénomènes décrits par un facteur d'accélération

Dans le cas de figure des phénomènes décrits par leur facteur d'accélération, on a constaté que la discrétisation aléatoire et uniforme ne permettait pas d'avoir une répartition judicieuse de la TP. Il fallait donc trouver un choix judicieux de discrétisation. Pour expliciter le problème, on propose de prendre l'exemple du facteur d'accélération donné par la corrosion de la puce pour lequel plusieurs scénarii ont été considérés :

- discrétisation uniforme : on discrétise la classe en un nombre de classes équiprobables en partitionnant la plage de variation de la variable en intervalles égaux. Lorsque la plage de variation est très grande, il apparaît que quasiment 100 % des valeurs se retrouvent dans la première classe même en augmentant le nombre de classes. On a fait l'exercice pour 20 classes (figure V.29a), 100 classes (figure V.29b), 1000 classes (figure V.29c) et 2500 classes (figure V.29d). On arrive à la même conclusion. Cela conforte le fait que la discrétisation équiprobable lorsque la plage de variation est grande n'est pas idéale ;
- discrétisation arbitraire : on choisit un nombre de classes puis on discrétise finement dans les zones où la densité de probabilité est très élevée et grossièrement dans les zones où la distribution de probabilité est faible. L'exemple de la figure V.29e illustre ce scenario avec 18 classes. Cette discrétisation donne de bons résultats ;

- discrétisation normative : on se base sur choix de classes statistiques en utilisant la règles de Sturges [Birgé et Rozenholc, 2006]. Cette règle sert à découper une plage de valeurs en tranches pour en faire une description statistique. On passe par le logarithme pour réduire la plage de variation, on détermine le nombre de classes et on passe en exponentielle pour trouver les classes discrétisées. L'illustration de cette technique sur le cas de l'exemple présenté au paragraphe V.29f, conduit à 22 classes.

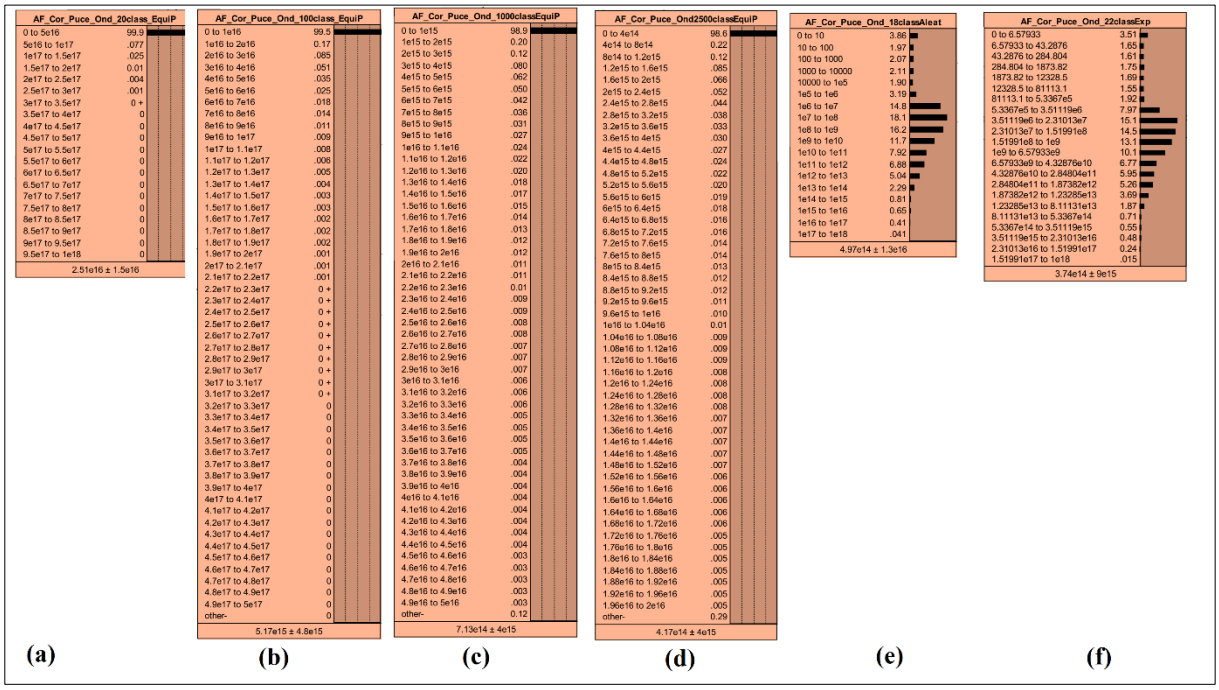


Figure V.29: Différents scénarii de choix de discrétisation statique (a) 20 classes équiprobables (b) 100 classes équiprobables (c) 1000 classes équiprobables (d) 2500 classes équiprobables (e) discrétisation aléatoire (f)discrétisation exponentiellement équiprobable avec un nombre de classes choisi par la règle de Sturges

Fort de ces constats tirés de ces scénarii, on a fait le choix de caractériser les variables décrites par un facteur d'accélération à partir d'une discrétisation exponentielle et un nombre de classes donné par la règle de Sturges. Ce choix se justifie par deux raisons : la première raison est qu'il permet d'avoir une répartition judicieuse de la densité de probabilité du facteur d'accélération et se base sur une logique mathématique ; la deuxième raison est qu'il résout le problème de convergence de la probabilité dans une seule classe lorsque l'on fait une discrétisation uniforme. C'est donc ce choix qui est appliqué pour les variables décrites par un facteur d'accélération.

V.6.3.1. Etude du phénomène de corrosion de la terminaison de la puce

L'équation donnant le facteur d'accélération dû au phénomène de corrosion de la puce [Kitajima et al., 2017] est donnée par :

$$AF_{cor_{Puce}} = \left(\frac{RH_{acc}}{RH_{ref}}\right)^{x} \left(\frac{V_{dc_{acc}}}{V_{dc_{ref}}}\right)^{y} Exp\left[\left(\frac{E_a}{k}\right)\left(\frac{1}{T_{jref}+273{,}15} - \frac{1}{T_{jacc}+273{,}15}\right)\right] \qquad (V.9)$$

où

- $T_{j_{acc}}$= 85 °C est la température de jonction dans les conditions accélérées ;
- RH_{acc} = 85 % est l'humidité relative dans les conditions accélérées ;
- $V_{dc_{acc}}$= 2000 V est la tension du bus continu dans les conditions accélérées ;
- x = 20,5 est un exposant ;
- y =1,37 est un exposant ;
- E_a = 0,79 eV est l'énergie d'activation ;
- k=8,617.10^{-5}eV K^{-1} est la constante de Boltzmann ;
- RH_{ref} est l'humidité relative de l'IGBT dans les conditions de référence ;
- $V_{dc_{ref}}$ est la tension du bus continu appliquée à l'IGBT dans les conditions de référence ;
- T_{jref} est la température de jonction de l'IGBT dans les conditions de référence.

Les conditions de référence $RH_{ref}, V_{dc_{ref}}$ et T_{jref} sont données dans le modèle bayesien. Les paramètres de la loi de Weibull accélérée sont : α_{acc} = 5167 heures et β_{acc} = 4,85. Les démonstrations de x, y et de α_{acc} et β_{acc} sont fournies en annexe E. Les résultats de modélisation de Netica obtenus en termes de facteur d'accélération sont ceux de la figure V.30 pour le phénomène de corrosion de la puce dans le cas de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF.

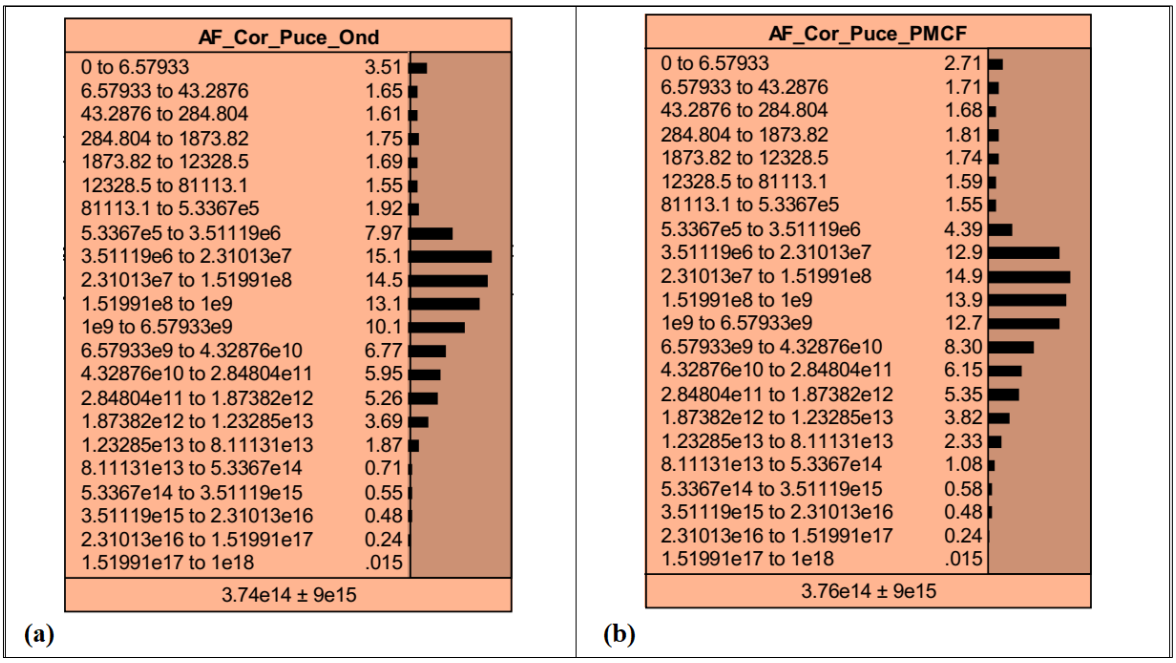


Figure V.30: TP du facteur d'accélération du phénomène de corrosion de la puce (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF

Pour estimer le taux de défaillance, on utilise la somme pondérée de lois de Weibull présentée au chapitre IV. La formulation de la somme pondérée de lois de Weibull est donnée par la relation V.10.

$$\lambda_{cor_{puce}}(t) = \sum_{i=1}^{n} p_i \frac{\beta_{acc}}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}} \left(\frac{t}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}}\right)^{\beta_{acc}-1} \quad \text{(V.10)}$$

Cette méthode appliquée à l'estimation du taux de défaillance dû au phénomène de corrosion de la puce permet d'écrire la relation V.11.

$$\lambda_{cor_{puce}}(t) = \sum_{i=1}^{22} \left[p_i \frac{10^9}{8760} \frac{4{,}85}{AF_{moy_i}} \frac{1}{5167} \left(\frac{t}{AF_{moy_i}}\right)^{3{,}85} \right] \quad \text{(V.11)}$$

t est en années, *n*=22 classes ; AF_{moy_i} représente la moyenne de la classe *i* et p_i la probabilité de la classe *i*. Le chiffre 8760 est rajouté pour la conversion année/heure, et la constante 10^{-9} pour avoir la valeur du taux de défaillance en FIT. Pour faire le calcul du taux de défaillance, on reporte dans le tableau V.7 les classes et probabilités données par la TP du facteur d'accélération dû à la corrosion. On calcule les moyennes des classes et on compile l'équation V.11 qui donne l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps.

$classes$	AF_{min}	AF_{max}	AF_{moy_i}	p_i (IGBT Onduleur)	p_i (IGBT PMCF)
1	0	6,579332247	3,289666124	0,0351	0,027
2	6,579332247	43,28761281	24,93347253	0,0165	0,0171
3	43,28761281	284,8035868	164,0455998	0,0161	0,0168
4	284,8035868	1873,817423	1079,310505	0,0175	0,0181
5	1873,817423	12328,46739	7101,142407	0,0169	0,0174
6	12328,46739	81113,08308	46720,77524	0,0155	0,0159
7	81113,08308	533669,9231	307391,5031	0,0192	0,0155
8	533669,9231	3511191,734	2022430,829	0,0797	0,0439
9	3511191,734	23101297	13306244,37	0,151	0,129
10	23101297	151991108,3	87546202,65	0,145	0,149
11	151991108,3	1000000000	575995554,2	0,131	0,139
12	1000000000	6579332247	3789666124	0,101	0,127
13	6579332247	43287612811	24933472529	0,0677	0,083
14	43287612811	284804000000	$1{,}64046 \times 10^{11}$	0,0595	0,0615
15	284804000000	1873820000000	$1{,}07931 \times 10^{12}$	0,0526	0,0535
16	1873820000000	12328500000000	$7{,}10116 \times 10^{12}$	0,0369	0,0382
17	12328500000000	81113100000000	$4{,}67208 \times 10^{13}$	0,0187	0,0233
18	81113100000000	533670000000000	$3{,}07392 \times 10^{14}$	0,0071	0,0108
19	533670000000000	3511190000000000	$2{,}02243 \times 10^{15}$	0,0055	0,0058
20	3511190000000000	$2{,}31013 \times 10^{16}$	$1{,}33062 \times 10^{16}$	0,0048	0,0048
21	$2{,}31013 \times 10^{16}$	$1{,}51991 \times 10^{17}$	$8{,}75462 \times 10^{16}$	0,0024	0,0024
22	$1{,}51991 \times 10^{17}$	10^{18}	$5{,}75996 \times 10^{17}$	0,00015	0,00015

Tableau V.7: paramètres du facteur d'accélération de la corrosion de la puce

Les figures V.31 montrent l'évolution du taux de défaillance en utilisant la somme pondérée des lois de Weibull dans le cas de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF.

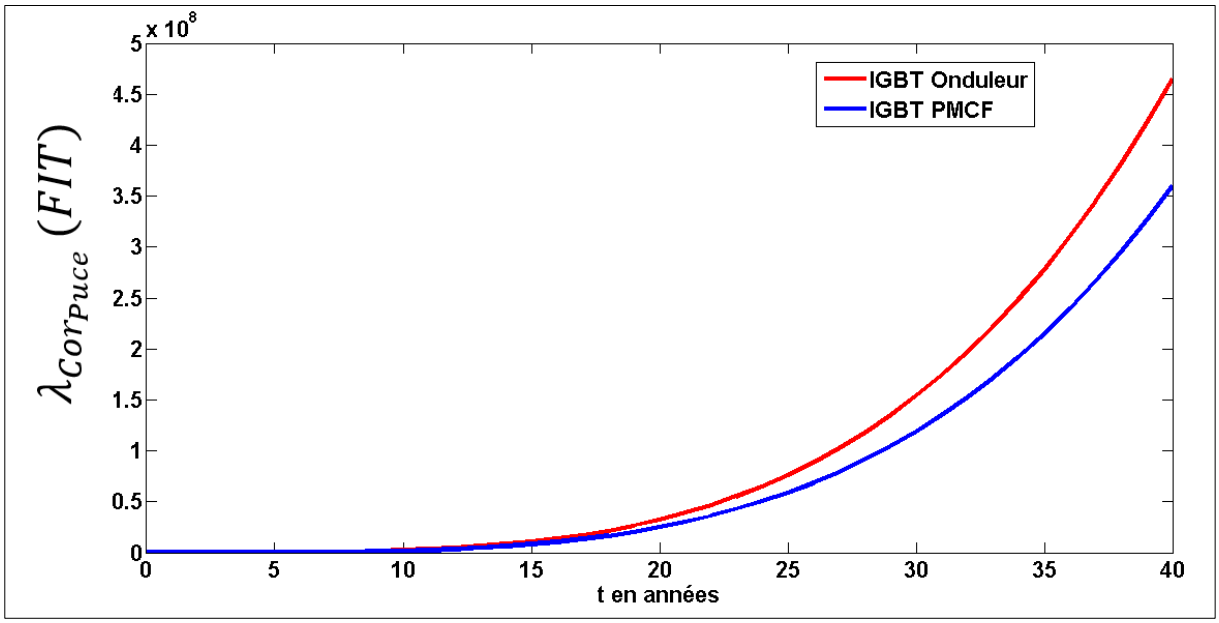


Figure V.31: Courbe du taux de défaillance de la corrosion de la puce de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF

Les deux courbes sont représentatives de la période de vie utile à la période de vieillissement de la courbe en baignoire caractéristique de l'évolution du taux de défaillance des composants électroniques. L'obtention de ces courbes caractéristiques est prévisible étant donné qu'on est en présence de sommation de lois de Weibull. Les valeurs de taux de défaillance atteignent respectivement $4{,}65 \times 10^8$ FIT et $3{,}6 \times 10^8$ FIT pour l'IGBT de l'onduleur et l'IGBT du PMCF. L'IGBT de l'onduleur devrait donc connaître un nombre de pannes supérieur à celui du PMCF.

Les valeurs de taux de défaillance calculées sont largement élevées par rapport aux valeurs attendues. Une première cause possible c'est que le phénomène de corrosion de la puce est moins connu et moins bien modélisé. Une deuxième cause possible (la plus probable) est liée à l'utilisation de la méthode dite somme pondérée de lois de Weibull (validité discutable de l'extension de la méthode décrite par FIDES).

V.6.3.2. Etude du phénomène de fatigue de la brasure

Le facteur d'accélération dû au phénomène de fatigue de la soudure est donné par la relation V.12 :

$$AF_{fat_{bras}} = \left(\frac{\Delta T_{cacc}}{\Delta T_{c_{ref}}}\right)^n \qquad \text{(V.12)}$$

où

- $\Delta T_{c_{acc}}$ = 30 K est l'amplitude de cycle de la température de la semelle dans les conditions accélérées ;
- n = 3,84 est une constante.

Les paramètres de la Weibull accélérée sont : α_{acc} = 150813 cycles, β_{acc} = 6,49.

Démonstration de l'obtention de α_{acc} et β_{acc}

La littérature est assez pauvre sur les résultats des essais concernant le phénomène de fatigue de la soudure. On ne dispose pas de documentation combinant directement le modèle de Weibull avec le facteur d'accélération. Il n'existe donc pas de données permettant de faire un ajustement pour déterminer les paramètres de la loi. On s'est basé sur les valeurs de quantile données dans la note d'application 5SYA 2043-04 du fabricant ABB [ABB, 2014] pour estimer les paramètres α_{acc} et β_{acc}. Le quantile B_5 est de 95400 cycles et le quantile B_1 est de 74200 cycles. À partir de ces deux informations, on a calculé les paramètres de Weibull.

La formule du quantile d'une loi de Weibull est donnée par la relation V.13 :

$$B_p = \alpha_{acc}\, ln\left(\frac{1}{1-p}\right)^{\beta_{acc}} \tag{V.13}$$

L'utilisation des deux quantiles fournis par la note d'application conduit aux jeux d'équations suivants :

$$\begin{cases} B_{p_1} = \alpha_{acc}\, ln\left(\frac{1}{1-p_1}\right)^{\beta_{acc}} \\ B_{p_2} = \alpha_{acc}\, ln\left(\frac{1}{1-p_2}\right)^{\beta_{acc}} \end{cases} \tag{V.14}$$

$$\begin{cases} 95\,400 = \alpha_{acc}\, ln\left(\frac{1}{1-0{,}05}\right)^{\beta_{acc}} \\ 74\,200 = \alpha_{acc}\, ln\left(\frac{1}{1-0{,}01}\right)^{\beta_{acc}} \end{cases} \tag{V.15}$$

La résolution du système d'équation permet alors d'obtenir les valeurs de α_{acc} et β_{acc} :

$$\beta_{acc} = \frac{ln\left[\frac{ln\left(\frac{1}{0{,}95}\right)}{ln\left(\frac{1}{0{,}99}\right)}\right]}{ln\left(\frac{95\,400}{74\,200}\right)} \tag{V.16}$$

$$\alpha_{acc} = \frac{94500}{\ln\left(\frac{1}{0{,}9}\right)^{\frac{1}{\beta_{acc}}}} \tag{V.17}$$

Après calcul, les paramètres de forme et d'échelle de la Weibull accélérée sont respectivement de β_{acc}= 6,49 et α_{acc}=150813 cycles. Il faut ensuite traduire le paramètre de forme de cycles

en heures. Le paramètre d'échelle se traduit en temps par une multiplication par le temps de cycle de la température de la semelle en conditions de référence ($t_{T_{c_{ref}}}$). Pour l'IGBT de l'onduleur, $t_{T_{c_{ref}}}$ est égal à 31,18 s et à 46,20 s pour l'IGBT du PMCF. Le paramètre d'échelle dans les conditions accélérées convertit en heures devient alors t α_{acc}=1306 heures pour l'IGBT de l'onduleur et 1935 heures pour l'IGBT du PMCF.

Les résultats de modélisation dans Netica sont donnés par la figure V.32a pour l'IGBT de l'onduleur et V.32b pour l'IGBT du PMCF.

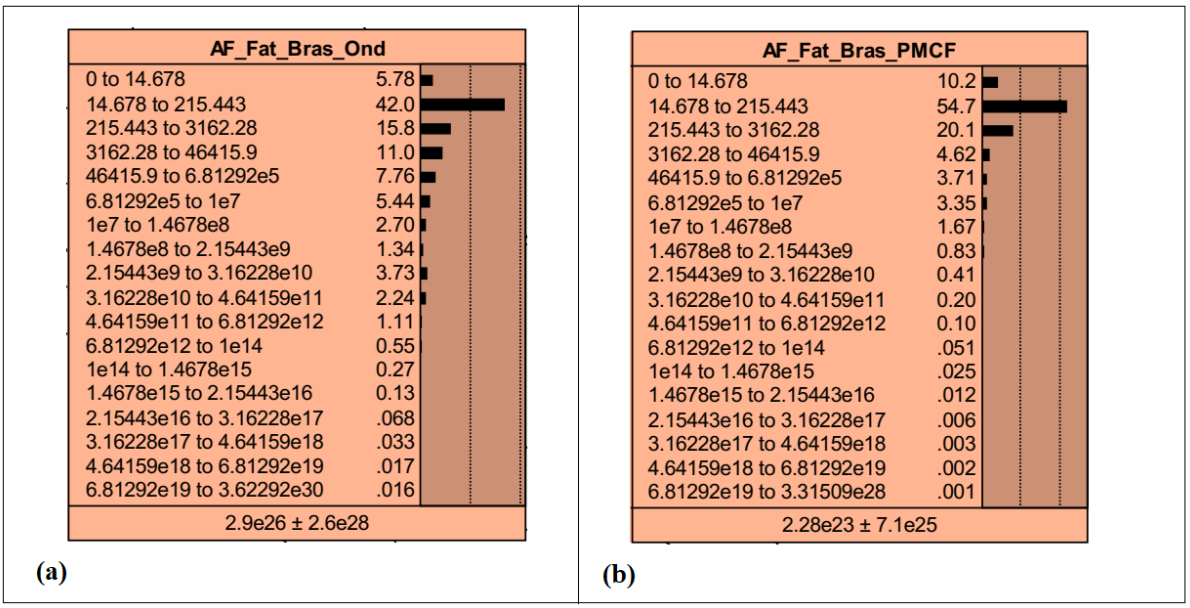


Figure V.32: TP du facteur d'accélération du phénomène de fatigue de la brasure (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF

À partir de la connaissance de la TP (classes et probabilités) du facteur d'accélération et des paramètres de la Weibull accélérée, on peut alors écrire l'expression du taux de défaillance pour l'IGBT de l'onduleur (relation V.18) et pour l'IGBT du PMCF (relation V.19) en utilisant la somme pondérée de lois de Weibull.

$$\lambda_{Fat_{Bras_{IGBT\,Ond}}}(t) = \sum_{i=1}^{18}\left[p_i \frac{10^9}{8760} \frac{6{,}49}{AF_{moy_i}} \frac{1}{1306}\left(\frac{t}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}}\right)^{5{,}49}\right] \qquad \text{(V.18)}$$

$$\lambda_{Fat_{Bras_{IGBT_{Pmcf}}}}(t) = \sum_{i=1}^{18}\left[p_i \frac{10^9}{8760} \frac{6{,}49}{AF_{moy_i}} \frac{1}{1935}\left(\frac{t}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}}\right)^{5{,}49}\right] \qquad \text{(V.19)}$$

Le nombre de classes est 18. AF_{moy_i} est la moyenne de chaque classe *i*.

