

XAVIER ZWINGMANN

MODÈLE D'ÉVALUATION DE LA FIABILITÉ ET DE LA MAINTENABILITÉ AU STADE DE LA CONCEPTION

Thèse de doctorat en cotutelle présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec
dans le cadre du programme de doctorat en Génie Mécanique
pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

Département de génie mécanique
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC (QC)

et

UNIVERSITÉ LOUIS-PASTEUR
STRASBOURG, FRANCE
pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences pour l'Ingénieur

2005

Résumé

Un produit est généralement défini à partir d'un cahier des charges qui décrit ses caractéristiques en termes de performances, fiabilité, qualité, etc. La plupart des caractéristiques exigeant d'être validées expérimentalement sont évaluées a posteriori de la conception à l'aide d'essais sur des prototypes physiques. Ce processus engendre des coûts importants, prend du temps et peut conduire à des modifications majeures, surtout si elles interviennent tardivement. Cette thèse vise la prise en compte de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception ainsi que le développement d'outils permettant la validation des objectifs de conception et la comparaison de plusieurs alternatives. Elle répond ainsi à une problématique importante de l'industrie (prolongement de la durée de vie, développement durable) et à l'enrichissement des outils de conception actuels. La démarche de validation classique consiste à reproduire les conditions d'utilisation pour tester un échantillon de prototypes physiques. Dans cette thèse, nous définissons l'évaluation des caractéristiques d'un produit au moyen de prototypes virtuels élaborés à partir du modèle CAO établi par le concepteur. Tout d'abord, le prototype virtuel généré doit être représentatif de la réalité. Pour cela, nous identifions les facteurs qui influencent la caractéristique étudiée. Puis, le processus de test doit être défini. Nous avons développé, dans le cas de la fiabilité, un outil spécifique basé sur l'approche contrainte/résistance ainsi que sur les séries de Taylor. En ce qui concerne la maintenabilité, des indicateurs et un algorithme de désassemblage ont été mis en place pour quantifier les différents critères. Ces outils ont été implémentés dans une approche de conception intégrée (FSC) puis validés sur un cas réel. Ils permettent la comparaison relative des caractéristiques de plusieurs alternatives à partir de leurs représentations CAO. À terme, nous envisageons une évaluation absolue des caractéristiques, ce qui permettrait de valider directement les objectifs de conception, diminuant alors significativement le recours aux prototypes physiques.

Avant-Propos

Tout d'abord, je remercie mes directeurs de thèse, M. Daoud Aït-Kadi, de l'Université Laval de Québec, et M. Bernard Mutel, de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg, pour leur soutien et leur disponibilité. Je voudrais aussi remercier M. Amadou Coulibaly, maître de conférence à l'INSA, pour son encadrement. Je tiens d'ailleurs à souligner que l'ensemble de ce travail est le fruit d'une étroite collaboration entre l'INSA, pour les compétences en conception intégrée, et l'Université Laval, pour l'expertise en évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité.

Mes remerciements vont également à M. Jacques Demonsant, du département Direction de la Recherche chez Renault ; à M. Christian Vancraenenbroeck, M. François Routhier et au personnel du Programme des aides techniques de l'Institut de Réadaptation en Déficience Physique de Québec (IRDPQ) ; à M. Marcel Côté, de la Régie de l'Assurance Maladie du Québec (RAMQ), aux collègues du laboratoire LICIA de l'INSA de Strasbourg, du laboratoire SIMNET de l'Université Laval. Merci aux CRSNG, CIEC et RAMQ pour le soutien financier.

Des remerciements sincères pour M. Augustin Gakwaya, de l'Université Laval, M. Daniel Noyes, de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, et M. Emmanuel Caillaud, de l'Université Louis-Pasteur, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens spécialement à remercier mes comparses de tous les jours Marc Chouinard et Claver Diallo - mon « jumeau astral », ainsi que les amis Gérald, Sophie, Dina, Sébastien, l'équipe Boudreau, les rencontres des résidences de l'Université Laval.

Finalement, un gros merci à ma famille. À mes parents, qui m'ont soutenu et encouragé de loin, à mon frère cadet Vincent qui tourne mal comme son grand frère, à ma sœur Sylvaine pour qui on a encore de l'espoir, et enfin à Karine qui m'a accompagné durant cette aventure.

*À tous les êtres chers
dont le soutien m'a été indispensable.*

Table des matières

Résumé.....	i
Avant-Propos	ii
Table des matières	iv
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures	x
Liste des annexes.....	xii
Acronymes.....	xiii
Introduction	xv
Partie A Introduction.....	1
Chapitre 1. L'activité de validation	2
1. La validation dans le processus de conception	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Importance de l'étape validation.....	4
2. La validation de la conception	5
2.1. Introduction.....	5
2.2. Les essais de validation.....	6
2.3. Conclusion.....	8
Chapitre 2. L'évaluation comportementale.....	9
1. Intégration de l'évaluation au stade de la définition du produit	10
1.1. Introduction.....	10
1.2. L'évaluation déterministe.....	11
1.3. La prise en compte de l'environnement	12
1.4. Bilan.....	12
2. L'approche d'intégration FSC	14
2.1. L'évaluation comportementale intégrée.....	14
2.2. L'approche Fonctionnelle-Structurelle-Comportementale	15
2.3. Les trois modèles de FSC.....	17
2.4. Architecture orientée objets.....	21

Partie B La fiabilité en conception.....	24
Chapitre 3. La fiabilité	25
1. Introduction	26
1.1. Définition	26
1.2. Estimation des indices de fiabilité	29
2. Évaluation a posteriori : validation de la fiabilité	32
2.1. Les tests accélérés	32
2.2. Les tests d'échantillons	35
2.3. Les tests en production	37
3. Évaluation lors de la conception : prévoir la fiabilité	38
3.1. Fiabilité prévisionnelle d'un système multi-composants.....	38
3.2. Conception pour la fiabilité (<i>DfR</i>)	40
3.3. Estimation de la fiabilité par l'approche fiabiliste de la conception.....	47
3.4. Caractère temporel de la fiabilité.....	55
4. Évaluation de la tenue du produit	60
4.1. Formulation du problème	60
4.2. Simulation par la technique de Monte Carlo	62
4.3. Méthodes de premier ordre et de second ordre	64
4.4. Algèbre des variables aléatoires	71
4.5. Bilan.....	73
Chapitre 4. Évaluation de la fiabilité.....	78
1. Introduction	79
1.1. Module d'évaluation de la fiabilité	79
1.2. Modèle d'intégration dans un environnement de définition de produit.....	79
2. Identification et caractérisation des facteurs influençant la fiabilité	82
2.1. Cause « Matériaux »	83
2.2. Cause « Main d'œuvre »	86
2.3. Cause « Méthodes » et « Machines ».....	89
2.4. Cause « Milieu/Environnement »	95
2.5. Contenu du modèle sémantique.....	96
3. Pondération et formalisation.....	99
3.1. La pondération des facteurs	99
3.2. Formalisation de la fiabilité selon un critère et une mesure statique	101
3.3. Formalisation de la génération de prototypes virtuels.....	104
3.4. Évaluation temporelle de la fiabilité	110
4. Conclusion	118
4.1. Disponibilité et fiabilité des données requises	118
4.2. Distinction de la charge et de la résistance.....	119
4.3. Intégration dans l'architecture logicielle de FSC.....	120
4.4. Limitation de la complexité du mode de défaillance.....	121

Partie C La maintenabilité en conception	122
Chapitre 5. La maintenabilité	123
1. Introduction	124
1.1. La disponibilité	124
1.2. Amélioration de la disponibilité	125
1.3. La maintenabilité	126
2. Évaluation a posteriori : tester et démontrer la maintenabilité.....	128
2.1. Mesure de la maintenabilité d'un système en exploitation	128
2.2. Analyse de démonstration de la maintenabilité.....	128
3. Évaluation lors de la conception : prévoir la maintenabilité.....	131
3.1. La conception pour la maintenabilité (<i>DfM</i>).....	131
3.2. Les procédures de prévision de la maintenabilité.....	133
4. Le processus de réparation.....	139
4.1. Réalité virtuelle et simulation	139
4.2. Algorithmes de désassemblage	143
4.3. Modélisation d'un problème de désassemblage	145
4.4. Les critères d'optimalité d'une séquence de désassemblage.....	150
Chapitre 6. Évaluation de la maintenabilité.....	164
1. Identification des critères.....	165
1.1. Prise en compte de la maintenabilité au stade de la conception.....	165
1.2. Classification des critères selon la typologie de maintenance.....	165
1.3. Classification des critères vis-à-vis du produit	166
1.4. Étude des critères.....	166
2. Caractérisation des critères.....	170
2.1. Les critères intrinsèques et intrinsèques enrichis	170
2.2. Les critères extrinsèques	174
2.3. Les critères communs.....	176
3. Formalisation des critères de maintenabilité	178
3.1. Intégration des critères.....	178
3.2. Les critères de la maintenabilité intrinsèque	179
3.3. Recherche des séquences d'accès par la programmation par contraintes	184
3.4. La maintenabilité intrinsèque	197
4. Conclusion	199
4.1. Bilan.....	199
4.2. Intégration dans l'architecture logicielle de FSC.....	200
4.3. Limites.....	201

Partie D Application.....	202
Chapitre 7. Cas des aides à la mobilité	203
1. Introduction	204
1.1. Contexte de valorisation des aides à la mobilité	204
1.2. Études préliminaires	205
1.3. Dimension fonctionnelle d'un fauteuil roulant	205
1.4. Dimension structurelle d'un fauteuil roulant	206
2. Évaluation de la fiabilité	208
2.1. Modèle sémantique et modèle mécanique	208
2.2. Évaluation du comportement de la structure	215
2.3. Génération des échantillons de prototypes virtuels et calcul de la fiabilité	218
2.4. Analyse comparative des différentes méthodes	225
2.5. Évaluation temporelle de la fiabilité	228
2.6. Bilan	230
3. Évaluation de la maintenabilité	232
3.1. Introduction	232
3.2. Application à deux exemples de la littérature	237
3.3. Calcul de la maintenabilité d'un fauteuil roulant	247
3.4. Bilan	253
Conclusion.....	254
Bibliographie	259
Annexes.....	275

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Impact des essais sur les coûts et les délais	7
Tableau 3.1 : Relations entre $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ ou $r(t)$	27
Tableau 3.2 : Sources de connaissances – El Khair El Idrissi <i>et al.</i> (1995).....	36
Tableau 3.3 : Algorithme <i>FORM2</i>	70
Tableau 3.4 : Comparaison des méthodes basées sur l’algèbre des VA.....	73
Tableau 4.1 : Relation entre les tolérances et les écarts types	97
Tableau 5.1 : Composantes de la durée d’inactivité totale d’un système	132
Tableau 5.2 : Recommandations pour améliorer la maintenabilité.....	133
Tableau 5.3 : Modèles de séquences de bases pour des tâches manuelles	135
Tableau 5.4 : Critères de l’indice de maintenabilité – Wani & Gandhi (1999)	137
Tableau 5.5 : Méthodes de quantification de l’effort de désassemblage.....	151
Tableau 6.1 : Classification des critères selon la typologie de maintenance	165
Tableau 6.2 : Indice de difficulté des attaches de liaisons – Das & Naik (2002)	181
Tableau 6.3 : Pondération de l’accès aux liaisons – Desai & Mital (2003).....	182
Tableau 6.4 : Relations de désassemblage enrichies pour la Figure 6.2.	187
Tableau 6.5 : Matrice de transition de la Figure 6.2c.....	191
Tableau 6.6 : Coûts des 29 transitions réalisables de la Figure 6.2 (b) et (c)	196
Tableau 6.7 : Séquences pour la Figure 6.2 (b) et (c)	197
Tableau 7.1 : Modélisations CAO de deux fauteuils roulants	207
Tableau 7.2 : Propriétés nominales des matériaux – Roark & Young (1989).....	211
Tableau 7.3 : Distributions de probabilités des propriétés des matériaux	211
Tableau 7.4 : Châssis simplifiés des deux fauteuils	212
Tableau 7.5 : Distributions des caractéristiques des profils des structures	212
Tableau 7.6 : Dimensions des deux fauteuils.....	213
Tableau 7.7 : Distributions géométriques pour <i>2B01</i>	214
Tableau 7.8 : Distributions géométriques pour <i>3B01</i>	214
Tableau 7.9 : Choix des distributions sur les dimensions de l’AM.....	215
Tableau 7.10 : Caractéristiques des calculs par éléments finis	217
Tableau 7.11 : Étapes de <i>FORM2</i> pour <i>2B01</i> – normalisation identique.....	220
Tableau 7.12 : Étapes de <i>FORM2</i> pour <i>2B01</i> – charge (X_{32}) re-normalisée.....	221
Tableau 7.13 : Bilan des calculs de fiabilité par <i>FORM2</i>	222
Tableau 7.14 : La fiabilité à partir de l’évaluation intrinsèque de Monte Carlo	223
Tableau 7.15 : Résultats des calculs <i>TSFD</i> pour le modèle <i>2B01</i>	224
Tableau 7.16 : Bilan des calculs de fiabilité par <i>TSFD</i>	225
Tableau 7.17 : Comparatif des estimations de fiabilité.....	226
Tableau 7.18 : Durée des calculs	227
Tableau 7.19 : Variabilité de la caractéristique de Wöhler.....	229
Tableau 7.20 : Quelques résultats des calculs de fiabilité en fonction du temps....	229
Tableau 7.21 : Pondération de la nature des liaisons.....	233
Tableau 7.22 : Relations de précédence de l’AFI – Lambert (2001).....	238
Tableau 7.23 : Sous-assemblages réalisables de l’AFI.....	241

Tableau 7.24 : Nombre d'actions de séparation selon la taille des parents	241
Tableau 7.25 : Séquences et indices de maintenabilité pour l'AFI.....	242
Tableau 7.26 : Matrice des connexions de la Figure 7.14a.....	244
Tableau 7.27 : Liste des sous-assemblages réalisables pour la Figure 7.14a.....	245
Tableau 7.28 : Transitions selon la taille des parents de la Figure 7.14a.....	245
Tableau 7.29 : Séquences et indices de maintenabilité pour la Figure 7.14a	246
Tableau 7.30 : Éléments de construction des relations de précedence enrichies	250
Tableau 7.31 : Nombre de transitions selon la taille du parent pour le FR	252

Liste des figures

Figure 1 : Cheminement de lecture des parties B et C du manuscrit	xviii
Figure 1.1 : Processus de conception de produit	3
Figure 1.2 : Analyse fonctionnelle de la validation produit - Ferrari <i>et al.</i> (2000).....	5
Figure 1.3 : Coûts rapportés au cycle de conception – Salomone (1995)	7
Figure 2.1 : Positionnements de nos travaux dans le processus de conception.....	14
Figure 2.2 : Évaluation comportementale.....	16
Figure 2.3 : Dimensions Fonctionnelle-Structurale-Comportementale de FSC.....	17
Figure 2.4 : Diagramme pieuvre pour le modèle Fonctionnel	18
Figure 2.5 : Classes du modèle objet d'évaluation comportementale	22
Figure 3.1 : La fiabilité décroissante avec le temps	27
Figure 3.2 : Évolution du taux de panne en courbe « baignoire »	28
Figure 3.3 : Allures caractéristiques du taux de panne – Lewis (1987)	28
Figure 3.4 : Obtention des caractéristiques de fiabilité.....	30
Figure 3.5 : Estimation des durées de vies en conditions normales – Lewis (1987) .	33
Figure 3.6 : Courbe de Wöhler	34
Figure 3.7 : Structure série	39
Figure 3.8 : Structure d'un arbre de défaillance	41
Figure 3.9 : Maison de la qualité	45
Figure 3.10 Distributions de contrainte et de résistance	48
Figure 3.11 : Domaine d'intégration dans un repère standardisé.....	51
Figure 3.12 : Indice de sécurité de Hasofer-Lind.....	54
Figure 3.13 : Distribution de la fonction performance – variable aléatoire Z	65
Figure 3.14 Indice de Hasofer-Lind sur une fonction performance linéaire	68
Figure 3.15 : État limite non linéaire dans l'espace des coordonnées réduites	68
Figure 4.1 : Principe de validation de la fiabilité utilisant des prototypes virtuels..	80
Figure 4.2 : Identification partielle des facteurs influençant la fiabilité.....	82
Figure 4.3 : Loi de Hooke – Limite à la rupture à 0,2 % de déformation plastique..	83
Figure 4.4 : Influence de la galvanisation sur la tenue en fatigue.....	84
Figure 4.5 : Découpe avec outils à bords droits.....	91
Figure 4.6 : Découpe à bords frappés.....	92
Figure 4.7 : Constante élastique sous une action laser (Zhang <i>et al.</i> (2001)).....	93
Figure 4.8 : Différents états de surface dus au procédé de fabrication	93
Figure 4.9 : Éléments requis pour l'étude d'un mode de défaillance.....	100
Figure 4.10 : Mécanique de la rupture à 2 et 3 paramètres (Zeghloul (2002)).....	102
Figure 4.11 : Approche virtuelle basée sur la fonction performance.....	106
Figure 4.12 : Principe des approches virtuelles basées sur la fonction résistance ..	108
Figure 4.13 : Introduction du vieillissement dans le critère de défaillance	112
Figure 4.14 : Courbe de Wöhler : critère se dégradant avec le temps, les cycles....	113
Figure 4.15 : Modèle de la résistance selon la durée de vie – Murty <i>et al.</i> (1995) ...	115
Figure 4.16 : Le processus d'estimation de la fiabilité en CAO.....	120
Figure 5.1 : Chronogramme d'un système réparable	125

Figure 5.2 : Conditions pour une analyse de la maintenabilité.....	129
Figure 5.3 : Facteurs de maintenabilité du <i>DEI</i> de Das <i>et al.</i> (2000).....	138
Figure 5.4 : Durées de calcul requis par le conventionnel et la réalité virtuelle	143
Figure 5.5 : Représentations d'un assemblage simple	146
Figure 5.6 : Diagramme de transitions entre états de l'assemblage.....	148
Figure 5.7 : Graphe ET/OU réduit	150
Figure 5.8 : Énergie requise pour défaire un clip ou « <i>snap fit</i> ».....	155
Figure 5.9 : Distribution de probabilité de paramètres systèmes - Suh (1990).....	157
Figure 5.10 : Structure fonctionnelle hiérarchique	161
Figure 6.1 : Positionnement des critères de maintenabilité	168
Figure 6.2 : Assemblage simple.....	185
Figure 6.3 : Éléments de la modélisation formelle du design de la Figure 6.2.....	186
Figure 6.4 : Graphe ET/OU complet pour l'exemple de la Figure 6.2c	190
Figure 6.5 : Processus d'estimation de la maintenabilité en environnement CAO 200	
Figure 7.1 : Étude de la charge appliquée au châssis pour une utilisation donnée	209
Figure 7.2 : Distribution de la charge appliquée au châssis.....	209
Figure 7.3 : Exemples de scénarios avec historique des efforts.....	210
Figure 7.4 : Calcul des contraintes internes au châssis arrière droit de <i>2B01</i>	216
Figure 7.5 : Exemple de déformée du châssis de <i>3B01</i> calculée sous <i>MAPLE</i> ®	216
Figure 7.6 : Variation de la performance $z(\bullet)$ selon la charge appliquée L	218
Figure 7.7 : Évolutions de β et $z(\bullet)$ pour <i>2B01</i> - normalisation identique	220
Figure 7.8 : Évolutions de β et $z(\bullet)$ pour <i>2B01</i> - charge (X_{32}) re-normalisée	221
Figure 7.9 : Fonction de densité de la résistance par Monte Carlo	223
Figure 7.10 : Évolutions temporelles des fiabilités $R(t)$ pour <i>2B01</i> et <i>3B01</i>	230
Figure 7.11 : Exemple AFI - De Fazio & Whitney (1987)	237
Figure 7.12 : Graphe ET/OU complet de l'AFI, 75 nœuds et 221 hyperarcs.....	239
Figure 7.13 : Graphe ET/OU réduit de l'AFI, 75 nœuds et 221 arcs	240
Figure 7.14 : Exemples des polyèdres 2D	243
Figure 7.15 : Vue éclatée d'une moitié du fauteuil <i>2B01</i>	247
Figure 7.16 : Diagramme des connexions enrichi pour le FR.....	248
Figure 7.17 : Sous-assemblages réalisables du FR.....	251

Liste des annexes

Annexe I. Le processus de conception.....	276
Annexe II. Réalisation d'une analyse fonctionnelle.....	282
Annexe III. Quelques fonctions de distribution.....	284
Annexe IV. Outils reliés à l'analyse de la fiabilité.....	287
Annexe V. Modèles de dommage cumulé.....	290
Annexe VI. Les outils CAO industriels.....	294
Annexe VII. La technique de Monte Carlo.....	301
Annexe VIII. Fondements des méthodes <i>FORM/SORM</i>	304
Annexe IX. Algèbre des variables aléatoires.....	308
Annexe X. La méthode des éléments finis.....	311
Annexe XI. Critère d'accessibilité.....	313
Annexe XII. Techniques d'analyse du désassemblage.....	319
Annexe XIII. Mesure quantitative de l'information.....	325
Annexe XIV. Éléments du modèle de Zwingmann <i>et al.</i> (2005).....	328
Annexe XV. Pistes de formalisation pour les critères contextuels.....	331
Annexe XVI. Analyses des fauteuils roulants.....	342
Annexe XVII. Définition des géométries des fauteuils.....	349
Annexe XVIII. Calculs des efforts dans la structure du modèle <i>3B01</i>	353
Annexe XIX. Calculs de l'indice de fiabilité.....	354
Annexe XX. Génération aléatoire des variables de <i>3B01</i> par Monte Carlo.....	356
Annexe XXI. Évolution temporelle de la fiabilité et de la résistance.....	357
Annexe XXII. Représentation multi-couches du graphe ET/OU de l'AFI.....	358

Acronymes

<i>AFI</i>	<i>Assembly for Industry</i>
<i>AFNOR</i>	<i>Association Française de NORmalisation</i>
<i>AM</i>	<i>Aide à la Mobilité</i>
<i>AMDEC</i>	<i>Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité</i>
<i>AMOEP</i>	<i>Approches et MOdèles pour l'Évaluation des Performances</i>
<i>ASG</i>	<i>Assembly Sequence Graph</i>
<i>CA</i>	<i>Component Accessibility</i>
<i>CAO</i>	<i>Conception Assistée par Ordinateur</i>
<i>CFAO</i>	<i>Conception-Fabrication Assistée par Ordinateur</i>
<i>CSP</i>	<i>Constraint Satisfaction Problems</i>
<i>DA</i>	<i>Destructive Action</i>
<i>DEI</i>	<i>Disassembly effort index</i>
<i>DfA</i>	<i>Design for Assembly ou conception pour l'assemblage</i>
<i>DfM</i>	<i>Design for Maintainability ou conception pour la maintenabilité</i>
<i>DFQ</i>	<i>Déploiement de la Fonction Qualité</i>
<i>DfR</i>	<i>Design for Reliability ou conception pour la fiabilité</i>
<i>DfX</i>	<i>Design for X ou conception pour X</i>
<i>DPM</i>	<i>Disassembly Precedence Matrix</i>
<i>DSM</i>	<i>Design Structure Matrix</i>
<i>DT</i>	<i>Down Time ou durée de non fonctionnement</i>
<i>ESS</i>	<i>Environmental Stress Screening</i>
<i>FORM/SORM</i>	<i>First Order Reliability Method/ Second Order Reliability Method</i>
<i>FOSM</i>	<i>First-Order Second-Moment Method</i>
<i>FR</i>	<i>Fauteuil Roulant</i>
<i>FSC</i>	<i>approche Fonctionnelle, Structurelle et Comportementale</i>
<i>GDR/MACS</i>	<i>Groupe De Recherche « Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques »</i>
<i>IAO</i>	<i>Ingénierie Assistée par Ordinateur</i>
<i>IS3C</i>	<i>Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du Cycle de vie</i>
<i>KBE</i>	<i>Knowledge-Based Engineering</i>
<i>MACOD</i>	<i>Modélisation et Optimisation de la Maintenance Coopérative et Distribuée</i>
<i>MAW</i>	<i>Maintainability Analysis Workspace</i>
<i>MIT</i>	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
<i>MDT</i>	<i>Mean Downtime</i>
<i>MOST</i>	<i>Maynard Operation Sequence Technique</i>
<i>MTBF</i>	<i>Mean Time Between Failure</i>
<i>MTM</i>	<i>Methods Time Measurement</i>
<i>MTTF</i>	<i>Mean Time To (First) Failure</i>

<i>MTTR</i>	<i>Mean Time To Repair</i> ou durée moyenne de réparation
<i>MUT</i>	<i>Mean Uptime</i> ou <u>m</u> oyenne des <u>t</u> emps de <u>b</u> on <u>f</u> onctionnement différent de MTBF
<i>MVFOSM</i>	<i>Mean Value First-Order Second-Moment Method</i>
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NIOSH</i>	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
<i>NPRD/EPRD</i>	<i>Nonelectronic Parts Reliability/Electronic Parts Reliability databases</i>
<i>pdf</i>	<i>probability density function</i>
<i>QFD</i>	<i>Quality Function Deployment</i>
<i>RAMQ</i>	Régie de l'assurance maladie du Québec
<i>RBD</i>	<i>Reliability Block Diagram</i> ou schémas bloc
<i>RGA</i>	<i>Reliability Growth Analysis</i>
<i>SGDT</i>	Système de Gestion des Données Techniques
<i>TMU</i>	<i>Time Measurement Unit</i>
<i>TRIAGE</i>	Technique de Recherche de l'Information par l'Animation d'un Groupe Expert
<i>TSFD</i>	<i>Taylor Series Finite Difference</i> ou développement en séries de Taylor
<i>UA</i>	<i>Unfastening Action</i>
<i>UTR</i>	<i>Up Time Ratio</i> ou proportion du temps de bon fonctionnement
<i>VA</i>	Variable Aélatoire
<i>VRT</i>	<i>Variance-Reduction Technique</i>

Introduction

Dans le cycle de développement d'un produit manufacturé, la phase de validation des solutions est une étape fondamentale. Il est indispensable de vérifier que les performances sont conformes aux spécifications du cahier des charges, au moyen de tests effectués durant la phase de conception. Selon le degré de satisfaction atteint, le produit est soit validé, soit amélioré ou complètement modifié. Actuellement, la validation est assurée essentiellement par des tests sur prototypes physiques après la conception.

Ces tests sont nécessaires car ils simulent le comportement du produit dans son environnement (conditions d'utilisation). Cependant, ils interviennent tardivement dans le processus de conception et de développement, ce qui entraîne parfois des modifications coûteuses et un allongement du temps de mise sur le marché. Il est donc souhaitable de pouvoir évaluer, dès le stade initial de conception du produit, ses performances comportementales futures.

Dans cette thèse, nous proposons une méthodologie et des modèles d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité du futur produit, et ce au stade de la conception.

Deux modèles d'analyse de la fiabilité et de la maintenabilité sont développés et intégrés dans une nouvelle approche d'évaluation comportementale. Cette approche, dite Fonctionnelle, Structurelle et Comportementale (FSC), est structurée de manière à tirer profit de l'ensemble des fonctionnalités disponibles dans les systèmes de CAO avancés actuels.

Le principe d'analyse consiste, pour un domaine considéré, à définir un critère ou une combinaison de critères permettant l'évaluation de la caractéristique spécifiée dans le cahier des charges. Ces critères sont identifiés et caractérisés par une ou plusieurs variables de conception disponibles dans les modèles CAO. L'ensemble des critères est agrégé afin d'obtenir une mesure quantifiable. En comparant cette

mesure à un seuil (valeur limite ou idéale), on établit un indice de performance dans l'espace de comportement étudié.

Pour la fiabilité, le critère porte sur la tenue du produit soumis à des charges aléatoires. La mesure du critère repose sur l'utilisation de prototypes virtuels testés sur un banc d'essais virtuel qui reproduit, essentiellement à l'aide des outils de la conception assistée par ordinateur (CAO), les essais traditionnellement réalisés sur des prototypes physiques et compare la mesure associée au critère avec un seuil de tolérance prédéterminé. Dans un premier temps, l'indicateur de la fiabilité proposé est indépendant du temps. Ensuite, une extension est proposée pour tenir compte de la durée de mission du produit.