La figure V.33 montre l'évolution du taux de défaillance dû au phénomène de fatigue de la brasure respectivement pour l'IGBT de l'onduleur et celui du PMCF. Sur 40 ans, en utilisant la

somme pondérée de lois de Weibull, on observe que le taux de défaillance atteint $1{,}57 \times 10^7$ FIT pour l'IGBT de l'onduleur contre $2{,}77 \times 10^7$ pour l'IGBT du PMCF.

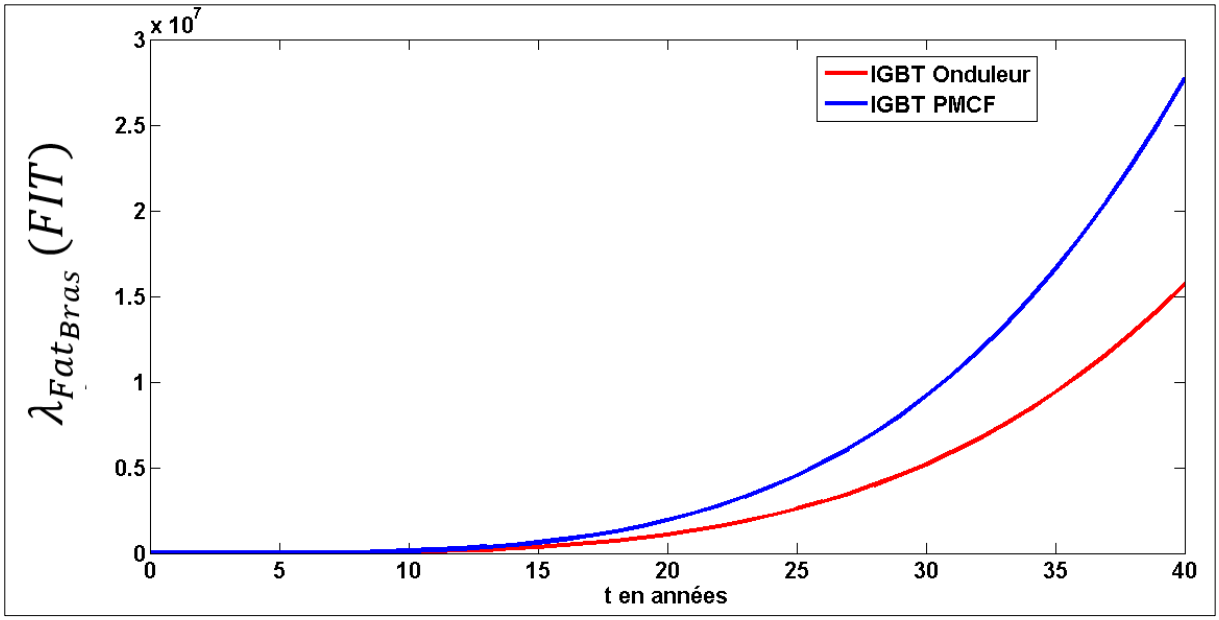


Figure V.33: Courbe du taux de défaillance de la fatigue de la brasure de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF

V.6.3.3. Etude du phénomène de décollement du fil de bonding

L'expression du facteur d'accélération dû au phénomène de décollement du fil de bonding est donnée par la relation V.20.

$$AF_{Dec_{Fil}} = \left(\frac{\Delta T_{j_{acc}}}{\Delta T_{j_{ref}}}\right)^n \quad \text{(V.20)}$$

où $\Delta T_{j_{acc}}$ = 110 K est l'amplitude de cycle de la température de jonction dans les conditions accélérées. n = 5,91 est une constante. Les paramètres de la Weibull accélérés β_{acc} = 13,6 et α_{acc} =31400 cycles (figure V.34).

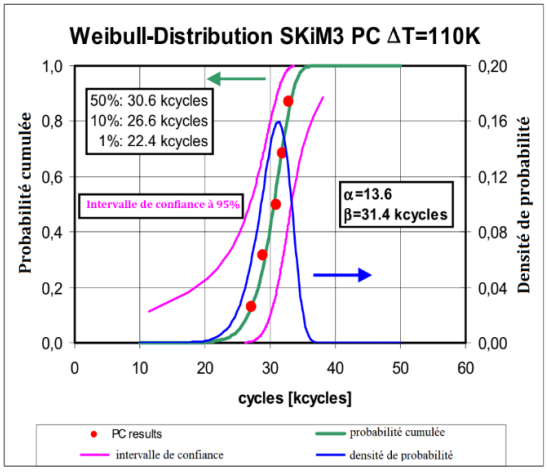


Figure V.34: Paramètres de Weibull accélérée [Scheuermann, 2012]

Pour passer du paramètre d'échelle de la Weibull accélérée exprimé en Cycle en Unité temporelle, il faut multiplier par le temps du cycle de la température de jonction dans les conditions de référence noté $t_{T_{j_{ref}}}$. Ce temps est de 30,42 s pour l'IGBT de l'onduleur et de 43,79 s pour l'IGBT du PMCF. Après calcul, le paramètre d'échelle est α_{acc}=265 heures pour l'IGBT de l'onduleur et de 382 heures pour celui du PMCF.

La modélisation probabiliste permet d'obtenir les TP du facteur d'accélération dû au phénomène de décollement du fil de bonding dans le cas de l'IGBT de l'onduleur et dans le cas de l'IGBT du PMCF (figure V.35a et V.35b respectivement).

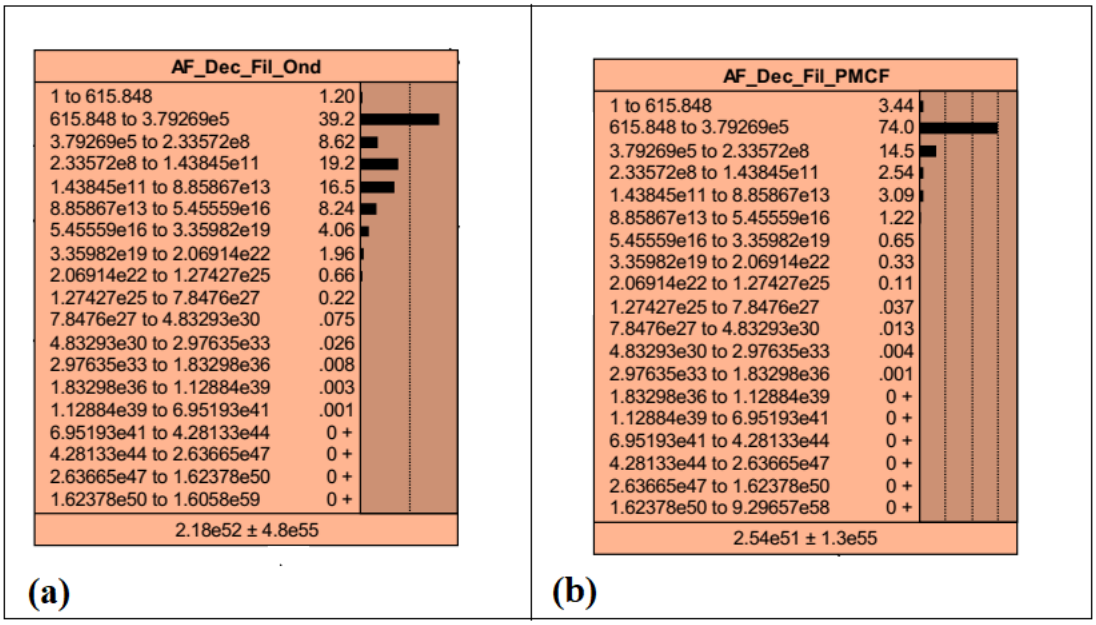


Figure V.35: TP du facteur d'accélération du phénomène de décollement du fil de bonding (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF

L'expression du taux de défaillance s'écrit alors à partir des relations V.21 pour l'IGBT de l'onduleur et V. 22 pour l'IGBT du PMCF.

$$\lambda_{Dec_{Fil_{Ond}}}(t) = \sum_{i=1}^{18}\left[p_i \frac{10^9}{8760} \frac{13,6}{AF_{moy_i}} \frac{1}{265}\left(\frac{t}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}}\right)^{12,6}\right] \quad \text{(V.21)}$$

$$\lambda_{Dec_{Fil_{PMCF}}}(t) = \sum_{i=1}^{18}\left[p_i \frac{10^9}{8760} \frac{13,6}{AF_{moy_i}} \frac{1}{382}\left(\frac{t}{AF_{moy_i}\,\alpha_{acc}}\right)^{12,6}\right] \quad \text{(V.22)}$$

On trace l'évolution du taux de défaillance dû au phénomène de décollement du fil de bonding en utilisant la somme pondérée de lois de Weibull. La figure V.36 montre l'évolution du taux de défaillance des deux types d'IGBT.

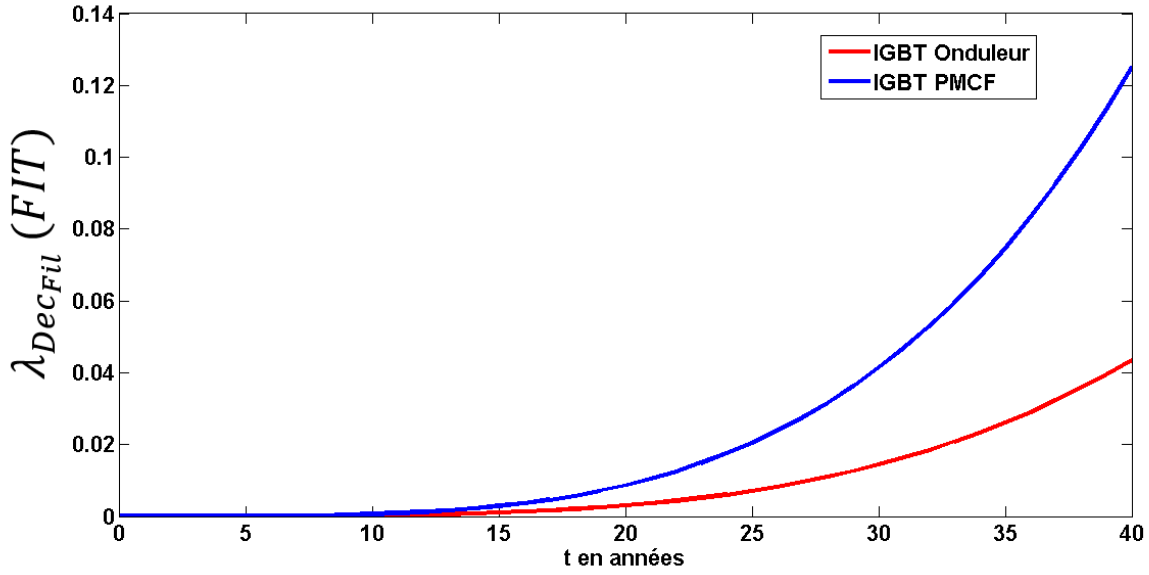


Figure V.36 : Courbe du taux de défaillance du décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur et du PMCF

Le taux de défaillance sur 40 ans est de 0,04 FIT pour l'IGBT de l'onduleur et de 0,13 FIT pour celui du PMCF.

V.6.4. Taux de défaillance global de l'IGBT

Le taux de défaillance global de l'IGBT peut être obtenu par sommation des taux de défaillance liés à chaque mécanisme de défaillance. Pour rappel, les mécanismes de défaillance étudiés sont : la fatigue de la soudure, la corrosion de la puce, le dépassement de l'aire de sécurité, le rayonnement cosmique et le décollement du fil de bonding. On a tracé sur une même figure le taux de défaillance lié à chacun des mécanismes de défaillance et le taux de défaillance global de l'IGBT. La figure V.37a et la figure V.37b représentent respectivement la courbe du taux de défaillance global de l'IGBT de l'onduleur et de l'IGBT du PMCF.

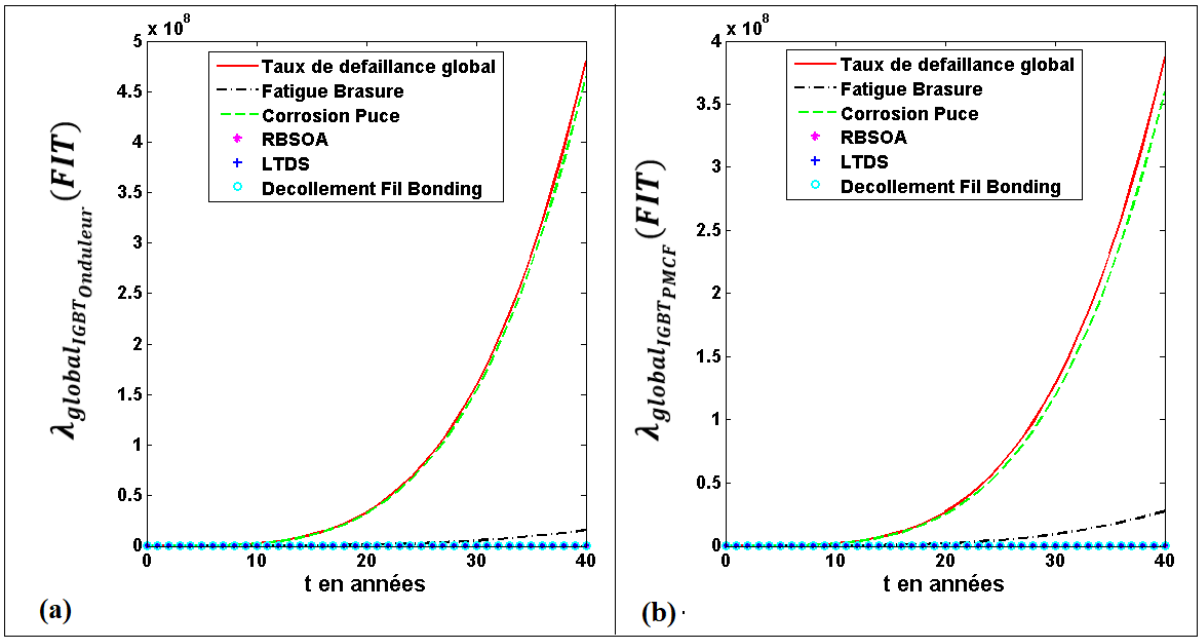


Figure V.37: Evolution du taux de défaillance global de l'IGBT (a) Cas de l'IGBT de l'onduleur (b) Cas de l'IGBT du PMCF

On remarque sur les deux types d'IGBT, la prépondérance du phénomène de corrosion de la puce sur le taux de défaillance global de l'IGBT suivie par le phénomène de fatigue de la brasure. Les phénomènes de rayonnement cosmique (LTDS), de RBSOA (dépassement de l'aire de sécurité), de décollement du fil de bonding restent faibles par rapport aux deux autres phénomènes. Après 40 ans, le taux de défaillance de l'IGBT de l'onduleur atteint $4{,}8 \times 10^8$ FIT et $3{,}87 \times 10^8$ pour l'IGBT du PMCF. L'étude montre que l'IGBT de l'onduleur connaîtra plus de pannes que celui du PMCF sur le profil de mission du métro de Chennai. Une caractéristique importante à relever de la courbe en baignoire du taux de défaillance de l'IGBT est la durée de vie à laquelle il rentre dans la période de vieillissement. Globalement, les courbes montrent que le phénomène de vieillissement apparaît au bout de 13 ans de fonctionnement.

V.6.5. Estimation de la durée de vie par phénomène

On étudie ici la durée de vie de l'IGBT due au phénomène de décollement de fil de bonding et de fatigue de la soudure.

V.6.5.1. Durée de vie due au phénomène de décollement du fil de bonding

Le modèle de durée de vie pour l'étude du mécanisme de décollement du fil de bonding donne le nombre de cycles thermiques avant défaillance en fonction de l'amplitude du cycle.

$$N_f = a\,\Delta T_j^{-n} \tag{V.23}$$

où ΔT_j est l'amplitude du cycle ; a et n sont des constantes. a =9,56.10^{15} et n=5,91. La durée de vie consommée est donnée par la relation V.24.

$$Durée\ de\ Vie_{cons} = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{c_i}}{N_{f_i}} \quad \text{(V.24)}$$

où N_{c_i} est le nombre de cycles réels.

On modélise l'équation V.24 dans le réseau bayesien et on obtient la TP de la durée de vie consommée par jour. La figure V.38a montre la TP de la durée de vie due aux phénomènes de décollement du fil de bonding pour l'IGBT de l'onduleur et la figure V.38b celle de l'IGBT du PMCF.

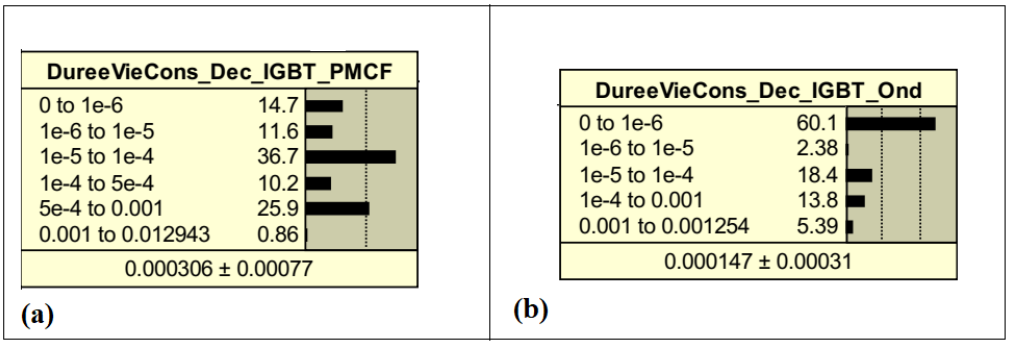


Figure V.38: TP de la durée de vie consommée par l'IGBT dû au phénomène de décollement du fil de bonding (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF

On a montré dans le chapitre IV que pour les phénomènes décrits par le nombre de cycles avant défaillance, on calculait la moyenne de durée de vie consommée par jour. Ainsi, en moyenne, l'IGBT de l'onduleur consomme 1,47×10^{-2} % de sa durée de vie par jour. Sur un fonctionnement de 289 jours de fonctionnement par an, la durée de vie de l'IGBT de l'onduleur est de 24 ans. Le PMCF quant à lui consomme en moyenne 2,23 ×10^{-2} % de sa vie par jour. En correspondance, l'IGBT du PMCF a une durée de vie de 16 ans.

La courbe du taux de défaillance (figure V.36) a montré que le phénomène de vieillissement dû au phénomène de décollement du fil de bonding apparaissait à 14 ans. Avec une estimation de la durée de vie à 24 ans et à 16 ans respectivement pour l'IGBT de l'onduleur et l'IGBT du PMCF, on reste au-delà de la période de vieillissement qui apparaît à partir de 14 ans à la lecture de la courbe du taux de défaillance dû au phénomène de décollement du fil de bonding.

V.6.5.2. Durée de vie due au phénomène de fatigue de la brasure

Un modèle de durée de vie dû à la fatigue de la soudure est donné par la relation V.25 :

$$N_f = a\ \Delta T_j{}^{-n} \quad \text{(V.25)}$$

Où ΔT_c est la différence de température de la semelle de l'IGBT. *a* et *n* sont des constantes. a=4,64 $\times 10^{11}$ et n = 3,84.

$$Durée\ de\ Vie_{cons} = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_{c_i}}{N_{f_i}} \quad \text{(V.26)}$$

La figure V.39 montre la TP du nombre de cycles avant défaillance pour l'IGBT de l'onduleur et l'IGBT du PMCF. La figure V.39 montre la TP de la durée de vie consommée par jour due au phénomène de fatigue de la soudure pour l'IGBT de l'onduleur et l'IGBT du PMCF.

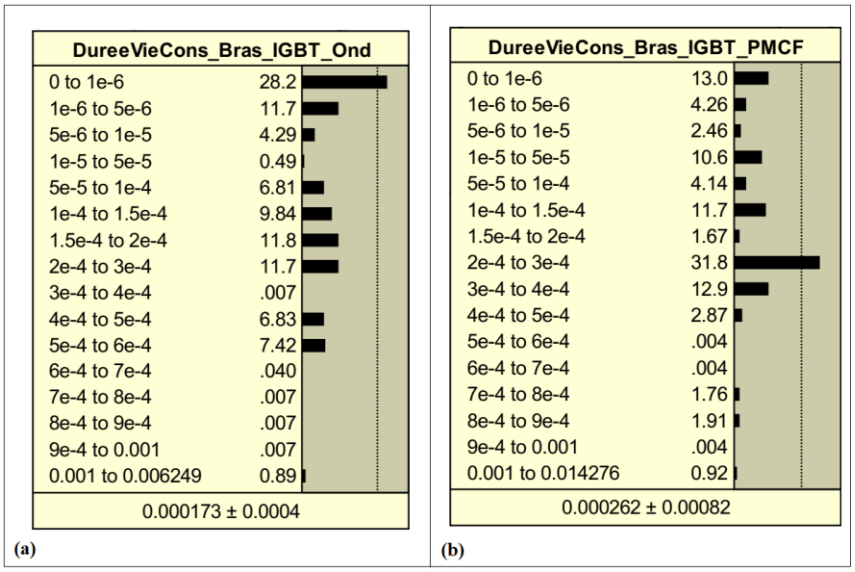


Figure V.39: TP de la durée de vie consommée par l'IGBT dû au phénomène de fatigue de la soudure (a) cas de l'IGBT de l'onduleur (b) cas de l'IGBT du PMCF

Après calcul, la durée de vie de l'IGBT de l'onduleur est de 25 ans et celle de l'IGBT du PMCF est de 18 ans.

V.6.6. Durée de vie globale de l'IGBT

La durée de vie globale de l'IGBT est le minimum des durées de vie de chacun des mécanismes de défaillance. Ainsi, la durée de vie globale de l'IGBT de l'onduleur est de 24 ans et celle de l'IGBT du PMCF est de 16 ans hors considération du phénomène de corrosion de la puce[10]. Les durées de vie sont bien restituées par rapport à ce que l'on s'entend à avoir comme durée de vie du composant de puissance. On trouve les ordres de grandeurs cohérentes avec les valeurs de durée de vie qu'on retrouve dans les calculs de dimensionnement faits sous les mêmes hypothèses.

[10] On ne dispose pas des valeurs des paramètres de la loi de durée de vie due au phénomène de corrosion de la puce. On ne dispose pas aussi d'essais accélérés dans la littérature pour les estimer. Les critères de durée de vie pour ce phénomène ne sont pas encore clairement définis.

Il est intéressant de confronter ces résultats de durée de vie avec les courbes de taux de défaillance global hors considération de la corrosion de la puce. Ces dernières ont montré que la période de fin de vie commençait que ce soit pour l'IGBT de l'onduleur ou l'IGBT du PMCF autour de 13 ans hors considération du phénomène de corrosion. Les résultats de durées de vie de 24 ans et de 16 ans respectivement pour l'IGBT de l'onduleur et l'IGBT du PMCF sont cohérentes avec la courbe de taux de défaillance.

V.7. Pré-validation du modèle

L'objectif de cette partie est de comparer les résultats du modèle bayesien (taux de défaillance et durée de vie) avec les études et les données de retour d'expérience.

En termes de taux de défaillance, on dispose de données de retour d'expérience sur une durée de 4 ans. Le métro de Chennai a été mis en service en Juillet 2015 et on dispose de données de retour d'expérience jusqu'en Juin 2019. Depuis la mise en service du métro de Chennai, 5 casses d'IGBT ont été recensées sur toute la flotte. Le nombre d'heures sous tension depuis le début du projet est de 31 002 528 heures [Estecahandy 2019]. À partir de ces informations, on calcule le taux de défaillance opérationnel cumulé qui est le quotient du nombre de pannes par le nombre d'heures de fonctionnement. La figure V.40 montre l'évolution du taux de défaillance opérationnel cumulé et la figure V.41 le taux de défaillance estimé par le modèle bayesien. Pour des raisons d'échelle, les deux courbes sont représentées sur deux figures différentes

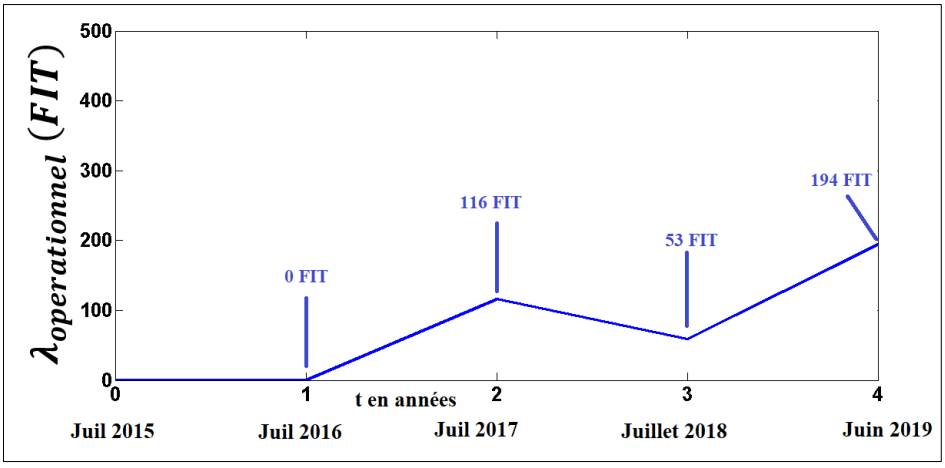


Figure V.40: Taux de défaillance opérationnel depuis la mise en service du train

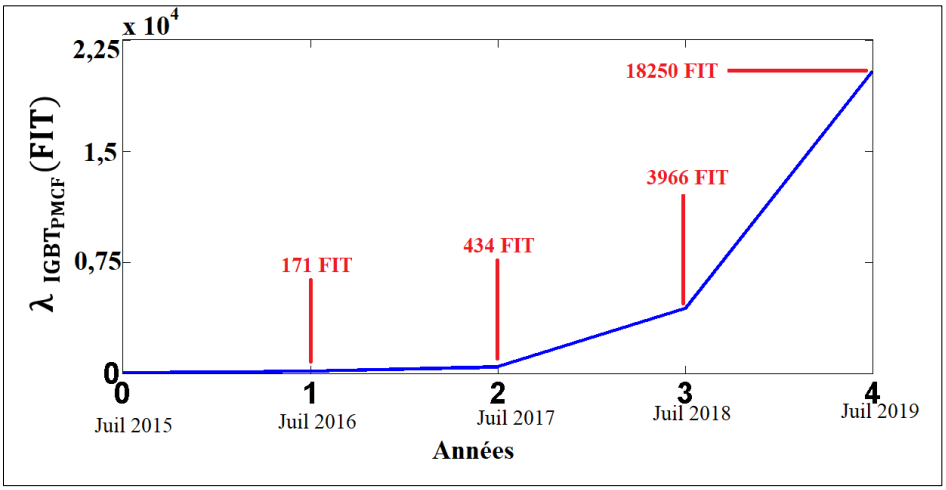


Figure V.41: Taux de défaillance estimé sur 4 ans (IGBT du PMCF)

Le taux de défaillance opérationnel est de 194 FIT en 4 années de fonctionnement. Celui estimé est de 18250 FIT (figure V.41). On remarque que les deux premières années, les valeurs de taux de défaillance sont plutôt cohérentes. Au-delà, les valeurs données par le réseau bayésien sont largement supérieures aux valeurs constatées sur le terrain.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces constats : le premier c'est que les données de fonctionnement en temps réel aurait permis d'affiner mieux les tables de probabilités, le deuxième facteur c'est que les paramètres des équations au niveau des mécanismes de défaillance (les paramètres des facteurs d'accélération notamment pourraient être affinés par la mise en place de bancs d'essais). L'écart constaté pourrait aussi être dû à l'utilisation de la somme pondérée de lois de Weibull pondérées pour passer des résultats probabilistes du réseau bayesien à la courbe de taux de défaillance, méthode qui n'est pas aujourd'hui validée. La comparaison aurait du sens s'il était possible d'avoir accès à l'ensemble des données de fonctionnement réelles sur le terrain afin de correspondre au profil de mission pour la validation du modèle. Une solution serait alors d'instrumenter le train afin d'acquérir ces données réelles de fonctionnement et d'estimer le taux de défaillance avec le modèle bayesien.

Le phénomène de corrosion de la puce reste le plus impactant sur le taux de défaillance estimé. En retraçant la courbe du taux de défaillance (figure V.42) obtenu à l'aide du modèle bayesien à l'exclusion de ce phénomène, on remarque que les valeurs obtenues sont dans un rapport de 10 plus petites. On retombe dans des valeurs qui restent élevées par rapport au taux défaillance opérationnel mais l'écart a beaucoup réduit.

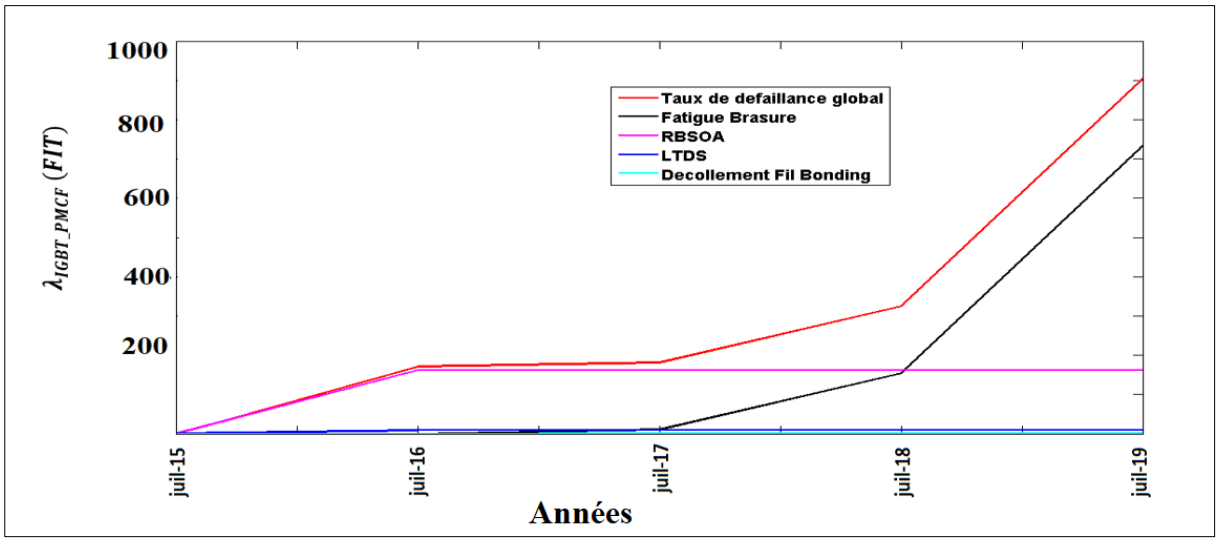


Figure V.42: Taux de défaillance estimé sur 4 ans hors corrosion

En termes de durée de vie, on dispose de calculs estimatifs effectués dès les études de dimensionnement du métro de Chennai qui peuvent être une première base de comparaison avec le modèle bayesien. Ces études ont montré une estimation de la durée de vie de l'IGBT de l'onduleur à 31 ans et celui de l'IGBT du PMCF à 17 ans. Les résultats du modèle bayesien sont de 24 ans pour l'IGBT de l'onduleur et de 16 ans pour l'IGBT du PMCF. Les valeurs de durées de vie calculées en phase de dimensionnement sont au-dessus de celles obtenues à partir du modèle bayesien, mais les résultats restent cohérents étant donné les hypothèses prises et des méthodes mathématiques utilisées pour estimer la durée de vie dans le modèle bayesien.

Cette pré-validation permet pour l'instant d'avoir une vision globale de ce qui existe par rapport aux résultats du modèle bayesien.

V.8. Exploitation du réseau bayesien en diagnostic et pronostic

Le modèle peut être exploité de deux façons : en pronostic et en diagnostic. Alors que le pronostic permet de localiser les défaillances, le diagnostic anticipe d'éventuelles dégradations pouvant affecter un système. Les paragraphes suivants sont consacrés à un court état de l'art des deux termes et à l'utilisation du modèle bayesien de l'IGBT dans ces deux configurations.

V.8.1. Définitions du pronostic et du diagnostic

Etymologiquement, le pronostic signifie « connaître à l'avance ». Le pronostic est la capacité à prédire l'état futur d'un système ou d'un composant à partir de son état actuel, de sa disponibilité opérationnelle et de ces données futures [Goh et al., 2006]. Une démarche de

pronostic s'intègre dans un environnement informationnel pour obtenir des informations passées ou courantes nécessaires à sa mise en œuvre [Cocheteux et al., 2008]. On prend donc en compte non seulement l'état courant du système ou du composant mais aussi les données futures appliquées au système.

Le diagnostic est défini pas la norme AFNOR comme l'identification de la cause probable de la (ou les) défaillance (s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Cette définition met en évidence la détection de la panne et l'identification de la cause de la panne [Zwingelstein, 1995].

Des travaux présents dans la littérature ont utilisé les réseaux bayesiens statiques et dynamiques dans le diagnostic de défaillance et dans le pronostic de dégradations. C'est le cas des travaux de Medjaher et al. [2008] et de Tobon Mejia [2011]. Ces auteurs ont utilisé les réseaux bayesiens statiques dans le sens du diagnostic pour la localisation de pannes, sur un moteur électrique synchrone à aimants permanents en intégrant des observations ou évidences. Après la construction du modèle et l'identification de toutes les TP par expertise, des observations ont été intégrées. Ces observations concernent l'absence de mouvement de l'arbre de rotation et la présence de fortes vibrations. L'actualisation du réseau bayesien a montré que le rotor serait la cause probable du dysfonctionnement du moteur. Les mêmes auteurs ont proposé un modèle bayesien dynamique pour construire un modèle de pronostic. Ils ont utilisé le modèle physique du système et ont estimé la durée de vie et l'état futur du système. D'autres auteurs ont travaillé sur le pronostic et le diagnostic des systèmes. Ce sont par exemple les travaux de Codetta-Raiteri et Portinale [2014] pour la détection et l'identification de pannes dans un vaisseau spatial ; les travaux de Mcnaught et Zagorecki [2009] qui utilisent les réseaux bayesiens dans la modélisation du pronostic afin de faciliter la prise de décision en matière de maintenance, ou encore le diagnostic de défauts des systèmes mécaniques en utilisant les réseaux bayesiens dynamiques dans les travaux de Camci et Chinnam [2005].

V.8.2. Exploitation du modèle bayesien de l'IGBT en pronostic

En pronostic, le modèle bayesien pourrait être exploité lorsqu'on aura de nouvelles observations ou informations sur les variables. En fonction de ces nouvelles observations, les TP et les indicateurs de fiabilité seront mis à jour.

On propose d'exposer dans les lignes suivantes deux scenarii permettant d'illustrer l'utilisation du modèle en pronostic. Ils concernent le phénomène de corrosion de la puce de l'IGBT de l'onduleur représenté dans le modèle bayesien par son facteur d'accélération et les causes directes sont l'humidité ambiante de l'IGBT, la tension du bus continu et la température de jonction de l'IGBT. Dans le premier scénario, on suppose qu'on introduit une observation (évidence) sur la tension du bus continu qui prend la valeur de 1800 V. Cela se traduit dans le modèle bayesien par la probabilité suivante : P (Vdc_Conv [1710 ,1800] = 100 %). On souhaite voir l'impact de cette variation sur le taux de défaillance dû au phénomène de corrosion de la puce de l'IGBT de l'onduleur. La figure V.43 montre l'actualisation de l'ensemble des TP du réseau bayesien. À partir de la nouvelle TP du facteur d'accélération, on utilise la moyenne pondérée de lois de Weibull pour estimer le taux de défaillance.

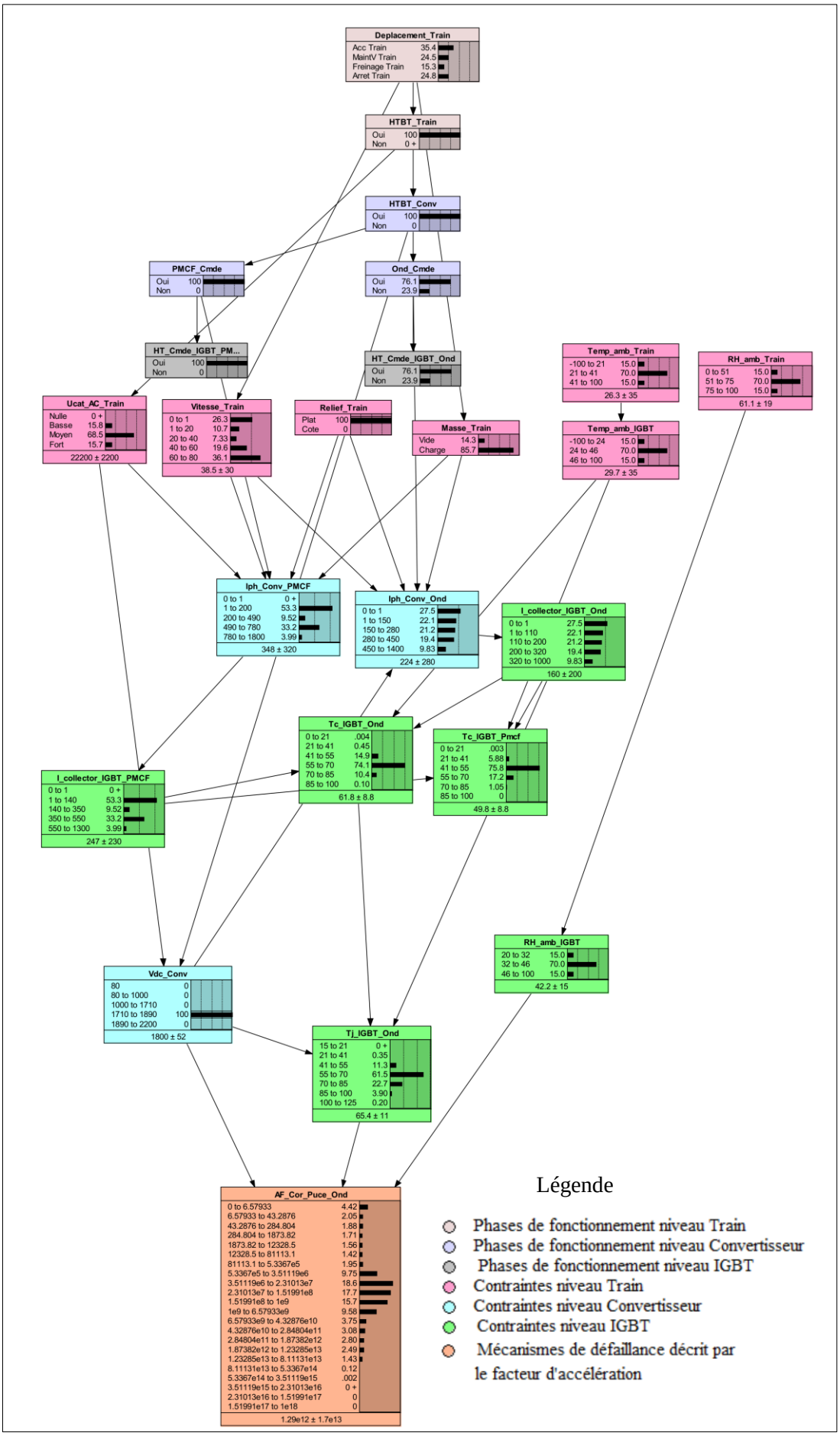


Figure V.43: Introduction d'une évidence Vdc_Conv=1800V et mise à jour des TP

La courbe du taux de défaillance dans cette nouvelle configuration est donnée par la figure V.44. Le phénomène de vieillissement apparait autour de 10 ans et le taux de défaillance atteint $5{,}8 \times 10^{6}$ FIT autour de 40 ans. Lorsqu'on compare ces résultats avec ceux obtenus avec un profil de mission probabiliste journalier, on remarque que la durée de vie a réduit et le taux de défaillance a augmenté. Cela s'explique par le fait que les effets des autres classes de la variable tension du bus continu (Vdc_Conv) ne sont pas considérés dans le modèle, seule une classe est considérée contrairement à l'estimation dans le cas du profil de mission journalier où chaque classe avait une probabilité bien définie.

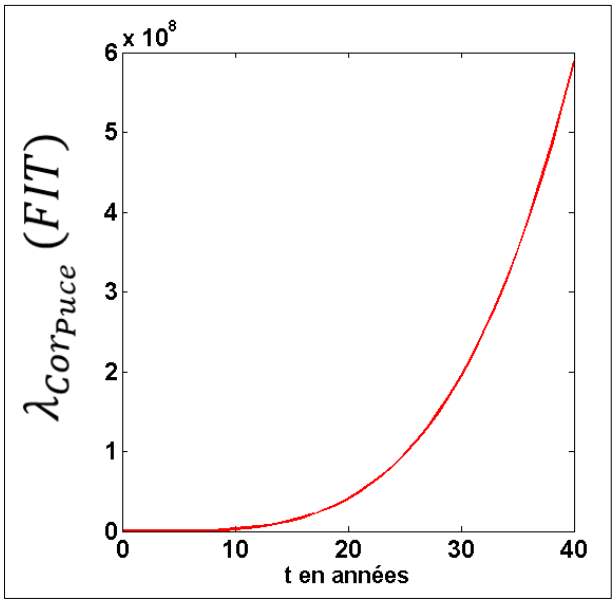


Figure V.44: Taux de défaillance global de l'IGBT de l'onduleur estimé après introduction d'une évidence Vdc=1800 V

Dans le deuxième scénario, on considère qu'on observe les observations suivantes : la tension du bus continu prend la valeur de 1800 V ; la température de jonction de l'IGBT la valeur de 100 °C et l'humidité ambiante la valeur de 46 %. Ces évidences se traduisent respectivement en termes de probabilité par P(Vdc_Conv [1710, 1800] =100 %) ; P(Tj_IGBT_Ond [100 , 125] =100%) et P(RH_amb_IGBT [46, 100] =100 %). La figure V.45 montre l'ensemble des évidences introduites et la mise à jour des TPC. À partir de cette table du facteur d'accélération, on estime le taux de défaillance (figure V.46) à partir de la somme pondérée de Weibull. La courbe montre que le taux de défaillance est plus élevé par rapport au cas d'un profil journalier de base.

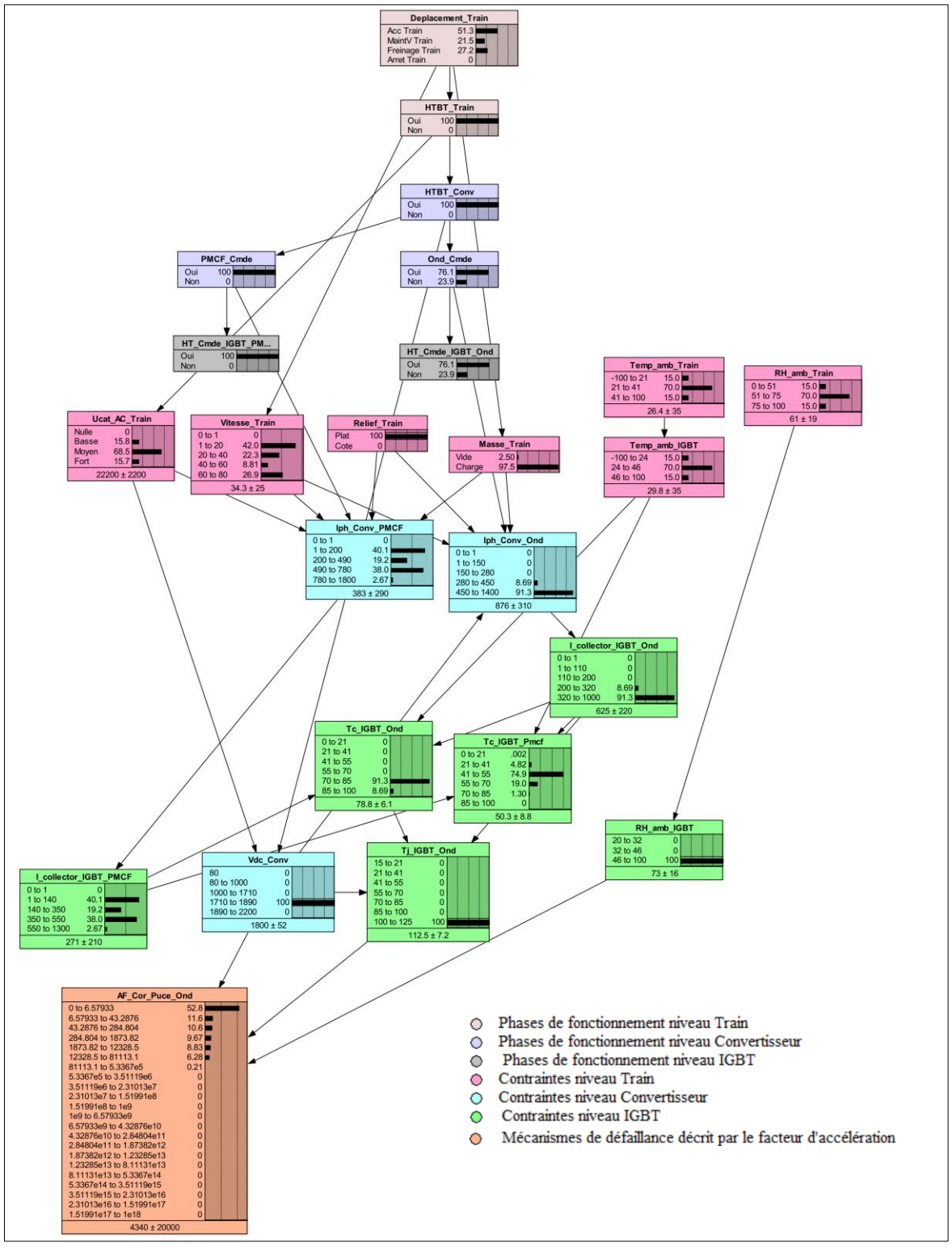


Figure V.45: Introduction des évidences Vdc_Conv=1800 V ; Tj_IGBT_Ond=100 °C ; RH_amb_IGBT= 46% et mise à jour des TP

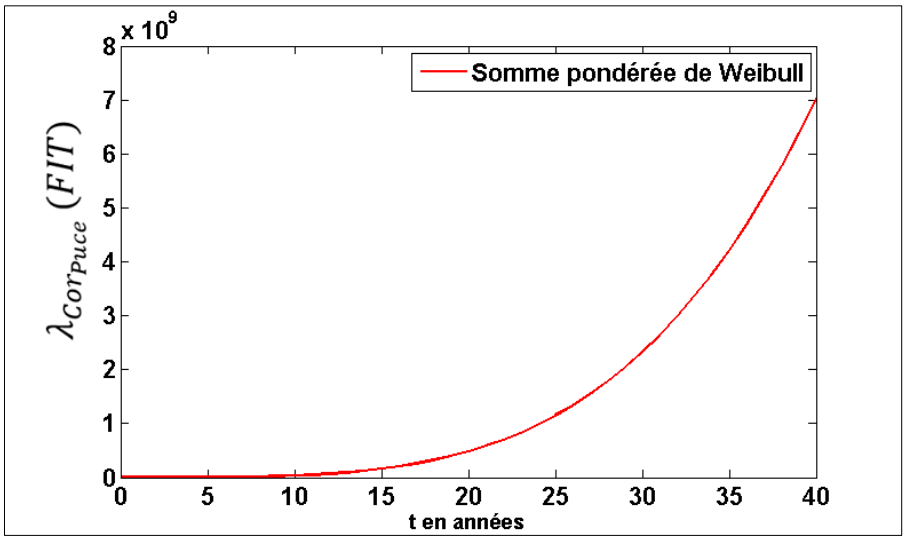


Figure V.46: Courbe du taux de défaillance obtenue après intégration des évidences Vdc_Conv=1800 V ; Tj_IGBT_Ond=100 °C ; RH_amb_IGBT= 46%

En conclusion, le modèle bayesien se prête très bien au pronostic. Par l'introduction d'évidences, on réestime le taux de défaillance, ce qui permettra à l'avenir lorsque de nouvelles informations seront recueillies sur le projet de remettre à jour les indicateurs de fiabilité.