Pour la maintenabilité, un ensemble de critères incluant des aspects d'assemblage et de désassemblage est étudié. Pour chaque critère, plusieurs possibilités de mesure sont examinées. On distingue les critères intrinsèques, propres au produit, des critères extrinsèques, représentant l'environnement. Les critères intrinsèques sont définis puis agrégés de manière à former un indicateur global de maintenabilité intrinsèque. Pour deux conceptions légèrement différentes, l'indicateur de maintenabilité permet une comparaison relative. Pour deux systèmes distincts, la maintenabilité intrinsèque est comparée à la maintenabilité intrinsèque qui serait obtenue par une conception semblable que nous définirons comme étant « idéale », de manière à permettre une comparaison absolue.

Le champ d'application de nos recherches concerne les produits ou systèmes à plusieurs composants. Ainsi, une validation des concepts et outils développés est effectuée sur des fauteuils et bases roulantes pour personnes ayant des déficiences physiques. Cette étude intervient dans le cadre d'un vaste programme provincial de valorisation des aides à la mobilité qui concerne l'amélioration de la gestion de ces appareils très personnalisés et à forte valeur ajoutée. Les objectifs incluent,

entre autres, l'amélioration de la disponibilité des appareils en les rendant plus fiables et en réduisant leur durée de réparation.

Structure du manuscrit

Ce manuscrit est composé de sept chapitres regroupés en quatre parties.

Partie A : Introduction

Le Chapitre 1 situe le contexte du processus de conception, avec les outils et techniques qui ont été mis au point pour développer et valider les caractéristiques d'un produit selon les spécifications du cahier des charges. On se penche principalement sur les caractéristiques basées sur la fiabilité et la maintenabilité d'un produit. La fiabilité est la probabilité qu'un système accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée. La maintenabilité est la probabilité qu'un matériel soit remis dans un état de fonctionnement donné, dans des limites de temps spécifiées, lorsque le travail est effectué selon des procédures prescrites et des conditions données.

Le Chapitre 2 souligne les limites des approches déterministes traditionnelles pour l'évaluation de certaines caractéristiques. On propose d'utiliser une nouvelle approche, dite Fonctionnelle-Structurale-Comportementale (FSC). Cette approche, intégrée au stade de la conception avec l'utilisation de prototypes virtuels, met en place une évaluation comportementale, notion qui est également définie.

Parties B et C : La fiabilité et la maintenabilité en conception

Les parties B et C sont des déclinaisons du concept proposé. La première traite de la fiabilité, tandis que la seconde traite de la maintenabilité. La Figure 1 présente le contenu de ces deux parties. Chacun des deux chapitres 3 et 5 définit la caractéristique qui le concerne, présente comment la mesurer après la conception et l'estimer à partir de connaissances acquises sur des systèmes similaires. Chacun fait un bilan des techniques et outils disponibles pour l'évaluation a priori des caractéristiques d'un nouveau produit.

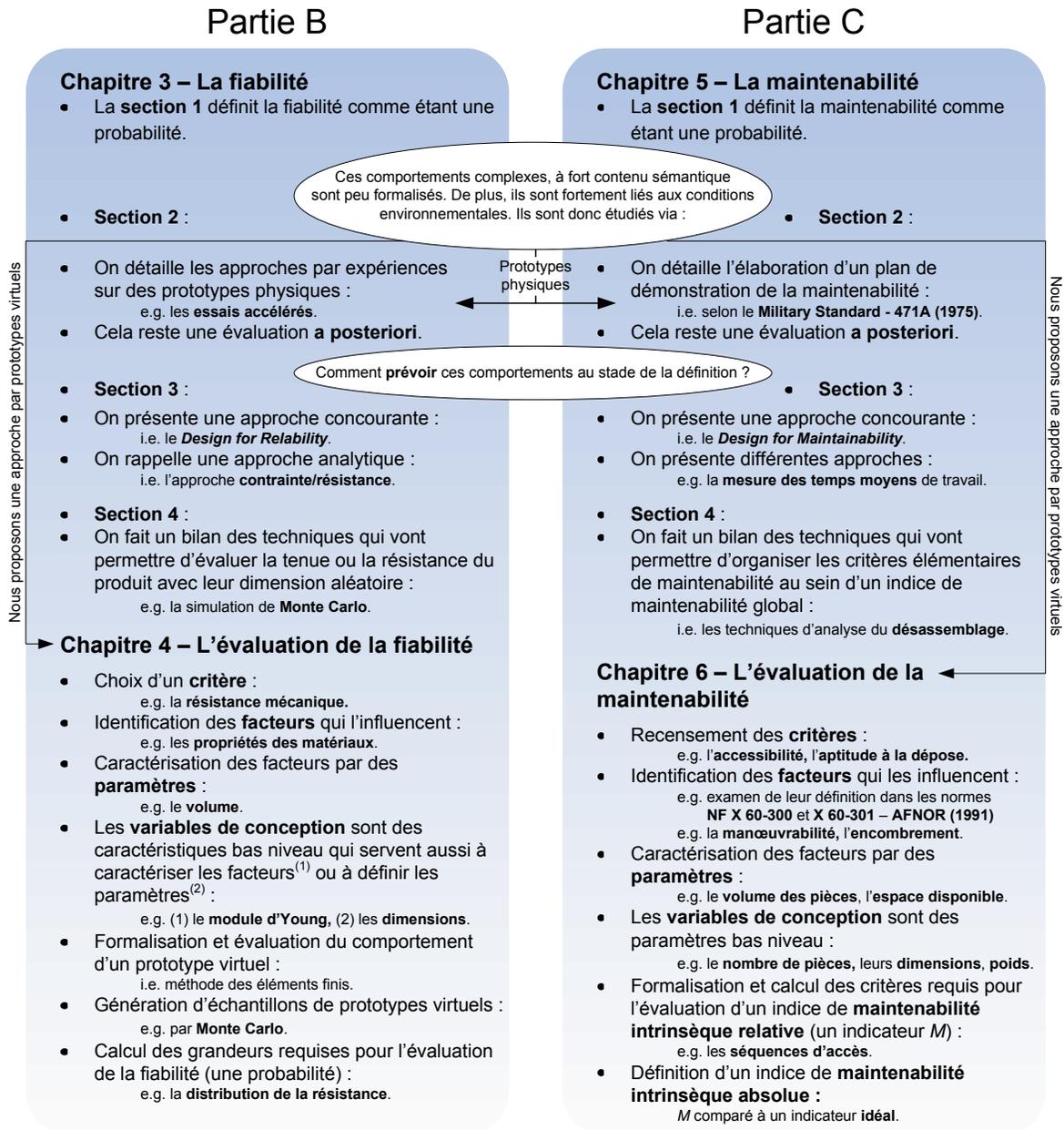


Figure 1 : Cheminement de lecture des parties B et C du manuscrit

Dans le Chapitre 4, l'évaluation de la fiabilité est synthétisée par une probabilité. Les prototypes virtuels, représentatifs de la réalité, sont générés soit de façon à évaluer la fiabilité en tenant compte de la variabilité de l'environnement et des conditions d'utilisation (évaluation contextuelle), soit de façon à déterminer la résistance (évaluation intrinsèque), ce qui permet le calcul de la fiabilité en réintégrant la variabilité du contexte via l'approche contrainte/résistance.

Plusieurs techniques de génération d'un échantillon de prototypes virtuels sont utilisées. Parmi elles, les développements en séries de Taylor permettent de trouver la distribution de la fonction résistance. Ce procédé exige moins de ressources et moins de données que d'autres techniques.

Dans le Chapitre 6, la maintenabilité est mesurée à l'aide d'un indice de maintenabilité intrinsèque. Ce dernier est défini à partir de critères propres au produit. Il est obtenu à l'aide des outils standards de la CAO. Pour apprécier le degré de complexité du produit vis-à-vis des opérations de maintenance, on se penche sur la séquence optimale de désassemblage du produit.

Partie D : Application

Cette partie contient un seul chapitre (le Chapitre 7) dédié à la validation des approches et outils mis au point dans les chapitres qui le précèdent. On présente rapidement le contexte : la valorisation de fauteuils roulants (aides à la mobilité). Deux châssis de fauteuils roulants sont analysés du point de vue de la fiabilité dans le but de les comparer. On valide ensuite le principe d'analyse de la maintenabilité sur des exemples de la littérature puis sur un fauteuil roulant partiel.

Conclusion

Sous cette rubrique nous faisons le bilan des travaux réalisés et des limites des approches adoptées. On présente ensuite quelques perspectives de développement.

Partie A

Introduction

Chapitre 1.

L'activité de validation

Dans cette thèse, on se penche sur la problématique portant sur la prise en compte de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception, ces deux caractéristiques étant généralement validées une fois la conception complétée.

Ce chapitre présente l'importance de l'étape de validation et souligne les impacts d'une validation a posteriori des performances et des caractéristiques complexes, en particulier sur les coûts et sur les délais avant la mise sur le marché.

1. La validation dans le processus de conception

1.1. Introduction

Un produit, ou un service, est traditionnellement conçu à partir d'un cahier des charges, selon les besoins exprimés par un client, une étude de marché ou des séances de remue-méninges. Selon AFNOR (1991), le cahier des charges est un document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en termes de fonctions de services et de contraintes. Des critères d'appréciation, avec seuils et tolérances, sont associés à chacun de ces éléments.

La Figure 1.1 présente le processus de conception, de l'étude de marché à la validation du concept. À partir du cahier des charges, le concepteur ou l'équipe de conception va proposer une ou plusieurs solutions répondant au besoin identifié. À ce stade, on doit s'assurer que ces alternatives peuvent franchir les étapes ultérieures du cycle de vie (e.g. fabrication, utilisation, etc.).

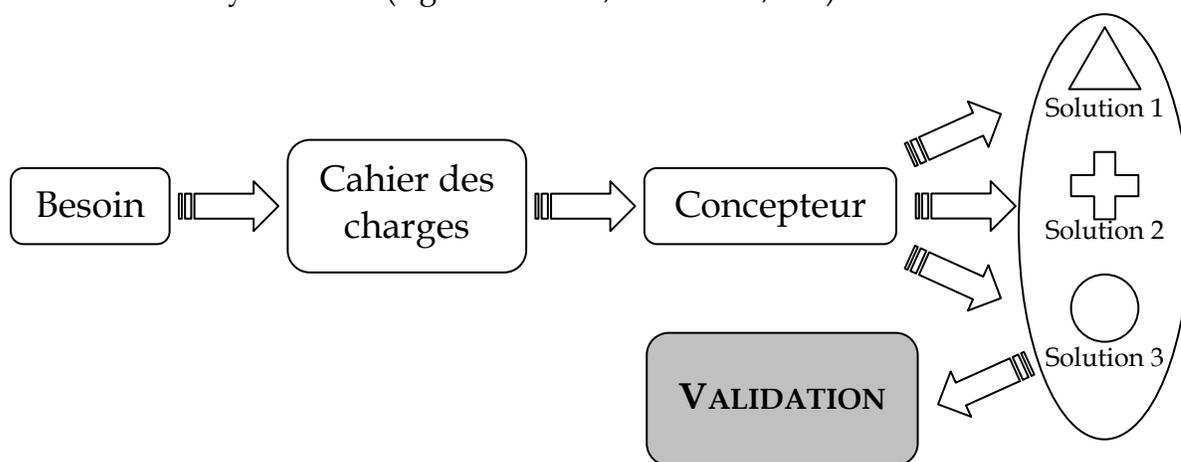


Figure 1.1 : Processus de conception de produit

Ce processus peut être abordé séquentiellement par l'équipe de conception, où une activité n'est initiée qu'une fois les activités préalables complétées, ou de façon concurrente, où l'ensemble des activités est pris en compte à toutes les étapes. L'Annexe I détaille les différences entre la conception séquentielle et l'ingénierie

concourante. On y présente aussi les méthodes et outils qui ont été développés pour supporter les intervenants dans le processus de création.

1.2. Importance de l'étape validation

L'objectif des méthodes et outils de l'ingénierie concourante est d'acquérir un avantage concurrentiel en lançant sur le marché des produits rapidement avant que la concurrence ne réagisse. Tous ces éléments visent à obtenir un produit « bon du premier coup » et permettent d'aborder le processus de conception de manière plus efficace.

Cependant, ces approches ne dispensent pas l'équipe de conception de valider les performances du produit conçu, car il est nécessaire de vérifier que les objectifs sont effectivement atteints. En effet, si les outils développés permettent d'évaluer certaines caractéristiques, ils ont toutefois plusieurs limites, en particulier lorsque les caractéristiques à valider exigent des essais selon une mise en situation définie, dans un ou plusieurs environnements d'utilisation. La définition de ce type de caractéristique s'exprime généralement sous la forme d'une probabilité, c'est le cas de la fiabilité et de la maintenabilité.

2. La validation de la conception

Pour des raisons contractuelles, législatives ou de sécurité, l'entreprise manufacturière doit vérifier, voire même faire la preuve, que la ou les solutions qu'elle propose répondent bien aux spécifications du cahier des charges, des normes et de toutes les exigences de mise en marché.

2.1. Introduction

La validation est définie, selon le projet de norme NF L 00-007 B, comme « l'acte par lequel le réalisateur du produit ou du procédé le reconnaît capable de satisfaire le besoin pour lequel il a été défini, après l'avoir vérifié en général par le suivi de sa première utilisation ».

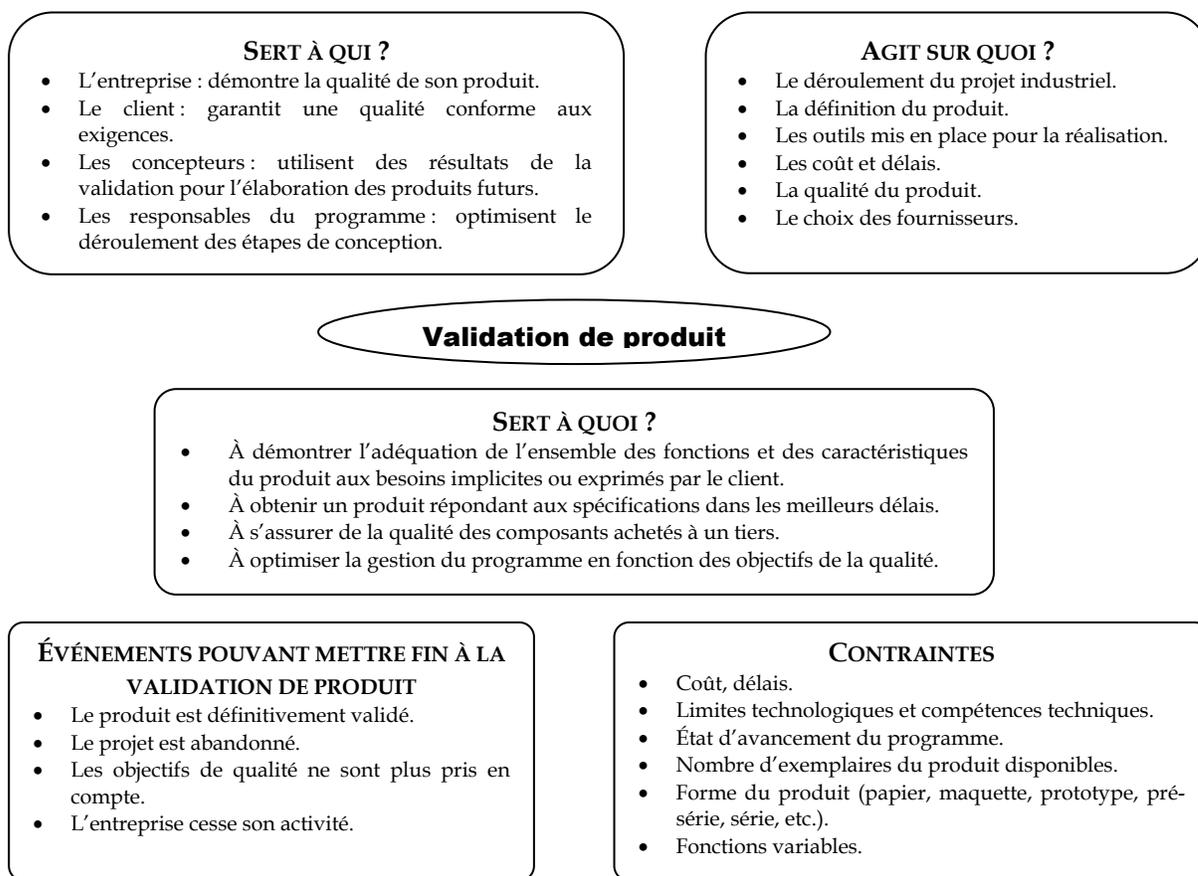


Figure 1.2 : Analyse fonctionnelle de la validation produit - Ferrari *et al.* (2000)

La validation de produit se doit de répondre à la question suivante : « est-ce que le produit est conforme aux exigences de qualité spécifiées ou implicites ? ». La Figure 1.2 présente une analyse fonctionnelle de la validation, définissant l'intérêt de la validation de produit et les contraintes qui lui sont associées. Dans la section suivante, nous porterons une attention particulière à la case « contraintes » qui identifie les éléments limitatifs de la portée des essais.

2.2. Les essais de validation

Les essais ont pour principaux objectifs de s'assurer « concrètement » de la conformité du produit aux exigences de qualité et aux spécifications du cahier des charges. Avec les exigences grandissantes de la clientèle, les essais ont pris une part de plus en plus importante dans le processus de validation. Leur déroulement dépend, entre autres, des objectifs du test et des performances à valider (Nelson (1990) a identifié 14 objectifs).

La caractéristique à valider peut être une performance ou une propriété facilement mesurable (à l'aide d'un instrument approprié). La validation peut aussi porter sur des comportements complexes (e.g. la fiabilité et la maintenabilité). Dans ce cas, les essais interviennent plus tard, une fois que le design est bien défini et qu'il est possible de prendre en compte l'environnement d'exploitation.

La disponibilité « a posteriori » de ces évaluations pose des problèmes de délais et de coûts. De plus, pour s'assurer d'un certain niveau de confiance, les tests de validation sont effectués sur un échantillon de grande taille. On retrouve alors les mêmes problèmes de coûts car plus on souhaite un niveau de confiance élevé plus la taille de l'échantillon augmente. Le Tableau 1.1 détaille les impacts des tests a posteriori.

Tableau 1.1 : Impact des essais sur les coûts et les délais

	Tests a posteriori	Taille des échantillons
Délais	<p>Les essais sont à la base d'un long processus d'ajustement du produit et, si une erreur est détectée, le processus de conception revient à l'étape de définition pour proposer une alternative qui sera retestée.</p> <p>Les délais de réaction peuvent alors compter plusieurs mois car les itérations de conception aux réactions les plus rapides sont habituellement dans la phase de définition, où les idées sont généralement générées, vérifiées et sélectionnées ou rejetées dans des délais de l'ordre de la semaine (Sellgren & Drogou (1998)).</p>	<p>La taille de l'échantillon influence directement le niveau de confiance dans les résultats des tests. De plus, un nombre important de tests va apporter une meilleure connaissance du produit et de ses réactions et faciliter l'amélioration du produit pour se rapprocher des objectifs qualité désirés.</p> <p>Bien souvent, les tests sont réalisés sur des bancs d'essai dont le nombre est inférieur au nombre de prototypes à tester. Les tests sont consécutifs et rallongent les délais.</p> <p>D'autre part, comment tester la fiabilité d'un produit ayant une durée de vie de plusieurs années ? Les essais accélérés (provoquant une usure plus rapide de manière contrôlée) sont une possibilité de réponse à cette problématique.</p>
Coûts	<p>Si un problème est détecté au stade de la production par exemple, il faut revoir la conception à partir d'une étape antérieure et réengager une grande partie des dépenses déjà investies. La Figure 1.3 montre que cela peut s'élever jusqu'à environ 75% du coût du produit.</p>	<p>Les prototypes sont souvent très coûteux car les moyens de fabrication de masse ne sont pas mobilisés. Par conséquent, la fabrication semi-manuelle des pièces implique des coûts de main d'œuvre (et les délais). De plus, il n'y a pas d'économie d'échelle.</p> <p>Si les tests impliquent des personnes (employés ou usagers tests), il y a un coût associé à leur formation, une rétribution, etc.</p>

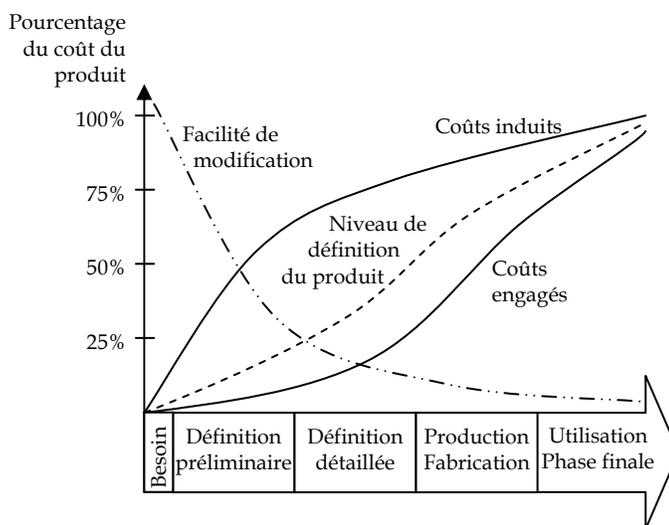


Figure 1.3 : Coûts rapportés au cycle de conception – Salomone (1995)

2.3. Conclusion

Les essais de validation effectués a posteriori sont coûteux et requièrent beaucoup de temps et de moyens. Pour la validation de la fiabilité, la taille de l'échantillon à tester augmente avec le niveau de fiabilité à valider et l'intervalle de confiance requis.

Dans la prochaine section, une procédure utilisant des prototypes virtuels et un banc d'essai virtuel est mise en place pour permettre une évaluation a priori, au stade de la définition du produit.

Chapitre 2.

L'évaluation comportementale

Le constat posé par le précédent chapitre nous amène à proposer une évaluation a priori des caractéristiques. Ce chapitre définit l'évaluation comportementale et décrit l'approche FSC (Fonctionnelle-Structurelle-Comportementale) qui détermine les objectifs et la méthodologie à suivre pour que l'analyse d'un comportement donné puisse s'intégrer dans un environnement de conception assisté par ordinateur (CAO).

1. Intégration de l'évaluation au stade de la définition du produit

1.1. Introduction

De nombreux travaux portent sur l'intégration des contraintes liées aux procédés de fabrication ou à la tenue mécanique ou thermique. Par contre, on note peu de travaux consacrés à l'évaluation des performances des produits sur tout leur cycle de vie. Au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*, États-Unis), les recherches menées par le laboratoire *Industrial Performance Centre* et l'équipe *DSM (Design Structure Matrix)* portent sur l'élaboration de nouvelles méthodes de modélisation des données du cycle de vie, permettant d'intégrer des données distribuées, et d'en produire des vues spécifiques requises pour des évaluations de performances.

Au MIT, Suh (1990) a développé la conception axiomatique (*axiomatic design*) qui se base sur des axiomes pour prendre de bonnes décisions dans le processus de conception. Il s'oppose ainsi à d'autres approches considérant que la conception requiert de l'expérience et ne peut être enseignée ou abordant la conception par l'optimisation, avec des outils informatiques adaptés.

L'approche axiomatique de la conception a pour objectif de généraliser les règles de conception par des théorèmes et des corollaires. Suh a identifié deux axiomes (Albano *et al.* (1999), Hugh (2001)) :

1. l'axiome d'indépendance qui postule que l'indépendance des fonctions requises doit être assurée;
2. l'axiome d'information qui définit la meilleure conception comme étant celle qui a la plus grande probabilité de succès.

En Angleterre, trois des sept thèmes de recherche du *Cambridge Engineering Design Centre (EDC)* portent sur la validation de la conception, la gestion des connaissances associées au produit et l'optimisation en conception. En France, ces problématiques sont abordées par trois groupes de travail du GDR/MACS : le groupe *AMOEP (Approches et Modèles pour l'Évaluation des Performances)*, le

groupe *IS3C* (Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du cycle de vie) et le groupe *MACOD* (Modélisation et Optimisation de la Maintenance Coopérative et Distribuée). Ce dernier s'intéresse particulièrement à l'intégration de la maintenabilité en conception.

1.2. L'évaluation déterministe

Les outils d'évaluation actuels, intégrés à la conception, sont relativement sectoriels (e.g. calcul de résistance mécanique, dynamique des fluides, etc.) et bien souvent utilisés de manière déterministe. À titre d'exemple, on vérifie qu'une configuration donnée de la structure d'un produit résiste à une charge spécifique. Ces outils sont alors limités à tester divers scénarios (e.g. charge faible, moyenne et forte).

La formulation déterministe, la plus courante en règles de conception et en standards de vérification des structures en fatigue, conduit à des critères de calcul qui n'utilisent qu'un seul coefficient de sécurité global, aussi appelé coefficient d'ignorance. Cette dénomination humoristique reflète en fait les limites de cette pratique dans laquelle la prise en compte de toutes les incertitudes et marges de sécurité est ramenée à un seul coefficient (Huther (2004)).

Il est difficile, voire impossible, de dire quelles sont les incertitudes et la probabilité de défaillance qu'intègre ce coefficient. Or, l'utilisation d'un tel coefficient conduit bien souvent à un surdimensionnement de la structure. Il est souvent envisagé de réduire le coefficient de sécurité, pour des questions de coût, de poids, etc. Dans ce cas, le risque de défaillance augmente, sans qu'il soit possible de le quantifier ou de déterminer s'il respecte un seuil acceptable. C'est cette limitation qui a conduit les ingénieurs à s'intéresser de près aux approches et formulations probabilistes.

1.3. La prise en compte de l'environnement

Si on s'intéresse à la fiabilité ou à la maintenabilité, le postulat déterministe est pris en défaut car plusieurs paramètres prennent des valeurs aléatoires en raison de la variabilité de la qualité des matériaux utilisés, des conditions de fabrication du produit, du contexte d'utilisation et celui dans lequel il sera réparé, etc.

Pour bien analyser de tels comportements, il est important de considérer l'environnement. Le concepteur est principalement intéressé par le comportement du produit dans son environnement de fabrication (conditions de fabrication, contraintes métier, etc.), car cela a un impact direct sur ses caractéristiques ou performances finales. Pour l'utilisateur, la préoccupation est de savoir si le produit est apte à remplir sa mission dans l'environnement d'exploitation (scénarios d'utilisation, conditions climatiques, etc.).

1.4. Bilan

L'évaluation des performances d'un produit dans un environnement aléatoire se heurte à un certain nombre de limites. L'approche classique utilisant des prototypes physiques intervient assez tard dans le processus de conception. Quant aux approches utilisées pour une évaluation plus précoce, la plupart sont déterministes et font abstraction de certaines variations parfois très importantes.

Certains domaines tels que la fabricabilité ont fait l'objet de nombreuses recherches et on est maintenant capable d'intégrer des contraintes métier au stade de la conception. Citons l'exemple de la compagnie eMachineshop (2004) offrant à ses clients, qui peuvent être novices en fabrication, de concevoir leur produit en ayant l'assurance qu'il sera fabricable. Dans un article publié par Associated Press (2004), le président de la compagnie exprime son ambition « *to become the Amazon in the manufacturing segment* ».

Dans les domaines de la fiabilité et de la maintenabilité, par contre, les avancées sont moins poussées et le potentiel de développement est plus important. Il ne s'agit plus seulement d'intégrer des contraintes métiers mais aussi la grande variabilité de l'environnement.

2. L'approche d'intégration FSC

2.1. L'évaluation comportementale intégrée

Il est important de disposer d'une approche collaborative avec l'environnement CAO et pluridisciplinaire pour regrouper les compétences habituellement réparties dans plusieurs équipes de concepteurs. Il est également important d'effectuer une évaluation a priori, en particulier pour la fiabilité et la maintenabilité auxquelles on s'intéresse.

Les prototypes virtuels que nous utilisons pour répondre à ces objectifs sont élaborés dans un cadre bien précis. La Figure 2.1 positionne notre contribution dans le processus de conception et d'évaluation.