V.8.3. Exploitation du modèle bayesien de l'IGBT en diagnostic

En diagnostic, on a la connaissance de la casse ou de la défaillance et l'idée serait de déterminer les conditions dans lesquelles le composant aurait fonctionné. Le modèle bayesien est entièrement utilisable en diagnostic. On propose deux exemples pour cette exploitation et le mécanisme de défaillance mis en lumière et celui du rayonnement cosmique de l'IGBT de l'onduleur qui est modélisé dans le réseau bayesien son taux de défaillance Lambda_LTDS_IGBT_Ond. Les variables contraintes au niveau IGBT qui sont à l'origine de ce phénomène sont l'altitude, la température de jonction et la tension du bus continu.

Dans le premier exemple, on considère qu'on connaît la valeur du taux de défaillance dû au rayonnement cosmique qui est de 100 FIT. Cette valeur peut être un résultat de calcul de taux de défaillance opérationnel obtenu à partir du retour d'expérience. La probabilité de Lambda_LTDS_IGBT_Ond passe à 100 %. Le réseau remet à jour les variables parents et calcule les distributions des variables parents. La figure V.47 montre les nouvelles distributions de probabilités de l'altitude, de la température de jonction et de la tension du bus continu. On retrouve les conditions de fonctionnement (distribution de la TP) qui auraient amené à avoir un taux de défaillance de 100 FIT.

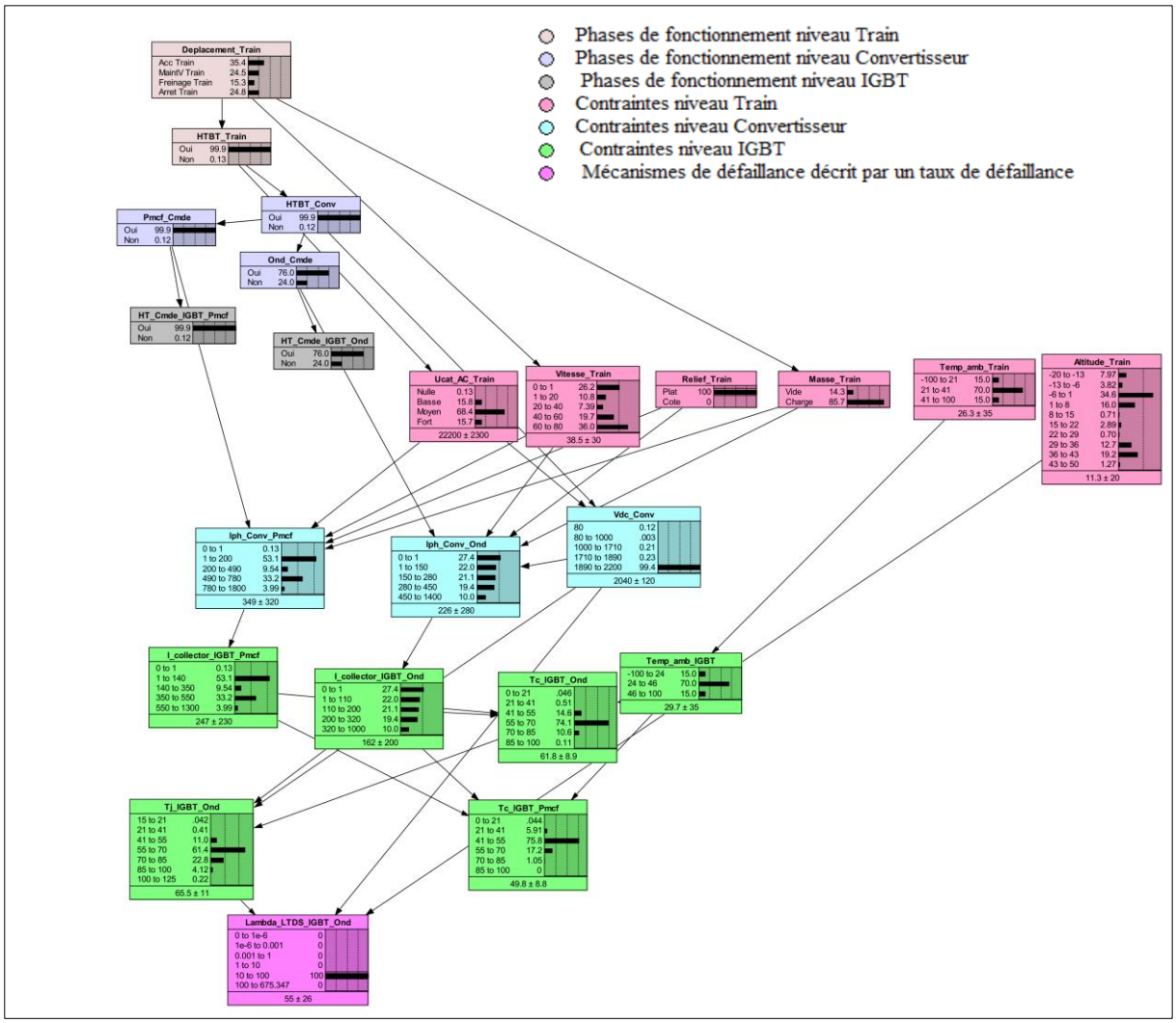


Figure V.47: Introduction d'une évidence sur le taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique à 100 % et mise à jour des probabilités des variables parents

Dans le deuxième exemple, on part d'une déviation de fonctionnement nominal de la température de jonction et on recherche les causes de ce dysfonctionnement. On suppose que la température de jonction est de 125 °C. Les TP du réseau bayesien sont mises à jour et représentées par la figure V.48. Il faut noter que c'est une combinaison de répartition probabiliste de toutes les variables depuis le niveau contraintes IGBT au niveau contraintes Train qui amènent à cette déviation.

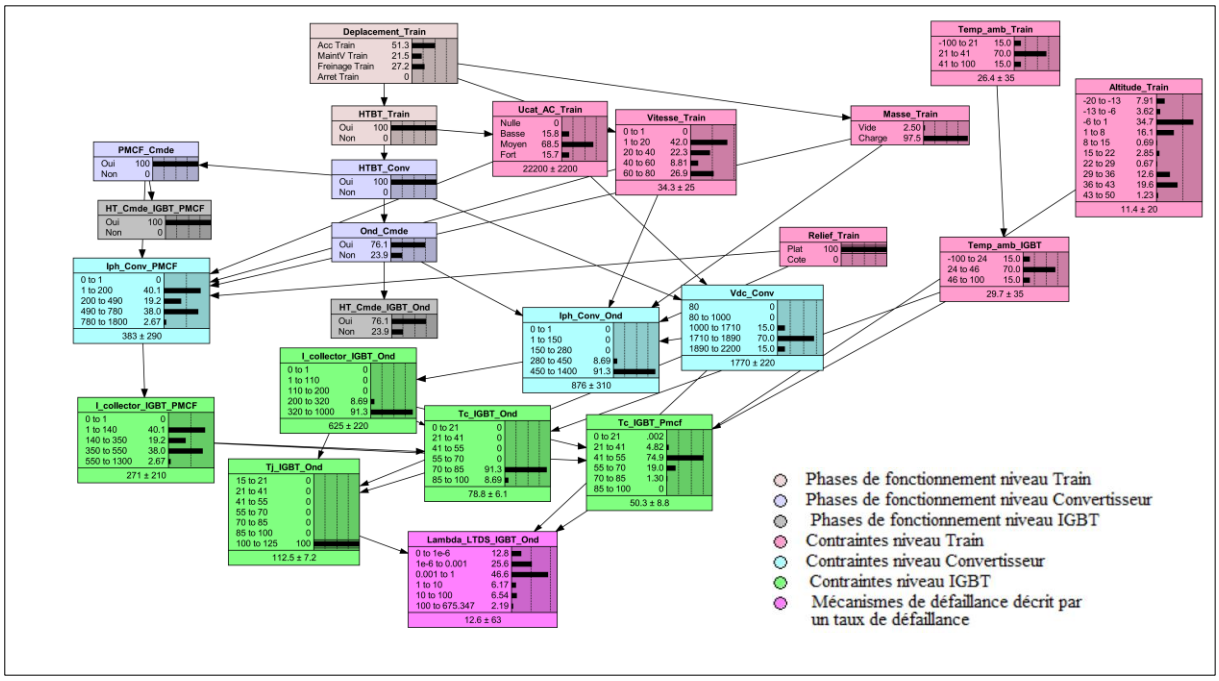


Figure V.48: Intégration d'un fonctionnement à Tj=125 °C et mise à jour des TP du modèle

Le taux de défaillance dans cette configuration est de 12,6 FIT contrairement à la valeur de 8,75 FIT constatée sur le profil journalier modélisé du métro de Chennai. L'exploitation en diagnostic permettra à l'avenir de déterminer les conditions de fonctionnement en fonction de la connaissance des indicateurs de fiabilité des composants ou des conditions de fonctionnement en mode non nominal.

Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer le déploiement de toute la démarche de modélisation proposée dans ce travail de recherche sur l'exemple du métro de Chennai. Après avoir justifié le choix du métro de Chennai et capitalisé l'ensemble des données disponibles sur le projet, la détermination des TP des variables du réseau s'en est suivie. Les mécanismes de défaillance étudiés sont le décollement du fil de bonding, la fatigue de la brasure, la corrosion de la puce, le rayonnement cosmique ou LTDS, et le phénomène de dépassement de l'aire de sécurité (RBSOA). Les indicateurs de défaillance globaux de l'IGBT notamment le taux de défaillance et la durée de vie ont été enfin évalués. En termes de durée de vie, l'IGBT de l'onduleur a une durée de vie de 24 ans et celle du PMCF a une durée de vie de 16 ans. Nos résultats permettent de proposer à ALSTOM un changement de la flotte d'IGBT au minimum à mi-vie du projet. Toutefois, on a été confronté à la difficulté de validation complète du modèle sur le métro de Chennai d'autant plus que l'on ne dispose pas de suffisamment de données pour l'alimenter.

Au-delà de l'application au métro de Chennai, il est important de souligner qu'un des avantages de ce modèle est son extrapolation à d'autres projets. La structure du modèle restera la même

et seules les TP seront déterminées à partir des données sur lesdits projets. Le modèle développé présente aussi l'avantage d'être exploitable en diagnostic et en pronostic. En pronostic, l'intégration de nouvelles observations permettra de mettre à jour les différents indicateurs de défaillance. Ces observations pourront être intégrées aux différents niveaux contraintes et phases de fonctionnement IGBT, convertisseur ou IGBT dépendamment des connaissances qu'on a sur le système. L'exploitation en diagnostic se fait de deux façons : la première lorsqu'on connaît les indicateurs de défaillance et qu'on souhaite remonter à la distribution des variables causes et la deuxième lorsqu'on est en présence d'un dysfonctionnement lié aux dépassements de valeurs nominales des contraintes.

Conclusion générale

ALSTOM au travers du programme de recherche Shift2Rail est largement impliqué dans les problématiques d'amélioration de la fiabilité des composants de la chaîne de traction ferroviaire. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans une démarche de mise en place de modèles visant à améliorer l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des IGBT. Le travail de recherche visait à définir un modèle de fiabilité de l'IGBT en environnement ferroviaire. Le modèle a été basé sur une approche bayesienne capable de prendre en compte, de manière probabiliste, le profil de mission de l'IGBT dans son environnement global de fonctionnement. En partant de l'IGBT et dans une logique remontant l'arborescence du système ferroviaire, cela a impliqué donc de considérer à minima le convertisseur lui-même intégré dans la chaîne de traction appartenant au train. Cette thèse est novatrice dans le domaine de la prédiction de la fiabilité des IGBT par la prise en compte de profils de mission complexes et empreints d'incertitude dans l'estimation de la fiabilité des IGBT. Les principales conclusions de cette thèse sont décrites sous la forme de contributions.

La première contribution de ce travail de recherche a été la mise en place d'une démarche nouvelle et originale nommée « Cycle en U » qui a permis de dissocier, dans le cadre d'une analyse matricielle, une vue systémique correspondant à la décomposition du système en fonction de sa nomenclature et une vue opérationnelle séparant les modes fonctionnels et dysfonctionnels. La démarche retenue a ainsi permis de mettre en évidence :

- pour l'aspect fonctionnel d'une part, les phases de fonctionnement niveau Train, niveau Convertisseur et niveau IGBT ainsi que les contraintes associées ;
- pour l'aspect dysfonctionnel d'autre part, la mise en évidence, via une AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) de tous les mécanismes de défaillance ayant un impact sur la fiabilité de l'IGBT. Cette analyse a été étendue à la mise en évidence des essais de vieillissement accélérés ainsi que des lois mathématiques régissant ces phénomènes.

L'analyse « Cycle en U » a nécessité tout d'abord de mettre en évidence une problématique finalement assez complexe liée à la caractérisation du profil de mission d'un système. La définition des différentes phases constitutives du cycle de vie s'avère un élément clé dans la caractérisation des mesures de fiabilité ou dans l'évaluation de sa durée de vie. Cette problématique se complexifie encore lorsqu'elle est déployée vers les niveaux inférieurs dans la décomposition organique du système. Le profil de mission d'un composant n'est pas celui du système. Il n'est pas sollicité de la même façon donc ne répond pas aux mêmes contraintes. Le passage fonctionnel du profil de mission du système vers le composant est une réelle problématique à part entière qu'on a abordée à travers le cas applicatif traité. L'identification des variables clés susceptibles d'intervenir dans la défaillance du composant étudié a autorisé l'établissement de la structure d'un graphe causal, prémisse à la construction d'un réseau bayesien.

Dans la mesure où les variables pertinentes ayant un impact sur la fiabilité de l'IGBT sont les mêmes d'un train à un autre, la deuxième contribution de ce travail de recherche a donc concerné la mise en place de la structure d'un modèle générique susceptible d'être déployé pour la modélisation de tout type de train (métro, tram, trains à grande vitesse, locomotive, fret…). L'instanciation des modèles en fonction du système étudié devra seulement être adaptée par rapport à sa configuration ou son profil de mission mais les principes de base de la modélisation demeurent identiques.

Le métro de Chennai a été choisi pour appliquer la démarche développée car on dispose sur ce train de données d'humidité et de température en conditions réelles de fonctionnement et de données de dimensionnement en phase de conception. Ces données ont été couplées à des hypothèses et à des avis d'experts afin de déterminer les TP du réseau bayesien. À l'inverse des méthodes existantes basées sur des analyses distinctes des différents mécanismes de défaillance, la troisième contribution de cette thèse est donc associée à la capacité d'intégrer, dans une même approche, plusieurs modes de défaillance susceptibles de coexister et d'affecter simultanément la fiabilité de l'IGBT et donc du système ferroviaire.

La finalisation du modèle bayesien pour l'estimation de la fiabilité de l'IGBT nécessite de définir les paramètres associés à chaque nœud. Dans le cadre du métro de Chennai (mais on pourrait globaliser à pratiquement tous les systèmes ferroviaires), on a été confronté à un manque récurrent de données « terrain » (émanant du système lui-même sous la forme de retour d'expérience et d'historique de fonctionnement) pour la détermination des TP associées aux mécanismes de défaillance. Des méthodes palliatives ont été imaginées à partir de l'utilisation de la connaissance existante principalement exprimée sous la forme de nombre de cycles avant

défaillance, de temps de fonctionnement avant défaillance, de facteurs d'accélération ou encore directement exprimés en taux de défaillance. Pour le calcul des indicateurs de défaillance globaux de défaillance, on a appliqué un ensemble de méthodes mathématiques autorisant le passage des TP des mécanismes de défaillance aux indicateurs de défaillances. L'utilisation de la somme pondérée de lois de Weibull dans le domaine de la prédiction des indicateurs fiabilistes des composants de puissance IGBT constitue la quatrième contribution de ce travail de recherche. Dans l'étude du métro de Chennai, cinq mécanismes de défaillance prépondérants ont été considérés : fatigue de la brasure, corrosion de la puce, rayonnement cosmique, dépassement de l'aire de sécurité et décollement du fil de bonding. La prise en compte de ces mécanismes individuels et l'estimation de leur taux de défaillance respectif a conduit à l'estimation du taux de défaillance global de l'IGBT de l'onduleur et de l'IGBT du PMCF. Pour l'estimation de la durée de vie globale et du fait d'un manque de connaissance associés aux autres phénomènes, seuls la fatigue de la soudure et le décollement du fil de bonding ont été pris en compte. En termes de durée de vie, les résultats sont cohérents par rapport aux estimations habituelles : une durée de vie de 16 ans pour l'IGBT du PMCF et 24 ans pour l'IGBT de l'onduleur hors considération du phénomène de corrosion de la puce.

Perspectives

De l'analyse découlant de ce travail de recherche, deux constats et plusieurs perspectives se dégagent.

Le premier constat est que le modèle qu'on a établi est relativement complet au niveau de sa structure et basé sur un graphe causal cohérent et suffisamment détaillé pour une utilisation industrielle. En l'état actuel des choses, cette structure autorise une représentation qualitative du processus susceptible d'induire la défaillance de l'IGBT. C'est en soi une contribution originale dont les retombées peuvent déjà servir les concepteurs de systèmes électroniques de puissance dans le domaine ferroviaire.

Le deuxième constat concerne l'aspect quantitatif qui repose sur la capacité à déterminer les tables de probabilités associées aux différentes variables du modèle. La difficulté à construire ces tables à partir de bases de données existantes a induit de reconstituer les données à partir de la connaissance des phénomènes, des équations qui les gouvernent et de l'expertise. Les données ainsi constituées ont permis d'inférer le modèle afin d'estimer le taux de défaillance et la durée de vie de l'IGBT (cas d'application du métro de Chennai). Une fois cette méthode adoptée, la question de la validation du modèle de fiabilité reste ouverte. Aujourd'hui, il est extrêmement compliqué de mesurer la justesse ou la précision du réseau bayesien. Les modèles de défaillance, on le sait, sont toujours difficiles à valider par comparaison statistique avec des cas réels dans la mesure où l'on ne dispose que rarement d'un retour d'expérience significatif. Malgré tout, des principes de validation peuvent être envisagés via des tests de cohérence et des analyses de sensibilité de certaines variables dans le comportement du système face à la panne ou la dégradation. La comparaison des résultats inférés par la modélisation avec certaines situations dysfonctionnelles vécues et disposant d'un jeu de données suffisamment fourni peut aussi confirmer ou infirmer le bien fondé du modèle. Ces cas pilotes restent à identifier.

Toutes les équations et les paramètres utilisés relèvent de l'état de l'art et de la bibliographie actuellement disponibles. En l'état, un point de progrès clairement identifié est l'amélioration de la statistique pour affiner ces paramètres. En cela, concevoir, réaliser et exploiter des bancs d'essais permettra de continuer à renseigner les relations entre variables sur les plans fonctionnels et dysfonctionnels. À partir du modèle établi dans ce travail et en fonction des

contraintes liées au positionnement des capteurs, une analyse permettra de définir les besoins en termes de bancs et de spécifier les objectifs visés sur la base des situations à reproduire et des conditions d'essais à mettre en place.

Afin d'améliorer les résultats issus du passage des tables de probabilité aux indicateurs de défaillance, d'autres méthodes pourraient être explorées. C'est notamment le cas des modèles de durée de vie de type phase et des méthodes de calcul d'un facteur d'accélération équivalent (méthode de Sedyakin par exemple).

Le modèle développé pourrait s'inscrire dans un cadre global d'intelligence artificielle basé sur le recueil et la mise à disposition d'un grand nombre d'informations issues d'un retour d'expérience pour une utilisation en phase de conception (pronostic de comportement) ou en temps réel pour une exploitation en phase d'utilisation du système (diagnostic de défaillance et pronostic d'évolution des défauts constatés). Dans ce cadre, il sera nécessaire de remettre à plat et mieux utiliser les informations disponibles et dispersées dans divers outils et matériels collectant les informations (Train Tracer, AGATE, RailSys). Une première étape envisageable serait d'exploiter les données disponibles. Une deuxième serait l'instrumentation des trains pour être en mesure de récupérer l'information à la source. Cela impliquera de tracer à des instants choisis la valeur d'une variable clé en étant capable de quantifier au même instant ses variables parents dans le graphe causal. Cette démarche reposera sur la mise en place d'un système de capteurs intégrés aux systèmes ferroviaires dont la nature, le nombre et le positionnement (sur des composants élémentaires ou des systèmes de niveaux supérieurs) devront être étudiés avec précision. Il faut aussi noter que les variables à récupérer sont multiples, nombreuses par forcément accessibles de manière évidente ou naturelle par les capteurs déjà présents et donc la tache de récupération n'est pas forcément facile à faire. L'instrumentation des trains en service permettra d'enregistrer des données électriques, mécaniques, cinématiques environnementales à des intervalles fixes ou variables sur des périodes à déterminer. Dans une logique naturelle de continuation, les principes de fusion des informations recueillies (informations hétérogènes ou positionnées à différents niveaux dans la nomenclature du système) devront aussi être établis.

Finalement, la dernière piste d'extension des travaux viserait à élargir le spectre des composants utilisés sur d'autres systèmes et composants. Le modèle pourrait aussi ambitionner d'embrasser d'autres problématiques que le ferroviaire. Les secteurs automobiles ou aéronautiques sont susceptibles de pouvoir bénéficier moyennant certaines adaptations des principes de modélisation établis dans le cadre de ce travail de recherche.

Annexes

Annexe A : AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) de l'IGBT

Constituants de l'IGBT	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Mécanisme de défaillance interne	Effet sur l'IGBT	Paramètres physiques intervenant
Fil de bonding	-Assurer la connection entre la puce au travers de sa métallisation et les connectiques de puissance -Assurer la liaison entre la puce et le substrat DBC	Circuit ouvert	Décollement du fil	Dilatation différentielle de CTE entre l'aluminium et le Silicium (dû à une contrainte de cyclage thermique)	-Perte de continuité électrique entre le fil et les puces -Dégradation de la résistance de contact du fil -Augmentation de la densité de courant dans les fils restants -Augmentation de la tension Vce -Dégradation des performances électriques de l'IGBT	ΔT_j,T_j, I
		Circuit ouvert	Fissuration du fil			ε_f
		Circuit ouvert	Corrosion du fil			RH, V, T_j
Gel de silicone	-Protéger les composants et leurs connections contre l'humidité, la pollution, les contaminants -Assurer l'isolation électrique	Claquage diélectrique	Présence de champ électrique élevé	-Décharges partielles dans le gel de silicone suite à l'apparition de cavités dans le gel de silicone		

Constituants de l'IGBT	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Mécanisme de défaillance interne	Effet sur l'IGBT	Paramètres physiques intervenant
Boitier	-Conférer à l'assemblage de puissance une rigidité mécanique nécessaire à son montage -protéger l'assemblage de puissance contre la poussière et des éventuels agents de corrosion extérieur -garantir un transfert de chaleur adéquat entre la puce et le radiateur	Présence de fissures sur le boitier	Fissuration du plastique	Pénétration de l'humidité	Dégradation des performances électriques de l'IGBT	
Connectique de puissance	Assurer la connection électrique entre l'IGBT et son environnement extérieur	Circuit ouvert	Fatigue des connectiques de puissance	Fortes densités de courant	Dégradation des performances électriques de l'IGBT	Vcesat, V_f
Brasure puce substrat et substrat semelle	Assurer le contact thermique	Augmentation de la résistance thermique jonction semelle	Fatigue de la brasure	Cyclage thermique	Dégradation des performances thermiques de l'IGBT	ΔW, ΔT

Constituants de l'IGBT	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Mécanisme de défaillance interne	Effet sur l'IGBT	Paramètres physiques intervenant
Puce IGBT et sa métallisation	Découper le courant	-puce en court-circuit - augmentation de la résistance de contact de la puce Si et sa métallisation	Electromigration	-Fortes densités de courant -Migration de l'aluminium dans les puces Silicium -Température agissant comme facteur accélérant le phénomène	-Dégradation des performances électriques de l'IGBT car dégradation du contact entre métallisation et fil de bonding	T_j, J
		Circuit ouvert	Corrosion de la métallisation en surface	-Dilatation différentielle de CTE entre l'aluminium et le Silicium (dû à une contrainte de cyclage thermique) -Humidité	Dégradation des performances électriques de l'IGBT	RH, V, T_j
		Court-circuit	Time Dependent Dielectric Breakdown dans l'oxyde de grille	-Fortes température -Surtensions -Mauvaise qualité de l'oxyde de grille	- Augmentation du courant de fuite de grille -perte de commande de l'IGBT	T_j
		Diminution de la tension d'avalanche	Contamination de l'ion	-Humidité -Fortes température de fonctionnement	Dégradation des performances électriques de l'IGBT notamment la tenue en avalanche	T_j, J

Constituants de l'IGBT	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Mécanisme de défaillance interne	Effet sur l'IGBT	Paramètres physiques intervenant
Puce IGBT et sa métallisation	Découper le courant	-variation de la tension de seuil Vge -augmentation de la transconductance	Hot carriers or hot electron injection	Surtension et dépassement limite en courant	Dégradation des performances électriques de l'IGBT	T_j, I
		Circuit ouvert	Reconstruction de l'aluminium	-Dilation différentielle de CTE entre l'Al et le Si (dû à une contrainte de cyclage thermique) -Humidité	Dégradation des performances électriques de l'IGBT	
		-augmentation de la résistance électrique -court-circuit	Migration électrochimique	Apparition de dendrites	Dégradation des performances de conduction et de blocage de l'IGBT	T_j, RH, V, J_{tip}
		-court-circuit	Phénomène d'avalanche statique	-Tension en fonctionnement -Dépassement du seuil de température -Dépassement de l'aire de sécurité	Casse de l'IGBT	
		court-circuit	Phénomène d'avalanche dynamique	- Forts courants et tension -Dépassement du seuil de température -Dépassement de l'aire de sécurité	Casse de l'IGBT	

Constituants de l'IGBT	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Mécanisme de défaillance interne	Effet sur l'IGBT	Paramètres physiques intervenant
Puce IGBT et sa métallisation	Découper le courant	Court-circuit	Phénomène de filamentation			
		Court-circuit	Phénomène de rayonnement cosmique ou LTDS	Rayons cosmiques	Casse de l'IGBT	V_{dc}, T_j, h
		-augmentation du courant de fuite émetteur collecteur -diminution de la tension de blocage	Défauts de cristaux	Microfissures dans les puces	-Dégradation des performances électriques de l'IGBT -Casse de l'IGBT	
		Court-circuit	Latch-up statique et dynamique	-Dépassement de l'aire de sécurité simultanément en courant et en tension lors d'une commutation ou d'un court-circuit -Champ électrique élevé	Casse de l'IGBT	
Substrat isolant	Assure l'isolation électrique des puces	Perte d'isolation par rapport à la semelle	Brittle Cracking	-Cyclage thermique -Microfissure initiales dans la céramique qui vont s'accentuer -Décharges partielles	Casse de l'IGBT	
		Dégradation locale du substrat par élargissement des inclusions gazeuses	Présence d'inclusions	Défaut de qualité de la céramique	Casse de l'IGBT	Champ électrique E

Constituants de l'IGBT	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Mécanisme de défaillance interne	Effet sur l'IGBT	Paramètres physiques intervenant
Puce diode et sa métallisation	Découper le courant	-Puce en court-circuit -Augmentation de la résistance de contact puce Si et métallisation -Rupture de la couche de passivation	Electromigration	-Fortes densités de courant -Migration de l'aluminium dans les puces Si -Température comme facteur accélérant le phénomène	-dégradation des performances électriques de l'IGBT car dégradation du contact entre métallisation et fil de bonding	T_j, J
		Circuit ouvert	Corrosion de la métallisation en surface des puces	Dilatation différentielle de CTE entre l'Al et le Si (dû à une contrainte de cyclage thermique -Humidité	-dégradation des performances électriques de l'IGBT	RH, V, T_j
		-Variation de la tension seuil Vge -Augmentation de la transconductance	Hot carriers or hot electron injection	Surtension et dépassement limite en courant	Dégradation des performances électriques de l'IGBT	
		Diminution de la tension d'avalanche	Ion contamination	-Humidité -Fortes températures de fonctionnement	Dégradation des performances électriques de l'IGBT (tenue en avalanche)	T_j, I
		Circuit ouvert	Reconstruction de l'aluminium	-Dilatation différentielle de CTE entre Al et Si (dû à une contrainte de cyclage thermique) -Humidité	Dégradation des performances électriques de l'IGBT	

Constituants de l'IGBT	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Mécanisme de défaillance interne	Effet sur l'IGBT	Paramètres physiques intervenant
Puce diode et sa métallisation	Découper le courant	Court-circuit	Phénomène d'avalanche statique	- Tension en fonctionnement -Dépassement du seuil de température -Dépassement de l'aire de sécurité	Casse de l'IGBT	
		Court-circuit	Phénomène d'avalanche dynamique	-Forts courants en tension en fonctionnement -Dépassement du seuil de température -Dépassement de l'aire de sécurité	Casse de l'IGBT	
		Court-circuit	Phénomène de fi lamentation	Dépassement de l'aire de sécurité	Casse de l'IGBT	
		Court-circuit	Phénomène de rayonnement cosmique	Rayons cosmiques	Casse de l'IGBT	V_{dc}, T_j, h
		-Augmentation du courant de fuite émetteur collecteur -Diminution de la tension de blocage Vces	Défauts de cristaux			

Annexe B : Données disponibles sur chacun des variables du réseau dans le cas d'application de Chennai.

Pour chacune des variables du réseau, on fait un inventaire des données et connaissances dont on dispose. On utilisera le code couleur suivant.

1ère catégorie de variable

2ème catégorie de variable

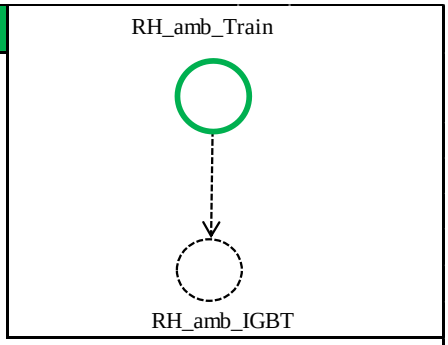
3ème catégorie de variable

4ème catégorie de variable

1ère catégorie de variables

- **La variable « RH_amb_Train »**

RH_amb_Train	
Définition	Humidité Relative ambiante du train
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	RH_amb_IGBT
Table de Probabilité	Marginale



Données existantes

Données enrégistrées en fonctionnement du train à partir de capteurs

Méthode de détermination des TP

Calcul classique de probabilités d'une variable sur chaque modalité de la variable

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Rossini, 2016], [Saiz,2016]

Représentativité des données

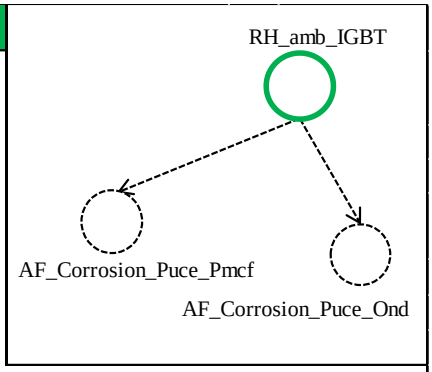
Données représentatives du profil annuel

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **La variable « RH_amb_IGBT »**

RH_amb_IGBT	
Définition	Humidité relative ambiante de l'IGBT
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	AF_Corrosion_puce_Ond; AF_Corrosion_Puce_Pmcf
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données enrégistrées en fonctionnement du train à partir de capteurs

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique avec la méthode du Maximum de Vraisemblance

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Exellent

Bibliographie

[Rossini, 2016], [Saiz,2016]

Représentativité des données

Données représentatives du profil annuel

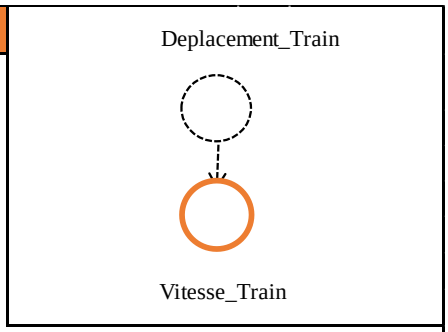
Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

2ème catégorie de variables

- **Variable Vitesse_Train**

Vitesse_Train	
Définition	La vitesse du train
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Deplacement_Train
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] [Chapas et Petit, 2004]

Représentativité des données

Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Altitude_Train**

Altitude_Train	
Définition	L'altitude du train
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	-
Table de Probabilité	Marginale

Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Calcul classique de probabilités d'une variable sur chaque modalité de la variable

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

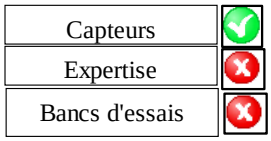
[Chapas et Petit, 2004],[Colombo et al 2012],[Colombo et Godio, 2011]



Représentativité des données

Données représentatives d'un parcours typique

Besoins



- **Iph_Conv_Ond**

Iph_Conv_Ond	
Définition	Courant phase de l'onduleur
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schéma
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL + Avis d'experts

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

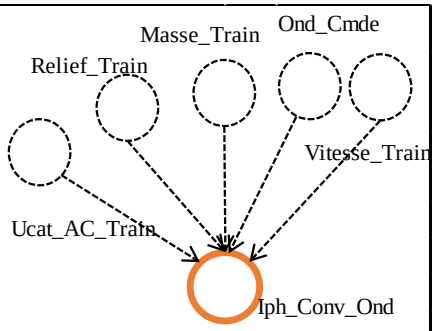
Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

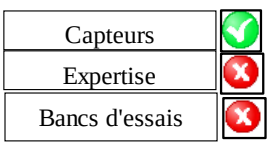
[Colombo et Godio, 2011],[Colombo et al 2012]



Représentativité des données

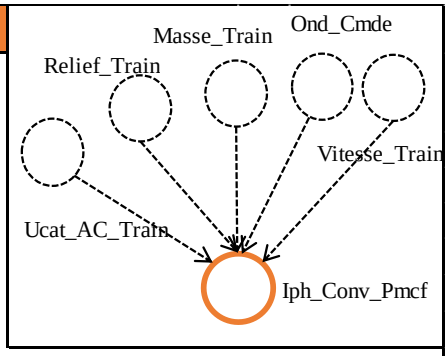
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins



- **Iph_Conv_PMCF**

Iph_Conv_Pmcf	
Définition	Courant phase du Pmcf
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schéma
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL + Avis d'experts

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011],[Colombo et al 2012]

Représentativité des données

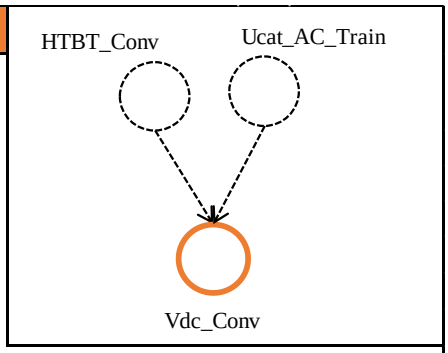
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable Vdc_Conv**

Vdc_Conv	
Définition	Tension du bus continu
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schéma
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL + Norme

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[EN50163,2004], [Sabaté,1998]

Représentativité des données

Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable I_Collecteur_IGBT_Ond**

I_Collecteur_IGBT_Ond	
Définition	Tension collecteur de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Courant de phase de l'onduleur
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL + Avis d'experts

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

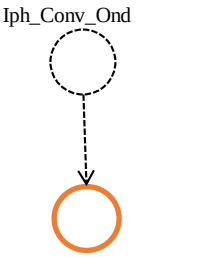
Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011],[Colombo et al 2012]



Représentativité des données

Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable I_Collecteur_IGBT_PMCF**

I_Collecteur_IGBT_Ond	
Définition	Tension collecteur de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Courant de phase de l'onduleur
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL + Avis d'experts

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

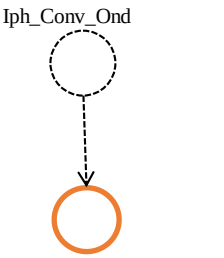
Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011],[Colombo et al 2012]



Représentativité des données

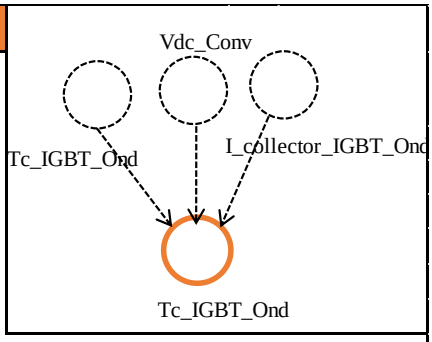
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable Tj_IGBT_Ond**

Tj_IGBT_Ond	
Définition	Température de la jonction de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schéma
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011]

Représentativité des données

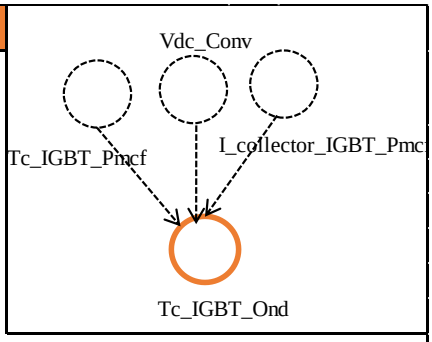
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable Tj_IGBT_PMCF**

Tj_IGBT_Pmcf	
Définition	Température de la jonction de l'IGBT du Pmcf
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schéma
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011]

Représentativité des données

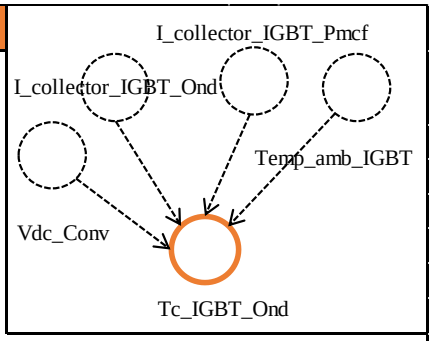
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable Tc_IGBT_Ond**

Tc_IGBT_Ond	
Définition	Température de la semelle de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schéma
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011]

Représentativité des données

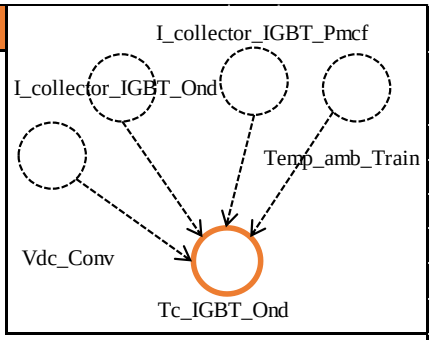
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable Tc_IGBT_PMCF**

Tc_IGBT_Pmcf	
Définition	Température de la semelle de l'IGBT du Pmcf
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schéma
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011]

Représentativité des données

Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable DeltaTj_IGBT_Ond**

DeltaTj_IGBT_Ond	
Définition	Différence de température de jonction de l'IGBT de l'ond
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Tj_IGBT_Ond
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

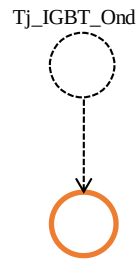
Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

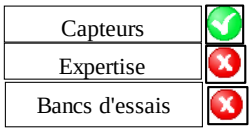
[Colombo et Godio, 2011]



Représentativité des données

Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins



- **Variable DeltaTj_IGBT_PMCF**

DeltaTj_IGBT_Pmcf	
Définition	Différence de température de jonction de l'IGBT du Pmcf
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Tj_IGBT_Pmcf
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

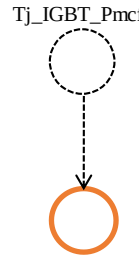
Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

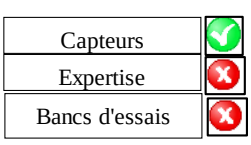
[Colombo et Godio, 2011]



Représentativité des données

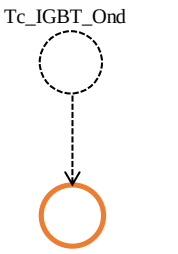
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins



- **Variable DeltaTc_IGBT_Ond**

DeltaTc_IGBT_Ond	
Définition	Différence de température semelle de l'IGBT de l'ond
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Tj_IGBT_Ond
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011]

Représentativité des données

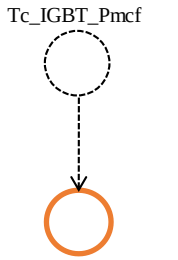
Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

- **Variable DeltaTc_IGBT_PMCF**

DeltaTc_IGBT_Pmcf	
Définition	Différence de température semelle de l'IGBT du Pmcf
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Tconnect_Puis_IGBT_Pmcf
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Données déduites de spécification technique issues du logiciel de dimensionnement CITHEL

Méthode de détermination des TP

Tables de probabilités conditionnelles calculées à partir du théorème de Bayes

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et Godio, 2011]

Représentativité des données

Données typiques de l'application; pas des données réelles de fonctionnement de l'application

Besoins

Capteurs	✓
Expertise	✗
Bancs d'essais	✗

3ème catégorie de varaibles

- **Variable HTBT_Conv**

HTBT_Conv	
Définition	Convertisseurs alimentés
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	HTBT_Train
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Informations évidentes et logiques + connaissances expertes

Méthode de détermination des TP

Estimation sans données à partir de connaissance expertes et d'informations logiques

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] ;[Sabate 1998]

HTBT_Train



HTBT_Conv

Représentativité des données

Données représentatives de la connaissance experte sur la variable

Besoins

- **Variable PMCF_Cmde**

PMCF_Cmde	
Définition	Pmcf alimenté et commandé
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	HTBT_Cmde
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Informations évidentes et logiques + connaissances expertes

Méthode de détermination des TP

Estimation sans données à partir de connaissance expertes et d'informations logiques

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] ;[Sabate 1998]

HTBT_Cmde



Pmcf_Cmde

Représentativité des données

Données représentatives de la connaissance experte sur la variable

Besoins

- **Variable Ond_Cmde**

Ond_Cmde	
Définition	Onduleur alimenté et commandé
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	HTBT_Cmde
Table de Probabilité	Conditionnelle

HTBT_Cmde



Ond_Cmde

Données existantes

Informations évidentes et logiques + connaissances expertes

Méthode de détermination des TP

Estimation sans données à partir de connaissance expertes et d'informations logiques

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] ;[Sabate 1998]

Représentativité des données

Données représentatives de la connaissance experte sur la variable

Besoins

- **Variable HT_Cmde_IGBT_PMCF**

HT_Cmde_IGBT_Pmcf	
Définition	IGBT du Pmcf alimenté et commandé
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	HTBT_Cmde
Table de Probabilité	Conditionnelle

Pmcf_Cmde



HT_Cmde_IGBT_Pmcf

Données existantes

Informations évidentes et logiques + connaissances expertes

Méthode de détermination des TP

Estimation sans données à partir de connaissance expertes et d'informations logiques

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] ;[Sabate 1998]

Représentativité des données

Données représentatives de la connaissance experte sur la variable

Besoins

- **Variable HT_Cmde_IGBT_Ond**

HT_Cmde_IGBT_Ond	
Définition	IGBT de l'onduleur alimenté et commandé
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	Pmcf_Cmde
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Informations évidentes et logiques + connaissances expertes

Méthode de détermination des TP

Estimation sans données à partir de connaissance expertes et d'informations logiques

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012] ;[Sabate 1998]

Ond_Cmde



HT_Cmde_IGBT_Ond

Représentativité des données

Données représentatives de la connaissance experte sur la variable

Besoins

- **Masse_Train**

Masse_Train	
Définition	La masse du train
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Discrèt
Variables Parents	-
Table de Probabilité	Marginale

Données existantes

Valaur constante de la masse donnée dans les documents techniques de dimensionnement

Méthode de détermination des TP

Estimation à partir de connaissances expertes et d'informations logiques

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur les données

Excellent

Bibliographie

[Colombo et al 2012]

Masse_Train

Représentativité des données

Pas de données sur la variation de cette masse selon l'utilisation du train- Dimensionnement de la masse au pire cas

Besoins

Installer des Capteurs pour enrégistrer la masse du train

4ème catégorie de variables

- **Variable DureeVieCons_Dec_IGBT_PMCF**

DureeVieCons_Dec_IGBT_Pmcf	
Définition	Duree de vie consommée par le décollement du fil de bonding de l'IGBT du Pmcf
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	DeltaTj_IGBT_Pmcf
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique + Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

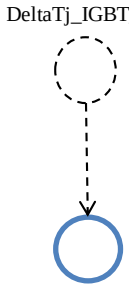
Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Ciappa, 2002], [Chamund, 2013]



Représentativité de l'équation

Equation représentant le phénomène

Besoins

Mécanisme de défaillance très bien exploré dans la littérature- Pas de besoin

- **Variable DureeVieCons_Soud_IGBT_Ond**

DureeVieCons_Soud_IGBT_Ond	
Définition	**Duree de vie consommée par la fatigue de la soudure de l'IGBT de l'onduleur**
Nature du nœud	**Enfant**
Type de variable	**Continu**
Variables Parents	**Voir schema**
Table de Probabilité	**Conditionnelle**

Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

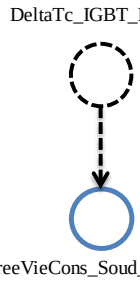
Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Ciappa, 2002]; [Chamund, 2013]



Représentativité de l'équation

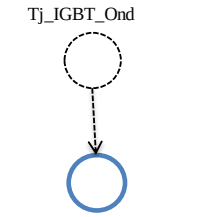
Equation représentant le phénomène

Besoins

Mécanisme de défaillance très bien exploré dans la littérature- Pas de besoin

- **Variable Lamda_RBSOA_IGBT_Ond**

Lambda_RBSOA_IGBT_Ond	
Définition	Taux de défaillance dû au phénomène de dépassement de l'aire de sécurité
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[MITSUBISHI, 2005]

Représentativité de l'équation

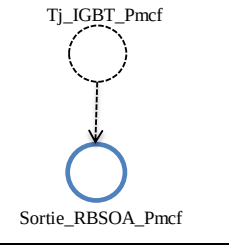
Equation représentant le phénomène.

Besoins

Mécanisme de défaillance très bien exploré dans la littérature- Pas de besoin

- **Variable Lamda_RBSOA_IGBT_PMCF**

Lambda_RBSOA_IGBT_Pmcf	
Définition	Taux de défaillance dû au phénomène de dépassement de l'aire de sécurité de l'IGBT du PMCF
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Bibliographie

[MITSUBISHI, 2005]

Représentativité de l'équation

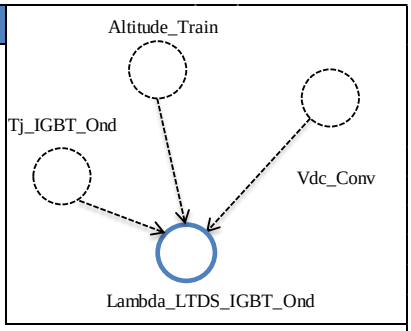
Equation représentant le phénomène.