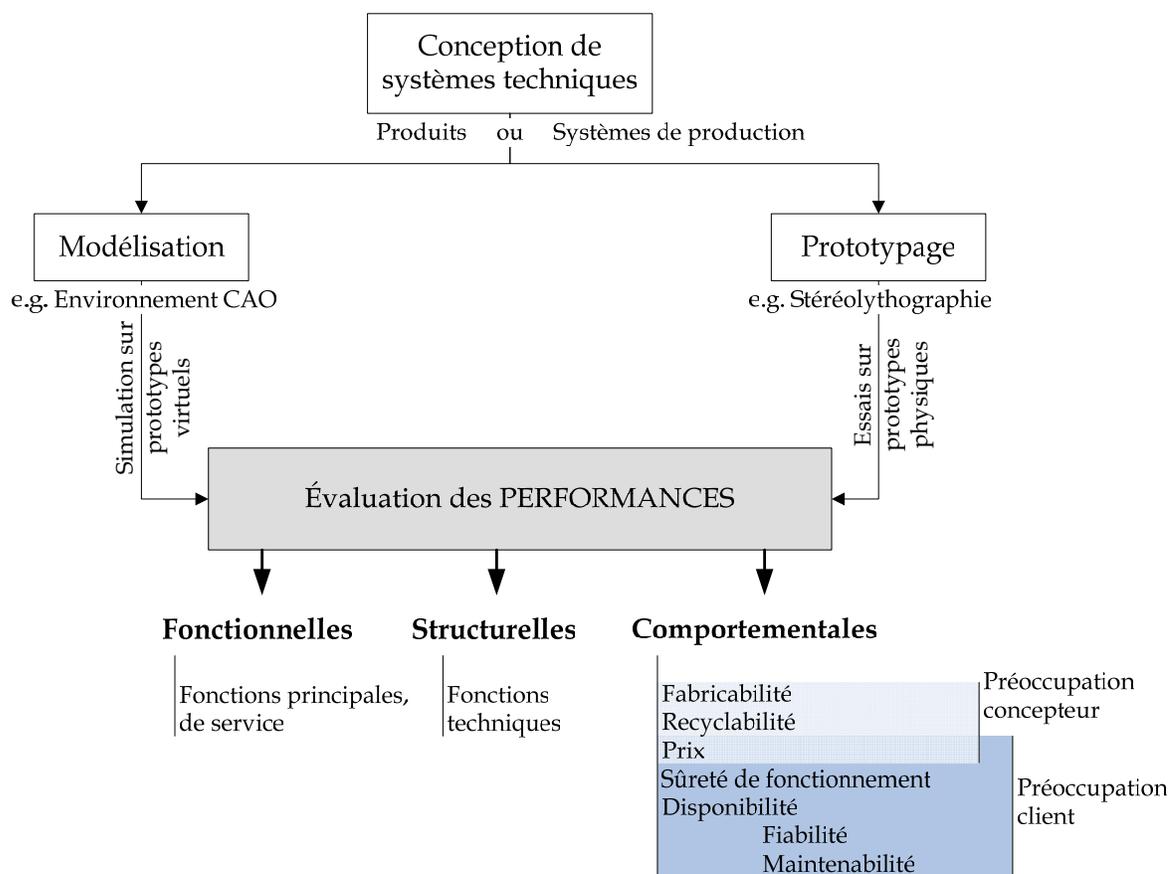


Figure 2.1 : Positionnements de nos travaux dans le processus de conception

Cette figure fait également apparaître la distinction entre 3 classes de performances. Prenons l'exemple d'un produit ou d'un service qui doit répondre au besoin suivant : transporter une charge d'un point *A* à un point *B*. La terminologie relative aux performances est la suivante :

- Les performances **fonctionnelles** visent les **fonctions principales** et de services. Dans l'exemple, le produit proposé doit être capable d'accueillir une charge, de l'arrimer, de se déplacer, de se diriger, etc.
- Les performances **structurelles** visent les **fonctions techniques** : comment est réalisée chaque fonction de service ? Par une ou plusieurs fonctions techniques, concrétisées par des composantes mécaniques. Si l'exemple est un transport terrestre, le concepteur s'orientera vers un système éprouvé, la roue.
- Les performances **comportementales** analysent le comportement du produit dans différentes phases de son cycle de vie. Le concepteur s'intéressera plus à la fabricabilité du produit, à sa recyclabilité, à son prix, etc. Cette dernière préoccupation est partagée avec le client, qui prêtera également une grande attention à la sûreté de fonctionnement, à la disponibilité, etc.

Pour les performances comportementales fiabilité et maintenabilité, notre objectif consiste à proposer des indices de performance I_j pour chacune des différentes alternatives de conception A_j proposées, en CAO, par le concepteur. Ces indices doivent permettre la comparaison relative de deux alternatives de conception A_j et A_k . Pour la fiabilité (R) par exemple, il s'agit de vérifier si $R_j^V < R_k^V$ ou $R_j^V \geq R_k^V$.

2.2. L'approche Fonctionnelle-Structurelle-Comportementale

L'approche Fonctionnelle-Structurelle-Comportementale (FSC) permet d'évaluer les performances comportementales à fort contenu sémantique, en temps réel et dans un environnement CAO (Coulibaly *et al.* (1998)).

L'évaluation comportementale fournit des indicateurs permettant d'évaluer une solution de produit à partir de critères fixés par l'analyse fonctionnelle du produit et de vérifier le respect de règles de « bon comportement ». Le processus doit permettre au concepteur d'améliorer, le cas échéant, l'alternative dont les

caractéristiques sont les plus proches des spécifications du cahier des charges. Dans le cas d'un rejet, la solution est mémorisée dans un historique afin d'éviter des bouclages inutiles mais aussi pour donner une indication sur les améliorations à apporter à la solution jugée intéressante.

La Figure 2.2 présente une boucle de rétroaction, permettant d'envisager une amélioration des solutions. Dans ce mémoire, nous n'abordons pas ce problème. C'est le concepteur, au vu des valeurs des indicateurs de performance, qui prend les décisions qu'il juge nécessaires.

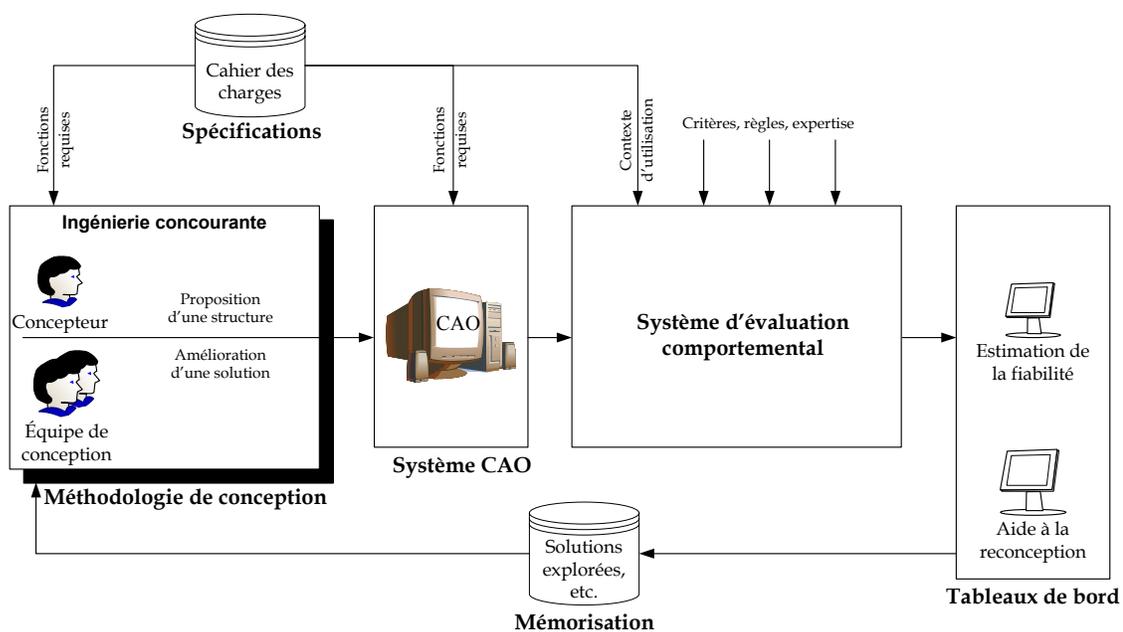


Figure 2.2 : Évaluation comportementale

Le produit est représenté par un modèle objet FSC, avec des caractéristiques fonctionnelles (fonctions de service), une structure (modèle géométrique enrichi) et des comportements propres dans chaque étape du cycle de vie (Figure 2.3). Ce modèle orienté-objets sert de support aux différentes analyses dans les espaces de comportement considérés par le cahier des charges. L'approche FSC permet ainsi de standardiser l'intégration des divers espaces comportementaux.

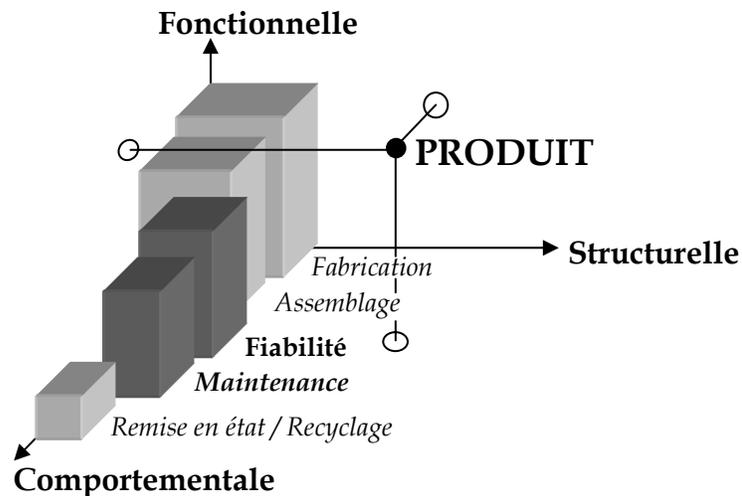


Figure 2.3 : Dimensions Fonctionnelle-Structurelle-Comportementale de FSC

2.3. Les trois modèles de FSC

2.3.1 Représentation du modèle Fonctionnel

Les fonctions de service s'expriment selon le formalisme classique de l'Analyse Fonctionnelle, à travers des relations reliant deux éléments appartenant au milieu environnant du produit et répondant aux questions : **À qui** le produit sert-il ? **Sur quoi** le produit agit-il pour réaliser cette fonction ? Et **pourquoi** est-il nécessaire de réaliser cette fonction ?

Le modèle Fonctionnel est représenté par un diagramme pieuvre faisant apparaître les éléments extérieurs (E_i) reliés au produit, les fonctions de service (FS_i) et les contraintes (C_i) qui leur sont associées (Figure 2.4). L'Annexe II.1 propose une manière de procéder au recensement de ces fonctions, tandis que l'Annexe II.2 traite d'une technique pour organiser les différentes classes de fonctions (de service, techniques).

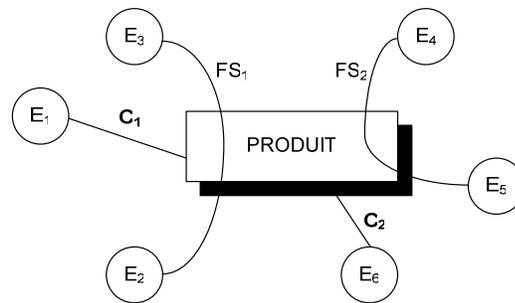


Figure 2.4 : Diagramme pieuvre pour le modèle Fonctionnel

2.3.1.a Fonctions de service du produit

Les fonctions de service du produit, considéré dans son ensemble, sont destinées à satisfaire directement les besoins ou désirs de l'utilisateur. L'ensemble de ces fonctions constitue la définition commerciale du produit.

La définition du mot « fonction » est liée aux notions d'activité, d'action, de service à rendre, de besoin à satisfaire. La norme NF X 50-150 (AFNOR (1991)) propose la définition suivante : « action d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimée exclusivement en terme de finalité ». La fonction exprime un « résultat » attendu et non la solution permettant d'obtenir ce résultat. Décrire un résultat sous la forme de fonctions à satisfaire permet l'expression fonctionnelle du besoin.

Crowe *et al.* (2001) recommandent plusieurs moyens afin de mieux comprendre les besoins des utilisateurs. La veille technologique, l'ingénierie inverse et l'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) sont susceptibles d'améliorer les produits dans cet objectif. Traditionnellement, l'AMDEC est une activité post-conception. Cependant, son utilisation au stade de la conception peut aider le concepteur à optimiser le produit, en particulier dans un processus de conception pour la fiabilité (*DfR*), car elle aide à mieux maîtriser les besoins du client et les capacités du produit.

Lors de la conception, on privilégie les fonctions à l'origine de l'essentiel du coût du produit. Pour cette thèse, l'impact fonctionnel est abordé selon la criticité des

fonctions : est-ce que le produit remplit encore sa mission sans une fonction donnée ? Est-il encore sécuritaire ?

Dans le cas d'un groupe de travail multi-disciplinaire, il existe une méthode simple, fréquemment employée, qui consiste à attribuer un coefficient d'importance à chaque fonction après son identification. Une échelle de pondération de 1 à 5 est généralement suffisante mais pour des cas délicats il est possible d'utiliser une échelle de 1 à 10. Notons toutefois que plus l'échelle est fine, plus elle est susceptible de provoquer des débats inutiles dans le groupe de travail et de déclencher ce qu'il est convenu d'appeler une bataille d'experts.

Lorsque certaines difficultés apparaissent pour obtenir le consensus du groupe de travail sur le choix d'un coefficient, on peut recourir à la méthode du tri croisé. Dans le même esprit, nous utiliserons une approche originale pour notre application (Partie D) : la technique TRIAGE, Technique de Recherche de l'Information par l'Animation d'un Groupe Expert (Gervais *et al.* (2000)).

2.3.1.b Fonctions techniques des éléments du produit

Les fonctions techniques sont en quelque sorte les supports des fonctions de service. Sans elles, ces dernières ne pourraient pas être satisfaites. Généralement, on essaye de satisfaire la définition d'une fonction de service avec un minimum de fonctions techniques. Une bonne conception du produit se mesure à la proportion de fonctions techniques par rapport aux fonctions de service. Selon Tassinari (1997), le rendement d'une solution est bon lorsque ce ratio est compris entre 0.5 et 0.7.

2.3.2 Représentation du modèle Structurel

Le modèle structurel est la représentation géométrique et topologique réalisée à l'aide d'un système CAO. Il comprend l'ensemble des modèles des différents composants du produit ainsi que les relations d'assemblage qui les relient. Dans le

cas d'un modèle CAO, on retrouve des fonctions de construction (*Features*) comme des trous, des rainures, des épaulements ou des éléments d'une bibliothèque, éventuellement modifiés (e.g. visserie).

En première approximation, le modèle Structurel est une représentation dérivée du modèle Fonctionnel où on remplace chaque fonction de service par le sous-ensemble de composants (pièces, sous-ensembles, accessoires) qui réalise cette fonction. Ce processus aboutit à la création de sous-ensembles fonctionnels qui sont ensuite assemblés pour former le produit final.

2.3.3 Représentation du modèle Comportemental

Chaque point de vue de l'espace comportemental constitue un domaine d'analyse caractérisé, d'une part, par des critères à vérifier et, d'autre part, par des contraintes à satisfaire. Ces éléments relèvent d'une expertise issue du savoir-faire du domaine comportemental considéré. Dans l'approche FSC, cette expertise est intégrée dans une base de règles et de connaissances. Cette base est mise à jour et enrichie pour l'évaluation de produit dans tout nouveau domaine comportemental.

Le **critère choisi** est influencé par divers **facteurs**. Ceux-ci doivent être **identifiés** puis **caractérisés** par un ou plusieurs **paramètres**. La **formalisation** des facteurs (leur expression en fonction de leurs paramètres) relève de l'expertise intégrée dans la base de connaissance. Selon la nature et la complexité des critères, nous utilisons des expressions analytiques, des raisonnements algorithmiques, etc.

L'évaluation des critères repose sur les paramètres disponibles dans les systèmes CAO, auxquels le concepteur ajoute des **propriétés sémantiques**, généralement absentes de la CAO : les propriétés mécaniques, les typologies de liaisons mécaniques, les conditions environnementales (température, humidité, etc.) et autres.

D'une manière générale, l'analyse comportementale mise en place tient compte de l'environnement d'exploitation du produit analysé. Ainsi, lors du recensement des différents critères et facteurs, nous distinguons deux classes : les éléments **intrinsèques** (qui se rapportent au produit) et les éléments **extrinsèques** (qui se rapportent à l'environnement).

2.4. Architecture orientée objets

Pour la mise en œuvre de l'évaluation comportementale, une architecture de système CAO a été envisagée par Coulibaly *et al.* (2000). Cette architecture considère un système de CAO composé de deux sous-systèmes de modélisation du produit. Le premier sous-système est un système de CAO classique basé sur un modèleur géométrique ou topologique comme ParasolidTm ou AcisTm. Le second sous-système assure la gestion des contraintes dimensionnelles et géométriques.

Cette architecture nous a conduit à développer une architecture orientée objets, intégrant un système de gestion de contraintes pour l'évaluation comportementale, indépendante du système de CAO. La Figure 2.5 présente l'architecture de ce système avec les principales classes et quelques exemples de méthodes et propriétés.

À partir d'un cahier des charges, un objet **Concepteur** va développer une représentation CAO du produit qu'il veut construire. Il dispose d'un certain nombre d'attributs (e.g. ses *Connaissances*) et de méthodes (e.g. *conçoitSelonIngenierieSimultanee*). Il utilise un système CAO qui possède également des méthodes et attributs (e.g. *calculeRésistance* et *bibliothequeVisserie*). Ce dernier est nécessaire à l'élaboration du **ModeleCAO** composé de *Surfaces* et de *Volumes*.

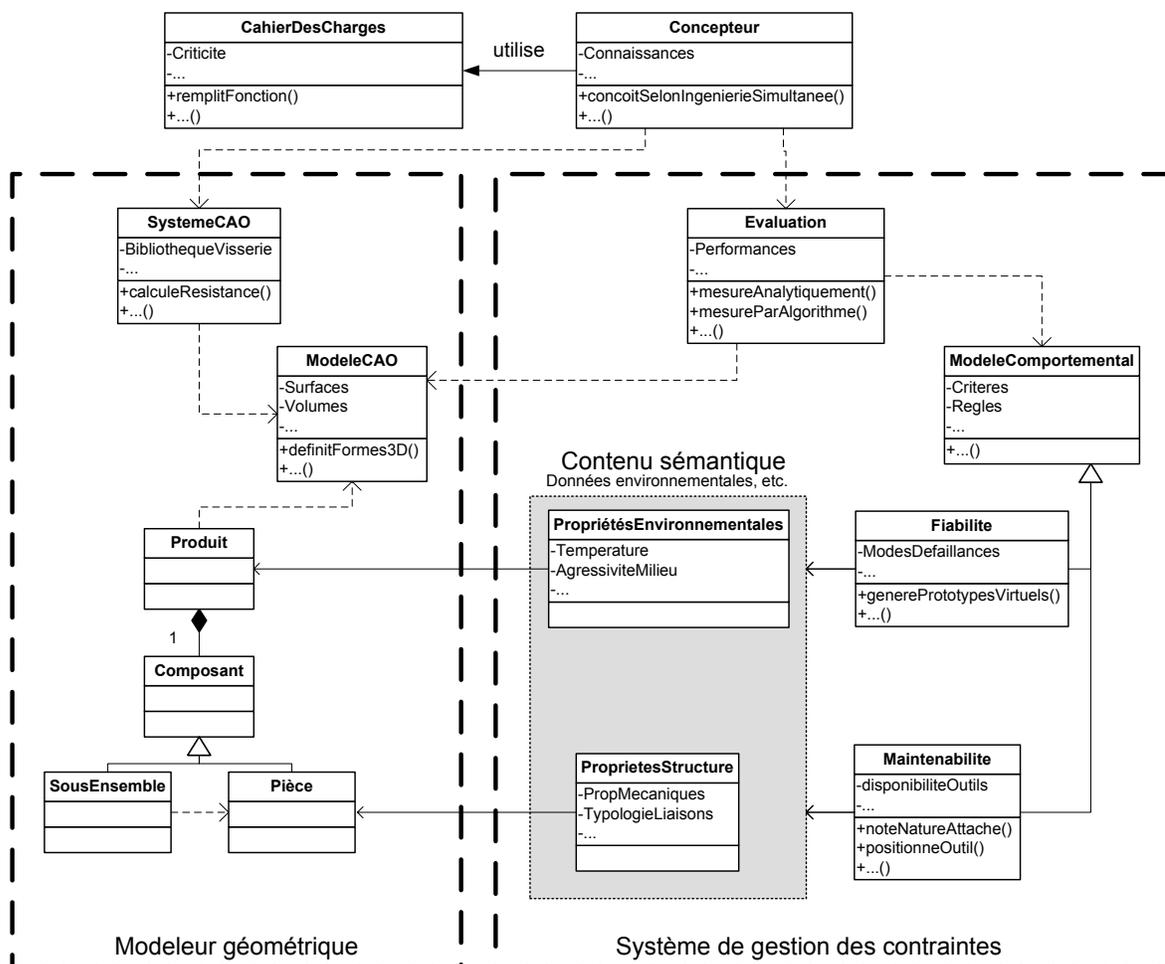


Figure 2.5 : Classes du modèle objet d'évaluation comportementale

Cette entité est au cœur de notre modèle puisque c'est à partir du **ModeleCAO** que l'évaluation comportementale est réalisée. Ses données sont utilisées, entre autres, pour effectuer la mesure des performances.

Afin de conserver l'intégrité des modeleurs géométriques commerciaux existants et pouvoir leur adjoindre plus facilement le système de gestion des contraintes, l'architecture proposée respecte deux contraintes :

- séparer les informations contextuelles pour ne pas alourdir le modèle CAO de base par des informations inutiles (e.g. les outils de maintenance quand c'est seulement la fiabilité qui doit être évaluée) ;
- réduire l'impact sur le modèle lors de l'ajout d'un module d'évaluation comportemental, dans un nouveau domaine.

C'est pourquoi on retrouve la méthode *noteNatureAttache(Piece p1, Piece p2)* dans la classe **Maintenabilite**, alors qu'on pourrait l'intégrer à une classe du modeleur géométrique (dans une classe **Liaison** par exemple). Ainsi, l'intégration et les améliorations ultérieures se feront plus facilement par une simple mise à jour du système de gestion des contraintes.

Les parties B et C de ce manuscrit tentent de valider ce concept en traitant la fiabilité et la maintenabilité du produit.

Partie B

La fiabilité en conception

Chapitre 3.

La fiabilité

Ce chapitre décline pour l'étude de la fiabilité, les objectifs spécifiques à l'analyse d'une caractéristique comportementale donnée qui ont été introduits précédemment. Ce chapitre définit la fiabilité ainsi que les grandeurs qui la caractérise. On y présente diverses techniques pour mesurer la fiabilité soit à partir de l'analyse de données a posteriori suffisantes, soit à partir d'un nombre réduit de données issues d'essais sur des prototypes physiques. Tout d'abord, on fait un bilan des approches qualitatives et quantitatives qui sont utilisées pour prévenir les problèmes de fiabilité lors de la validation et pour prévoir la fiabilité d'un système à partir de la connaissance de la fiabilité de ses composants. Puis nous discutons de l'approche analytique de la fiabilité (approche contrainte/résistance), des méthodes d'évaluation probabiliste (simulation de Monte Carlo, méthodes de premier et de second ordre ou *FORM/SORM* pour *First Order Reliability Method/Second Order Reliability Method*) et de l'algèbre des variables aléatoires.

1. Introduction

Dans les approches déterministes, la résistance d'un système (sa capacité à résister aux chargements subis) est supposée connue et invariable dans le temps, quel que soit le système. En réalité, cette capacité peut être différente selon le produit, et ce pour différentes raisons : variations des propriétés des matériaux, des tolérances dimensionnelles et autres facteurs qui affectent la tenue d'un composant ou d'un système composé de plusieurs composants (erreur dans le processus de fabrication, etc.). En outre, les conditions d'exploitation ne sont pas, elles non plus, parfaitement déterminées. Ces deux éléments d'incertitude, charge et capacité, rendent aléatoire le bon fonctionnement du produit.

1.1. Définition

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée (NF X 060-010 - AFNOR (1991)). Ainsi, la durée de vie d'un système est utilisée pour mesurer la quantité de service rendu. D'une manière générale, on mesure la durée de vie d'un système par le nombre d'heures durant lesquelles il a effectivement fonctionné (Aït-Kadi (2002)).

La durée de vie (T) d'un système est une variable aléatoire non négative, à partir de laquelle la loi de dégradation du système peut être déterminée. L'équation (3.1) exprime la probabilité que la durée de vie T du système soit comprise entre t et $t+dt$, ou encore la probabilité qu'il tombe en panne entre t et $t+dt$.

$$f(t).dt = \Pr(t < \text{durée de vie } T \leq t + dt) \quad (3.1)$$

avec $f(t)$ la fonction de densité de probabilité associée aux durées de vie. Quant à la distribution des durées de vie $F(t)$ et la fonction de fiabilité $R(t)$, elles sont reliées par l'équation (3.2).

$$F(t) = \Pr(\text{durée de vie } T \leq t) \quad \text{et} \quad R(t) = \Pr(\text{durée de vie } T > t) \quad (3.2)$$

Le taux de panne, $r(t)$, est la quatrième fonction permettant de caractériser la loi de dégradation d'un système. Il s'agit de la probabilité conditionnelle de défaillance par unité de temps d'un système ayant survécu jusqu'à t . Cependant, la loi de dégradation d'un système est complètement définie par la connaissance d'une seule de ces 4 caractéristiques. Le Tableau 3.1 présente ces relations.

Tableau 3.1 : Relations entre $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ ou $r(t)$

	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$r(t)$
$f(t) =$	-	$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$r(t) \cdot e^{-\int_0^t r(x) dx}$
$F(t) =$	$\int_0^t f(x) dx$	-	$1 - R(t)$	$1 - e^{-\int_0^t r(x) dx}$
$R(t) =$	$\int_t^\infty f(x) dx$	$1 - F(t)$	-	$e^{-\int_0^t r(x) dx}$
$r(t) =$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x) dx}$	$\frac{dF(t)}{1 - F(t)}$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$	-

La fiabilité est une fonction décroissante du temps (Figure 3.1), de telle manière que $R(t_1) > R(t_2)$ si $t_1 < t_2$.

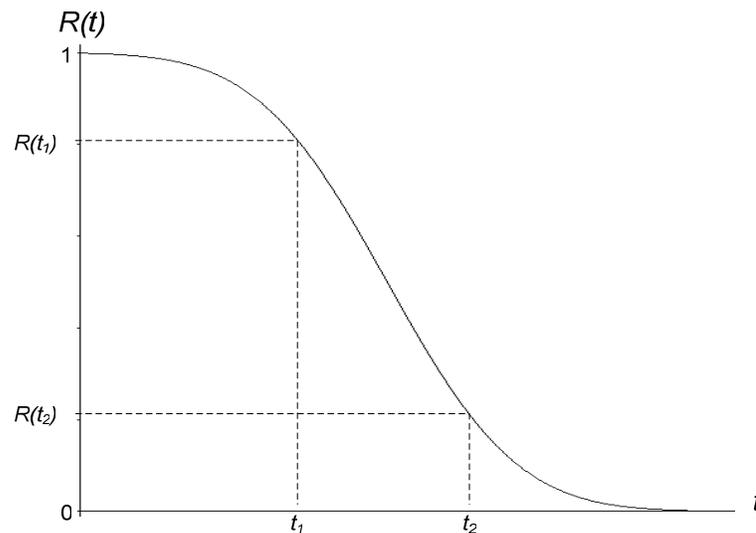


Figure 3.1 : La fiabilité décroissante avec le temps

Le comportement temporel du taux de panne est représenté par la courbe « en baignoire » de la Figure 3.2. Cette courbe comporte trois phases pour lesquelles on détaille les causes potentielles et les actions à entreprendre pour améliorer le comportement du système.