Besoins

Mécanisme de défaillance très bien exploré dans la littérature- Pas de besoin

- **Variable Lambda_LTDS_IGBT_Ond**

Lambda_LTDS_IGBT_Ond	
Définition	Taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Enfant
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[ABB, 2000] ; [Zeller, 1997]; [Findeisen et Zeller, 1998]

Représentativité de l'équation

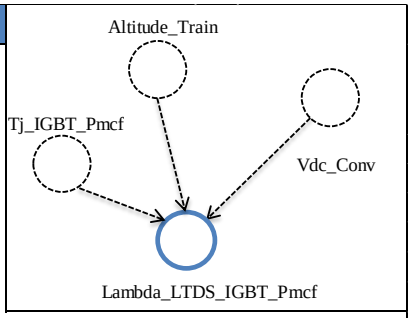
Equation représentant le phénomène

Besoins

Mécanisme de défaillance très bien exploré dans la littérature- Pas de besoin

- **Variable Lambda_LTDS_IGBT_PMCF**

Lambda_LTDS_IGBT_Pmcf	
Définition	Taux de défaillance dû au phénomène de rayonnement cosmique de l'IGBT du PMCF
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[ABB, 2000] ; [Zeller, 1997]; [Findeisen et Zeller, 1998]

Représentativité de l'équation

Equation représentant le phénomène.

Besoins

Mécanisme de défaillance très bien exploré dans la littérature- Pas de besoin

- **Variable AF_Corrosion_Puce_PMCF**

AF_Corrosion_Puce_Ond	
Définition	Facteur d'accélération dû à la corrosion du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

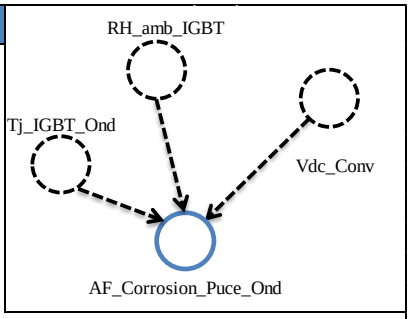
Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Blish et Durrant,2000]; [Kitajima et al, 2017];[Tanaka et al, 2015]; [Honda et al, 2016]; [Zorn et Kaminski, 2015]



Représentativité de l'équation

Equation représentant le phénomène.

Besoins

Affiner les paramètres des modèles en augmentant le nombre d'échantillons d'IGBT testés

- **Variable AF_Decollement_Fil_Ond**

AF_Decollement_Fil_Ond	
Définition	**Facteur d'accélération dû au phénomène de décollement du fil de bonding de l'IGBT de l'onduleur**
Nature du nœud	**Racine**
Type de variable	**Continu**
Variables Parents	**Voir schema**
Table de Probabilité	**Conditionnelle**

Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

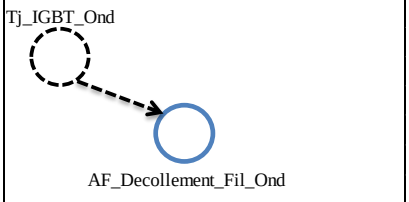
Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Norris et Landzberg, 1969]; [Scheuerman,2012]



Représentativité de l'équation

Equation représentant le phénomène.

Besoins

Affiner les paramètres des modèles en augmentant le nombre d'échantillons d'IGBT testés

- **Variable AF_Decollement_Fil_PMCF**

AF_Decollement_Fil_Pmcf	
Définition	Facteur d'accélération dû au phénomène de décollement du fil de bonding de l'IGBT du PMCF
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

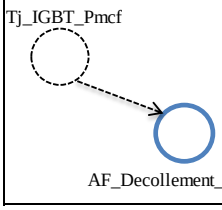
Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Norris et Landzberg, 1969]; [Scheuerman,2012]



Représentativité de l'équation

Equation représentant le phénomène

Besoins

Affiner les paramètres des modèles en augmentant le nombre d'échantillons d'IGBT testés

- **Variable AF_Fatigue_Soudure_Ond**

AF_Fatigue_Soudure_Ond	
Définition	Facteur d'accélération dû au phénomène de fatigue de la soudure de l'IGBT de l'onduleur
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle

Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

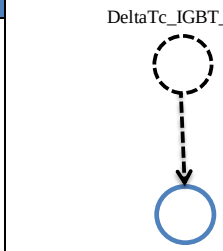
Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Norris et Landzberg, 1969]; [ABB, 2014]



Représentativité de l'équation

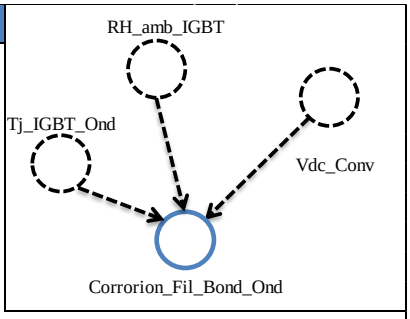
Equation représentant le phénomène

Besoins

Affiner les paramètres des modèles en augmentant le nombre d'échantillons d'IGBT testés

- **Variable AF_Fatigue_Soudure_PMCF**

AF_Fatigue_Soudure_Pmcf	
Définition	Facteur d'accélération dû au phénomène de fatigue de la soudure de l'IGBT du PMCF
Nature du nœud	Racine
Type de variable	Continu
Variables Parents	Voir schema
Table de Probabilité	Conditionnelle



Données existantes

Etat de l'art. Equation régissant ce phénomène

Méthode de détermination des TP

Apprentissage statistique+ Simulation de Monte Carlo

Niveau de confiance sur la méthode

Excellent

Niveau de confiance sur l'équation

Excellent

Bibliographie

[Norris et Landzberg, 1969]; [ABB, 2014]

Représentativité des données

Equation représentant le phénomène

Besoins

Affiner les paramètres des modèles en augmentant le nombre d'échantillons d'IGBT testés

Annexe C : Hypothèses détaillées d'estimation des TP

Cette annexe résume les hypothèses prises sur chacune des variables phases et contraintes aux différents niveaux train, convertisseur et IGBT. Les hypothèses et considérations prises sur certaines variables ont été déjà décrites à titre d'exemples illustratifs dans le chapitre V.

1. Tension caténaire

Dans les données de spécification technique, la tension catenaire est fixée à 22500 V. Or on sait que dans la réalité, la tension caténaire est variable.

On a considéré cette valeur comme la moyenne et avons utilisé les valeurs données par la norme EN 50163 pour définir la plage de variation de la variable. Selon la norme pour un réseau de 25KV, la tension catenaire peut fluctuer entre 15000 V et 26500V.

Lorsque le train est en service, la tension caténaire suit une loi normale de moyenne 22500 V et d'écart type de 5% (soit 1125 V).

Lorsque le train est hors service la tension caténaire est nulle.

L'analyse probabiliste sur le profil journalier a montré que :

- dans 19,9 % des cas la tension caténaire est nulle ;
- dans 12,7 % des cas, elle appartient à l'intervalle]0 V, 21375 V] ;
- dans 54,9 % des cas, elle appartient à l'intervalle]21375 V, 23625 V] ;
- dans 12,6 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 23625 V, 26500 V] ;

2. HTBT_Conv

L'alimentation du convertisseur (ici le convertisseur sous-entend l'onduleur et le PMCF) suit le même principe que la variable HTBT_Train. Le convertisseur est alimenté lorsque le train est alimenté et hors tension quand le train n'est plus alimenté. On retrouve les mêmes probabilités. Dans 80,1 % des cas le convertisseur est alimenté et dans 19,9 % des cas il ne l'est pas.

3. PMCF_Cmde

Lorsque le PMCF est alimenté, il est commandé. On retrouve donc les mêmes probabilités que lorsque le convertisseur est alimenté. Dans 80,1 % des cas le PMCF est alimenté et dans 19,9% des cas il ne l'est pas.

4. Ond_Cmde

Le principe de commande de l'onduleur est un différent. Lorsque l'onduleur est alimenté, il peut ou ne pas être commandé. Les cas où il est alimenté mais pas commandés sont les cas où le train est en arrêt mais sous tension. En clair, dans 23 % des cas l'onduleur peut être alimenté mais non commandé. Finalement, en termes de probabilités dans 61 % des cas l'onduleur est commandé et dans 39 % des cas il ne l'est pas.

5. HT_Cmde_IGBT_PMCF

Lorsque le PMCF est commandé, l'IGBT du PMCF est aussi commandé. La TP de cette variable est donc la même que celle de la variable « PMCF_Cmde ». Dans 80,1 % des cas l'IGBT du PMCF est commandé et dans 19,9 % des cas il ne l'est pas.

6. HT_Cmde_IGBT_Ond

Le raisonnement reste le même que précédemment. Lorsque l'onduleur est commandé, l'IGBT de l'onduleur est aussi commandé. La TP de cette variable est donc la même que celle de la variable « PMCF_Cmde ». Dans 61 % des cas l'IGBT du PMCF est commandé et 39% des cas il ne l'est pas.

7. Masse

La masse est une donnée déduite de la spécification technique. Elle a une valeur constante. La variation de la masse n'a pas été prise en compte. Dans la modélisation bayesienne on fait l'hypothèse de la prendre en compte comme une variable discrète qui a deux modalités : à vide et chargé. On fera l'hypothèse que la probabilité que le train soit chargé est de 78,6 % et la probabilité qu'elle soit vide de 21,4 %. Clairement cela voudra dire que lorsque le train est hors service il est vide.

8. Relief

On ne dispose pas de données sur le relief qu'elles soient opérationnelles ou de spécification technique. La variable relief a deux modalités que sont : « Plat » et « Côte ». Chennai est une ville à très faible altitude donc la considération est que dans 100 % des cas le relief est plat.

9. Le courant phase PMCF (convertisseur d'entrée)

Le courant phase du PMCF (Iph_Conv_PMCF) est donné dans la spécification technique sur un parcours aller-retour. Des considérations ont été faîtes pour reconstruire son profil journalier.

Considérations :

- sur les 17 parcours journaliers, le profil du courant phase PMCF est celui donné dans la spécification technique
- sur les temps de retournement qui sont équivalents à une période de 2202 s par jour, on fait l'hypothèse que Iph_Conv_PMCF est relativement faible et serait compris dans l'intervalle
  ] 0, 200 A].
- sur les 5 h d'arrêt du métro, Iph_Conv_PMCF est nul.

L'analyse probabiliste sur le profil journalier a montré que :

- dans 19,9 % des cas Iph_Conv_PMCF est nulle ;
- dans 42,7 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 0 A, 200 A] ;
- dans 7,62 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 200 A, 490A] ;
- dans 26,6 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 490 A, 780A] ;
- dans 3,2 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 780 A, 1800A] ;

10. Le courant phase Onduleur

De la même façon que le courant phase du PMCF, le courant phase onduleur est donné dans la spécification technique sur un parcours aller-retour. Des considérations ont été faîtes pour reconstruire le profil journalier.

Considérations :

- sur les 17 parcours journaliers, le profil du courant phase Ond est celui donné dans la spécification technique
- sur les temps de retournement qui sont équivalents à une période de 2202 s par jour, on fait l'hypothèse que Iph_Conv_PMCF est relativement faible et serait compris dans l'intervalle
  ] 0,150 A].
- sur les 5 h d'arrêt du métro, Iph_Conv_Ond est nul.

L'analyse probabiliste sur le profil journalier a montré que :

- dans 41,9 % des cas Iph_Conv_Ond est nulle ;
- dans 17,7 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 0 A, 150 A] ;
- dans 17 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 200 A, 490 A] ;
- dans 15,5 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 150 A, 450 A] ;
- dans 7,88 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 450 A, 1000 A] ;

11. Le courant Collecteur de l'IGBT de l'onduleur

Dans les données de spécification technique, on retrouve les données du courant collecteur IGBT (I_Collecteur_IGBT_Ond) sur un parcours aller-retour. On peut retrouver les valeurs de I_Collecteur_IGBT_Ond à partir de celles de Iph_Conv_Ond en divisant ce dernier par $\sqrt{2}$. Les considérations restent les mêmes que celles du courant phase onduleur avec un ratio de $\sqrt{2}$.L'analyse probabiliste sur une journée donne :

- dans 41,9 % des cas I_Collecteur_IGBT_Ond est nulle ;
- dans 17,7 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 0 A, 110 A] ;
- dans 17% des cas, elle appartient à l'intervalle] 110 A, 200 A] ;
- dans 15,5 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 200 A, 320 A] ;
- dans 7,88 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 320 A, 1000 A] ;

Les probabilités restent les mêmes que celles obtenues pour Iph_Conv_Ond, seules les classes de variations ont été divisés par le ratio $\sqrt{2}$.

12. Le courant Collecteur de l'IGBT du PMCF

Dans les données de spécification technique, on retrouve les données du courant Collecteur IGBT (I_Collecteur_IGBT_PMCF) sur un parcours aller-retour. On peut retrouver les valeurs de I_Collecteur_IGBT_PMCF à partir de celles de Iph_Conv_PMCF en divisant ce dernier par $\sqrt{2}$.

Les considérations restent les mêmes que celles du courant phase onduleur avec un ratio de $\sqrt{2}$.

L'analyse probabiliste sur une journée donne :

- dans 19,9 % des cas I_Collecteur_IGBT_PMCF est nulle ;
- dans 42,7 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 0 A, 140 A] ;
- dans 7,62 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 110 A, 350 A] ;
- dans 26,6 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 200 A, 550 A] ;
- dans 3,2 % des cas, elle appartient à l'intervalle] 320 A, 1300 A] ;

Les probabilités restent les mêmes que celles obtenues pour Iph_Conv_PMCF, seules les classes de variations ont été divisés par le ratio $\sqrt{2}$.

13. La température cas de l'IGBT de l'onduleur

Le calcul de la température case de l'IGBT de l'onduleur (Tc_IGBT_Ond) a été fait sur parcours dans CITHEL. La particularité dans CITHEL, c'est que ce calcul a été fait sur la base d'une température ambiante de 45°C. Pour revenir au cas réel de Chennai (température moyenne de 30°C) les considérations suivantes ont été prises pour reconstruire le profil journalier :

- on fait trois calculs de Tc_IGBT_Ond dans trois conditions différentes 21 °C, 30 °C et 45 °C. 21 °C représente la température minimum ambiante réelle sur le métro Chennai. La valeur 30 °C est celle de la température réelle ambiante sur Chennai.
- on applique des coefficients de 0,15 ; 0,7 et 0,15 respectivement données obtenues des trois calculs à 20 °C, 30 °C et 45 °C. Les valeurs 0.15 ;0.7 et 0.15. Cela signifie concrètement que dans la réalité comme la température ambiante n'est jamais à une valeur fixe de 45 °C et qu'elle impacte fortement sur la température case, on pondère donc le profil de Tc_IGBT_Ond par les probabilités de Temp_amb_Train. Les deux premiers points sont valables sur les 17 parcours journaliers.
- sur les temps de retournement, on a récemment fait l'hypothèse que la vitesse appartient à l'intervalle]0, 20], on filtre donc les valeurs de Tc_IGBT_Ond qui correspondent à cette vitesse dans les trois conditions de température ambiante notamment 21 °C, 30 °C

et 45 °C. Ensuite on calcule la moyenne des Tc_IGBT_Ond dans ces trois conditions. Puis, on pondère ces moyennes calculées par les coefficients 0,1 ; 0,8 et 0,1 respectivement car on considère qu'en retournement il passe beaucoup plus de temps autour de la moyenne.

- lorsque le train est à l'arrêt, Tc_IGBT_Ond est égal à la même que la température ambiante. On pondère également avec les coefficients 0,15 ; 0,7 et 0,15 respectivement pour les conditions 21 °C, 31 °C et 45 °C. Les trois probabilités 0,15 ; 0,7 et 0,15 sont celles de la température ambiante du train.

En termes de probabilités sur un profil journalier on a :

- dans 2,99 % des cas Tc_IGBT_Ond appartient à l'intervalle [0,21] °C ;
- dans 14,3 % des cas Tc_IGBT_Ond appartient à l'intervalle]21,41] °C ;
- dans 14,9 % des cas elle appartient à l'intervalle]41,55] °C ;
- dans 59,4 % des cas elle appartient à l'intervalle]55,70] °C ;
- dans 8,36 % des cas elle appartient à l'intervalle]70,85] °C ;
- dans 0,081 % des cas elle appartient à l'intervalle]85,100] °C ;

14. La température case de l'IGBT du PMCF

On distingue les données sur parcours obtenues sur Cithel. La construction du profil journalier de la température Tc_IGBT_PMCF suit le même principe de celui de l'onduleur. Seules les valeurs sur parcours changent, les hypothèses restent les mêmes.

En termes de probabilités sur un profil journalier on a :

- dans 2,99 % des cas Tc_IGBT_PMCF appartient à l'intervalle [0,21] °C ;
- dans 18,6 % des cas Tc_IGBT_PMCF appartient à l'intervalle]21,41] °C ;
- dans 63,7 % des cas elle appartient à l'intervalle] 41,55] °C ;
- dans 13,8 % des cas elle appartient à l'intervalle] 55,70] °C ;
- dans 0,84 % des cas elle appartient à l'intervalle]70,85] °C ;
- dans 0 % des cas elle appartient à l'intervalle]85,100] °C ;

15. La température jonction de l'IGBT de l'onduleur

La température de jonction de l'IGBT de l'onduleur est donnée dans CITHEL avec le parcours aller-retour typique. Les considérations sont ajoutées pour construire un profil journalier. Ce sont les mêmes considérations que pour la température case de l'IGBT de l'onduleur.

16. LA TEMPERATURE DE JONCTION DE L'IGBT du PMCF

La température de jonction de l'IGBT de l'onduleur est donnée dans CITHEL avec le parcours aller-retour typique. Les considérations sont ajoutées pour construire un profil journalier. Ce sont les mêmes considérations que pour la température case de l'IGBT de l'onduleur.

17. Amplitude de cycle de température de jonction de l'IGBT de l'onduleur

Dans le cas de DeltaTj_IGBT_Ond, on a le calcul des différences de température sur parcours.

Considérations

- sur les temps de retournement, on considère que le métro fait un DeltaTj_IGBT_Ond de 35°C
- a l'arrêt du métro, on considère que le train fait un DeltaTj_IGBT_Ond compris entre]0,20] °C.

18. La différence de température de jonction de l'IGBT du PMCF

Les considérations sont les mêmes que pour celles de la température de jonction de l'IGBT de l'onduleur.

19. La différence de température case de l'IGBT de l'onduleur

Dans le cas de DeltaTj_IGBT_Ond, on a le calcul des différences de température sur parcours.

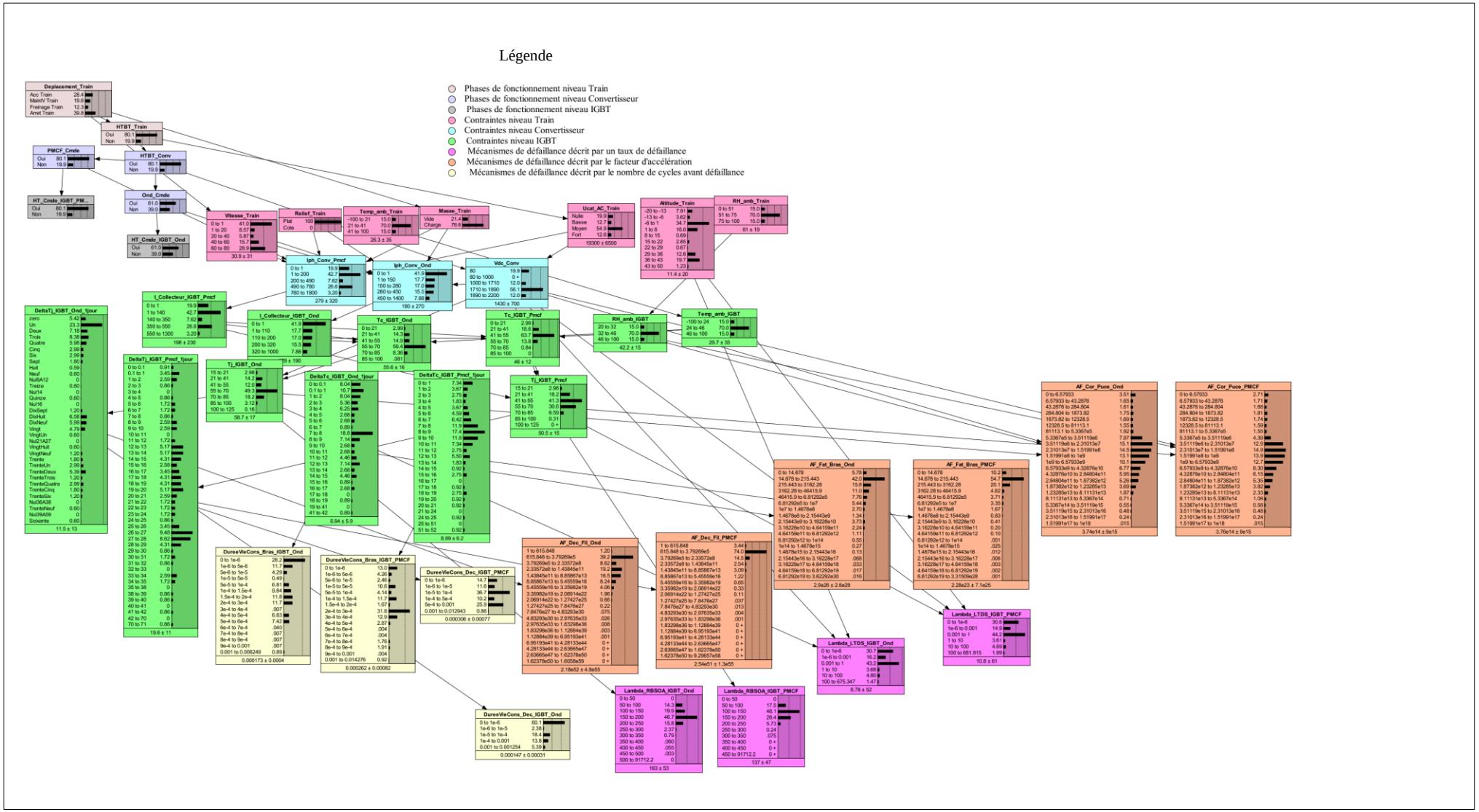
Considérations

- sur les temps de retournement, on considère que le métro fait un DeltaTj_IGBT_Ond de 19°C
- à l'arrêt du métro, on considère que le train fait un DeltaTj_IGBT_Ond compris entre]0,20] °C.

20. La différence de température de l'IGBT du PMCF

Les considérations sont les mêmes que pour celles de la température de jonction de l'IGBT de l'onduleur.

Annexe D : Résultats de modélisation dans Netica



Annexes E : Démonstration de l'obtention de x et y pour le phénomène de corrosion de la puce

Cette annexe est une étude détaillée de l'article de [Kitajima et al., 2017]. L'article présente une approche empirique de détermination des coefficients de la loi de Peck modifiée classiquement utilisée pour les mécanismes de corrosion par des essais accélérés dans des conditions différentes. Les résultats de temps de défaillance obtenus à l'issue des essais accélérés effectués par les auteurs dans cet article (ci-joint) sont cohérents avec les résultats observés lors d'essais accélérés de ce type, d'où notre référence à cet article. Les coefficients du modèle sont déterminés en faisant varier un paramètre (T, RH, V) uniquement de deux niveaux, ce qui est peu. Les ordres de grandeurs des coefficients du modèle sont cohérents avec d'autres estimations du même type sauf pour le coefficient y qui est donné à 20.

Les inconnus dans ces équations sont x et y qu'il faille déterminer à partir des résultats des tests. Pour l'estimation des paramètres x et y les auteurs mettent en oeuvre trois tests de vieillissement accélérés dans trois conditions différentes données par les tableaux suivants. Les temps de défaillance obtenues sont aussi donnés dans le tableau.

Test A : conditions	Temps de défaillance
T=85°C ; RH=85% ; V=2800V	315 h
	2618 h
	3196 h
	3203 h
	3995 h

Test B : conditions	Temps de défaillance
T=85°C ; RH=95% ; V=2800V	224 h
	255 h
	255 h
	382 h
	780 h

Test C : conditions	Temps de défaillance
T=85°C ; RH=95% ; V=2000V	439 h
	451 h
	464 h
	485 h
	588 h

Tableau : description des conditions des trois tests et les temps de défaillance

Les paramètres *x* et *y* par les relations suivantes. Leurs démonstrations sont données par la suite.

$$x = \frac{ln(AF_{_A-B})}{ln\left(\frac{RHacc_{_testB}}{RHacc_{_testA}}\right)}$$

$$y = \frac{\ln(AF_{_C-B})}{\ln\left(\frac{Va_{_testB}}{Va_{_testC}}\right)}$$

Démonstration de l'obtention de x

On utilise les données du test A et B. On note

$$AF_{-A-B} = \left(\frac{RH_{a_testB}}{RH_{u_testA}}\right)^{x} \left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testA}}\right)^{y} exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{a_testA}+273K} - \frac{1}{T_{a_testB}+273K}\right)\right]$$

or T_{a_testA}=85% et T_{a_testB}=85% ; V_{a_testB}=2800 V et V_{a_testA}=2800V

AF_{-A-B} devient :

$$AF_{-A-B} = \left(\frac{RH_{a_testB}}{RH_{u_testA}}\right)^{x} \left(\frac{2800}{2800}\right)^{y} exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{85+273K} - \frac{1}{85+273K}\right)\right]$$

$$AF_{-A-B} = \left(\frac{RH_{a_testB}}{RH_{u_testA}}\right)^{x}$$

Passons en logarithme

$$ln(AF_{-A-B}) = x * ln\left(\frac{RH_{a_testB}}{RH_{u_testA}}\right)$$

D'où

$$x = \frac{ln(AF_{-A-B})}{ln\left(\frac{RHacc_testB}{RHacc_testA}\right)} \text{ avec } AF_{-A-B} = \frac{MTTF_{testA}}{MTTF_{testB}}$$

On passe à la démonstration de *y*

$$AF_{-C-B} = \left(\frac{RH_{a_testB}}{RH_{a_testC}}\right)^{x} \left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testC}}\right)^{y} exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{a_testC}+273K} - \frac{1}{T_{a_testB}+273K}\right)\right]$$

Or RH_{a_testB}=95% et RH_{a_testC}=95% T_{a_testC}=85°C T_{a_testB}= 85 °C

$$AF_{-C-B} = \left(\frac{95}{95}\right)^{x} \left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testC}}\right)^{y} exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{a_testC}+273K} - \frac{1}{T_{a_testC}+273K}\right)\right]$$

AF_{-C-B} devient

$$AF_{-C-B} = \left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testC}}\right)^{y}$$

Passons en logarithme

$$\ln(AF_{-C-B}) = y * ln\left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testC}}\right)$$

D'où

$$y = \frac{ln(AF_{_C-B})}{ln\left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testC}}\right)} \text{ avec } AF_{_C-B} = \frac{MTTF_{testC}}{MTTF_{testB}}$$

Pour l'obtention des temps moyens de défaillance, les auteurs utilisent une analyse de Weibull avec les 5 temps de défaillance pour chaque condition de test.

Ainsi $MTTF_{testA}$=3023 heures, $MTTF_{testB}$= 309 h et $MTTF_{testC}$=490 h comme le montre la figure suivante.

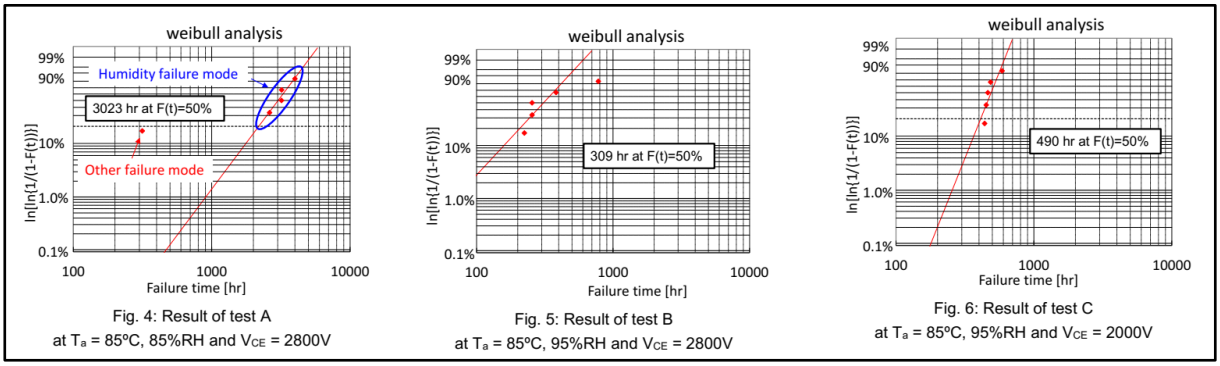


Fig. 4: Result of test A at T_a = 85°C, 85%RH and V_{CE} = 2800V

Fig. 5: Result of test B at T_a = 85°C, 95%RH and V_{CE} = 2800V

Fig. 6: Result of test C at T_a = 85°C, 95%RH and V_{CE} = 2000V

Calculs numériques de *x* et *y*

$$x = \frac{ln(AF_{_A-B})}{ln\left(\frac{RH_{acc_testB}}{RH_{acc_testA}}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{3023}{309}\right)}{ln\left(\frac{95}{85}\right)} = 20{,}5$$

$$y = \frac{ln(AF_{_C-B})}{ln\left(\frac{V_{a_testB}}{V_{a_testC}}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{490}{309}\right)}{ln\left(\frac{2800}{2000}\right)} = 1{,}37$$

En conclusion *x*=20,5 et *y*=1,37.

Calcul de α_{acc} et β_{acc}

Connaissant maintenant les paramètres *x* et *y* on peut calculer le facteur d'accélération et calculer les temps de défaillance en conditions de référence. Pour passer des conditions accélérées aux conditions de référence on utilise la formule suivante :

$$Temps\ de\ défaillance\ en\ conditions\ de\ référence = AF * Temps\ de\ défaillance\ en\ conditions\ accélérées$$

Rappelons que les conditions de référence prises par l'auteur sont de : RH_u=75 %; T_u =25 °C et V_u=1500 V.

Pour le test A

$$AF_{_testA}(RH,T,V) = \left(\frac{85}{75}\right)^{20,5} \left(\frac{2800}{1500}\right)^{1,37} exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{25+273,15} - \frac{1}{85+273,15}\right)\right]$$

$$AF_{_testA}(\mathrm{RH,T,V}) = 5310$$

Pour le test B

$$AF_{_testB}(RH,T,V) = \left(\frac{95}{75}\right)^{20,5} \left(\frac{2800}{1500}\right)^{1,37} exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{25+273,15} - \frac{1}{85+273,15}\right)\right]$$

$$AF_{_testB}((\mathrm{RH,T,V}) = 52000$$

Pour le test C

$$AF_{_testC}(RH,T,V) = \left(\frac{95}{75}\right)^{20,5} \left(\frac{2000}{1500}\right)^{1,37} exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{25+273,15} - \frac{1}{85+273,15}\right)\right]$$

$$AF_{_testC}(RH,T,V) = 32800$$

Après calcul on obtient les temps de fonctionnement en conditions de référence dans le tableau suivant.

Passage des conditions accélérées aux conditions de référence

Test A	Temps de défaillance
En conditions accélérés T= 85°C ; RH= 85% ; V= 2800V	315 heures 2618 heures 3196 heures 3203 heures 3995 heures
En conditions de référence	191 années 1 587 années 1 937 années 1 942 années 2 422 années

Test B	Temps de défaillance
En conditions accélérés T= 85°C ; RH= 95% ; V= 2800V	224 heures 255 heures 255 heures 382 heures 780 heures
En conditions de référence	1 330 années 1 514 années 1 514 années 2 268 années 4 630 années

Test C	Temps de défaillance
En conditions accélérés T= 85°C ; RH= 95% ; V= 2000V	439 heures 451 heures 464 heures 485 heures 588 heures
En conditions de référence	1 644 années 1 689 années 1 737 années 1 816 années 2 202 années

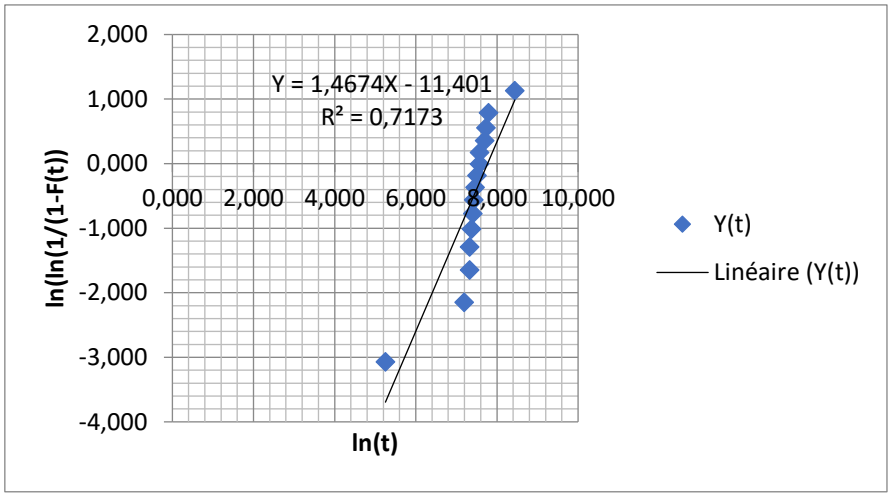
Ajustement de loi de Weibull pour trouver ces paramètres.

$$F(t) = 1 - exp\left(-\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}$$

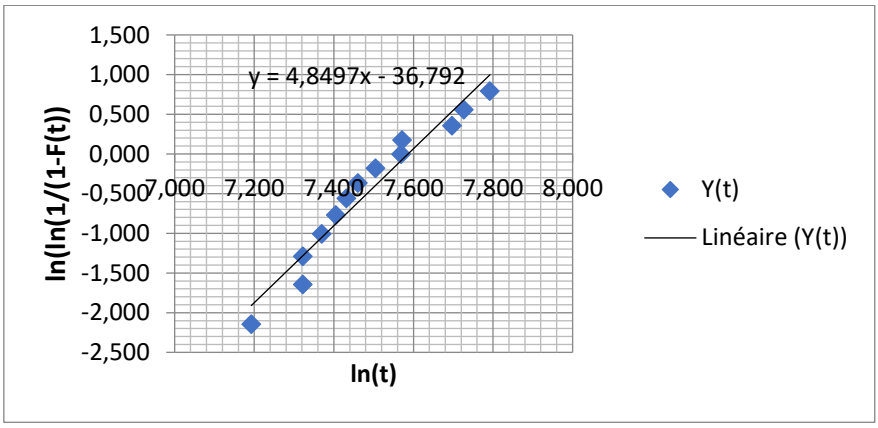
$$ln\big(1 - F(t)\big) = \left(-\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}$$

$$ln\left(ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta\ ln(t) - \beta\ ln(\alpha)$$

$$Y = A\ X + B$$



Pour avoir un meilleur ajustement, on supprime les deux points extrêmes et on refait l'approximation.



$$\beta_{ref} = 4{,}85$$

$$\alpha_{ref} = 1971\ années$$

On revient en conditions accélérés

On calcule AF dans nos nouvelles conditions accélérées.

T=85 °C, RH = 85 %, V=2000 V

$$AF_{cor_{puce}} = \left(\frac{85}{75}\right)^{x} \left(\frac{2000}{1500}\right)^{y} \exp\left[\left(\frac{0{,}79}{8{,}62\ e{-}5}\right)\left(\frac{1}{25{+}273{,}15} - \frac{1}{85{+}273{,}15}\right)\right]$$

$$AF = 3342$$

$$\alpha_{acc} = \frac{\alpha_{ref}}{AF_{cor_{puce}}}$$

$$\alpha_{acc} = 0{,}58\ années = \ 5167\ heures$$

Le paramètre de forme ne change pas donc :

$$\beta_{acc} = 4{,}85$$

Références bibliographiques

[ABB, 2013] *Failure rates of HiPak modules due to cosmic rates*. Application Note 5SYA 2042-04.

[ABB, 2014]. *Load-cycling capability of HiPak IGBT modules*. Application Note 5SYA 2043-04 04-Fev-2014.

[Akaike, 1998] H. Akaike. *Statistical predictor identification*. Reprinted from Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Springer Science+Business Media New York 1998.

[Allenbach, 2013] Jean-Marc Allenbach. *Techniques ferroviaires*, Laboratoire de Machines électriques, 2013.

[Amro et Lutz, 2004]. R. Amro, J. Lutz. *Power cycling with high Temperature Swing of Discrete Components based on Different Technologies*. IEEE, 2004.

[Belmehdi, 2011] Yassine Belmehdi. *Contribution à l'identification de nouveaux indicateurs de défaillance des modules de puissance*. Thèse de doctorat de l'université Sciences et Technologies de Bordeaux. 2011.

[Benaddy, 2012] Mohamed Benaddy. *Modélisation et prédiction de la fiabilité des logiciels et des réseaux*. Thèse de doctorat de l'université IBN ZOHR, 2012.

[Ben Salem, 2008] Abdeljabbar BEN SALEM. *Modèles Probabilistes de Séquences Temporelles et Fusion de Décisions. Application à la Classification de Défauts de Rails et à leur Maintenance*, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy 1 (2008).

[Berg et Wolfgang, 1998] H. Berg, E Wolfgang, 1998. *Advanced IGBT modules for railway traction applications: reliability testing*. Microelectronic Reliability 38 (1998) p1319-1323.

[Birgé et Rozenholc, 2006] L. Birgé et Y. Rozenholc. *How many bins should be put in a regular histogram*., ESAIM: Probability and Statistics, vol. 10, 2006, p. 24-45.

[Birolini, 1997] Alessandro Birolini. *Quality Reliability of technical Systems*. Theory Practise Management 2nd Edition, Springer, 1997.

[Birolini, 2007] A. Birolini. *Reliability Engineering: Theory and practice.* Fifth Edition, Springer, Berlin, 2007.

[Bouarroudj-Berkani, 2008] Bouarroudj-Berkani Mounira. (2008). *Etude de la fatigue thermo-mécaniques de modules électroniques de puissance en ambiance de températures élevées pour des applications de traction de véhicules électriques et hybrides*, Ecole Normale Supérieure de Cachan.

[Bouchiba, 2013] Anass Bouchiba. *Evaluation de dysfonctionnement d'un système par approche bayesienne : Cas du système ferroviaire*. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 2013.

[Bourcerie 2011] Bourcerie Marc. *Réseau de Petri Elaboration pour les systèmes de production Cours et exercices corrigés*. Livre Editions Ellipses Techno Sup les filières technologiques des enseignements supérieurs.

[Brite EuRam, 1995]. Brite EuRam BE 95-2105 RAPSDRA. *Reliability of Advanced Power Semiconductors for Railway Traction Applications*, 1995.

[Boudali et Dugan, 2005] H. Boudali, J.B. Dugan. *A discrete-time Bayesian network Reliability modeling and analysis framework*. Reliability Engineering et System Safety Science direct, Volume 87, Issue 3, March 2005, Pages 337-349, 2005.

[Bumiller et Hillman, 2006] Bumiller E. and Hillman C. *A Review of Models for Time-to-Failure due to Metallic Migration Mechanisms*. White paper DfR solutions, 2006

[Camci et Chinnam, 2005] F. Camci, R. B. Zagorecki. *Dynamic Bayesian networks for machine diagnostics: hierarchical hidden markovs vs competitive learning. IEEE, 2005.*

[Carubelli, 2003] Stephane Carubelli : *Contribution à l'identification et à l'estimation de contraintes de fatigue thermique des convertisseurs intégrés pour la traction électrique.* Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré de Nancy 1. 2003.

[Chamund, 2013] Chamund Dinesh. *Lifetime modelling of IGBT modules*. ECPE, 2013.

[CEI 61373 2011] *Rolling stock equipment. Shock and vibration tests.* Norme CEI, 2011.

[Chapas, 2003] Pierre Chapas. *Composantes et applications électriques du système ferroviaire*. Techniques de l'ingénieur, 2003.

[Chapas, 2006] Pierre Chapas. *Evolution de la chaîne de traction, Première partie*. Cours de l'AFAC (Association des Amis des Chemins de fer), Lyon, Janvier 2011.

[Chapas et Petit, 2004] Chapas Pierre et Petit Jean-Michel. *Dimensionnement du matériel roulant ferroviaire*. Techniques de l'ingénieur, 10 novembre 2004.

[Chapas, 2012] Pierre Chapas. *Alimentation en énergie des trains-Distribution de l'énergie électrique*, Techniques de l'ingénieur, 10 Novembre 2012.

[Cheng et al., 2002] Jie Cheng, Russel Grenier, Jonathan Kelly, David Bell et Weiru Liu. *Learning bayesian networks form data: An information based approach*. Artificial Intelligence, 2002.

[Christophersen et al, 2018]. Annemarie Christophersen, Natalia I. Deligne, Anca M. Hanea, Lauriane Chardot, Nicolas Fournier, Willy P. Aspinall. *Bayesian Network Modeling and Expert Elicitation for Probabilistic Eruption Forecasting: Pilot Study for Whakaari/White Island, New Zealand.* Frontiers in Earth Science, Volume 6, id.211 (2018)

[Ciappa, 1994] Mauro Ciappa. *Package reliability in microelectronics*: a review Proc. International Workshop on Electronics and Detector Cooling WELDEC 1 (1994) 133-149.

[Ciappa, 2000] Mauro Ciappa. *Some reliability aspects of IGBT modules for High-power Modules*. Thèse de doctorat, Swiss federal Institute of Technology Zurich.

[Ciappa, 2002] Mauro Ciappa. *Selected failure mechanisms of modern power modules*. Microelectronics Reliability 42, pages 653–667.

[Ciappa et Fichtner, 2000] M. Ciappa and W. Fichtner, *Lifetime prediction of IGBT modules for traction applications*. IEEE Int. Reliab. Symp. 38 (2000), pp. 210-216.

[Ciappa et Malberti, 1996] Ciappa M, Malberti P. *Plastic-strain of aluminum interconnections during pulsed operation of IGBT multichip modules*. Quality and Reliability Engineering International, 1996.

[Cocozza-Thivent, 1997]. Christine Cocozza-Thivent. *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*, Springer, 1997.

[Codetta-Raiteri et Portinale, 2014] Daniele Codetta-Raiteri, Luigi Portinale. *Dynamic bayesian networks for fault detection, identification and recovery in autonomous spacecraft*, IEEE, 2014.

[Colombo et Godio 2011] *Requirements specification for ONIX 6X2 power module family*. Technical internal document ALSTOM Sesto 2832DT, 04/03/2011.

[Colombo et al. 2012] D. Colombo, C Vacca, B. Pregara. *Chennai metro rail limited Electrical and Brake dimensioning*. CITHEL Simulation report ALSTOM Sesto, 04/10/2012, ALSTOM internal Document.

[Corset, 2003] Franck Corset. *Aide à l'optimisation de maintenance à partir de réseaux bayésiens et fiabilité dans un contexte doublement censuré.* HAL, 2003.

[Constantinou et al 2016] Anthony Costa Constantinou, Norman Fenton, and Martin Neil. *Integrating Expert Knowledge with Data in Bayesian Networks: Preserving Data-Driven Expectations when the Expert Variables Remain Unobserved.* PMC 2016 Sep 1.

[Cooper et Herskovits, 1992] G. Cooper et E. Herskovits. *A bayesian method for the induction of probabilistic networks from data*. Machine Learning, 9:309-347,1992.

[Coquery et al., 2003] G. Coquery, G. Lefranc, T. Litcht, R. Lallemand, N. Seliger, H. Berg. *High temperature reliability on automotive power modules verified by power cycling tests up to 150°C*. Microelectronics reliability, Vol. 43, pp. 1871-1876, 2003.

[Cornuéjols et Miclet, 2002] Antoine Cornuéjols, Laurent Miclet. *Apprentissage artificiel : Concepts et algorithmes*. édition Eyrolles (2002).

[Cova et Ciappa, 1997] P. Cova, M. Ciappa, G. Franceschini, P. Malberti, F. Fantini. *Thermal characterization of IGBT power modules*. Microelectronic Reliability. 37 (1997) p 1731-1734.

[Cocheteux et al., 2008] P. Cocheteux, A. Voisin, E. Levrat et B. Iung. *Formalisation du pronostic à base d'une approche processus.* HAL Archives Ouvertes. Mai, 2008.

[Cowell et al, 1999] Robert Cowell, A. Dawid, Steffen Lauritzen, and David Spiegelhalter. *Probabilistic Networks and Expert Systems.* Statistics for Engineering and Information Science. Springer-Verlag, 1999

[Dabla et al, 2017] Essi Ahoefa Dabla ; Carmen Martin ; François Pérès ; Florent Andrianoelison ; Clair Fournier ; Michel Piton. *Methodological framework for implementation of a prediction reliability model of IGBT power modules used in railway applications*. 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)",0639-0644, IEEE 2017

[Dabla et al 2018] E Dabla ; C Martin ; F Pérès ; F Andrianoelison ; C Fournier ; M Piton. *Contribution of Bayesian Network to the prediction of the Reliability of IGBT Module Used in Railway Applications*. IFAC-PapersOnLine,51,11,223-228, Elsevier 2018.

[Debruyne, 2009] Marc Debruyne. *Formation ALSTOM : "Chaînes de traction. Généralités. Support de formation,* 2009, Document interne ALSTOM.

[Delaplace, 2007] Alain Delaplace. *Approche évolutionnaire de l'apprentissage de structure pour les réseaux bayesiens*. Thèse de Doctorat, Université de TOURS (2007).

[De Maglie, 2007] De Maglie Rodolphe. *Modélisation de différentes technologies de transistors bipolaires à grille isolée pour la simulation d'applications en électronique de puissance*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier III, 2007.

[Dempster et al, 1977] A. Dempster, N. Laird, and D. Rubin. *Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm*. Journal of the Royal Statistical Society, B 39 :1–38, 1977.

[Dorkel, 2003] Jean Marie Dorkel. *Semi-conducteurs de puissance : Problèmes Techniques*. Techniques de l'Ingénieur 2003.

[Durrant, 2000] Blish R. Durrant N. (2000) : *Semi-conductors devices Reliability Failure Models*. International SEMATECH Reliability Technology Advisory Board Technology transfer.

[EN50163, 2004] *Railway Applications -Supply voltages of traction systems*. Norme européenne, Novembre 2004.

[Estecahandy, 2019] Maïder Estecahandy. *Suivi de fiabilité IGBT à décembre 2018. Document interne ALSTOM, 2019.*

[FIDES, 2009] : Guide FIDES 2009, Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques, Edition A, Septembre 2010

[Giraud, 2006] M. Giraud. *Sûreté de fonctionnement des systèmes. Analyse des systèmes réparables*. Techniques de l'Ingénieur, E 3 852 (2006).

[Godichaud, 2009] Mathieu Godichaud. *Outils d'aide à la décision pour la sélection de filières de valorisation des produits de la déconstruction des systèmes en fin de vie : application au domaine aéronautique*. Thèse de doctorat de Université de Toulouse, 2009.

[Goh et al., 2006] K. Goh, B. Tjahjono, T. Baines and S. Subramaniam. A Review of Research in Manufacturing Prognostics", proceedings of *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics*, New York, 2006, pages 417-422.

[Gonzalès et Wuillemin, 1998]. Christophe Gonzales 1 Pierre-Henri Wuillemin. *Réseaux Bayésiens en Modélisation Utilisateur. HAL Archives Ouvertes. 1998.*

[Hassen et al., 2012] W. Ben Hassen, F. Auzanneau, F. Peres, A. Tchangani. *A distributed diagnosis strategy using bayesian network for complex wiring networks.* IFAC Proceedings Volumes, 45, 31, 42-47, 2012, Elsevier.

[Held et al, 1997] M. Held, P. Jacob, G. Nicoletti, P. Scacco, M.-H. Poech. *Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application.* IEEE, 1997.

[Houasnia, 1999] Tayeb Houasnia. *Pondération de taux de défaillance des équipements qui opèrent dans des environnements hostiles*. Thèse de doctorat de l'université du Québec à Trois-Rivières, Décembre 1999.