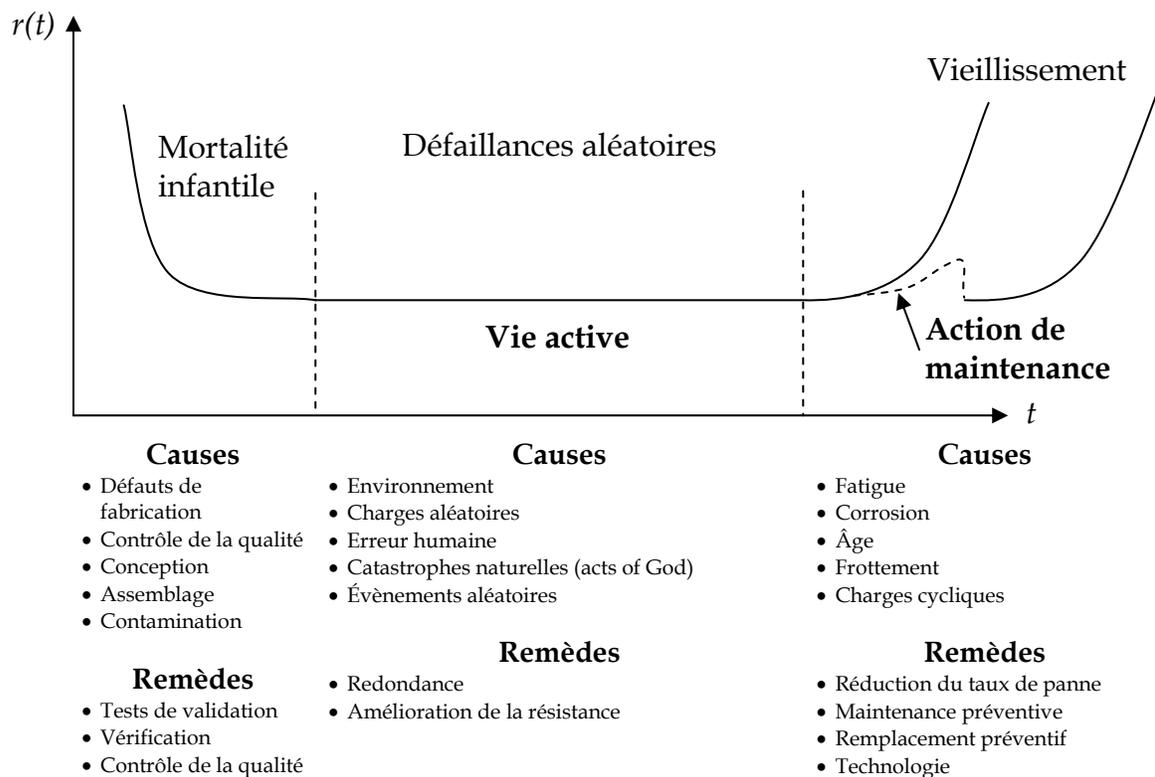


Figure 3.2 : Évolution du taux de panne en courbe « baignoire »

Selon le type de produit (électronique, informatique ou mécanique), l'allure de la courbe peut changer. Lewis (1987) présente plusieurs types de courbes en baignoire (Figure 3.3).

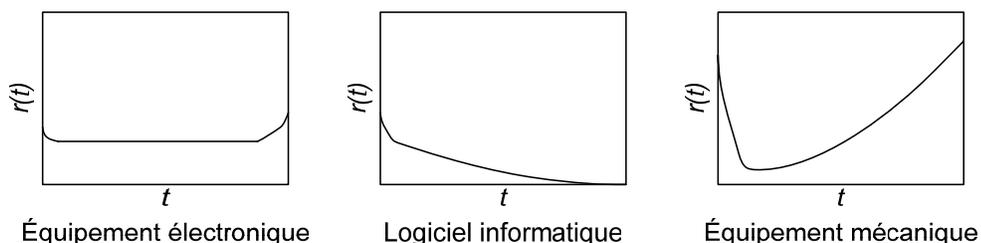


Figure 3.3 : Allures caractéristiques du taux de panne - Lewis (1987)

1.2. Estimation des indices de fiabilité

1.2.1 Méthodes

Pour mesurer la fiabilité, il faut disposer d'informations sur les durées de vie. Celles-ci peuvent être issues d'historiques d'exploitation ou d'expériences sur des prototypes. Si on soumet à l'essai N éléments identiques, dans les mêmes conditions, à l'instant t où les essais se terminent, on a $N_s(t)$ éléments qui ont survécu et $N_f(t)$ qui ont échoué ($N_s(t) + N_f(t) = N$ car il n'y a pas de remplacement à la panne). À l'issue de ces essais, on est en mesure de déterminer le taux de panne et la fonction de densité de probabilité (équation (3.3)), la fiabilité et la probabilité de défaillance (équation (3.4)) et les autres caractéristiques de la fiabilité (Aït-Kadi (2002)).

$$r(t) = \frac{N_f(t+\Delta) - N_f(t)}{N_s(t) \cdot \Delta} \quad \text{et} \quad f(t) = \frac{N_f(t+\Delta) - N_f(t)}{N \cdot \Delta} \quad (3.3)$$

$$R(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_s(t)}{N} \quad \text{et} \quad F(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_f(t)}{N} \quad (3.4)$$

La valeur de Δ peut être obtenue par la formule de Sturges (relation (3.5)), où r est l'étendue de la gamme des durées de vie.

$$\Delta \approx r \cdot \frac{1}{1 + 3.3 \cdot \log(N)} \quad (3.5)$$

Cette analyse par intervalles n'est pas facilement manipulable pour les calculs de fiabilité (dérivation et intégration), c'est pourquoi on lui préfère l'utilisation de fonctions mathématiques : les fonctions de densité de probabilité. Ces lois peuvent être discrètes (loi binomiale, de Poisson) ou continues (loi normale, log-normale, exponentielle, Weibull). L'Annexe III définit quelques unes des lois les plus couramment utilisées, avec leurs caractéristiques.

La Figure 3.4 présente le processus employé pour identifier la distribution la plus adaptée et les paramètres adéquats. Les données sur les durées de vie sont recueillies et analysées afin d'en déduire la fonction de densité de probabilité, ce qui permet d'accéder à toutes les autres caractéristiques de fiabilité¹.

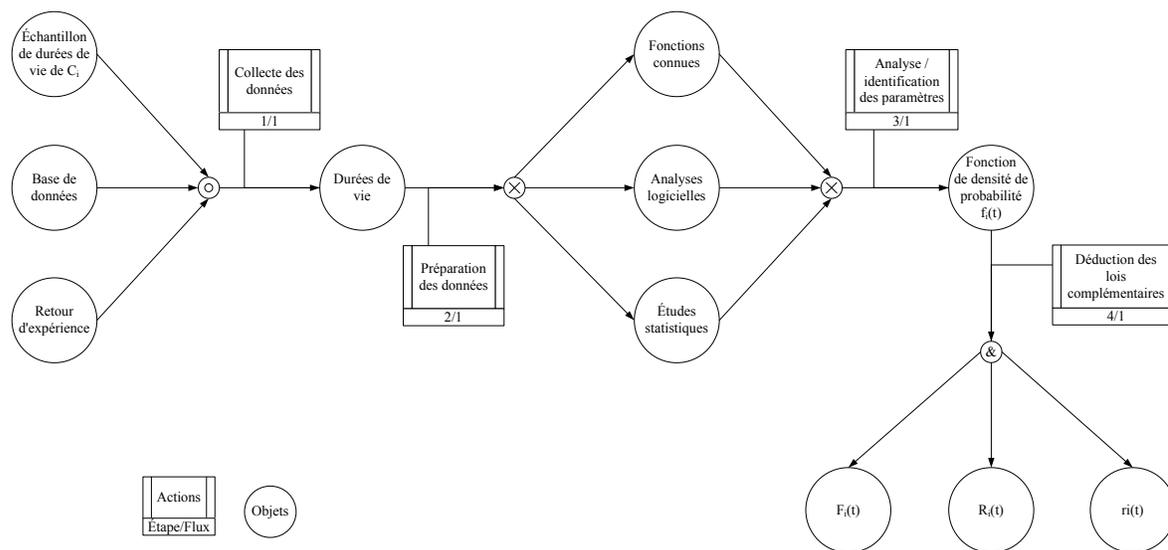


Figure 3.4 : Obtention des caractéristiques de fiabilité

Selon le degré d'avancement de la conception, ces données sont issues :

- de données d'exploitation (pour un produit déjà utilisé) ;
- de retours d'expérience (conception basée sur les connaissances d'un produit similaire) ;
- de tests sur prototypes physiques.

Pour simplifier le travail d'identification, un certain nombre d'outils informatiques sont disponibles sur le marché : ExpertFit®, StatFit®, Weibull++®, Relex-Weibull® (Annexe IV.1).

¹ Le formalisme employé est celui de la méthode de représentation *IDEF3*. Il permet de construire une représentation structurée des différentes actions qui interviennent sur des objets, selon un flux donné (Mayer *et al.* (1995)).

1.2.2 Analyse de données censurées

La technique précédente exploite les durées de vies connues des N_f éléments ayant échoués aux tests. Cependant, les N_s éléments survivants apportent eux aussi de l'information : comme les tests ont été arrêtés avant que tous les produits ne soient brisés, les données issues des N_s éléments sont tronquées (censure simple ou à droite).

Les données peuvent également être multi-censurées quand les produits sont retirés du processus de test ou d'exploitation à différents instants de la période couverte par les tests. Lewis (1987) présente la technique de Kaplan & Meier (1958) pour estimer la fiabilité à partir de données multi-censurées. D'autre part, certains logiciels comme Weibull++[®] sont capables de traiter les données selon plusieurs types de censure.

2. Évaluation a posteriori : validation de la fiabilité

Pour tester et démontrer le niveau de fiabilité, l'approche traditionnelle doit faire face à deux problématiques principales : la durée des tests et la taille de l'échantillon à tester. Les sections 2.1 et 2.2 présentent deux approches de résolution de ces deux aspects.

2.1. Les tests accélérés

D'une manière générale, les tests accélérés sont utilisés pour faire apparaître les défaillances plus rapidement que lors d'une utilisation « normale » du produit. L'accélération des tests peut se faire soit par sévérisation des contraintes, soit par vieillissement ou par une combinaison des deux (Lewis (1987)).

En utilisant le vieillissement prématuré comme moyen d'accélération des tests, on impose un certain nombre d'actions à la pièce avant de la soumettre aux essais. Celle-ci est alors vieillie par une usure provoquée volontairement qui altère la résistance de la pièce.

Pour effectuer des tests par sévérisation, le produit est soumis à des contraintes plus élevées que la normale. En général, le taux de panne va augmenter et la fiabilité diminuer. Si une diminution de la fiabilité peut être reliée à une augmentation des contraintes, alors la fiabilité pour des contraintes normales peut être inférée à partir de durées de vie obtenues pour des contraintes élevées.

Les tests avec sévérisation ou vieillissement prématuré donnent des durées de vie « accélérées ». Pour des tests sévérisés, la contrainte est généralement une température, un voltage ou une force mécanique qui est plus élevée que la contrainte nominale que le produit doit supporter dans une utilisation normale. Dans Lewis (1987), les durées de vie moyennes obtenues lors de ces tests sévérisés sont représentées en fonction du niveau de contrainte (Figure 3.5). Une courbe ajuste ces données, ce qui permet d'extrapoler la durée de vie nominale, calculée à

partir du niveau de contrainte pour lequel le produit a été conçu (la contrainte nominale).

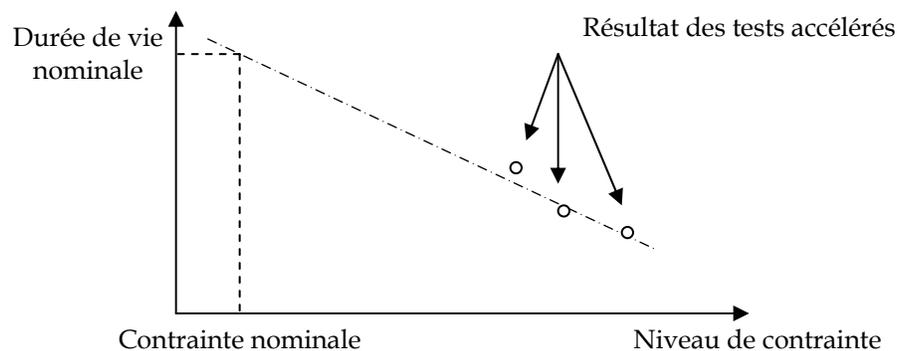


Figure 3.5 : Estimation des durées de vies en conditions normales - Lewis (1987)

Si le nombre de tests accélérés est insuffisant, l'extrapolation peut manquer de précision. Barton (1991) et Pathak *et al.* (1991) proposent des techniques pour réduire l'incertitude résultant de l'extrapolation aux conditions normales d'utilisation. Un cas d'application sur la roue libre d'une bicyclette illustre bien la complexité de l'acquisition des données et leur traitement (Burgess *et al.* (1990)).

La maîtrise des mécanismes de défaillance est essentielle. Il est important de vérifier que les mécanismes de défaillance qui ont lieu pour des contraintes élevées sont les mêmes que pour les contraintes nominales. De plus, l'extrapolation n'est pas forcément linéaire comme dans le cas de la Figure 3.5. Pour un mode de défaillance impliquant des réactions chimiques (corrosion, perte de lubrification, etc.) où la température est une contrainte importante, c'est l'équation d'Arrhenius (Shoorman (1990)) qui permet de déterminer la relation entre contrainte nominale et contraintes accélérées. L'équation (3.6) donne l'exemple rapporté par Lewis (1987), où T est la température normale et T_A la température utilisée pour les tests accélérés. Les durées de vies obtenues sont t et t_A , respectivement nominale et accélérées.

$$\frac{t}{t_A} = e^{\left[C_{st} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_A} \right) \right]} \quad (3.6)$$

S'il s'agit de composants électriques soumis à une tension donnée, une équation similaire à la relation (3.7) est utilisée (V représente le voltage et t la durée de vie - les grandeurs accélérées ont l'indice A).

$$\frac{t}{t_A} = \left(\frac{V_A}{V} \right)^3 \quad (3.7)$$

Pour des composants mécaniques, on utilise plutôt la courbe de Wöhler pour faire l'extrapolation entre les valeurs accélérées et celles d'usage (Figure 3.6b). La Figure 3.6a illustre la construction de cette courbe. Pour un niveau de contrainte donné, on relève le pourcentage de pièce qui résiste jusqu'au nombre de cycles considérés. Ainsi, on obtient en fait plusieurs courbes qui donnent la probabilité qu'une pièce brise à N cycles, sachant qu'elle est soumise à une contrainte C .

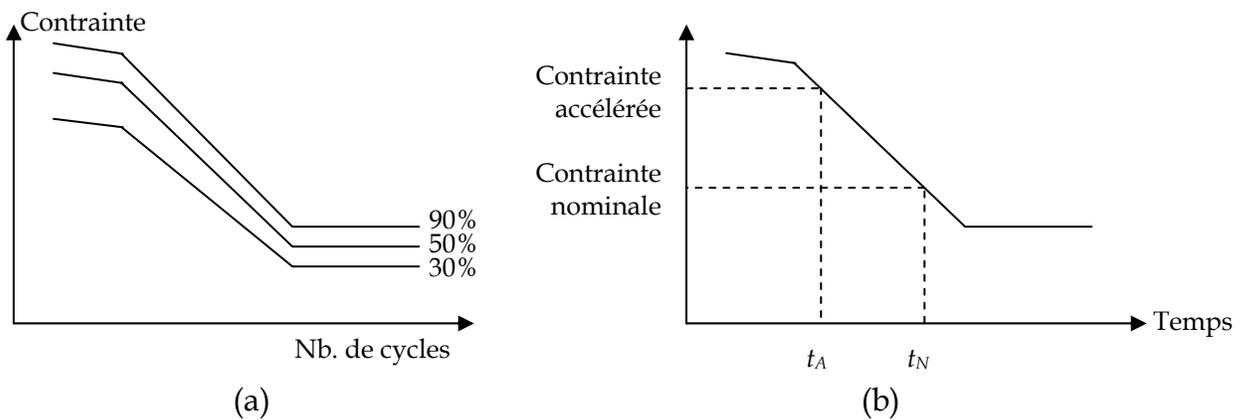


Figure 3.6 : Courbe de Wöhler

(a) Construction de la courbe. (b) Utilisation pour l'extrapolation.

Ces mécanismes ne sont pas les seuls utilisés (e.g. Hu *et al.* (1992)). Notons que Nachlas *et al.* (1985) étudient les interactions entre plusieurs paramètres environnementaux et leurs impacts sur le vieillissement, contrairement à la relation d'Arrhenius, l'équation (3.7) et la courbe de Wöhler qui ne considèrent

qu'un seul paramètre pour accélérer le vieillissement (soit la température, le voltage ou la contrainte).

2.2. Les tests d'échantillons

2.2.1 Le niveau de confiance

La réduction du temps et des coûts associés aux essais dépend également de la taille de l'échantillon de produits à tester. Pour valider un niveau de fiabilité R_0 , l'équation (3.8) montre la relation entre le nombre de composants testés n , le nombre de défaillances observées k et le coefficient de confiance γ (Aït-Kadi *et al.* (2000)).

$$\gamma = \Pr(\text{fiabilité mesurée} > R_0) = 1 - (n+1) \cdot C_n^k \cdot \sum_{j=0}^k (-1)^j \cdot \frac{R_0^{n-k+j+1}}{n-k+j+1} \quad (3.8)$$

Si l'échantillon est soumis aux tests sans qu'aucune défaillance ne soit observée, il suffit que la taille de l'échantillon soit telle que donnée par l'équation (3.9) pour valider le niveau de fiabilité R_0 avec le niveau de confiance γ (Martz & Waller (1982) - Aït-Kadi *et al.* (2000)). D'après cette relation, on constate que n augmente quand R_0 ou γ augmentent.

$$n = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln(R_0)} - 1 \quad (3.9)$$

2.2.2 Intégration des connaissances a priori

Dans un contexte industriel, le budget et le temps alloués aux tests imposent bien souvent un nombre limité d'observations (n'), inférieur au nombre recommandé par l'équation (3.9). L'approche bayésienne compense le manque d'information $\text{Inf}(n) - \text{Inf}(n')$ par l'expérience acquise. La pratique indique que les durées de vie x du produit (issues d'un échantillon de petite taille) suivent la fonction de densité $f(x|\theta)$ dont le paramètre inconnu θ est considéré comme une variable aléatoire.

Soit $g(\theta)$ la fonction de densité a priori associée à la variable aléatoire θ . La distribution a priori du paramètre θ est basée sur des connaissances a priori (Tableau 3.2), qui peuvent se traduire par l'expression des moments de la distribution (moyenne, variance), de valeurs minimales et maximales, etc. Le choix de la distribution doit alors maximiser le niveau d'information apporté (ce niveau peut être mesuré par la fonction d'entropie), tout en respectant les contraintes issues de la connaissance a priori.

Tableau 3.2 : Sources de connaissances – El Khair El Idrissi *et al.* (1995)

Type de source	Provenance
Objective	• Données antérieures
	• Données sur des composants similaires
	• Banques de données
	• Simulation (Guérin et al. (2001)) ²
Subjective	• Experts
	• Jugement
	• Quantification d'ingénieurs

Dans le cas où on ne dispose que d'une information floue, on fait appel à la distribution uniforme. Il importe cependant que la distribution choisie ne contamine pas l'information disponible. Une étude de sensibilité ou de robustesse est alors recommandée. L'équation (3.10) donne la distribution a posteriori $g(\theta|x)$ du paramètre θ , connaissant les n observations, en appliquant le théorème de Bayes (El Khair El Idrissi *et al.* (1995)).

$$g(\theta|x) = \frac{\left[\prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \right] \cdot g(\theta)}{\int_{\theta} \left[\prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \right] \cdot g(\theta) \cdot d\theta} \quad (3.10)$$

Pour le choix de la valeur de θ , El Khair El Idrissi *et al.* (1995) proposent également une évaluation du risque en mesurant l'erreur commise et en évaluant ses conséquences à l'aide d'une fonction coût.

L'approche bayésienne peut s'appliquer pour des produits dont les concepts sont « évolutionnaires » plutôt que « révolutionnaires », dans le sens où un nouveau produit est souvent créé par des modifications apportées à un produit existant, afin de mieux répondre aux besoins du marché. Il est alors possible d'utiliser les connaissances acquises sur la fiabilité du produit existant avec l'approche bayésienne. Rappelons les trois points importants à considérer :

1. le modèle statistique ou loi de distribution qui régit la population ;
2. la distribution a priori, qui synthétise l'information a priori ;
3. la fonction coût associée à la mauvaise estimation du paramètre.

2.3. Les tests en production

Il existe également d'autres classes de tests. Mentionnons l'existence des tests en phase de production du produit car, bien qu'ils interviennent à une autre phase du cycle de vie du produit, ils ont des points communs (recours aux tests accélérés, etc.) avec les tests de développement sur prototypes qui nous intéressent plus particulièrement.

Caruso (1996) introduit les tests en production, mieux connus sous l'acronyme anglais *ESS* pour *Environmental Stress Screening*, en les différenciant des tests de développement. L'*ESS* a été largement utilisé dans l'industrie afin de réduire la mortalité infantile : essentiellement pour éliminer les produits dont la tenue risque d'être affectée par le processus de fabrication.

² Cette catégorie n'apparaît pas dans l'article de El Khair El Idrissi *et al.* (1995).

3. Évaluation lors de la conception : prévoir la fiabilité

3.1. Fiabilité prévisionnelle d'un système multi-composants

Comme les systèmes sont de plus en plus complexes, certaines techniques telles que les schémas blocs et la modélisation markovienne décomposent le problème en composants ou sous-systèmes. Ces méthodes peuvent être utilisées pour l'allocation de la fiabilité, en traduisant l'objectif de fiabilité du système global en objectifs spécifiques pour ses sous-systèmes qui sont plus faciles à maîtriser. Dans notre cas, on s'intéresse à l'utilisation de ces techniques pour l'évaluation prévisionnelle de la fiabilité.

Pour des raisons pratiques, seuls certains composants du produit sont testés sur bancs d'essais. Toutefois, même un produit innovant peut réutiliser un composant déjà existant sur un produit antérieur dont on connaît la fiabilité (en faisant l'hypothèse que les conditions d'exploitation vont rester les mêmes). À partir de la connaissance de la fiabilité (ou du taux de panne) d'un composant, les schémas blocs ou les diagrammes de Markov permettent de prévoir la fiabilité du système global.

On note que des bases de données existent pour renseigner ces méthodes sur la fiabilité individuelle de certains composants : e.g. les bases de type *NPRD/EPRD* (*Nonelectronic Parts Reliability/Electronic Parts Reliability databases*).

3.1.1 Schémas blocs

Les composants d'un système peuvent former différentes configurations. L'objectif des schémas blocs est de prévoir comment ils collaborent entre eux pour assurer le bon fonctionnement du système. Soit C_i les composants du système et $R_i(t)$ leur fiabilité. La Figure 3.7 présente la configuration la plus simple, celle d'un système série de M composants, tandis que la relation (3.11) donne la fiabilité du système, en considérant les composants indépendants. Cette hypothèse est courante pour

simplifier les calculs à partir de ce diagramme. Si l'information est disponible, il est possible de tenir compte de la dépendance structurelle, mais on préfère souvent faire l'hypothèse de l'indépendance pour éventuellement corriger les résultats par un coefficient de sécurité.

$$R(t) = \prod_{i=1}^M R_i(t) \quad (3.11)$$

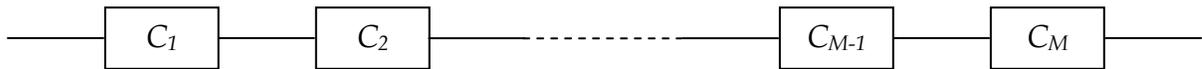


Figure 3.7 : Structure série

La représentation par schémas blocs (ou *RBD* pour *Reliability Block Diagram*) est couramment utilisée pour traduire le fonctionnement du système connaissant l'état des composants. Plusieurs méthodes permettent d'exprimer la fonction de fiabilité à partir de la structure du schéma blocs : les méthodes des chemins, des coupes, le théorème de décomposition de Shannon, etc. (Aït-Kadi (2002)). L'Annexe IV.2 présente plusieurs logiciels effectuant ce type de calcul, soit par des techniques analytiques, soit par simulation.

3.1.2 Diagramme d'états

La méthode markovienne est une technique très performante, utilisée pour modéliser des systèmes dont les modes de défaillance sont dépendants, mais aussi pour les systèmes réparables avec taux de panne et de réparation constants. Le diagramme représente les différents états du système et les transitions entre ces états. Pour chaque état, la probabilité d'occurrence est donnée par une relation qui, associée à toutes les autres, constitue un système d'équations pouvant être résolu par les transformées de Laplace (Lewis (1987), Aït-Kadi (2002)). Certains logiciels, entre autres RELEX[®], disposent d'un module de traitement des graphes de transitions (Annexe IV.2).

3.2. Conception pour la fiabilité (DfR)

Dans les sections précédentes, y compris pour le calcul de la fiabilité prévisionnelle, des historiques sont nécessaires à l'évaluation de la fiabilité. Pour une prise en compte plus précoce, le concepteur dispose de techniques l'aidant à atteindre les objectifs.

La conception pour la fiabilité, ou *Design for Reliability (DfR)*, cherche à sensibiliser le concepteur aux problèmes de fiabilité par des principes de conception de base. Un certain nombre de méthodes et analyses viennent supporter cette approche et permettent de maîtriser voire d'éviter les pannes ou accidents en identifiant les mécanismes par lesquels ils peuvent survenir.

3.2.1 Les arbres de défaillances

Au même titre que le comportement d'un système dépend de ses composants, le comportement du composant ou du sous-système dépend de ses différents modes de défaillance.

Une défaillance traduit la cessation d'une entité à accomplir la fonction pour laquelle elle a été conçue. Une entité est déclarée défaillante lorsque ses caractéristiques évoluent en dehors des tolérances définies lors de la conception ou si elle ne satisfait pas à une ou à plusieurs attentes du client. Le mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée (le symptôme). À chaque défaillance on associe un mode de défaillance et des causes de défaillance.

L'arbre de défaillance est un outil de recensement de toutes les causes et défauts entraînant l'apparition d'un événement indésirable. Il a pour objectif d'analyser et réduire les risques. Pour chaque défaillance potentielle, l'arbre de défaillance est construit comme suit :

- rechercher les causes immédiates provoquant directement l'événement indésirable ;
- classer les événements intermédiaires en trois classes (événements de base, défauts de conception et défauts de système) ;
- analyser les défauts des composants : chercher la défaillance première puis la défaillance seconde ;
- réitérer la méthode précédente jusqu'à obtention des événements d'origine.

Pour analyser le risque lié à cette défaillance, l'arbre de défaillance associe l'événement perçu comme risqué à une chaîne de causes (événements d'origine) pour lesquelles il existe une probabilité d'occurrence.

Lewis (1987), entre autres auteurs, donne de plus amples informations sur la construction et l'évaluation qualitative et quantitative des arbres de défaillances (page 340). Cependant, le calcul du risque qu'un événement indésirable se produise est basé sur les liens de causalité, qui peuvent être :

- inclusifs (A ET B) : $\Pr(A \cap B) = \Pr(A) \cdot \Pr(B)$ avec A et B indépendants ;
- exclusifs (A OU B) : $\Pr(A \cup B) = \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr(A \cap B)$;
- avec le cas particulier où les événements déclencheurs sont parfaitement exclusifs : $\Pr(A \cap B) = 0$.

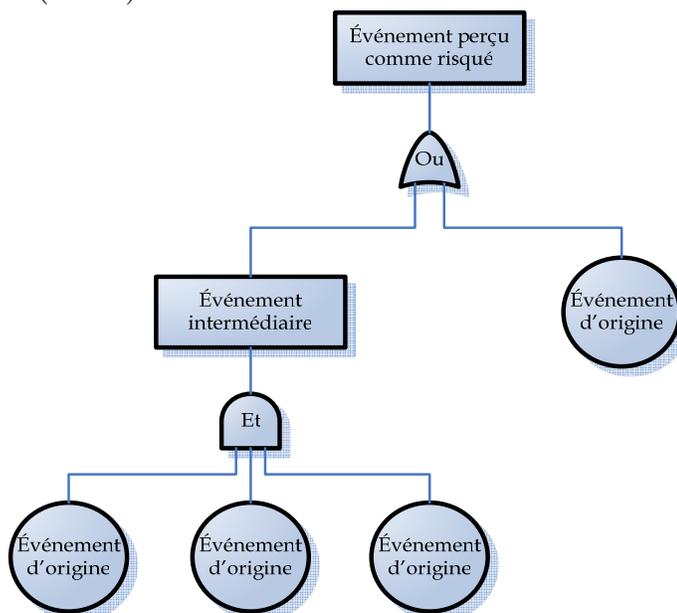


Figure 3.8 : Structure d'un arbre de défaillance

Cette technique est dépendante des probabilités d'occurrence des événements, ce qui, cette fois encore, pose la question de la disponibilité des données d'historiques. Certaines approches compensent le manque de données par des jugements experts, qui vont concentrer l'étude sur les modes de défaillance les plus importants. On peut d'ailleurs citer les travaux de Bouzaiene-Marle (2005) qui propose des méthodes aidant à la stimulation des experts pour favoriser l'exhaustivité des résultats.

3.2.2 Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effet et de leur Criticité

L'AMDEC est une méthode d'analyse préventive qui recense et met en évidence les risques potentiels (Bouti & Aït-Kadi (1994)). L'« AMDEC conception » permet de déterminer les points faibles, de préciser les moyens de se prémunir contre certaines défaillances et de classer les défaillances selon certains critères (fréquences, capacité de détection, criticité, gravité, etc.).

L'AMDEC constitue donc un outil extrêmement puissant d'aide à la conception des systèmes. Cependant, bien qu'applicable lors de la conception, cette méthode d'analyse est plus performante lorsqu'elle est appliquée à des systèmes déjà en exploitation et que l'on veut corriger.

3.2.2.a Analyse qualitative de la défaillance

La première étape consiste à recenser de façon la plus complète possible tous les **modes de défaillances** potentiels et plausibles de l'entité analysée. À ce stade, on suppose que la défaillance peut avoir lieu mais n'intervient pas nécessairement.

Pour la **cause de défaillance**, une technique efficace de recherche consiste à utiliser le diagramme d'Ishikawa ou diagramme en «arrête de poisson». À l'aide d'un diagramme par mode de défaillances, les causes interdépendantes sont identifiées et regroupées de façon arborescente.

Chaque mode provoque un **effet de défaillance**, c'est à dire une conséquence sur la fonction ou sur les systèmes environnants. Certains fabricants définissent l'effet comme « ce que le client pourrait remarquer en supposant que la défaillance intervienne ».

La **capacité de détection de la défaillance** peut être prévue et facilitée par un certain nombre de dispositifs. Il s'agit de recenser les moyens déjà existants, soit pour prévenir l'apparition de la cause, soit pour détecter la défaillance.

3.2.2.b Critères d'analyse quantitative de la défaillance

Il s'agit de pouvoir évaluer la défaillance au travers de plusieurs critères par l'attribution d'une note à chacun des critères. En règle générale, on utilise trois critères ou indices : la fréquence - la gravité - la détection.

L'indice de **fréquence** « F » ou d'occurrence « O » marque la probabilité que la cause se produise et qu'elle entraîne le mode de défaillance concerné. C'est aussi une estimation de la probabilité d'occurrence de la cause de défaillance considérée.

L'indice de **gravité** « G » s'intéresse à la gravité provoquée par l'effet. C'est aussi l'impact des effets des défaillances sur le produit ou une estimation de la sévérité de l'effet maximum de la défaillance.

L'indice de **détection** « D », plus souvent appelé risque de non-détection par souci de synthèse, marque la probabilité que la cause et le mode étant apparus, la défaillance atteigne l'utilisateur.

L'indice de **criticité** « C » est la résultante des facteurs de risques présentés ci-dessus. Il est déterminé par le produit des trois indices (équation (3.12)).

$$C = D.O.G \quad (3.12)$$

Si chaque indice est noté de 1 à 4, la criticité peut évoluer de 1 à 64. Plus l'indice est grand, plus le risque lié aux défaillances potentielles est élevé. Une stratégie d'amélioration des produits consiste à traiter les criticités supérieures à un seuil donné.

3.2.2.c Application de l'AMDEC

Des logiciels comme RELEX® proposent un support pour la mise en œuvre de l'AMDEC et la rédaction des rapports résultants (Annexe IV.3). Ces outils peuvent procurer un encadrement très utile car les analyses qualitative et quantitative de l'AMDEC s'insèrent dans une méthodologie globale (également applicable pour un produit déjà conçu) :

- définition de l'étude ;
- préparation de l'étude ;
- analyse et évaluation des défaillances potentielles ;
- actions correctives ou préventives ;
- réévaluation après actions correctives ;
- criticité résiduelle et liste des points critiques ;
- planification et mise en place des actions correctives.

3.2.3 Déploiement de la fonction qualité

Le Déploiement de la fonction qualité (DFQ ou QFD pour *Quality Function Deployment*) intègre le point de vue du client dans le processus de mise au point du produit ou du service. Elle a pour but de s'assurer que les besoins du client (ou les contraintes du cahier des charges, comme un seuil de fiabilité) sont respectés au moment de la conception du produit et du processus. Les exigences du client prennent souvent la forme d'un énoncé général qu'il faut traduire en adaptations techniques.

La structure du DFQ est constituée d'un ensemble de matrices. La matrice principale concerne les exigences du clients (le « quoi ») et leurs spécifications techniques correspondantes (le « comment »). La représentation finale est appelée

« maison de la qualité », de par sa forme (Figure 3.9). Des éléments complémentaires sont ajoutés :

- une évaluation pondérée, aussi bien des caractéristiques désirées par le client que celles de la concurrence ;
- une matrice corrélationnelle, pour les exigences techniques (elle peut révéler des conflits) ;

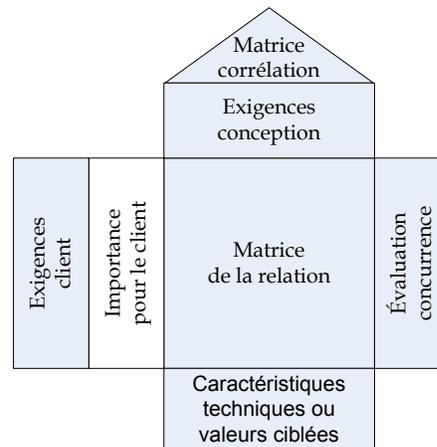


Figure 3.9 : Maison de la qualité

Stevenson & Benedetti (2001) et Heizer & Render (1999) détaillent le déploiement de la fonction qualité. Ces derniers donnent la séquence des maisons de la qualité à construire pour mieux répondre aux attentes du client. La première maison porte sur les caractéristiques techniques, la suivante sur les composants, puis sur les processus de production et enfin sur le projet de qualité.

3.2.4 L'accroissement de la fiabilité

À partir de ces analyses préalables, un premier prototype est élaboré pour être testé. Chaque problème constaté amène de nouvelles analyses et des modifications qui poussent à l'élaboration d'un nouveau prototype. Comme il s'agit de produits différents, les données de fiabilité de chaque prototype apparaissent indépendantes. L'analyse de l'accroissement de la fiabilité (ou *RGA* pour *Reliability Growth Analysis*) tire profit de l'ensemble des résultats des essais, sans distinction du produit d'origine.

Plusieurs livres traitent cette approche en détail : Lewis (1987), *Military Handbook - 189* (1981) ainsi que Crowe *et al.* (2001) qui parle aussi de l'aspect accéléré de l'accroissement de la fiabilité. Lewis (1987) présente une bonne introduction de cette approche, initiée par Duane (1964).

Soit, pour différents prototypes améliorés selon une procédure *test-fix-test* :

- T = le temps d'opération total accumulé par tous les prototypes ;
- $n(T)$ = le nombre de défaillances depuis le début des tests jusqu'à T .

Au fur et à mesure que les erreurs de conception sont corrigées, les durées de vie et la fiabilité augmentent. Duane (1964) a observé qu'en traçant $n(T)/T$ en fonction de T sur une échelle logarithmique, il obtenait des droites, quel que soit le type d'équipement électromécanique étudié. À partir de ces droites, il est possible d'estimer le développement des durées de vie avec le temps ainsi que d'extrapoler de combien la fiabilité pourra être améliorée dans les développements futurs.

Cette approche, tout comme les essais accélérés, n'est pas simplement mathématique. Une bonne méthodologie est nécessaire pour mener à des conclusions pertinentes. Crow *et al.* (1994) proposent un certain nombre de principes de base à suivre. Larry Crow, qui fait figure d'autorité dans le domaine de la fiabilité en développement (il a participé à l'élaboration de *Military Handbook - 189* (1981)), a d'ailleurs participé au développement du logiciel RGA®, de Reliasoft Corp. (2004), capable de prendre en charge le développement de la fiabilité.

Dans Crow (1984), il propose une méthode pour évaluer le potentiel de développement de la fiabilité pour une stratégie donnée. Le produit peut être amélioré ou laissé non corrigé après apparition d'un mode de défaillance. De ce fait, l'AMDEC est considérée comme un outil de planification du développement de la fiabilité.

3.3. Estimation de la fiabilité par l'approche fiabiliste de la conception

3.3.1 Introduction

Les travaux qui visent l'estimation quantitative de la fiabilité se basent principalement sur le mode de défaillance dominant du composant analysé. Pour une évaluation au plus tôt de la fiabilité d'un système innovant, on a recours à des jugements experts. Dans notre cas, nous utilisons une AMDEC.

Comme on l'a vu à la section 1.2 du Chapitre 2, la formulation déterministe, associée à un coefficient de sécurité, est la plus courante pour l'étude d'un mode de défaillance. Par contre, si on considère que les grandeurs utilisées dans les formules de dimensionnement sont des grandeurs aléatoires, le risque de défaillance s'exprime en terme de probabilité. Les mathématiques nous apprennent qu'à partir des distributions de probabilité de chacune des grandeurs, il est possible de calculer les distributions de probabilité d'une contrainte dans un éléments de structure, la probabilité de résistance du matériau et enfin la probabilité de rupture.

Dans un premier temps, nous présentons les fondements mathématiques de cette approche. Ensuite, nous détaillons plusieurs techniques de calcul qui peuvent servir la génération d'échantillons de prototypes virtuels dans nos travaux. Elles utilisent les grandeurs de dimensionnement sous forme de distributions de probabilité pour reproduire la variabilité des grandeurs des systèmes réels, contrairement à celles parfaites et déterministes qui sont utilisées en conception traditionnelle.

Cette étape, prérequis à la génération d'échantillons virtuels, consiste à identifier les grandeurs aléatoires intervenant dans les calculs de dimensionnement : charges (l_i), dimensions (d_i), résistances (s_i), modélisation (m_i).

3.3.2 L'approche contrainte/résistance

Les détails de l'approche contrainte/résistance se retrouvent dans divers ouvrages, dont Lewis (1987) et Haldar & Mahadevan (2000). Cette approche considère la contrainte et la résistance comme deux variables qui peuvent prendre des valeurs aléatoires (Figure 3.10). Ces variables sont alors définies par leur fonction de densité de probabilité (ou *pdf* pour *probability density function*), respectivement $f_L(\bullet)$ et $f_S(\bullet)$. La fiabilité n'est autre que la probabilité que la contrainte reste inférieure à la résistance du produit.

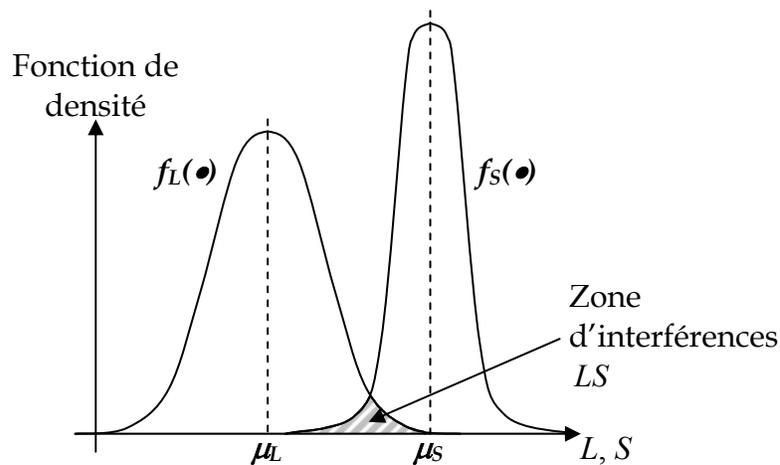


Figure 3.10 Distributions de contrainte et de résistance

Dans la zone d'interférences LS (l'approche contrainte/résistance se retrouve également sous le nom d'*Interference Theory*), la probabilité que la contrainte L soit supérieure à la résistance S est non nulle. Connaissant les deux fonctions de densité $f_L(\bullet)$ et $f_S(\bullet)$, il est alors possible de calculer la fiabilité :

$$R = \Pr(L < S) = \int_0^{\infty} f_S(y) \left[\int_0^y f_L(x) dx \right] dy \quad (3.13)$$

ou encore

$$R = \Pr(S > L) = \int_0^{\infty} f_L(x) \left[\int_x^{+\infty} f_S(y) dy \right] dx \quad (3.14)$$

Dans nos travaux, nous considérons cette approche pour un mode de défaillance donné. La **contrainte** est identifiée à la **charge** (dominante) reliée à l'apparition de ce mode de défaillance, tandis que la **résistance** traduit la **capacité** du produit à résister à cette charge.

3.3.3 Calcul formel de la fiabilité

Il existe un certain nombre de cas où la fiabilité est calculée sans approximation numérique. Les formules suivantes ne sont valables que sous des hypothèses très précises. C'est ce qui a longtemps favorisé, et favorise encore maintenant, l'utilisation de l'hypothèse de chargements et résistances gaussiens (Lewis (1987)).

3.3.3.a Chargement simple avec des lois normales pour L et S

Ce choix est approprié quand les variations de la charge ou de la capacité sont la somme de plusieurs effets dont aucun ne prédomine sur les autres (Annexe IX, Algèbre des variables aléatoires). Ainsi, la distribution normale est largement utilisée pour modéliser des charges et capacités (équations (3.15) et (3.16), respectivement), particulièrement quand les variations dans les matériaux et les tolérances dimensionnelles sont faibles et quand la charge ne peut être déterminée précisément.

$$f_L(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_L} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{(l - \mu_L)^2}{\sigma_L^2}} \quad (3.15)$$

$$f_S(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_S} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{(s - \mu_S)^2}{\sigma_S^2}} \quad (3.16)$$

où les valeurs moyennes de la contrainte (ou la charge) et de la résistance (ou la capacité) sont notées μ_L et μ_S et les écarts types correspondant σ_L et σ_S . En substituant ces expressions dans les équations (3.13) ou (3.14), la fiabilité devient³ :

$$R = \Pr(L < S) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_S} e^{-\frac{(s-\mu_S)^2}{2\sigma_S^2}} \left[\int_{-\infty}^s \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} e^{-\frac{(l-\mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} dl \right] ds \quad (3.17)$$

Cette expression peut être réduite sous une forme plus simple avec une seule intégrale par les changements de variables qui transforment les variables L et S en variables sans dimensions :

$$x = (s - \mu_S) / \sigma_S \quad (3.18)$$

$$y = (l - \mu_L) / \sigma_L \quad (3.19)$$

Ainsi, l'équation (3.17) devient :

$$R = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{(\sigma_S x + \mu_S - \mu_L) / \sigma_L} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2}} dy \right] dx \quad (3.20)$$

Cette double intégrale correspond géométriquement à l'aire située sous la droite (non hachurée sur la Figure 3.11) dont l'équation est la borne supérieure de l'intégrale de l'équation (3.20) :

$$y = (\sigma_S x + \mu_S - \mu_L) / \sigma_L \quad (3.21)$$

Un nouveau changement de variables vers des coordonnées polaires permet d'exprimer la fiabilité sous la forme d'une simple loi normale standard, dans un

³ Les bornes des intégrales ont été étendues à $-\infty$ pour être compatibles avec les changements de variables ultérieurs de la loi normale. L'impact sur les résultats est négligeable si $\mu_S \gg \sigma_S$ et $\mu_L \gg \sigma_L$.

nouveau système $\{x', y'\}$. La Figure 3.11 présente le domaine d'intégration (zone hachurée) lorsque la contrainte et la résistance sont distribuées normalement.

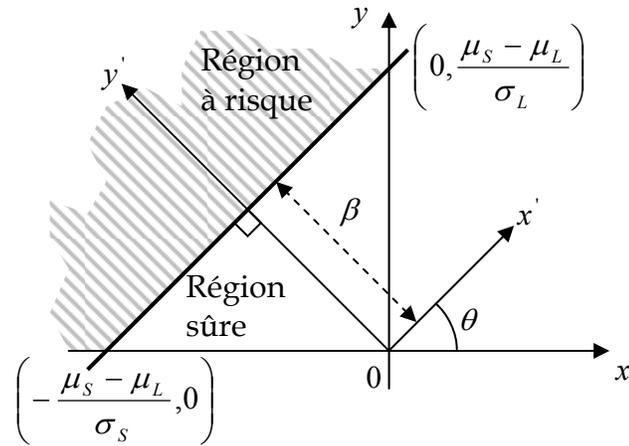


Figure 3.11 : Domaine d'intégration dans un repère standardisé

Grâce au changement effectué :

$$x' = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (3.22)$$

$$y' = -x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta \quad (3.23)$$

On peut montrer que :

$$x^2 + y^2 = x'^2 + y'^2 \quad (3.24)$$

$$dx \cdot dy = dx' \cdot dy' \quad (3.25)$$

Ce qui permet d'écrire la fiabilité sous la forme :

$$R = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\beta} e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{2}} \cdot dy' \right] \cdot dx' \quad (3.26)$$

où la limite supérieure de l'intégrale sur y' correspond à la distance β de la Figure 3.11. Cette constante, appelée l'indice de sûreté ou de fiabilité, est calculée par simple trigonométrie :

$$\beta = \frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_L^2}} \quad (3.27)$$

Comme il s'agit d'une constante, l'ordre d'intégration peut être inversé, ce qui permet de séparer les intégrales en x' et y' . L'intégrale en x' correspondant à $\Phi(\infty) = 1$, il ne reste que l'intégrale en y' .

La fiabilité s'exprime pour une contrainte et une résistance suivant une loi normale par :

$$R = \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_L^2}}\right) \quad (3.28)$$

Avec $\Phi(\bullet)$ la fonction cumulative de probabilité de la loi normale standard.

3.3.3.b Chargement simple avec des lois log-normales pour L et S

La distribution log-normale est également utilisée, plus spécialement quand l'incertitude sur la contrainte ou la résistance est relativement grande. Cette distribution est particulièrement adaptée quand la valeur de la variable résulte du produit de plusieurs facteurs différents (Annexe IX, Algèbre des variables aléatoires). Dans ce cas, les équations (3.15) et (3.16) sont remplacées par :

$$f_L(l) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \xi_L \cdot l}} \cdot e^{-\frac{1}{2 \cdot \xi_L^2} \cdot \ln^2\left(\frac{l}{l_0}\right)} \quad (3.29)$$

$$f_s(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \xi_s \cdot s} \cdot e^{-\frac{1}{2\xi_s^2} \ln^2\left(\frac{s}{s_0}\right)} \quad (3.30)$$

Sans entrer dans le détail des calculs, la fiabilité s'exprime de la même manière que dans l'équation (3.28), mais avec un nouvel indice β :

$$\beta = \frac{\ln(s_0/l_0)}{\sqrt{\xi_s^2 + \xi_L^2}} \quad (3.31)$$

3.3.3.c Chargement multiples

Les composants doivent satisfaire un maximum de demandes en résistant à tous les chargements qu'ils sont susceptibles d'avoir à supporter au cours de leur cycle de vie. Dans la réalité, on doit considérer des combinaisons de chargements. Or, jusqu'à présent, seule la contrainte prédominante était utilisée.

Pour tenir compte des effets de chargements multiples, la charge L peut être représentée par la somme de divers chargements L_i (Haldar & Mahadevan (2000)). Comme L est la combinaison d'autres variables aléatoires, sa moyenne et son écart type sont déterminées (Annexe IX, Algèbre des variables aléatoires). De plus, dans le cas de lois normales ou log-normales, les sections 3.3.3.a et 3.3.3.b ont montré que la fiabilité est calculable analytiquement.

3.3.4 Les indices de sécurité

La section précédente a fait apparaître l'expression de la fiabilité en fonction d'un indice β , en particulier avec les équations (3.28) et (3.31). Il s'agit de la formulation la plus simple de l'indice de sécurité, l'indice de Cornell. Toutefois, il existe une deuxième formulation, celle de Hasofer-Lind.

Dans ce cas, l'indice de sécurité est défini comme la distance minimale entre l'origine des coordonnées et la surface d'état limite dans l'espace à N dimensions correspondant aux variables aléatoires indépendantes normalisées X_i obtenues par

transformation des variables l_i , d_i et s_i . La surface d'état limite G dans l'espace normalisé doit vérifier l'équation (3.32) tandis que l'indice de sécurité est donné par l'équation (3.33). Une illustration dans un espace à 3 dimensions est donnée à la Figure 3.12.

$$G(X_i) = 0 \quad (3.32)$$

$$\beta = \min \sqrt{(\vec{X}' \cdot \vec{X})} \quad \text{pour tout } \vec{X} \in G \quad (3.33)$$

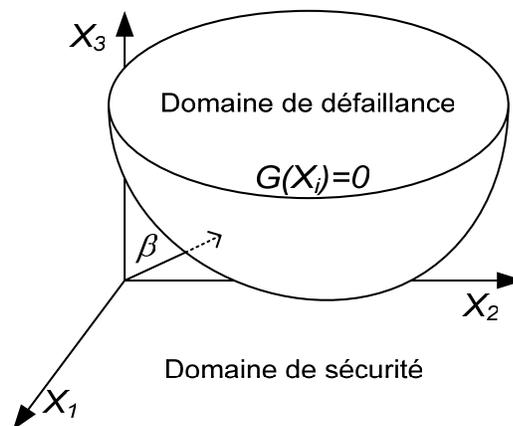


Figure 3.12 : Indice de sécurité de Hasofer-Lind

Le calcul de la valeur β requiert en général un logiciel spécifique appelé logiciel *FORM/SORM* (pour *First Order / Second Order Reliability Methods*). À partir des valeurs moyennes des variables aléatoires, de leur fonction de distribution de probabilité, de leur co-variance et de l'équation d'état limite, le logiciel fournit la valeur de β ainsi que le facteur d'importance de chaque variable, facteur qui représente sa participation dans la valeur de β . Ce type de calcul sera plus détaillé à la section 4.3.

3.3.5 Calcul de la fiabilité d'une manière générale

En général, l'évaluation analytique de la fiabilité par les équations (3.13) et (3.14) est difficile quand la contrainte et la résistance ont des distributions différentes. Dans nos travaux, nous utilisons les capacités de calcul formel de *MAPLE*® pour

calculer la fiabilité à partir de distributions quelconques de la contrainte et de la résistance.

Cependant, avant l'avènement de tels outils, d'autres moyens, graphiques et analytiques, furent mis en œuvre pour approximer le calcul de la fiabilité. Par exemple, Lewis (1987) présente une manière d'effectuer ces calculs quand l'une des distributions (contrainte ou résistance) suit une loi normale tandis que l'autre suit une distribution des valeurs extrêmes de type I (Lewis (1987)). Dans un cadre plus général, Murty *et al.* (1995) proposent une approximation polynomiale de la fonction de distribution de la contrainte et de la résistance à partir de plusieurs observations.

3.4. Caractère temporel de la fiabilité

Telle que présentée jusqu'ici, l'approche contrainte/résistance ne fait pas intervenir le temps. Tous les développements ont été faits à un instant t donné, à partir de variables de conception statiques (invariables dans le temps). Cependant, la contrainte et la résistance varient avec le temps, d'autant plus que la fiabilité a été définie comme étant une fonction décroissante du temps.

3.4.1 Le choix du processus de dégradation de la résistance

Il existe plusieurs techniques de modélisation de la dégradation de la résistance (Shoorman (1990)) :

- **le vieillissement** : modélisé, la plupart du temps, par une diminution linéaire de la moyenne de la résistance (ou augmentation de l'écart type) ;
- **le dommage cyclique** : la fonction de densité de la résistance dépend alors du nombre de cycles (une ampoule allumée et éteinte plusieurs fois vit moins longtemps qu'une ampoule qui reste allumée).
- **le dommage cumulatif** : la résistance diminue avec le nombre et l'amplitude des efforts appliqués par le passé ;

3.4.1.a Modèle de dommage cyclique

Le dommage cyclique est le modèle le plus simple à analyser pour des calculs de fiabilité. Notre extension temporelle de l'évaluation de la fiabilité (Chapitre 4) est d'ailleurs basée sur ce principe. Dans le cas où la contrainte est indépendante et où la résistance y_n varie de manière connue avec le nombre de cycles, la probabilité que le n -ième cycle soit effectué avec succès est donnée par l'équation (3.34).

$$R_{n,n-1} = \int_0^{y_n} f_L(x) \cdot dx \quad (3.34)$$

À partir de là, il est possible d'avoir une contrainte qui dépend du temps : $f_L(x)$ devient $f_L(x,n)$. Shooman (1990) propose un exemple où la résistance suit une distribution normale, dont la variance σ^2 est constante et dont la moyenne dépend du temps (équation (3.35)).

$$E[y_n] = a + b \cdot e^{-n} \quad (3.35)$$

Dans notre étude, nous utilisons la formulation générale donnée à la section 3.4.3 et la courbe de Wöhler comme critère de résistance variant avec le temps (ou le nombre de cycles), ce qui déplace la distribution de la résistance vers la gauche sous l'action du vieillissement.

Cette approche est simplifiée car le calcul du nombre limite de cycles avant la rupture est effectué à un niveau de contrainte donné, sans tenir compte de l'occurrence des différents niveaux de contraintes des cycles précédents. Pour cela, il faudrait étudier le dommage cumulé plutôt que le dommage cyclique.

3.4.1.b Le dommage cumulé

Dans ce cas, le principe de base consiste à appliquer la loi de Palmgren-Miner dont la forme déterministe est utilisée Birnbaum & Saunders (1968). Des formulations statistiques et probabilistes de ce principe apparaissent dans des travaux plus

récents (Shimokawa & Tanake (1980), Durham & Padgett (1990), Mahadevan & Ni (2003)).

La règle déterministe de Miner est donnée par l'équation (3.36) où n_i est le nombre de cycles subis sous le chargement S_i et N_{fi} la durée de vie, constante, indiquant le nombre limite de cycles auxquels la pièce peut résister sous ce chargement.

$$\sum_i \frac{n_i}{N_{fi}} < 1 \text{ la pièce survit ;} \quad (3.36)$$

$$\sum_i \frac{n_i}{N_{fi}} = 1 \text{ la pièce brise.}$$

Pour tenir compte de la dispersion des durées de vie, la constante N_{fi} est remplacée par la moyenne et le paramètre constant 1 par une variable aléatoire α .

Ainsi, il est possible d'intégrer le nombre et l'amplitude des contraintes dans les calculs de fiabilité. Cependant, la plupart des approches ne tiennent pas compte de l'ordre d'occurrence de ces contraintes. D'après Shooman (1990), les travaux de Bogdanoff & Kozin (1985) peuvent être appliqués de façon à considérer l'ordre d'occurrence. Cette modélisation est présentée ci-après.

3.4.2 Modèle de dommage cumulé

Le dommage cumulatif signifie « l'accumulation irréversible du dommage dans un composant sous l'action répétée d'une action mécanique » (Bogdanoff & Kozin (1985)). Les modes à dommage cumulatif permettent la modélisation d'un vaste champ de phénomènes tels que la corrosion, l'érosion, l'usure, le fluage, la fatigue, la propagation de rupture de fatigue, le changement des propriétés matérielles des plastiques avec le temps, les forces dynamiques, etc. Ces phénomènes peuvent être causés par des actions chimiques, par des actions mécaniques ou une combinaison des deux.

Nous détaillons en annexe deux modélisations markoviennes pour le dommage cumulé : d'une part, une modélisation macroscopique qui repose sur la base des chocs mécaniques comme source du dommage cumulatif (Bogdanoff & Kozin

(1985)) – (Annexe V.1) ; d'autre part, une modélisation microscopique qui repose sur la présence de fissure et tolère leur propagation de la taille initiale à une taille admissible (Ichikawa *et al.* (1987), Zou (2004)) – (Annexe V.2).

Ce type de modélisation, en particulier la propagation de la rupture, est très utilisé dans la littérature. Cependant, cela implique une modélisation beaucoup plus fine du comportement de la structure et des temps de calculs plus importants. Comme notre contribution ne se situe pas au niveau de la modélisation de phénomène physique, nous privilégions un modèle de dommage plus général.

3.4.3 Modèle de dommage cyclique

Comme on l'a vu lors de l'introduction du caractère temporel, le modèle de dommage cyclique se prête bien à l'utilisation de l'approche contrainte/résistance. C'est pourquoi nous l'avons choisi pour notre implémentation.

3.4.3.a L'approche contrainte/résistance avec prise en compte du temps

Devant la nécessité d'effectuer des analyses où les processus de chargement et de dégradation étaient aléatoires, un certain nombre de travaux sont venus améliorer l'approche contrainte/résistance traditionnelle.

En introduction, nous avons parlé de la résistance dont la distribution variait de manière connue. Il y a d'autres approches où le chargement varie avec le temps (Melchers (1992), Wen & Chen (1989)) et selon un processus stochastique (Boehm & Lewis (1992)), sans intégrer la dégradation de la résistance.

Pour tenir compte de la dégradation de la résistance, Lewis & Chen (1994) ont présenté un modèle pour deux cas simples seulement : un chargement déterministe associé à un vieillissement stochastique de la résistance et un chargement stochastique couplé à un vieillissement déterministe. Xue & Yang (1997), quant à eux, ont présenté une modélisation traitant les deux aspects stochastiquement et simultanément. Cependant, ils font l'hypothèse que les

chargements arrivent selon un processus de Poisson homogène et que leurs amplitudes sont distribuées normalement.

Plus récemment, Huang & Askin (2004) ont proposé un modèle généralisé qui peut être utilisé pour des processus de Poisson non homogènes et pour n'importe quel modèle de vieillissement. Ce modèle a permis de retrouver les résultats des approches limitées à des cas plus spécifiques.