[Hong et al., 1998] N.-P. Hong, B.-K. Song, S.-W. Lee, W.-C. Kim, P.-G. Im, J.-W. Hong. *The electrical properties of silicone gel due to curing condition*. Proceedings of the IEEE 6thInternational Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, ICSD apos, pp. 218 –220, 22-25 Jun 1998

[Huang et Darwiche, 1994] C. Huang, A. Darwiche. *Inference in belief networks : A procedural guide.* International Journal of approximative Reasoning, 1994.

[Iura et Umezaki, 2005] S. Iura et I. Umezaki .*FIT rate for RBSOA (CM900HG-90H / CM600HG-130H)* », Application note, Mitsubishi Electric Corporation.

[Jacobs et al, 1991]. R. Jacobs, M. Jordan, S. Nowlan, and G. Hinton. *Adaptive mixtures of local experts*. Neural Computation, 3 :79–87, 1991.

[Jensen et Nielsen, 2007] K. Jensen et T. D. Nielsen. *Bayesien networks and Decision graphs*. Springer, Berlin, 2007.

[Jordan 1998] M. I Jordan. *Learning in Graphical Models*. Kluwer Academic Publishers, Dordecht, The Netherlands (1998).

[Kalakh, 2013] Mina Kalakh. *Modélisation avec les réseaux de neurones d'un canal UWB dans une environnement minier souterrain*. Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université de Québec Abitibi-Témiscamingue.

[Kaminski et Zorn, 2013] Nando Kaminski, Christian Zorn. *Temperature Humidity Bias (THB) Testing on IGBT Modules at High Bias Levels*. ECPE Workshop Lifetime Modelling and Simulation, Düsseldorf, 2013.

[Kaminski et Zorn, 2014] Nando Kaminski, Christian Zorn. *Temperature Humidity Bias (THB) Testing on IGBT Modules at High Bias Levels.* CIPS 2014.

[Kaminski et Zorn, 2015b] Nando Kaminski et Christian Zorn. *Acceleration of Temperature Humidity Bias (THB) Testing on IGBT Modules by High Bias Levels*. IEEE, 2015.

[Kaminski et Zorn 2015a] Nando Kaminski et Christian Zorn. *Temperature-humidity-bias testing on insulated-gate bipolar transistor modules -failure modes and acceleration due to high voltage*. IET Power Electronics. 2015, vol 8, Iss.12, pp. 2339-2335.

[Karunanithi et al., 1992] Nachimuta Karunanithi, Darrell Whitley et Yashwant K. Malaiya. *Using neural networks in reliability prediction. Colorado State University, IEEE, 1992.*

[Kebaili et Aussem, 2007] Zahra Kebaili, Alexandre Aussem. *A novel Bayesian Network structure learning algorithm based on minimal correlated itemset mining techniques*. IEEE International Conference on Digital Information Management (ICDIM 07), 2007, Lyon, France. pp.121-126. hal-archives ouvertes 00264026.

[Kitajima et al., 2017] Yumie Kitajima, Henji Hatori, Schinichi Iura, Yasukata Kusakabe, Kazuhiro Kurachi, Wiesner Eugen, Eckhard Thal. *Lifetime estimation model of HVIGBT considering humidity*. Mitsubishi Electric Corporation, Japan and Mitsubishi Electric Europe B, V, Germany PCIM Europe 2017, 16-18 May 2017, Nuremberg, Germany

[Koller et Friedman, 2009] D. Koller, N. Friedman. *Probabilistic graphical models-Principles and Techniques*, MIT Press, Cambridge, MA, 2009.

[Lamine et al., 2013] Fradj Ben Mamine, Karim Kalti, Mohamed Ali Mahjou. *Etudes de modèles à base de réseaux bayesiens pour l'aide au diagnostic de tumeurs cérébrales*. HAL Archives ouvertes, 2013

[Langseth et Portinale, 2007] H. Langseth, L. Portinale: *Bayesian networks in Reliability*, Reliability Engineering & System Safety, 2007.

[Lawless, 2003] Jerarld F. Lawless. *Statistical models and methods for lifetime data*. Second Edition, University of Waterloo, Wiley series in probability and statistics.

[Lefranc et al., 2000] G. Lefranc, T. Licht, H.J. Schults, R. Beinert, G. Mitic. *Reliability testing of high-power multi-chip IGBT modules*. Microelectronics reliability, Vol. 40, pp. 1659-1663, 2000.

[Leray, 2006] Leray Philippe. *Réseaux bayesiens : apprentissage et modélisation de systèmes complexes*. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 2006.

[Leturc, 2000] Leturc, P. *Tenue en tension des semi-conducteurs de puissance. Rapport technique*. Technique de l'ingénieur D (3), pp 104.2-104.17, 2000.

[Liu et al., 2015] Q. Liu, A. Tchangani, B. Kamsu-Foguem and F. Pérès. *Modelling a large scale system for risk assessment*. Industrial Engineering and Systems Management (IESM), IIEE, 2015.

[Lhommeau, 2007] Tony Lhommeau : *Modes de défaillances et fiabilité des modules IGBT en contraintes aéronautiques*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

[Lyonnet, 2006] Lyonnet Patrick : *Ingénierie de la fiabilité.* Livre Editions Lavoisier, 2006

[Lyonnet et al, 2014]: *Modélisation de la fiabilité des macro-composants mécanique à partir de modèles mathématiques et de réseaux de neurones, comparaisons des méthodes*. HAL Archives ouvertes, Avril 2014.

[Lutz et al., 2008] J. Lutz, T. Herrmann, M. Feller, R. Bayerer, T. Licht, Raed Amro. *Power cycling induced failure mechanisms in the viewpoint of rough temperature environment*. CIPS, 2008.

[Manca et Wondrak, 2000] J.V. Manca, W. Wondrak & al. *Reliability aspects of high temperature power MOSFETs*. Microelectronics reliability 40, pp 1679-1682, 2000.

[Mahboob et Zio, 2018] Quamar Mahboob et Enrico Zio « *Handbook of RAMS in Railway Systems Theory and Practise*", CRS Press, 2018.

[McNaught et Zagorecki, 2009] K.R. McNaught, A. Zagorecki. *Using dynamic networks for prognostic modelling to inform maintenance decision making.* IEEE, 2009.

[Medjahed, 2012] Medjahed, Hassen. *Contribution à la simulation électro-thermomécanique numérique 3d appliquée à l'étude de la fiabilité des interrupteurs à semi-conducteurs packages, utilisés en traction ferroviaire*. Thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse, 2012.

[Medjaher, 2008] Kamal Medjaher, Amine Mechraoui, Noureddine Zerhouni. *Diagnostic et pronostic de défaillances par réseaux bayesiens*. Journées Francophone sur les Réseaux Bayesien, May 2008, Lyon, France. HAL Archives ouvertes, Mai 2008.

[Meek, 1997] C. Meek. *Graphical models: selecting causal and statistical models*. PHD thesis, Carnegie Mellon University,1997

[Mermet et Piton, 2010] M. Mermet-Guyennet, M. Piton. *Railway Traction Reliability*. CIPS. Nuremberg Germany, 2010.

[Micol, 2007] Micol A. (2007). *Approche probabiliste dans la conception des modules de puissance*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III.

[Mihalache,2007] Alin Gabriel Mihalache. *Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué.* Thèse de doctorat de l'université d'Angers, Mars 2010.

[MIL-HDBK6217F, 1991] *Reliability Prediction of electronic equipment*, military handbook, 1991.

[Mitic et Lefranc, 2002] G. Mitic, G. Lefranc. *Localization of electrical-insulation and partial discharge failures of IGBT modules*. IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 38, Issue 1, pp. 175 – 180, Jan/Feb 2002.

[Mitsubishi CM450DA-66X, 2016] H. Uemera, K. Kurachi. *DataSheet CM450DA-66X*, MITXUBISHI Electric Corporation, 2016.

[Moussodji, 2014] Jeff Moussodji Moussodji. *Caractérisation et modélisation électrothermique distribuée d'une puce IGBT : Application aux effets du vieillissement de la métallisation d'émetteur*. Thèse de doctorat de l'université normale supérieure de Cachan. 2014.

[Murphy, 2002] Murphy Patrick Kevin. *Dynamic Bayesian Networks : Representation, Inference and learning*. thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley, 2002.

[Marquez et al., 2010] David Marquez, Martin Neil and Norman Fenton. *Improved Reliability modelling using Bayesian Networks and dynamic discretisation.* Department of Computer Science, Queen Mary, University of London, 2010.

[Martin et al, 2008] Carmen Martin, Alexandre Micol, François Pérès. *Adaptive response surface method supporting finite element calculations: an application to power electronic module reliability assessment. HAL Archives Ouvertes. Mai 2017.*

[McPherson et Magul, 1998] : J. W. McPherson ; H.C. Mogul. *Disturbed bonding states in SiO/sub2/thin films and their impact on time-dependent dielectric breakdown*. 1998 IEEE international Reliability Physics Symposium Proceedings. 36th Annual, Pages 47-56.

[Naïm et al, 2004] Patrick Naïm, Pierre-Henri Wuillemin, Philippe Leray, Olivier Pourret. *Réseaux bayesiens*. Eyrolles 2004.

[Neale et Hinton, 1998] Nadford Neal, Geoffrey Hinton. *A view of the EM algorithm that justifies incremental, sparse and other variants*. In Michael Jordan, editor, Learning in graphical Models. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.

[Neil et al., 2007] Neil Martin, Manesh Tailor, David Marquez. *Inference in hybrid Bayesian networks using dynamic discretization*. Statistics and Computing, 17(3), 219-233, 2007.

[NF EN 50125-1] *Applications ferroviaires - Conditions d'environnement pour le matériel - Partie 1 : équipement embarqué du matériel roulant*. Juillet 2014.

[NF, EN 13306, 2010] Norme. *Maintenance - Terminologie de la maintenance*, 2010

[Norris et Landzberg, 1969] K.C. Norris et A. H. Landsberg. *Reliability of controlled collapsed interconnections*. IBM Journal of research and development, vol 13, no3, pp 226-271, mai 1969.

[Nieslony et al, 2016] Adam Niesłony, Michał Böhm, Tadeusz Łagoda*, Filippo Cianetti. *The use of spectral method for fatigue life assessment* for non-gaussian random loads. DOI 10.1515/ama-2016-0016.

[Pagès et Gondran, 1980] Alain Pagès, Michel Gondran. *Fiabilité des systèmes. Livre Edition Eyrolles.*

[Pagetti, 2012] Claire Pagetti. *Module de sûreté de fonctionnement*. Cours ENSEEIHT, Décembre 2012

[Pearl, 1985] Judea Pearl. *Bayesian networks: a model of self-activated memory for evidential reasoning.* Cognitive Systems Laboratory, Computer Science, Departement, UCLA, 1985.

[Pearl, 1995] Pearl Judea. *Bayesian networks: a model of self-activated memory for evidential reasoning*. Cognitive Systems Laboratory, Computer Science Departement, UCLA, 1995

[Pearl, 2000] Judea Pearl. *Causality: Models, Reasoning, and Inference*. Cambridge University Press (2000).

[Pearl et Verma, 1991] Judea Pearl and Tom Verma. *A theory of inferred causation*. In James Allen, Richard Fikes, and Erik Sandewall, editors, KR'91. Principles of Knowledge Representation and Reasoning. pages 441- 452, San Mateo, California, Morgan Kaufmann (1991)

[Pérès, 2005] F. Pérès. *Apport du soutien logistique et de la maintenance à l'optimisation du couple Disponibilité Opérationnelle / Coût Global de Possession.* Habilitation à Diriger des Recherches, INPT – ENIT, 2005.

[Perpiñà et al., 2012] X. Perpiñà, L. Navarro, X. Jordà, M. Vellvehi, Jean-François Serviere and M. Mermet-Guyennet (2012). *Reliability and Lifetime Prediction for IGBT Modules in Railway Traction Chains*. Reliability and Safety in Railway, 2012.

[PNT-WP04-D-SIE-083-01, 2018] Bernd Laska et al. Rapport PNT-WP04-D-SIE-083-01. *D4.3 Final report reliability and availability improvement. 2018.*

[Pompl et Röhner, 2005] T. Pompl, M. Röhner. *Voltage acceleration of Time Dependent Breakdown of Ultra-Thin Gate Dielectric*. Microelectronics Reliability, Vol. 45, pp. 1835-1841, 2005.

[Piton, 2015a] M. PITON. *Semi-conducteurs de puissance-IGBT Partie 1 Présentation des modules IGBT de forte puissance*. Support de formation ALSTOM, 18/12/2015 ; Document interne ALSTOM.

[Piton, 2015b] M. PITON. *Modules IGBT pour la traction ferroviaire : Partie 2 : fonctionnement et limites de fonctionnement*. Support de formation ALSTOM TRANSPORT TARBES, 03/06/2015, Document interne ALSTOM.

[Populaire et al., 2002] S. Populaire, T. Denoeux, A. Guilikeng, P. Gineste, et J. Blanc. *Fusion of experts knowledge with data using belief fonction: a case study in wastewater treatment*. In proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion, IF, 2002.

[Procaccia et Morilhat, 1996] Henri Procaccia et Patrick Morilhat. *Fiabilité des structures des installations industrielles Théorie et applications de la mécanique probabiliste*. Préfaces de Rémy Carle et Gérard Menjon, livre, Edition Eyrolles, 1996.

[Procaccia et Suhner, 2003] Henri Procaccia et Marie-Christine Suhner. *Démarches bayesiennes et applications à la sûreté de fonctionnement*. Livre Editions Lavoisier, 2003

[Rabier, 2007] Rabier François. *Modélisation par la méthode des plans d'expérience du comportement dynamique d'un IGBT utilisé en traction ferroviaire*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

[Robert, 1994] Robert Christian. *The bayesian choice: a decision-theoretic motivation*. Springer, New York, 1994.

[Renooij, 2001] S. Renooij. *Probability elicitation for belief networks: Issuesto conside. Knowledge Engineering review*. 16(3): 255-269, 2001.

[Rossini 2016] Rossini Christophe. *Chennai Environmental measurement in the field.* PowerPoint presentation, Juin 2016, ALSTOM internal document.

[Robinson, 1977] Robinson, R. W. *Counting unlabeled acyclic digraphs*. Dans Little, C. H. C. (Ed.), Combinatorial Mathematics V, volume 622 of Lecture Notes in Mathematics, (pp. 28–43)., Berlin. Springer. 14, 64 (1977).

[Sabaté, 1998] Sabaté Victor. *Traction électrique ferroviaire-convertisseurs et moteurs.* Techniques de l'Ingénieur, Ingénierie des transports, Systèmes ferroviaires, 1998.

[Saiz, 2016] Jose Saiz. *Thermal and Humidity recording on traction case of Chennai Project,* 24 May 2016, ALSTOM internal document.

[Saryazdi et al., 2017] Soroush Saryazdi, Bahareh Nikpour, Hossein Nezamabadi. *NPC: Neighbors Progressive Competition Algorithm for Classification of Imbalanced Data Sets.* Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran, 2017.

[Schuegraf et Hu, 1993] K.F. Schuegraf, C. Hu. *Hole injection oxide breakdown model for very low voltage lifetime expectation*. 31st Annual Proceedings Reliability Physics, 1993. Pages 7-12.

[Spirtes et al., 1993] Peter Spirtes, Clark Glymour, and Richard Scheines. *Causation, prediction, and search*. Springer-Verlag (1993).

[Scheuermann, 2012] Uwe Scheuermann. *Lifetime and Reliability Testing*. ECPE Tutorial Power Electronic Packaging, 11-12 October 2012, Birmingham, UK

[Scheuermann, 2015] Uwe Scheuermann. *Packaging and Reliability of Power Modules-Principles, Achievements and Future Challenges*. PCIM Europe 2015, 21 Mai 2015, Nuremberg Germany

[Schubert et al., 2003] A. Schubert; R. Dudek ; E. Auerswald ; A. Gollbardt ; B. Michel ; H. Reichl. *Fatigue Life Models of SnAgCu and SnPb Solder Joints Evaluated by Experiments and Simulations.* 53rd ECTC 2003, pp. 603-610, 2003.

[Servière, 2017] Jean-François Servière. *essais de stockage longue durée des IGBT en chaleur humide*, Rapport technique sur Projet SHIFT TO RAIL-WP4, document interne ALSTOM, 2017.

[Sidibe, 2014] Ibrahima dit Bouran SIDIBE. *Analyse non-paramétrique des politiques de maintenance basée sur des données des durée de vie hétérogènes*. Thèse de doctorat de l'université de Lorraine, 16 mai 2014.

[Suzuki,1999] Joe Suzuki. *Learning bayesien belief networks based on the MDL principe: An efficient algorithm using the branch and bound technique*. IECE Transactions on informations and systems, E82-D(2):356-367, 1999.

[Schwartz, 1978] G Schwartz. *Estimating the dimension of a model*. The Annals of Statistics, 6(2) :461–464, 1978.

[Tanaka et al., 2015] Nobuhiko Tanaka, Kenji O., Shinichi I., Yasutaka K., Keiichi Nakamura, Eugen Wiesner, Eckhard T. *Robust HVIGBT module design against high humidity*. PCIM Europe19-21 May 2015. Germany.

[Thiesson et al., 2001] Bo Thiesson, Christopher MeeK et David Heckerman. *Accelerating EM for large database*. Machine Learning, 45(3):279-299,2001.

[Tobon Mejia, 2011]. Diego Alejandro Tobon Mejia. *Contribution au pronostic industriel de défaillances guidé par les données : approche Bayesienne appliquée aux composants des moteurs électriques.* Thèse de doctorat de l'université de l'université de Franche-Comté.2011.

[UTE, 2005]. *Recueil de données de fiabilité - Modèle universel pour le calcul de la fiabilité prévisionnelle des composants, cartes et équipements électroniques*, 2005.

[Vallon, 2003] Vallon Jérôme. *Introduction à l'étude de la fiabilité des cellules de commutation à IGBT sous fortes contraintes*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003

[Volke et HornKamp] Volke, A. HornKamp, M. *IGBT Modules : Technologies, Drivers and Applications*. Pages 66–74. Infineon Technologies AG, Munich, 2011.

[Villemeur, 1988] Alain Villemeur. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité, facteurs humains, informatisation*. Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. Éd. Eyrolles, Paris (1988).

[Villeneuve et al., 2011] E. Villeneuve, C. Beler, F. Peres, L. Geneste. *Hybridization of Bayesian Networks and Belief Functions to Assess Risk. Application to aircraft Disassembly*. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2011.

[Weber et al., 2012] P. Weber, G. Medina Olivia, C. Simon, B. Iung. *Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012.

[Yap, 2007] G-E. Yap, A-H. Tan, H-H. Pang. *Explaining inferences in Bayesian networks.* Springer Science, 2007.

[Yehezkel et Lerner, 2005] Yehezkel, R. et Lerner, B. *Recursive autonomy identification for bayesian network structure learning*. The 10th International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics, AISTATS 2005, pages 429–436 (2005).

[Zehringer et Stuck, 1997] R. Zehringer, A. Stuck. *Realistic Operation Profile of locomotives operated in Switzerland*. RAPSDRA report 01 1996 and Technical Note 11/1997.

[Zéanh, 2009] *Adrien ZÉANH. Contribution à l'amélioration de la fiabilité des modules IGBT utilisés en environnement aéronautique.* Thèse de doctorat de l'INPT, Mai 2009.

[Zéanh et al, 2008] Adrien Zéanh, Olivier Dalverny, Eric Woirgard, Stephane Azzopardi, Moussa Karama, A. Bouzourene, J. Casut, Michel Mermet-Guyennet. *Fiabilité des substrats en AlN utilisés dans les modules IGBT en environnement aéronautique.* HAL Archives Ouvertes, Septembre 2008.

[Zeller 1997] H. R. Zeller. *Cosmic ray induced failures in high power semi-conductor devices*. Microelectronic Reliability, Vol 37. No.10/11. Pp 1711-1718, 1997.

[Zhang, 2008] Nevin L. Zhang. *Introduction to Bayesian networks. Department of Computer Science and engineering*. Hong Kong University of Science and technology, 2008.

[Zhang, 2012] Ludi Zhang. *Etude de fiabilité des modules d'électronique de puissance à base de composant SiC pour applications hautes températures.* Thèse de doctorat en électronique de l'université de Bordeaux 1. Janvier 2012.

[Zwingelstein, 1995] Gilles Zwingelstein. *Diagnostic des défaillances théorie et pratiques pour les systèmes industriels*. Livre Edition Hermès, 1995.

http://www.weibull.com/hotwire/issue116/hottopics116.html

https://shift2rail.org/

Résumé

Le contrôle de la fiabilité des composants électroniques critiques est un des enjeux des acteurs du secteur ferroviaire. Les modules de puissance à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) appartiennent à cette liste de composants. Ils sont soumis à de fortes contraintes correspondant à celles rencontrées dans des environnements ferroviaires sévères. Les conditions environnementales rencontrées dans l'exploitation ferroviaire et les fortes exigences en termes de disponibilité imposent des niveaux de fiabilité élevés aux IGBT. Dans une optique d'amélioration de leur fiabilité, une méthodologie d'évaluation a été développée basée sur une approche probabiliste et supportée par un réseau bayesien. Pour la mise en place du modèle, plusieurs briques de travail ont été assemblées. En premier lieu, une approche originale nommée « Cycle en U » a été proposée mettant en évidence de façon biunivoque un niveau système associé au train et un niveau composant assimilable à l'IGBT considérés simultanément selon des vues fonctionnelles et dysfonctionnelles. Dans ce cadre, le travail a conduit, dans un premier temps, à mettre en évidence les mécanismes caractérisant, dans une logique descendante, l'influence de la sollicitation du train sur la sollicitation du composant puis, selon une logique ascendante, de l'impact dysfonctionnel de la défaillance au niveau composant sur la fiabilité du système. Dans un deuxième temps, les résultats de cette analyse ont débouché sur la mise en place de la structure d'un modèle bayesien dont le caractère générique lui permet d'être déployé pour la modélisation fiabiliste de tout type de système ferroviaire. Le travail de modélisation basé sur les réseaux bayesiens sert de support au rapprochement entre modèles analytiques (physique de défaillance) et données issues de l'utilisation du composant élémentaire dans son environnement de fonctionnement. Le modèle a été utilisé pour la modélisation de la fiabilité d'un IGBT dans un cadre d'application correspondant au métro de la ville de Chennai en Inde. Les données et connaissances expertes recueillies sur le projet ont permis de déterminer les tables de probabilités du réseau bayesien. Les résultats probabilistes du modèle ont été traduites en indicateurs de fiabilité.

Mots-clés : Electronique de puissance ; Modèle probabiliste ; Réseaux bayesiens ; IGBT ; Fiabilité ; Profil de mission.

Abstract

The reliability control of critical electronic components is one of the challenges to be faced by railway stakeholders. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) power modules belong to this list of components. They are subject to high stresses corresponding to those encountered in harsh railway environments. The environmental conditions encountered in rail operations and the demanding availability requirements impose high levels of reliability on IGBT. In order to improve their reliability, an evaluation methodology has been developed based on a probabilistic approach and supported by a Bayesian network. For the implementation of the model, several working elements were assembled. First, an original approach called "U-Cycle" was proposed, highlighting in a one-to-one way a system level associated with the train and a component level similar to the IGBT considered simultaneously according to functional and dysfunctional views. In this context, the work led, first, to highlight the mechanisms characterizing, in a top-down logic, the influence of train loading on component stress and, in a bottom-up logic, the dysfunctional impact of the failure at component level on system reliability. In a second step, the results of this analysis led to the implementation of the structure of a Bayesian model whose generic nature allows it to be deployed for the reliable modelling of any type of rail system. The modelling work based on Bayesian networks is used to support the reconciliation between analytical models (failure physics) and data from the use of the elementary component in its operating environment. The model was used to model the reliability of an IGBT in an application framework corresponding to the metro in the city of Chennai, India. The data and expert knowledge collected on the project made it possible to determine the probability tables of the Bayesian network. The probabilistic results of the model have been translated into reliability indicators.

Key words: Power electronics; Probabilistic models; IGBT; Bayesian networks; Reliability; Mission profile.