3.4.3.b Le processus de chargement déterministe

Les processus de Poisson utilisés dans la littérature interviennent surtout pour la modélisation de chocs électriques ou thermiques en électronique et pour les chocs sismiques en génie civil. Nos travaux étant basés sur une utilisation régulière du produit, nous retenons l'approche déterministe de Lewis pour étudier l'aspect temporel de la fiabilité.

Lewis présente une extension du cas statique l'approche contrainte/résistance et montre comment calculer la fiabilité $R(t)$ quand la résistance varie avec des chargements répétés dans le temps (Lewis (1987)), selon des intervalles de temps périodiques ou distribués selon un processus de Poisson.

Pour connaître $R(t)$ à partir de ces hypothèses et pour un chargement périodique, il suffit d'intégrer la fiabilité $R(t|s)$ par rapport à la résistance s . L'équation (3.37) correspond alors à l'équation (3.13), son équivalent statique auquel on a ajouté une condition temporelle sur la résistance.

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(y) \cdot R(t|y) dy \quad (3.37)$$

4. Évaluation de la tenue du produit

Pour évaluer la fiabilité d'un produit, il faut déterminer s'il est en mesure ou non de continuer à assurer sa fonction. Pour en juger, on peut mesurer sa performance ou bien comparer la contrainte à sa résistance. Comme on l'a dit précédemment, ces trois éléments sont influençables par les grandeurs aléatoires qui interviennent dans les calculs de dimensionnement : charges (l_i), dimensions (d_i), résistances (s_i), modélisation (m_i).

Dans un premier temps, nous posons les éléments de base d'un calcul de la fiabilité. Nous présentons ensuite les différentes techniques de calcul avec leurs hypothèses avant de terminer par un bilan sur les limites de chaque approche.

4.1. Formulation du problème

4.1.1 Les variables de conception

L'identification de ces facteurs et des paramètres qui les caractérisent est détaillée au Chapitre 4. À ce stade, nous faisons l'hypothèse qu'un produit peut être représenté et modélisé par n variables de conception X_i pour $i = 1, 2, \dots, n$. Ces variables aléatoires correspondent à sa conception, sa fabrication, etc. et influencent essentiellement la capacité à résister du produit (résistance S ou *strength*). D'autre part, la variabilité du contexte d'utilisation (environnement, usager, etc.) est modélisé par la variable aléatoire de chargement (contrainte L ou *load, stress*).

Une fonction de densité de probabilité, supposée connue, est associée à chaque variable aléatoire L ou X_i . Pour simplifier les notations, les n variables de conception seront regroupées dans un vecteur de variables aléatoires $\vec{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. Parmi plusieurs produits, le k -ième produit est représenté par son vecteur \vec{X}^k . Si on lui associe le k -ième scénario d'utilisation

d'un ensemble de plusieurs scénarios, le couple produit-utilisation est défini par un vecteur \vec{Y}^k de $n+1$ composantes tel que $\vec{Y}^k = \{\vec{X}^k, L^k\} = \{X_1^k, X_2^k, \dots, X_n^k, L^k\}$.

4.1.2 Formulation d'un état limite

Soit $m(\bullet)$ un critère de performance mesurable, choisi par le concepteur pour vérifier que le produit respecte bien les spécifications du cahier des charges (e.g. la déformation du produit) pendant son utilisation. Si la valeur de $m(\vec{Y}^k)$ dépasse un seuil limite prédéfini ξ , il y a défaillance.

Ainsi, la fonction performance du produit est définie par $z(\bullet) = \xi - m(\bullet)$. Elle indique s'il y a défaillance - $z(\bullet) < 0$ - ou si le produit remplit parfaitement sa fonction - $z(\bullet) \geq 0$. Cette fonction amène la formulation de la fonction d'état limite, i.e. $z(\bullet) = 0$, couramment utilisée par les techniques de calcul de type *FORM/SORM*.

Cependant, la détermination de l'équation d'état limite n'est pas toujours possible, en particulier pour des produits mécaniques complexes. Dans ce cas, des calculs éléments finis sont mis en œuvre pour la calculer numériquement. Or, les progrès en moyens informatiques ont rendu disponibles des outils facilitant la conception à tous les niveaux (définition, amélioration, fabrication, échanges entre personnes, etc.). L'Annexe VI.1 présente l'ensemble des catégories couvertes par ces outils.

Tout d'abord, la structure du produit est modélisée en trois dimensions par un modèleur CAO (e.g. Pro/Engineer). Des outils multi-corps (e.g. ADAMS) sont utilisés pour transmettre les efforts externes, issus d'une utilisation spécifique, à l'organe qui fait l'objet de l'étude. Ce dernier peut alors être isolé, avec ces efforts, pour qu'un logiciel de calcul par éléments finis puisse calculer les contraintes internes à la structure. Des exemples d'outils impliqués dans ce processus (e.g. ANSYS) sont donnés aux Annexes VI.2 et VI.3, avec leurs caractéristiques.

Bien que tous ces outils soient bien souvent considérés séparément, certains logiciels intègrent plusieurs modules ou agissent à titre de passerelle pour fournir un environnement de conception intégré (Annexe VI.4). Dans cette annexe, on mentionne notamment l'existence du logiciel OPTIMUS qui collabore avec des outils éléments finis pour réaliser des simulations de Monte Carlo et des calculs par la méthode *FOSM* (*First Order Second Moment*).

Cependant, plusieurs laboratoires de recherche ont développé ce type d'expertise et même commercialisé des outils dédiés à l'analyse de la fiabilité (la thèse de Pendola *et al.* (2000) a précédé de peu la société Phimeca Engineering S.A. (2004)). L'Annexe VI.5 présente l'aboutissement des recherches des trois laboratoires Français, Belge et Autrichien.

4.1.3 Formulation de la fonction résistance

À partir de la fonction d'état limite, il est possible de définir une fonction $s(\vec{\mathbf{X}}^k)$ qui donne la résistance d'un produit $\vec{\mathbf{X}}^k$. Le calcul de $s(\bullet)$ sera formalisé au Chapitre 4 (section 3.3.2.a), cependant son principe consiste à charger progressivement le produit $\vec{\mathbf{X}}^k$ avec un chargement L jusqu'à l'apparition de la rupture ($z(\{\vec{\mathbf{X}}^k, L\}) = 0$), et cela sans tenir compte de la charge prévue par le scénario d'utilisation $f_L(\bullet)$. La valeur du chargement atteint correspond à la capacité ou la résistance du produit. Ainsi $S^k = s(\vec{\mathbf{X}}^k)$ signifie que $z(\{\vec{\mathbf{X}}^k, S^k\}) = 0$.

4.2. Simulation par la technique de Monte Carlo

La technique de simulation de Monte Carlo reproduit le fonctionnement d'un système réel par le biais d'une méthode analytique et analyse les effets des variations des entrées sur les sorties du système. Elle comprend six éléments clés :

- définir le problème en termes de variables aléatoires de conception ;
- identifier les caractéristiques probabilistes de toutes les variables aléatoires en terme de fonction de densité de probabilité et des paramètres associés ;
- générer des valeurs pour ces variables aléatoires ;
- évaluer le problème pour chaque ensemble de données ;
- conclure sur la probabilité de défaillance du produit ;
- déterminer la précision de la simulation.

En général, les ordinateurs modernes sont capables de générer des nombres distribués uniformément entre 0 et 1. L'Annexe VII.1 décrit le principe de Monte Carlo générant N valeurs pour chacune des n variables de conception, selon la distribution qui les définit. On génère ainsi un échantillon de N produits et N scénarios d'utilisation. L'ensemble des $k^{\text{èmes}}$ valeurs générées définit un couple produit-usage k , qui peut être représenté par un vecteur $\vec{Y}^k = (X_1^k, X_2^k, \dots, X_n^k, L^k)$ avec $k = 1..N$.

L'évaluation classique du problème consiste à soumettre chaque couple aux tests afin d'identifier le nombre de produit N_f qui ne survit pas à son scénario. Analytiquement, cela équivaut à évaluer la fonction $z(\vec{Y}^k)$ et à compter le nombre de couples produit-usage pour lesquels $z(\vec{Y}^k) < 0$. L'équation (3.38) permet alors de calculer la probabilité de défaillance et la fiabilité.

$$p_f = 1 - R = \frac{N_f}{N} \quad (3.38)$$

L'un des inconvénients majeurs des méthodes de Monte Carlo est le grand nombre de simulations requis dans certains cas. En effet, pour une faible probabilité de défaillance, un petit nombre de simulations peut conduire à une erreur importante. L'Annexe VII.2 détaille l'estimation de l'erreur proposée par Shooman (1990).

Cependant, il faut noter qu'il existe une alternative à l'augmentation de la taille de l'échantillon pour améliorer l'efficacité de ces simulations. Il s'agit de réduire la

variance ou l'erreur de la réponse étudiée sans altérer sa moyenne et sans augmenter la taille de l'échantillon. L'Annexe VII.3 fait référence à certaines de ces techniques, également connues sous l'acronyme *VRTs* (pour *variance-reduction techniques*), parmi lesquelles on retrouve les facteurs d'importance (*importance sampling*), largement répandus.

4.3. Méthodes de premier ordre et de second ordre

Les méthodes de premier ordre et de second ordre (*FORM* pour *First order reliability methods* et *SORM* pour *Second order reliability methods*) utilisent la formulation de l'état limite. Elles travaillent avec la variable aléatoire Z de la fonction de performance $z(\bullet)$, la variable aléatoire de la résistance, elle, n'est plus identifiée explicitement. En fait, on peut considérer que la variable Z agrège la contrainte et la résistance : $Z = S - L$.

L'équation (3.39) donne la formule la plus générale pour le calcul de la probabilité de défaillance P_f et la fiabilité R de la structure en utilisant le formalisme de l'état limite.

$$P_f = 1 - R = \int \dots \iint_{z(\vec{Y}) < 0} f_Y(\vec{Y}) \quad (3.39)$$

Où $f_Y(\bullet)$ est la fonction de densité commune à toutes les variables (les composantes de \vec{Y}). Si les variables sont statistiquement indépendantes, cette fonction peut être remplacée par le produit de toutes les fonctions de densité individuelles ($f_Y(\bullet) = f_{Y_1}(\bullet) \cdot f_{Y_2}(\bullet) \cdot \dots \cdot f_{Y_{n+1}}(\bullet)$). Dans le cas général, la fonction de densité commune est quasi impossible à obtenir et l'évaluation de l'intégrale multiple reste difficile.

4.3.1 Calcul de la fiabilité

Pour simplifier les calculs, on peut faire l'hypothèse que les valeurs de la fonction performance Z suivent une loi normale (Figure 3.13). Dès lors, la fiabilité R et la probabilité de défaillance P_f de la structure sont obtenues grâce au calcul d'un indice de sécurité ou de fiabilité, noté β_Z . Soit $\Phi(\bullet)$ la fonction de probabilité de la loi normale standard, les équations (3.40) et (3.41) expriment les relations entre P_f , R et β qui correspond à l'inverse du coefficient de variation de la variable aléatoire Z .

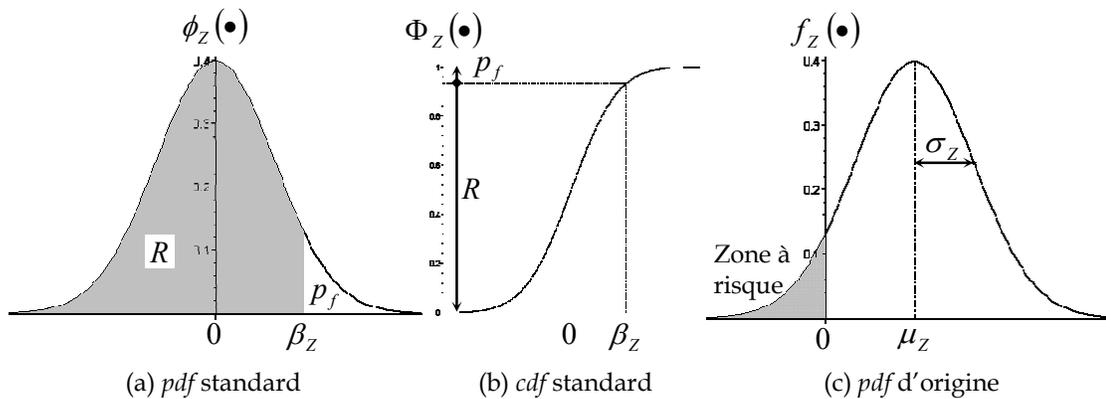


Figure 3.13 : Distribution de la fonction performance - variable aléatoire Z

$$P_f = \Pr(Z \leq 0) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta_Z) \quad (3.40)$$

$$R = 1 - P_f = \Phi(\beta_Z) \text{ avec } \beta_Z = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (3.41)$$

Remarque : si le produit est soumis à une seule charge (la contrainte L) et s'il peut être modélisé à partir d'une seule variable de conception (la résistance S), la fonction de performance s'exprime : $z(\{S, L\})$. Dans ce cas, l'indice β correspond à celui qui a été établi à la section 3.3.3.a.

Pour estimer la fiabilité, il faut être en mesure de calculer β . La méthode du premier ordre et des moments d'ordre deux, également appelée *First-Order Second-Moment Method (FOSM)* ou *Mean Value First-Order Second-Moment Method (MVFOSM)*, qui est détaillée à l'Annexe VIII.1, permet de trouver cet indice, dit de Cornell (introduit à la section 3.3.4).

Cependant, il a été démontré que la valeur de l'indice calculé est dépendante de la formulation de la capacité et de la demande même si elles sont équivalentes (Haldar & Mahadevan (2000), Huther (2004)).

4.3.2 Méthode Hasofer-Lind

4.3.2.a Avec variables normales

Pour pallier ce problème, la méthode Hasofer-Lind considère un nouvel indice, β_{HL} , dont la définition a été donnée à la section 3.3.4. Cette méthode, connue sous l'acronyme *Advanced First-Order Second Order Method (AFOSM)*, s'applique dans le cas de variables indépendantes et normalement distribuées. L'équation (3.44) permet de réduire les variables sous une forme standard :

$$Y'_i = \frac{Y_i - \mu_{Y_i}}{\sigma_{Y_i}}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n+1 \quad (3.42)$$

Ainsi Y'_i est une variable aléatoire normale standard de moyenne nulle et d'écart type unitaire. Ces changements de variables transforment l'état limite original $z(\vec{Y})=0$ en un état limite réduit $z(\vec{Y}')=0$.

L'indice de fiabilité β_{HL} est alors défini comme étant la distance minimale entre l'origine du système de coordonnées réduit et la surface de défaillance (section 3.3.4). Il s'exprime ainsi :

$$\beta_{HL} = \sqrt{(\vec{y}^*)^t (\vec{y}^*)} \quad (3.43)$$

Le point de distance minimale sur la surface de défaillance est appelé point de conception ou point de contrôle. Ses coordonnées sont indiquées par le vecteur \vec{y}^* dans le système de coordonnées original et par \vec{y}^* dans le système de coordonnées réduit.

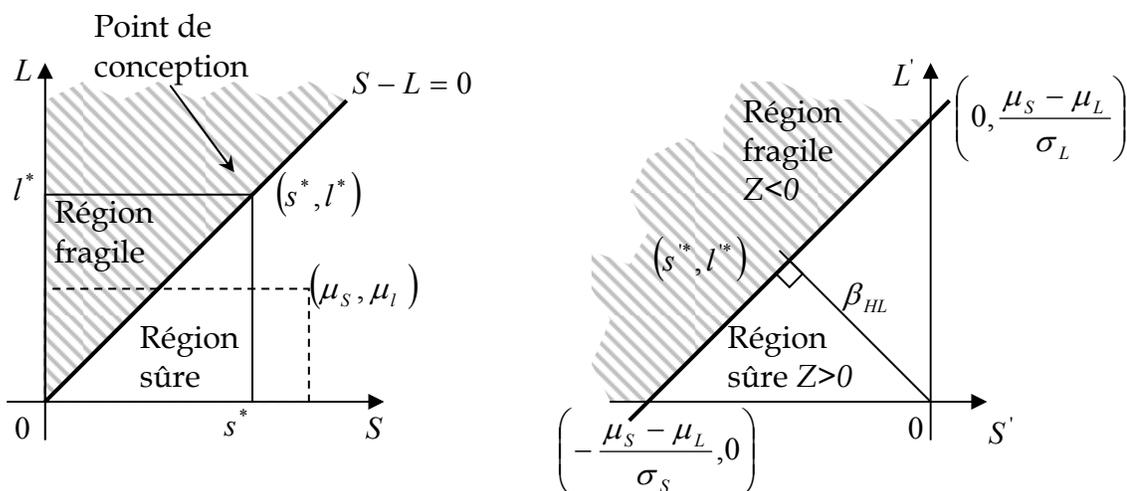
Cette méthode peut être illustrée en deux dimensions si on considère un état limite linéaire fonction de deux variables. Soit, par exemple, une structure de résistance S , sur laquelle est appliqué un effort L . La survie de la structure est conditionnée par la supériorité de S sur L . Ainsi, la fonction de performance peut être exprimée de la façon suivante :

$$Z = z(\vec{Y}) = z(\{S, L\}) = S - L \quad (3.44)$$

L'équation dans l'espace des coordonnées réduite devient :

$$z(\vec{Y}') = \sigma_S \cdot S' - \sigma_L \cdot L' + \mu_S - \mu_L = 0 \quad (3.45)$$

Remarque : même si la fonction $z(\bullet)$ change d'expression quand elle est exprimée à partir du vecteur \vec{Y}' , elle reste écrite $z(\vec{Y}')$ - et non pas $z'(\vec{Y}')$. En effet, elle donne toujours la même valeur et cela simplifie les notations.



(a) Coordonnées originales

(b) Coordonnées réduites

Figure 3.14 Indice de Hasofer-Lind sur une fonction performance linéaire

L'indice de fiabilité peut alors être calculé à partir de simples règles de trigonométrie :

$$\beta_{HL} = \frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_L^2}} \quad (3.46)$$

Cependant, la plupart des états limites ne sont pas linéaires, même dans l'espace des coordonnées standard. De plus, ils peuvent comporter bien plus de deux variables.

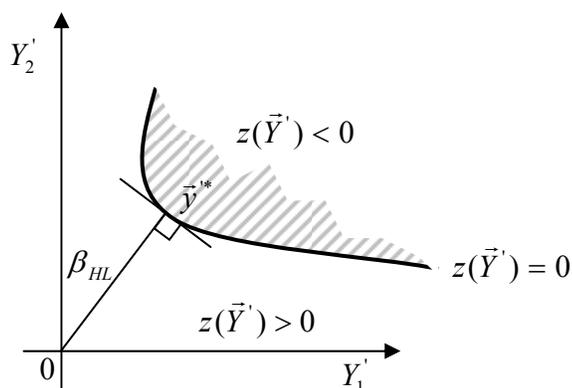


Figure 3.15 : État limite non linéaire dans l'espace des coordonnées réduites

Dans ce cas, le calcul de β_{HL} devient un problème d'optimisation :

$$\begin{aligned} \text{Minimiser } & \beta_{HL} \\ \text{sujet à } & z(\bar{y}) = z(\bar{y}') = 0 \end{aligned} \quad (3.47)$$

L'algorithme développé par Rackwitz & Fiessler (1976) permet de calculer β_{HL} par approximations linéaires à chaque point de contrôle, à chaque itération. Cet algorithme fut ensuite enrichi pour calculer β_{HL} lorsque les variables de base ne suivent pas des lois normales.

4.3.2.b Avec variables non normales

Dans de nombreux problèmes, les variables ne suivent pas des lois normales. Le principe consiste alors à ajouter une étape de transformation des lois non normales en lois normales équivalentes. Parmi les procédures de transformation les plus utilisées, on retrouve :

- la transformation de Rosenblatt ;
- l'approximation de Paloheimo ;
- la méthode de Rackwitz-Fissler (utilisée dans nos travaux et dont l'algorithme est donné en Annexe VIII.2).

4.3.3 Algorithme de calcul FORM2 pour l'indice de Hasofer-Lind

Haldar & Mahadevan (2000) présente un premier algorithme, *FORM1*, qui nécessite la connaissance explicite de $z(\bar{Y})$, plus précisément son expression en fonction de β_{HL} . Dans notre situation, nous recourons aux calculs par éléments finis pour calculer $z(\bullet)$, c'est pourquoi nous étudions l'algorithme *FORM2* (Haldar & Mahadevan (2000)), qui calcule la valeur de β à partir d'une expression implicite de $z(\bullet)$. Le Tableau 3.3 détaille cet algorithme.

Tableau 3.3 : Algorithme FORM2

1.	Définir l'équation appropriée pour l'état limite, là où la fonction performance est nulle : $z(\vec{Y}) = 0$.
2.	Assigner une valeur de départ au point de conception \vec{y}_1^* et calculer la valeur correspondante de la fonction performance : $z(\vec{y}_1^*)$. En l'absence d'autres informations, les composantes du vecteur seront définies par les valeurs moyennes des variables aléatoires $y_{i,1}^* = \mu_{Y_i}$, $\forall i = 1, 2, \dots, n+1$.
RÉPÈTE pour $t = 1, 2, 3, \dots$	
3.	Calcul des moyennes et écarts types standards, respectivement $\mu_{Y_i}^N$ et $\sigma_{Y_i}^N$, pour les variables qui ne suivent pas la loi normale. Ces paramètres doivent être recalculés à chaque itération, selon le point de conception en cours.
4.	Calcul des dérivées partielles $(\partial z / \partial Y_i)$, évaluées au point de conception \vec{y}_t^* .
5.	Transformation des dérivées partielles dans l'espace des coordonnées standard $(\partial z / \partial Y_i')$: $\frac{\partial z}{\partial Y_i'} = \frac{\partial z}{\partial Y_i} \cdot \sigma_{Y_i}^N \quad \text{soit} \quad \frac{\partial z}{\partial Y_i'}(\vec{y}_t^*) = \frac{\partial z}{\partial Y_i}(\vec{y}_t^*) \cdot \sigma_{Y_i}^N$ au point de conception. avec $y_i^{**} = \frac{y_i^* - \mu_{Y_i}^N}{\sigma_{Y_i}^N}$
Ces dérivées sont les composantes du vecteur gradient de la fonction performance $\vec{\nabla} z(\vec{y}_t^*)$, calculé au point de conception.	
6.	Calcul du nouveau point de conception dans l'espace de coordonnées standard, ce dernier doit converger sur la surface de défaillance ($z(\vec{y}_t^*) = 0$).
6a.	Changement de coordonnées pour converger sur la surface de défaillance : $\vec{y}_{t+1}^* = \frac{1}{\|\vec{\nabla} z(\vec{y}_t^*)\|^2} \left[\vec{\nabla} z(\vec{y}_t^*) \cdot \vec{y}_t^* - z(\vec{y}_t^*) \right] \vec{\nabla} z(\vec{y}_t^*)$
6b.	Si $\|\vec{y}_{t+1}^* - \vec{y}_t^*\|^2 \leq \delta$ et si $|z(\vec{y}_{t+1}^*)| \leq \varepsilon$ où δ et ε imposent la précision (par exemple 0.001), on considère alors que le nouveau point est sur la surface de défaillance.
7.	Calcul de la nouvelle distance entre le point de conception et l'origine : $\beta_{t+1} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i,t+1}^*)^2}$ où les $y_{i,t+1}^*$, $\forall i = 1, 2, \dots, n+1$ sont les composantes du vecteur \vec{y}_{t+1}^* .
8.	Calcul des coordonnées du point de conception dans l'espace des coordonnées original. $y_{it+1}^* = \mu_{Y_i}^N + \sigma_{Y_i}^N \cdot y_{i,t+1}^*$
FIN	si $|\beta_{t+1} - \beta_t| \leq \delta'$ et si $|z(\vec{y}_{t+1}^*)| \leq \varepsilon'$ où δ' et ε' imposent la précision, par exemple 0.001.

4.4. Algèbre des variables aléatoires

Si on considère l'algèbre des variables aléatoires, il est possible d'obtenir la réponse d'un système régi par plusieurs variables aléatoires d'entrée (Haldar & Mahadevan (2000)). Par exemple, si on considère la résistance S du produit comme la réponse du produit aux paramètres d'entrée (i.e. les variables de conception contenues dans le vecteur \vec{X}), l'objectif est d'identifier les caractéristiques de la fonction de distribution de la variable aléatoire S . On aurait pu choisir d'observer les durées de vies T , le chargement L ou tout autre réponse liée à l'estimation de la fiabilité.

4.4.1 Relations entre des éléments connus

L'algèbre des variables aléatoires permet de trouver partiellement ou totalement les caractéristiques de la réponse quand la relation entre les variables et la réponse est connue. L'Annexe IX le démontre pour des relations linéaires connues et inconnues, pour des relations non linéaires connues entre une seule variable et la réponse ainsi que pour des relations connues entre plusieurs variables aléatoires indépendantes et la réponse.

Bien que la manipulation des expressions soit simplifiée, seuls les cas très simples permettent d'exprimer explicitement la résistance en fonction des variables de conception. Le récapitulatif (Tableau 3.4) compare les possibilités de chacun des cas de figure. Le cas suivant est le plus général.

4.4.2 Développement en séries de Taylor

Dans le cas où la relation $s(\bullet)$, entre la réponse S et les variables indépendantes de \vec{X} , ne peut être établie de façon explicite, la moyenne et l'écart type de la réponse peuvent être approximées par des séries de Taylor (*TSFD* pour *Taylor Series Finite Difference*). Cette méthode, qui nécessite la connaissance des moyennes μ_{x_i} et des écarts types σ_{x_i} des n variables de base X_i , est décrite ci-dessous.

La réponse de la structure doit être analysée deux fois pour chaque variable, soit $2.n$ analyses (équations (3.48) et (3.49)), et une fois aux valeurs moyennes pour calculer la moyenne (équation (3.50)), soit une analyse supplémentaire. Au total, cette méthode nécessite $1+2.n$ analyses de la structure. La relation (3.51) se contente de reprendre les $2.n$ premières analyses pour calculer l'écart type de la réponse.

$$S_i^+ = s\left(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \left(\mu_{X_i} + \sigma_{X_i}\right), \dots, \mu_{X_n}\right) \quad (3.48)$$

$$S_i^- = s\left(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \left(\mu_{X_i} - \sigma_{X_i}\right), \dots, \mu_{X_n}\right) \quad (3.49)$$

$$E(S) \approx s\left(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_i}, \dots, \mu_{X_n}\right) \quad (3.50)$$

$$\text{Var}(S) \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i^+ - S_i^-}{2} \right)^2 \text{ avec } \text{Var}(S) = \sigma_S^2 \quad (3.51)$$

4.4.3 Récapitulatif

Parmi les approches basées sur l'algèbre de variables aléatoires, certaines restreignent le choix des lois des variables d'entrée à certaines distributions particulières. D'autres ne renseignent pas complètement la réponse (i.e. sa distribution et tous ses paramètres). Le Tableau 3.4 propose une comparaison des différentes méthodes.

Tableau 3.4 : Comparaison des méthodes basées sur l'algèbre des VA

	n VA de conception X_i	Calcul de la réponse	Mise en oeuvre
Relation connue	Relation linéaire ($n = 1$)	La réponse est calculable explicitement.	Dans la pratique, la réponse est fonction de plusieurs variables et les relations sont rarement aussi triviales. De plus, les hypothèses sur les lois de distribution des X_i sont très restrictives.
	Relation non linéaire ($n = 1$)		
	Relation linéaire ($n \geq 1$)	Réponse calculable seulement pour des X_i normales.	
	Somme ($n \rightarrow \infty$)	Réponse assimilable à une loi normale si aucune des lois des X_i ne domine l'autre.	
	Produit ou quotient ($n \geq 1$)	Réponse calculable seulement pour des X_i log-normales.	
	Relation connue quelconque ($n \geq 1$)	Si les lois des X_i sont inconnues ou différent, la réponse reste indéterminée. Seuls la moyenne et l'écart type peuvent être calculés.	La relation quelconque est plus apte à modéliser la réalité. Cependant, les informations qu'on en retire sont moins précises. Il n'y a pas d'indication sur la loi de distribution, seulement sur : <ul style="list-style-type: none"> • la moyenne ; • l'écart type.
Rel. inconnue	Relation inconnue quelconque ($n \geq 1$)	Si la relation n'est pas explicite, il faut exécuter $1+2.n$ analyses pour pouvoir calculer la moyenne et l'écart type de la réponse	

4.5. Bilan

4.5.1 Évaluation de la fonction performance

Que ce soit pour la formulation de l'état limite en fonction des variables aléatoires de conception et de la charge ou pour la formulation de la résistance en fonction des variables de conception, la définition des fonctions $z(\bar{\mathbf{Y}})$ et $g(\bar{\mathbf{X}})$ est une étape complexe, en particulier lorsque des calculs éléments finis sont mis en oeuvre pour le calcul des contraintes (Huther (2004)).

L'expression exacte de ces fonctions est rendue difficile par la complexité des processus physiques en jeu. Cependant, les outils informatiques récents ont fait beaucoup de progrès dans ce domaine (Schuëller (2000)). Pendola *et al.* (2000)

donnent d'ailleurs l'exemple de l'utilisation de la méthode des éléments finis pour les produits mécaniques complexes.

4.5.2 Efficacité des approches

4.5.2.a Approche de Monte Carlo

Elle définit complètement la réponse étudiée mais présente l'inconvénient de nécessiter un grand nombre de simulations, ce qui peut s'avérer très long, surtout quand des calculs éléments finis sont en jeu. Curbach & Proske (2004) présentent des cas pratiques où les durées d'exécution vont jusqu'à une semaine, même avec des techniques de réduction de la variance.

Cette nature critique de l'analyse de Monte Carlo vient avec la précision de la grandeur à mesurer. Dans l'approche classique, il s'agit de déterminer une probabilité de défaillance qui peut être très faible. Au Chapitre 4, nous proposons d'utiliser les simulation de Monte Carlo pour évaluer la fonction de résistance $s(\bullet)$ et déterminer la distribution de la résistance $f_s(\bullet)$ plutôt que de compter les défaillances de la fonction de performance $z(\bullet)$.

4.5.2.b Les méthodes du premier et du second ordre

Les méthodes *FORM/SORM* expriment un indice de fiabilité en faisant l'hypothèse que la fonction performance suit une loi normale. Le calcul de la fiabilité n'a été détaillé que pour la méthode de premier ordre (section 4.3). Bien qu'il apparait que la méthode *FORM* devienne de plus en plus imprécise avec l'augmentation du nombre de variables, nous en proposons une utilisation au Chapitre 4.

Les approches de second ordre, ou méthodes *SORM* pour *Second Order Reliability Method*, ont été envisagées en faisant l'hypothèse qu'un développement de l'état limite au second ordre était meilleur qu'un développement au premier ordre.

L'approche est similaire, les calculs du gradient sont simplement remplacés par ceux du Hessien. Ces calculs ne seront pas implémentés dans notre étude mais les temps de calculs seraient plus élevés.

Dans une revue de la littérature sur l'estimation de la fiabilité, Rackwitz (2001) rapporte que la théorie du premier ordre suffit à résoudre 90% des problèmes (la précision numérique est généralement suffisante), spécialement en regard des incertitudes dans la sélection du modèle stochastique et de ses paramètres.

Du point de vue du principe, il faut noter que les techniques *FORM/SORM*, basées sur la recherche du « point le plus probable » pour la rupture ont des détracteurs. Mentionnons le site Internet de Annis (2005) dont une partie est consacrée à démystifier ces techniques : « Why the "Most Probable Point" Isn't » et « How FORM/SORM is *Supposed* to Work ». Il y soutient, entre autres points, que les défaillances ne résultent pas de combinaisons de variables, toutes situées autour d'un unique « point » et appuie ses dires sur l'analyse de données obtenues par des tests en laboratoire.

4.5.2.c L'algèbre des variables aléatoires

L'algèbre des variables aléatoires, limitée aux relations linéaires ou multiplicatives, n'est pas vraiment adaptée à la complexité des systèmes étudiés. De plus, les conclusions sur la réponse sont limitées.

Nous retenons que les développements en séries de Taylor semblent pouvoir s'adapter à la majorité des situations. À ce titre, nous proposons une utilisation au Chapitre 4 : calculer la moyenne et l'écart type de la distribution de la résistance S , ce qui n'est pas suffisant, a priori, pour calculer la fiabilité selon l'approche contrainte/résistance. Cependant, un nombre suffisant de variables de conception permet de faire l'approximation du théorème limite central (la réponse suit alors une loi normale). Bien que cette hypothèse soit largement utilisée par l'approche

contrainte/résistance, l'impact d'une telle approximation sur le calcul de la fiabilité est étudié.

4.5.3 Les besoins en données et en ressources

Chacune des approches a des besoins différents quant à la nature, la quantité des informations requises pour leur application (la définition des variables de conception comme les propriétés des matériaux par exemple). Or, Kececioglu (1977) a bien souligné la criticité, toujours actuelle, du manque de disponibilité des données au stade de la conception. De plus, d'après notre expérience dans le domaine automobile (Zwingmann (2001)), la définition précise de ces distributions engendre des coûts très importants (même quand l'entreprise dispose de son propre centre d'essais).

Outre l'efficacité (qualité) de l'estimation donnée au concepteur, selon la méthode choisie et la qualité des données, il faut s'assurer de l'efficience (rapidité) de l'estimation, selon la complexité des calculs :

- Pour l'approche Monte Carlo, les lois des variables de conception doivent être totalement renseignées, pour être utilisées au mieux de leur définition. L'inconvénient majeur de cette approche est la longueur des calculs nécessaires. En effet, pour reproduire au mieux les lois des variables de conception qui sont données en entrées, le nombre de simulations et les temps de calculs sont élevés.
- Pour les méthodes *FORM/SORM*, l'indice β est obtenu avec un nombre limité d'itérations. Cependant, les besoins en données sont grands : les variables de conception doivent être totalement renseignées (lois et paramètres). Malgré cette exigeante précision, ces lois sont transformées en lois normales équivalentes à chaque itération. Le calcul de la fiabilité avec *FORM* est alors beaucoup plus rapide que par les simulations de Monte Carlo.
- Dans le cas de l'algèbre des variables aléatoires, les lois de probabilités se doivent d'être normales ou log-normales suivant que la relation étudiée est linéaire ou multiplicative. Dans ces cas très limités, la réponse est obtenue quasi immédiatement, sans calculs exigeants.
- Pour les séries de Taylor, seuls la moyenne et l'écart type des variables de conception sont nécessaires. Le temps de calcul dépend du nombre de variables de conception : $1+2.n$ itérations pour n variables.

4.5.4 Conclusion

Deux tâches se distinguent pour l'évaluation de la fiabilité par prototypes virtuels que nous proposons dans cette thèse : la génération des prototypes virtuels et l'évaluation de leur comportement. La deuxième tâche requiert la mise en œuvre de plusieurs outils tels que les systèmes CAO et de calculs par éléments finis. La première tâche peut se faire par des outils dédiés à l'approche utilisée, i.e. qui gèrent les simulations de Monte Carlo par exemple.

Ces fonctionnalités essentielles sont bien souvent réparties dans plusieurs logiciels commerciaux. Bien que certaines solutions informatiques agissent à titre de passerelles, de plus en plus transparentes pour l'utilisateur, l'intégration du calcul de la fiabilité au stade de la conception n'est pas parfait.

Nos travaux mettent en place une méthodologie d'estimation de la fiabilité. Nous privilégions l'utilisation des développements en séries de Taylor qui semblent, a priori, plus appropriés. Nous proposons également une architecture informatique capable de gérer des échantillons de prototypes virtuels tout au long du processus de test. Cette architecture est basée sur le modèle orienté-objets de FSC (section 2.2 du Chapitre 2).

Chapitre 4.

Évaluation de la fiabilité

Les éléments identifiés lors de l'état de l'art sur l'analyse de la fiabilité du précédent chapitre nous permettent de mettre en place les étapes nécessaires à l'évaluation de la fiabilité par prototypes virtuels. Dans un premier temps, ce chapitre identifie les facteurs servant à la création d'échantillons de prototypes virtuels. Puis, on propose deux types d'évaluation comportementale des prototypes : évaluation contextuelle de la performance et évaluation intrinsèque de la résistance. Le point fort de ce chapitre réside dans le développement d'une nouvelle alternative pour la génération des échantillons virtuels. Ce nouveau modèle est basé sur l'approche contrainte/résistance ainsi que sur les développements en séries de Taylor (*TSFD*) de la résistance et requiert moins de données que les autres méthodes (Monte Carlo, *FORM/SORM*). Il sert également à l'estimation de la fiabilité en fonction du temps. L'architecture proposée est intégrée à l'approche FSC pour collaborer avec les outils de la CAO.

1. Introduction

1.1. Module d'évaluation de la fiabilité

Le développement d'un module d'analyse de la fiabilité selon la méthodologie FSC (Coulibaly *et al.* (2000)) doit suivre un certain nombre d'étapes :

- identification des facteurs ayant une influence sur la fiabilité ;
- hiérarchisation des facteurs ;
- formalisation des facteurs (avec identification de leurs paramètres) ;
- évaluation de la fiabilité.

1.2. Modèle d'intégration dans un environnement de définition de produit

1.2.1 Modèles fonctionnel et structurel

Avant d'élaborer le modèle comportemental spécifique à la fiabilité, il faut que les modèles fonctionnel et structurel soient définis. La modélisation fonctionnelle du produit permet d'identifier les fonctions principales du produit. Leur importance est déterminée en fonction des attentes du client afin d'identifier les pièces essentielles dont la fiabilité doit être évaluée en priorité.

Selon la modélisation structurelle du produit, un certain nombre de composants interviennent dans la réalisation de chaque fonction. Leur structure est représentée dans le système CAO par un modèle volumique ou surfacique en trois dimensions. On suppose, dans un premier temps, que tous ces composants sont indispensables, c'est-à-dire que la défaillance d'un seul d'entre eux entraîne la perte de la fonction.

1.2.2 Principe de l'analyse de la fiabilité

Habituellement, les systèmes CAO représentent des produits exempts des défauts de la réalité. En caractérisant les différents facteurs affectant la résistance d'une pièce à l'aide de paramètres adéquats, nous sommes en mesure de générer des échantillons virtuels, non plus « parfaits » mais représentatifs de la diversité du réel. Nous distinguons les facteurs **intrinsèques** (propres au produit) et les facteurs **extrinsèques** (extérieurs au produit).

La Figure 4.1 présente le cheminement de l'évaluation de la fiabilité. Après avoir identifié les facteurs intrinsèques et extrinsèques, chacun est caractérisé par un ou plusieurs paramètres dont on change les valeurs pour générer divers prototypes virtuels. Pour cela, nous devons connaître les valeurs que peuvent prendre les paramètres, soit dans un intervalle prédéfini ou selon une distribution de probabilité.

Ce mode de fonctionnement permet d'en produire et d'en tester autant que désiré, a priori sans limitation de taille d'échantillon (on verra cependant que la durée des calculs peut s'avérer contraignante).

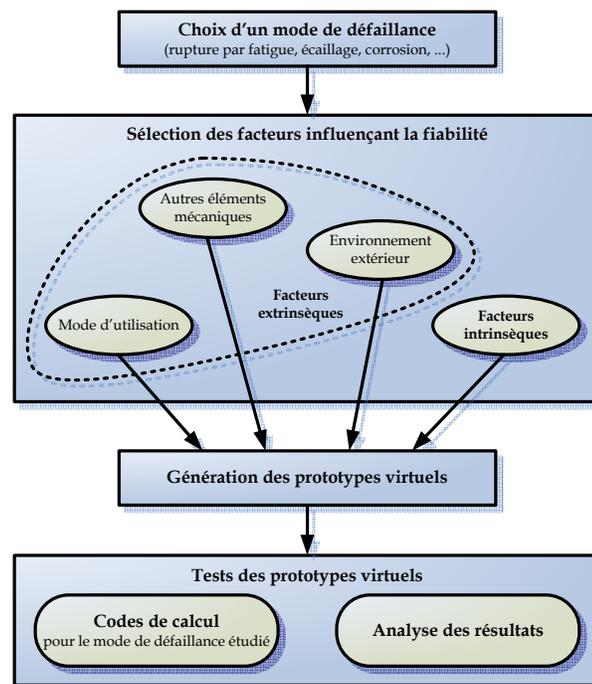


Figure 4.1 : Principe de validation de la fiabilité utilisant des prototypes virtuels

1.2.3 Données requises

Au fur et à mesure du développement du modèle, nous identifions les paramètres nécessaires au calcul de la fiabilité. Certains d'entre eux sont systématiquement intégrés en CAO (les dimensions, l'épaisseur des matériaux, etc.), tandis que d'autres sont plus rarement disponibles (courbe de Wöhler, limite d'élasticité, etc.).

Dans ce dernier cas, soulignons la nécessité de les intégrer en utilisant le modèle sématique de FSC.

Comme indiqué en Partie A, le modèle sémantique concerne essentiellement les données extrinsèques au produit. On y rassemble essentiellement la criticité des fonctions, les tolérances et les imprécisions dûes aux choix des méthodes de fabrication et les dispersions des caractéristiques des matériaux selon le choix des fournisseurs.

2. Identification et caractérisation des facteurs influençant la fiabilité

Pour un mode de défaillance quelconque, la fiabilité d'une pièce peut avoir différentes origines. Les facteurs influençant la fiabilité sont identifiés par une séance de « remue-méninges » puis représentés sur un diagramme causes-effets (ou Ishikawa). La Figure 4.2 propose une identification non exhaustive des causes affectant la fiabilité.

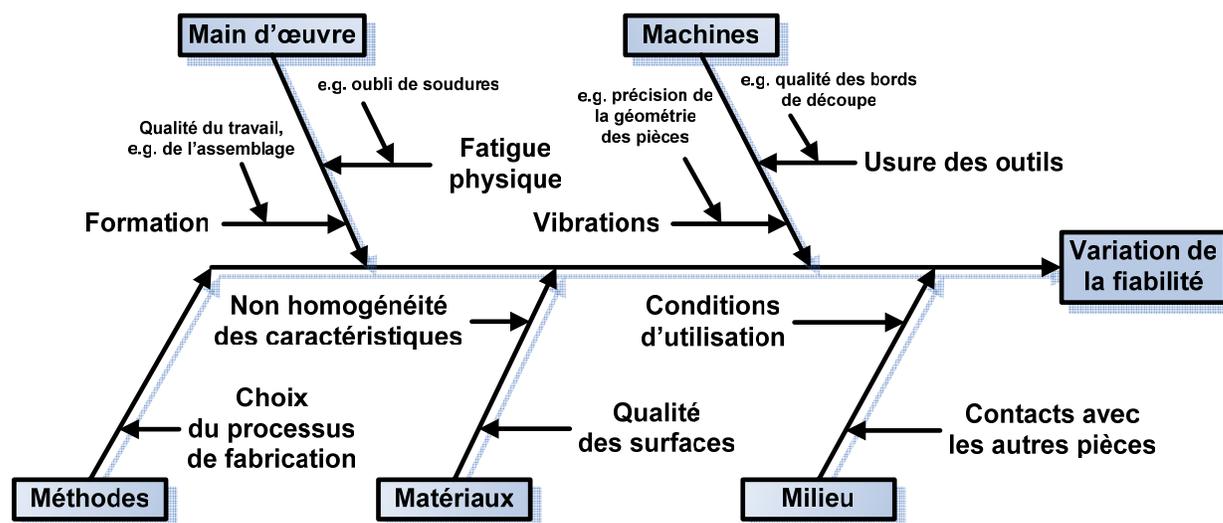


Figure 4.2 : Identification partielle des facteurs influençant la fiabilité

Cette analyse peut être conduite de façon beaucoup plus spécifique pour un mode de défaillance particulier. Dans ce cas, il suffit de remplacer l'effet générique « Variation de la fiabilité » (au sommet de l'arête d'Ishikawa), par le mode de défaillance à étudier. À la section 3.3, nous concentrons l'étude sur le mode de défaillance régi par le dépassement de la limite élastique par la contrainte interne.

Les facteurs intrinsèques, susceptibles d'affecter les caractéristiques du produit, sont reliés aux domaines « Matériaux », « Méthodes », « Main d'œuvre » et « Machines ». Les facteurs extrinsèques sont issus du domaine « Milieu/Environnement ».

Pour présenter et caractériser les différents types de facteurs jouant sur la fiabilité, nous regroupons les catégories « Méthodes » et « Machines ». Chaque section se termine par un aperçu des besoins en données pour intégrer ses facteurs dans le calcul de fiabilité.

2.1. Cause « Matériaux »

2.1.1 Dispersion des propriétés intrinsèques

D'une manière générale, les fournisseurs de matières premières ne peuvent garantir totalement que leur production garde constamment le même niveau de qualité. Ainsi, il est possible de trouver des variations dans les caractéristiques d'un même matériau, constituant un même produit ou plusieurs produits d'une même gamme. Comme les propriétés des matériaux sont fortement liées à la tenue du produit, il est nécessaire de pouvoir en vérifier la qualité.

Pour des raisons de coûts, il est très difficile de garantir la valeur de tous les paramètres caractérisant un matériau. Ainsi, dans le cas du matériau HE 320 DR (à Haute limite Élastique $R_e = 320MPa$) par exemple, une des caractéristiques garantie par le fournisseur est l'intervalle de tolérance sur la résistance à la rupture à 0.2% de déformation élastique ($R_{p0.2\%}$) pour le matériau :

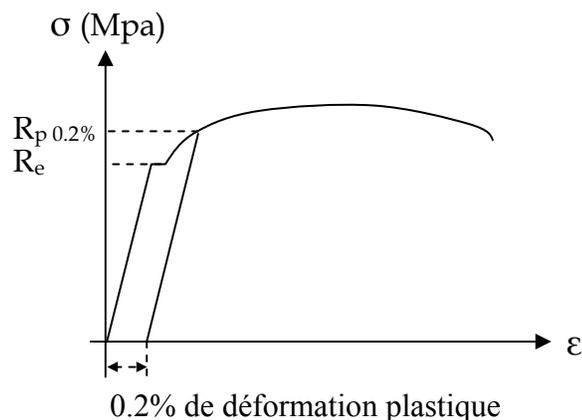


Figure 4.3 : Loi de Hooke – Limite à la rupture à 0,2 % de déformation plastique

2.1.2 Traitement de surface - la galvanisation

Les traitements de surface rendent généralement le comportement du produit complexe. Il s'avère qu'un matériau galvanisé, de par sa couche superficielle rapportée, a une tenue en fatigue inférieure à celle du matériau brut (Zwingmann (2001)). Ceci proviendrait du fait qu'au niveau des défauts ou imperfections contenus dans la couche de galvanisation, l'amorçage de fissure se fasse plus rapidement entraînant ainsi, par la même occasion et dans sa continuité, la fissuration de la plaque de base.

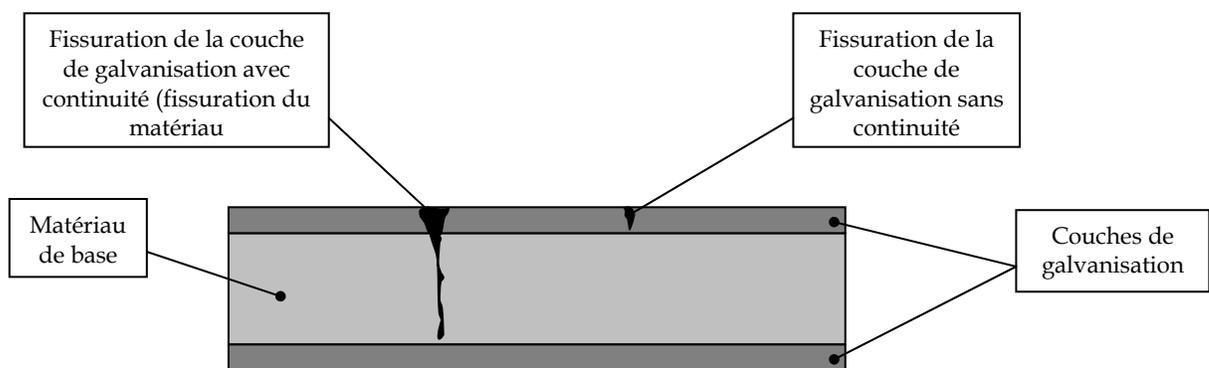


Figure 4.4 : Influence de la galvanisation sur la tenue en fatigue

2.1.3 Intégration de la cause « Matériaux » - les besoins en données

Afin de tenir compte des dispersions sur le matériau au sein du processus de simulation numérique, il est possible d'agir à plusieurs niveaux. Au niveau du code de calcul en résistance statique, les caractéristiques suivantes peuvent être modifiées :

- le module d'Young E ;
- le coefficient de poisson ν ;
- la masse volumique ρ .

Au niveau du code de calcul en fatigue, les caractéristiques employées sont les suivantes :

- la limite élastique R_e pour la correction de Neuber dans le domaine plastique ;
- la courbe de Wöhler pour le calcul de dommage ;
- la droite de Dang Van pour le calcul du coefficient de sécurité.

Or, les données du fournisseur de matière première ne touchent que la valeur de $R_{p0.2\%}$, sans indiquer l'influence d'une variation de R_p sur les caractéristiques de fatigue (courbe de Wöhler et droite de Dang Van). Les courbes de Wöhler synthétiques, construites analytiquement, permettent de répondre, du moins partiellement, à cette question.

Pour des données plus justes, les grands centres industriels investissent dans un département spécialisé qui réalise des tests de caractérisation, ce qui leur procure une base de données précises sur les matériaux qu'ils utilisent, ceux-ci n'étant pas forcément identifiés dans les tables. Dans notre étude, nous utilisons les mêmes caractéristiques de Wöhler et Dang Van quelle que soit la valeur de R_p .

La galvanisation (ou un autre traitement de surface) décrite plus tôt est encore mal connue et n'est donc pas prise en compte dans les calculs (i.e. changement de propriétés du matériau, augmentation de l'épaisseur, du poids, etc.). Dans nos travaux, le matériau est considéré comme homogène, avec des caractéristiques globales (ensemble matériau « pleine tôle » + galvanisation) provenant d'essais en laboratoire (valeurs tabulées).

D'une manière générale, il est possible de trouver de l'information sur les matériaux dans plusieurs journaux scientifiques tels que *Journal of Materials Science* publié par Springer (précédemment par Kluwer Academic) ou *Materials Science and Engineering A* et *Journal of light metals* publiés par Elsevier. À titre d'exemple, dans ce dernier journal, Sumitomo *et al.* (2002) étudient l'impact de la taille du grain, de la porosité, des composés de la solution solide et de revenu sur divers alliages de fontes.

2.2. Cause « Main d'œuvre »

2.2.1 Erreur humaine

2.2.1.a Classification

Toute conception est le fruit d'une réflexion humaine. À ce titre, un grand nombre de défaillances est d'origine humaine, qu'il s'agisse d'ignorance, de négligence ou de baisse de vigilance, de force ou de dextérité manuelle. Dhillon (1999a) cite plusieurs études qui illustrent ces faits. À titre d'exemple, une étude portant sur 23 000 défaillances dans la production de composants de l'industrie nucléaire a montré que 82% d'entre elles furent causées par une erreur humaine.

Les erreurs peuvent être classées en 6 catégories : les erreurs de décision, d'action, de transmission, de vérification de diagnostic et de recherche. Par contre, selon le sujet, elles peuvent se produire à 7 niveaux : lors de la conception, au niveau des opérateurs de fabrication, de l'assemblage, de l'inspection, de la maintenance, de l'installation ou lors du transport et du stockage (Dhillon (1999a)). Parmi toutes ces actions, Lewis (1987) considère deux volets :

- les opérations de routine, tout d'abord, où il considère les erreurs aléatoires, systématiques et sporadiques ;
- les opérations d'urgence où il montre que le niveau de stress influence la performance de l'opérateur (augmentation puis chute au-delà d'un seuil) et que la vigilance diminue avec le temps (tout comme la fiabilité).

2.2.1.b Causes

Dhillon (1999a) relate un certain nombre de causes qui expliquent l'erreur humaine, en plus du stress causé par les opérations d'urgence. Il mentionne le manque de motivation du personnel, l'absence d'entraînement ou d'habileté, la mauvaise conception des équipements, les procédures de fonctionnement et de maintenance inadéquates, l'environnement pauvre, le faible éclairage, les températures extrêmes, le bruit, la promiscuité, les outils non adaptés, la complexité des tâches, le mauvais agencement des postes, etc.

2.2.2 Variabilité de la qualité d'assemblage

2.2.2.a Pièces manquantes ou mal ajustées

Dans ce contexte, nous nous intéressons plus particulièrement aux conséquences des erreurs produites pendant le processus de fabrication.

Les problèmes de fiabilité peuvent survenir si, au moment de l'assemblage, l'opérateur oublie des pièces. Il s'agit néanmoins d'un cas très particulier où le produit peut ne pas fonctionner dès le début. Aussi, on fait l'hypothèse que toutes les pièces sont nécessaires au bon fonctionnement et que le contrôle de qualité post production est suffisant pour éviter ce type d'oubli.

Par contre, il peut subsister des problèmes d'ajustement, de montage susceptibles de provoquer une usure prématurée du composant. Dans le cas où un composant est mal ajusté, on choisit d'en tenir compte dans la variabilité de la géométrie due à une cause machine (section 2.3.1).

2.2.2.b Variabilité de la qualité des soudures

Quand un opérateur doit effectuer des opérations d'assemblage, des soudures par exemple, son niveau de stress, sa fatigue ou la pression peuvent affecter la qualité de son travail. Par exemple, la variabilité des soudures se traduit sur :

- la longueur du cordon de soudure ;
- la taille du point de soudure ;
- le nombre et la qualité des points de soudure.

La tenue d'un cordon de soudure peut être évaluée à partir de la caractéristique de Dang Van du cordon. La variabilité du cordon introduit des dispersions sur les paramètres de la droite de Dang Van (pente α et cisaillement à l'origine β). Quant à la résistance d'un point de soudure, Zwingmann (2001) rapporte qu'elle peut être caractérisée par un coefficient de risque (CR). L'équation (4.1) en donne

l'expression où $F_{\text{calculé}}$ est l'effort normal ou tangentiel calculé au point de soudure et F_{maximal} l'effort maximal acceptable, tiré d'une table de référence.

$$CR = \frac{F_{\text{calculé}}}{F_{\text{maximal}}} \quad (4.1)$$

L'intégration de l'erreur humaine pourrait se faire en ajustant la valeur tabulée F_{maximal} et ainsi traduire les dispersions de qualité d'un point de soudure. Quant au nombre de points de soudure oubliés, il provoque une hausse de l'effort sur les points effectivement réalisés. Si ces derniers ne sont plus suffisants (la charge totale étant moins bien répartie), la tenue du produit en est affectée.

2.2.3 Méthodes d'évaluation de la fiabilité humaine

La difficulté essentielle relative à l'intégration de l'erreur humaine dans notre évaluation de la fiabilité consiste à quantifier la fiabilité humaine. Dhillon (1999a) mentionne plusieurs techniques qui permettent son calcul : la construction d'un arbre de probabilité, d'un arbre de défaillance ou une représentation markovienne. Dans les deux derniers cas, les causes du diagramme ou les états markoviens sont remplacés par les tâches ou sous-tâches réalisées ou non avec erreur humaine.

Ces techniques fonctionnent de la même manière que pour la fiabilité des systèmes (section 3.2.1 du Chapitre 3) et, connaissant la probabilité d'occurrence de certains événements élémentaires, on est capable de quantifier la fiabilité de l'opérateur dans la réalisation d'une tâche donnée.

2.2.4 Intégration de la cause « Main d'œuvre » - les besoins en données

En conclusion, pour produire un échantillon virtuel intégrant la variabilité de qualité des soudures, il faut connaître les fonctions de distribution des erreurs commises sur les longueurs des cordons de soudure, le nombre de points de soudure, leur position et l'effort maximal qu'ils peuvent supporter.

Ce simple exemple montre que la précision avec laquelle l'échantillon virtuel est produit fait augmenter de manière exponentielle les besoins en données. En effet, il est déjà nécessaire de faire un large échantillonnage en production pour caractériser l'impact des situations particulières sur la performance des opérateurs et la qualité des produits. Il faut donc prêter attention à l'impact du choix de modélisation du mode de défaillance étudié sur le volume des données nécessaires et leur disponibilité.

L'analyse de l'erreur humaine est un champ de recherche à part entière. La récolte et la maintenance des données d'erreurs humaines sont réalisées par des études expérimentales, des jugements d'experts, des rapports remplis par le responsable de l'erreur, des enregistreurs manuels ou automatiques ainsi que par l'étude la littérature. À ce sujet, Dhillon (1999a) mentionne l'existence de plusieurs banques de données d'erreurs humaines, au même titre que celles de fiabilité (*NPRD/EPRD*).

2.3. Cause « Méthodes » et « Machines »

Le choix d'une méthode implique bien souvent le choix d'une machine. Ainsi, si le choix de la méthode implique des variations du comportement de la pièce, les sources de ces variations se retrouvent dans le choix de la machine et vice versa.

Les produits actuels sont, de plus en plus, construits au juste nécessaire. De ce fait, certaines zones subissent des contraintes proches de la limite du matériau. Il est donc important de prendre en compte les moindres dispersions causées par les machines lors de la création des prototypes virtuels car elles sont susceptibles de faire varier les contraintes et la résistance des produits.

2.3.1 Géométrie

Si les cotes d'une pièce viennent à changer, les contraintes peuvent varier, dépasser la limite et provoquer la défaillance. Que ce soit à cause de machines dérégées,

d'outils usés, de mauvaises manipulations, etc., les pièces issues de la production ont des dimensions qui varient autour d'une géométrie nominale. Grâce aux tolérances dimensionnelles, ces pièces ne sont pas rejetées. Ainsi, chaque dimension est considérée comme une variable aléatoire qui peut varier dans un intervalle de tolérance bien précis, sa fonction de distribution dépendant alors du processus d'obtention de la cote.

Dans Zwingmann (2001), nous avons étudié les différents moyens d'intégrer cette variabilité dans un modèle virtuel, avec les outils disponibles dans l'entreprise. La solution la plus simple consistait à modifier le modèle CAO. Cependant, cela nécessitait un réassemblage et un remaillage de la structure. Or, pour certaines pièces, un maillage complet peut prendre plusieurs semaines de préparation (conversion des fichiers entre les logiciels de CAO et de maillage, le maillage lui-même, etc.). À l'époque, la solution la plus simple était loin d'être la plus rapide.

Plusieurs autres moyens ont été envisagés, en particulier la possibilité de modifier les conditions aux limites pour simuler un changement de géométrie. Bien que cette approche ait donné des résultats encourageants, il s'agit d'un artifice qui introduit un biais dans une modélisation déjà simplifiée, tellement les phénomènes physiques peuvent être complexes.

De plus, de récentes avancées dans les logiciels de maillage et de calculs par éléments finis proposent de nouvelles fonctionnalités qui rendent cette intégration beaucoup plus facile. En effet, ANSYS® (Annexe VI.3) permet, via son module ParaMesh, de modifier directement les paramètres du modèle éléments finis du produit, ce qui évite la fastidieuse étape de remaillage.

2.3.2 Bords de découpe et effets de surface

La résistance des bords des pièces peut également se retrouver modifiée par le processus d'obtention de la pièce, or les arêtes sont importantes, d'autant plus si elles sont en contact avec une autre pièce (par soudure par exemple). Quel que soit

le processus de découpe, ce dernier engendre des modifications des caractéristiques matériau dans la zone de découpe (modification de l'état de surface, de la dureté, de la résistance élastique, etc.) qui diffèrent selon le processus utilisé (les performances du matériau s'en trouvent améliorées ou dégradées).

Marcovici & Ligeron (1974) rapportent que les pièces usinées d'une manière grossière se rompent par fatigue plus vite que les pièces polies soigneusement. Il y a plusieurs types d'effets de surface :

- les rayures d'usinage ;
- les marques à froid (poinçon de contrôle) ;
- les surfaces brutes de forge ;
- les surfaces découpées au chalumeau ;
- les surfaces décapées ;
- le type de fabrication (roulé à chaud, forgé), etc.

Sans entrer dans les détails, nous rapportons les faits saillants observés lors d'une expérience industrielle (Zwingmann (2001)).

2.3.2.a La découpe outil

Ce processus, utilisé aussi bien en phase prototype qu'en grande série, peut se décomposer en deux grandes familles :

- le premier processus utilise deux outils (matrice et poinçon) à bords tranchants et droits,

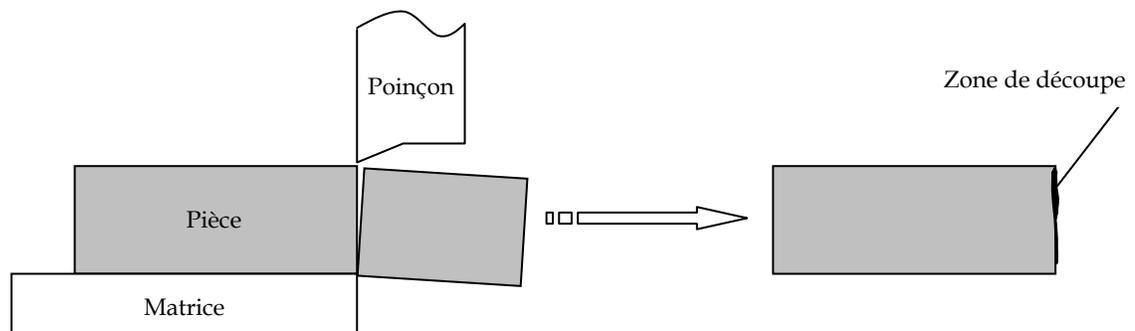


Figure 4.5 : Découpe avec outils à bords droits

- le deuxième, en plus de découper la matière, vient frapper l'arête vive de la pièce et créer ainsi un chanfrein qui présente une dureté supérieure à celle de la pleine tôle (c'est la propriété d'une zone martelée). Il s'agit d'une découpe « à bords frappés ».

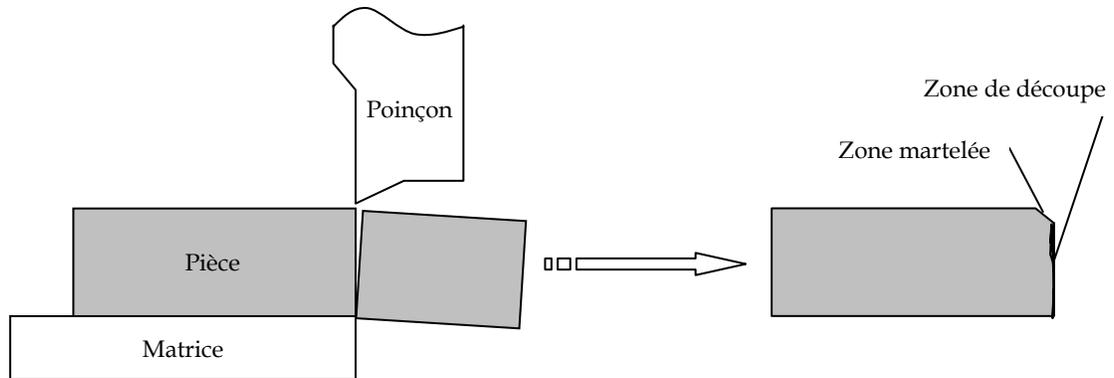


Figure 4.6 : Découpe à bords frappés

D'après Sorel (1999), le comportement en fatigue de bords de découpe diffère suivant le type de découpe. Plusieurs points ont été relevés (par souci de confidentialité, seul l'aspect qualitatif est reporté ici) :

- la découpe classique dégrade la tenue en fatigue des bords de découpe, la perte variant avec le jeu de découpe (entre la matrice et le poinçon) et le rapport de charge de l'essai ;
- la réalisation d'une découpe à bords frappés engendre, au contraire, un gain de l'endurance en fatigue, toujours suivant le jeu et/ou le rapport de charge.

2.3.2.b La découpe par laser ou par jet d'eau

Pour ces deux types de découpe, l'échauffement de la zone de découpe lors de l'usinage engendre un gain pour la limite d'endurance des bords par rapport au cœur du matériau.

Zhang *et al.* (2001) utilisent le laser pour améliorer les propriétés du matériau (un alliage d'aluminium : 2024-T62). Ils montrent, entre autres points, que le coefficient de Poisson ν peut augmenter jusqu'à 25% par rapport au reste du matériau tandis que le module d'Young E peut chuter d'autant. La Figure 4.7 présente l'allure de l'augmentation de la constante élastique C_{11} . La courbe est symétrique car il ne

s'agit pas d'une découpe, mais d'un cratère formé au milieu du matériau, sous l'action d'un laser YAG pulsé.

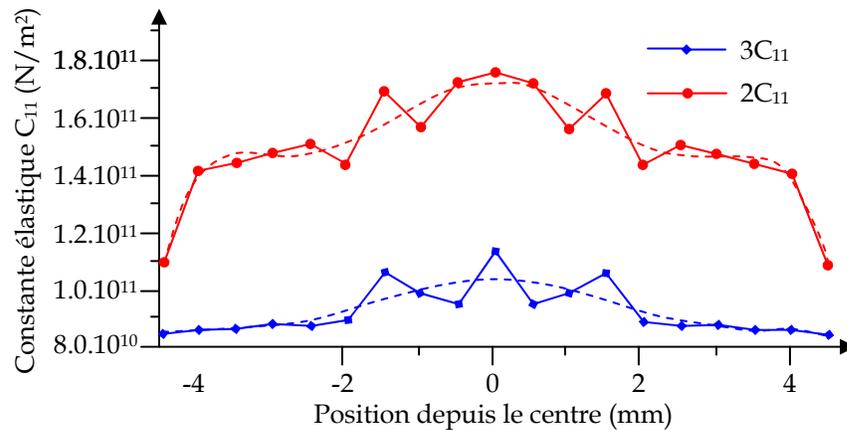


Figure 4.7 : Constante élastique sous une action laser (Zhang *et al.* (2001))

2.3.2.c La découpe par emboutissage

Vidal (2000) et Rathery (1999) étudient l'influence des pré-déformations avant emboutissage sur la tenue en fatigue des bords de découpe. Ils étudient en particulier les possibilités d'amélioration de la tenue en fatigue selon divers taux de déformation, différentes séquences de déformation, etc.

2.3.2.d La rugosité d'usinage

La présence de rugosité sur deux surfaces en contact peut influencer la durée de vie en fatigue des composants. Par exemple, la rugosité de surface a une influence à la fois sur la réduction du film de lubrifiant ainsi que sur le niveau de contraintes des corps en contact (Paulin *et al.* (2004)). Par conséquent, l'endommagement induit peut aussi bien être du grippage que du micro ou macro écaillage.

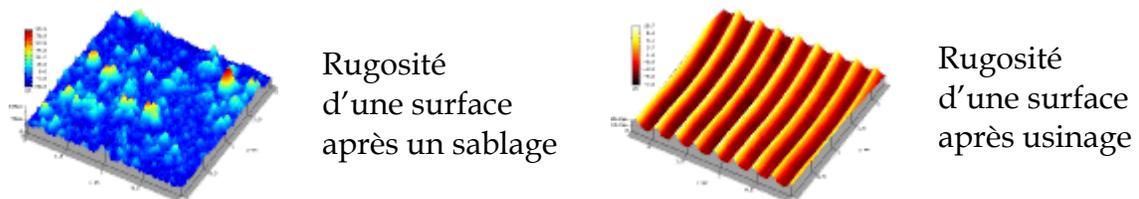


Figure 4.8 : Différents états de surface dus au procédé de fabrication

2.3.3 Importance du jeu

Habituellement, dans le cas d'une découpe outil, une diminution du jeu entraîne normalement une meilleure découpe. Cependant, nous avons vu que la tenue en fatigue n'était pas améliorée (section 2.3.2.a).

De plus, une diminution du jeu a pour effet de précipiter l'usure des outils de découpe, ce qui peut entraîner des modifications de la géométrie des pièces usinées (l'outil s'use, le jeu et les cotes des pièces changent jusqu'à ce que les paramètres de la machine soient recalibrés ou l'outil changé).

2.3.4 Intégration de la cause « Machines » - les besoins en données

Nombreuses sont les sources de variabilité influençant les paramètres des matériaux. Il apparaît donc impossible d'arriver à toutes les maîtriser compte tenu du nombre d'essais qu'il faudrait mener. C'est pourquoi la recherche actuelle s'oriente vers des modèles analytiques permettant d'extrapoler certaines propriétés selon le mode de fabrication employé.

Cependant, ces modèles reposent très souvent sur des relations empiriques qui ne peuvent pas tout le temps être généralisées. Par exemple, Sorel (1999) a constaté que, dans certains cas, une translation ou une rotation de la courbe de Wöhler pouvaient tenir compte de l'influence des différents jeux de découpe. Toutefois, cette observation n'a été faite que pour un seul matériau et une seule valeur de R_p , alors que cette dernière peut varier selon les livraisons.

Il existe un problème similaire pour les droites de Dang Van. Elles n'existent que pour certains matériaux seulement et les diverses transformations possibles pour traduire le changement de processus d'obtention de la pièce ne sont pas valables pour toutes les durées de vie. Or, une droite de Dang Van n'est valable que pour une durée de vie donnée.

En conclusion, même si certaines transformations analytiques peuvent être effectuées en connaissant quelques paramètres de base, elles se limitent à quelques situations bien précises. En effet, le jeu de découpe, qui peut être un paramètre important, est facilement mesurable et provient de phénomènes maîtrisés (usure de l'outil par exemple) mais il n'en est pas de même pour des paramètres tels que la résistance à la rupture ou le nombre de cycle à la rupture. Les relations disponibles peuvent cependant être intégrées dans le modèle sémantique.

2.4. Cause « Milieu/Environnement »

2.4.1 Conditions d'utilisation

Par définition, la fiabilité est établie « dans des condition d'utilisations données ». Ainsi, le produit doit respecter les spécifications du cahier des charges. Cependant, selon l'utilisateur, il peut être soumis à des conditions qui dépassent le cadre prévu initialement.

2.4.1.a Scénarios d'utilisation

Habituellement, le cahier des charges s'attarde à caractériser un profil d'utilisateur enveloppe, représentatif du plus grand nombre de clients. Dans notre cas d'étude, nous identifions plusieurs scénarios élémentaires d'utilisation du produit que nous assemblons ensuite de manière à avoir la distribution des efforts pour un usage mesuré, normal ou extrême, du produit.

2.4.1.b Les effets de la température

Parmi l'ensemble des conditions environnementales, la température affecte les propriétés de matériaux (d'autres effets environnementaux comme la corrosion pourraient être inclus dans cette section de la même manière). Pour certains matériaux, la limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuent lorsque la température s'élève, de même que la limite d'endurance qui leur est

proportionnelle. Par contre, l'augmentation des possibilités d'écoulement avec l'élévation de la température diminue la sensibilité à l'entaille.

2.4.2 Pièces avoisinantes

Dans notre étude, la fiabilité est étudiée pour le mode de défaillance dominant, défaillance qui met en jeu un composant principal. Ainsi, cette simplification néglige les effets des autres composants et des autres modes de défaillances. Cependant, pour une étude plus générale, il est nécessaire de considérer les éléments extérieurs en contact avec la pièce étudiée. Ceux-ci sont, eux aussi, susceptibles d'avoir des variations de géométrie qui peuvent induire des contraintes supplémentaires et affecter la fiabilité de la pièce.

2.5. Contenu du modèle sémantique

Afin de générer des échantillons virtuels en reproduisant au mieux la réalité, le modèle doit disposer d'informations précises sur les variations des paramètres que nous appelons des variables de conception et qui définissent le produit. C'est la mission du modèle sémantique de contenir ces informations. Il contient également les fonctions de transformations des paramètres selon le procédé (si elles existent) ainsi que leurs fonctions de distribution.

Certes, ce modèle est propre au produit analysé (approches différentes selon le produit, mécanique ou électronique) et il est d'autant plus riche que les procédés de fabrication sont nombreux et complexes. Nous allons faire l'exercice, non exhaustif, d'identifier les informations pertinentes du modèle sémantique dans le cas d'un produit mécanique manufacturé.

2.5.1.a Le choix des distributions des paramètres

Le choix des fonctions de distribution (celles utilisées dans notre étude sont présentées en Annexe III) peut être fait à partir d'un ou des critères suivants, présentés par Shooman (1990) :

1. la nature physique du problème satisfait plus ou moins aux hypothèses associées à une distribution particulière ;
2. des données sont disponibles et leur interprétation en terme de fonction de densité ou fonction cumulative de probabilité transforme le problème en un ajustement de courbe ;
3. un modèle pratique et simple qui approxime les critères 1 et 2 est choisi. Le type de problème doit justifier la nature approximative du modèle. Le jugement du concepteur joue alors un rôle primordial.

En résumé, pour établir les dispersions sur les paramètres de conception de manière rigoureuse, il faut disposer de données échantillonnées sur les variables de conception (X_i). Lorsque les données ne sont pas disponibles (comme pour notre cas d'étude), il est raisonnable de choisir la valeur moyenne comme étant la valeur nominale tandis que le choix de l'écart type est une question de jugement. Le Tableau 4.1 (Shooman (1990)) aide à faire des choix rationnels.

Tableau 4.1 : Relation entre les tolérances et les écarts types

Type de composant et de manufacturier	Relation
1 Composant militaire de haute qualité dont le développement est avancé ; manufacturier conservateur expérimenté et réputé.	Choisir $\mu = N$, $3.\sigma = T.N$ (1% de risque pour un utilisateur normal)
2 Situation moyenne entre les cas 1 et 3.	Choisir $\mu = N$, $2.\sigma = T.N$ (5% de risque pour un utilisateur normal)
3 Composant commercial ordinaire, en cours de développement ; manufacturier peu connu ou ayant une faible expérience voire mauvaise réputation.	Choisir $\mu = N$, $\sigma = T.N$ (37% de risque pour un utilisateur normal)

Les relations de ce tableau sont établies pour une distribution normale qui représente le pourcentage de composants hors tolérances dans un lot de fabrication quelconque. La moyenne est μ , l'écart type est σ et $T.100\%$ représente l'intervalle de tolérance.

2.5.1.b Disponibilité des données

Dans certains cas cependant, il est possible que les distributions des paramètres (en particulier les propriétés des matériaux) soient disponibles. En effet, les approches

statistiques sont de plus en plus employées en science des matériaux, en particulier pour les problèmes de fatigue et de fracture. Au Japon, par exemple, ce secteur de recherche a été très activement enrichi par le comité de recherche sur la fatigue (*JSMS* pour *Japan Society of Materials Science*). Un des plus grands apports dans ce domaine est l'élaboration de deux bases de données : l'une pour la résistance à la fatigue des métaux (2300 séries de données de type courbes de Wöhler) et l'autre pour la propagation de la rupture dans différents matériaux métalliques (900 séries).

Il s'agit d'un travail coopératif dont les sources sont multiples, même les plus modestes. Comme il s'agit de tests coûteux, Nakazawa & Kodama (1987) proposent une procédure pour déterminer une courbe de Wöhler (ou *S-N*) et les statistiques associées, selon les standards *JSME* (*Japan Society of Mechanical Engineers*) et à partir d'un échantillon de faible taille (14 spécimens).

Cependant, ce n'est pas la seule approche, chacun pouvant avoir sa propre procédure de tests et, néanmoins enrichir la base de connaissances. Ainsi, Nakayasu (1987) propose une méthode pour la mise en commun des données dans la base de résistance à la fatigue. Il s'agit en fait de définir clairement ce que sont des données de fatigue et de mettre en place des critères jugeant l'adéquation du modèle proposé à la courbe *S-N* obtenue expérimentalement.

3. Pondération et formalisation

Une fois que les principaux facteurs influençant la tenue de la pièce, et donc sa fiabilité, sont en place, il est nécessaire de les agréger au sein d'un même critère afin de déterminer si, effectivement, la pièce résiste ou non.

3.1. La pondération des facteurs

3.1.1 Choix du mode de défaillance

Tous ces facteurs et leurs paramètres n'ayant pas, a priori, la même influence sur le comportement global du produit, il est nécessaire de pondérer leurs effets. Cette pondération dépend du mode de défaillance prédominant qui est étudié. Par exemple, si on s'intéresse à la résistance aux chocs, l'analyse met l'accent sur les caractéristiques des matériaux tandis que pour une étude de la résistance à la corrosion on donne plus d'importance à la qualité des surfaces.

Le choix du mode de défaillance à étudier est une étape importante car il implique une pondération des paramètres complètement différente d'un mode à l'autre. Cette pondération apparaît dans la formalisation. L'étape suivante consiste donc à vérifier si la formalisation du mode de défaillance désiré est possible selon l'état des connaissances et des compétences disponibles.

3.1.2 Possibilité de formalisation

Lors de la caractérisation des différents facteurs influençant la fiabilité, nous avons souligné la difficulté d'avoir des renseignements suffisants sur les paramètres. Pour cette étape d'agrégation des facteurs, ou de formalisation, de nouveaux problèmes sont susceptibles de se poser. La Figure 4.9 présente un certain nombre d'éléments clés dont il faut vérifier la disponibilité avant d'entreprendre l'étude d'un mode de défaillance donné (Previtali (2000)).

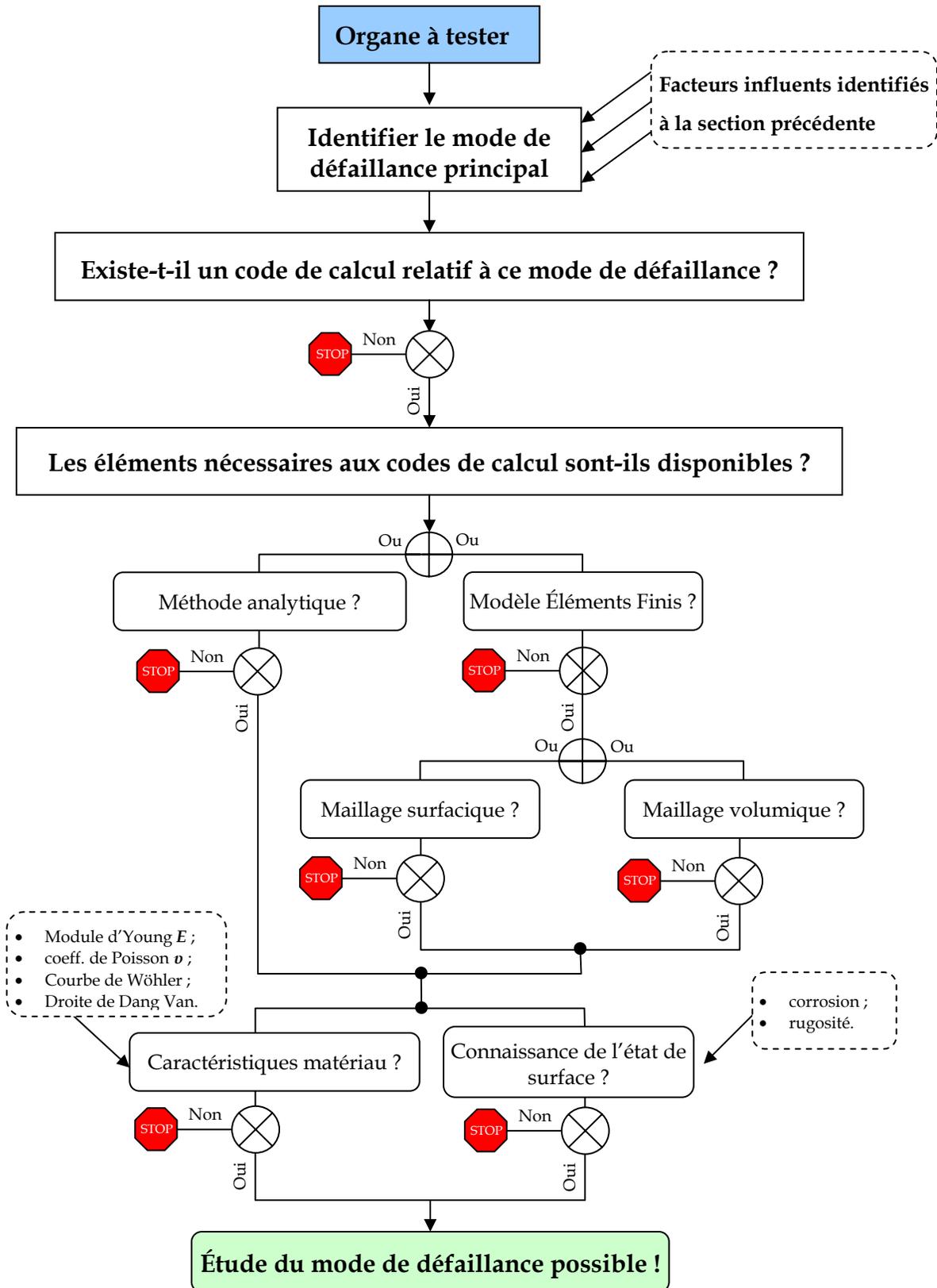


Figure 4.9 : Éléments requis pour l'étude d'un mode de défaillance

3.2. Formalisation de la fiabilité selon un critère et une mesure statique

D'une manière générale, la relation entre la fiabilité et les facteurs l'influençant ne peut être exprimée de façon explicite sous la forme :

$$R = f\left(\text{param}_1^{\text{facteur } 1}, \dots, \text{param}_n^{\text{facteur } 1}, \dots, \text{param}_1^{\text{facteur } m}, \dots, \text{param}_k^{\text{facteur } m}\right) \quad (4.2)$$

Ainsi, nous procédons de manière séquentielle :

- définir un prototype virtuel et son utilisation à partir des différents paramètres identifiés précédemment ;
- **évaluer la performance** du prototype : dans notre cas, il s'agit d'évaluer la capacité à résister sous une charge statique, jusqu'à la rupture (section 3.2.2) ;
- évaluer la fiabilité : en **générant d'autres prototypes virtuels** (selon la méthode choisie) et en compilant les résultats pour identifier soit la distribution de la performance, soit la distribution de la résistance et enfin conclure sur la fiabilité ou l'indice de fiabilité (section 3.3).

3.2.1 Mécanique de la rupture

Il y a plusieurs façons d'aborder la rupture d'un produit mécanique. Sans avoir la prétention d'effectuer un cours sur la résistance des matériaux, nous présentons les modélisations particulières qui peuvent être mises en place, avant de présenter le cas utilisé dans notre approche.

La rupture peut prendre plusieurs formes, dont les exemples les plus remarquables sont la rupture par fissurations progressives, la rupture des soudures et la rupture fragile.

3.2.1.a Modes de défaillance statiques

Il existe des approches synthétiques et empiriques pour décider de la défaillance d'une pièce. Pour les points de soudure par exemple, l'effort calculé et l'effort empirique maximum permettent de calculer un coefficient de sécurité qui doit rester inférieur ou égal à un.

Pour l'approche énergétique, le mode de rupture est modélisé selon le premier principe de la thermodynamique (Inglis) qui détermine la rupture lorsque l'énergie ΔW liée à la propagation d'une fissure atteint l'énergie spécifique γ_s du matériau (Zeghloul (2002)).

3.2.1.b Contrainte et limite d'élasticité

D'une manière générale, les différentes causes de défaillances ayant pour résultat la rupture d'une pièce sous les contraintes mécaniques statiques sont, par exemple, la traction, la compression, la flexion, la torsion, le cisaillement (la section 3.4.1.b traite des contraintes dynamiques).

Nous allons distinguer deux approches : l'approche classique à deux paramètres et la mécanique linéaire de la rupture à 3 paramètres.

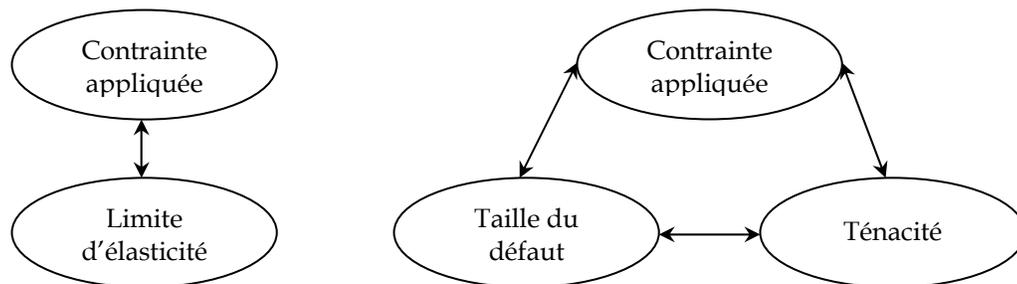


Figure 4.10 : Mécanique de la rupture à 2 et 3 paramètres (Zeghloul (2002))

Pour l'approche à 3 paramètres : cas de la rupture par fatigue. Dans le cas où les déformations résultantes des contraintes appliquées restent au-dessous de la limite élastique apparente des matériaux utilisés, la répétition cyclique de ces déformations entraîne des cisaillements et des microdéformations plastiques internes qui évoluent en microfissures. Celles-ci se développent, se propagent et finissent par entraîner une rupture. C'est ce qu'on appelle la *fatigue* et la même description pourrait se faire dans le cas des phénomènes de compression, torsion, flexion, cisaillement, etc.

Pour l'approche à 2 paramètres : cas de la rupture statique. Dans le cas de la traction par exemple, la tension interne d'une pièce mécanique résulte d'une force exercée de l'intérieur, vers l'extérieur de la pièce. L'effet de la traction est dans ce cas un allongement de la pièce proportionnel à l'amplitude de la force de traction exercée. Cet allongement doit normalement disparaître lorsque la traction n'est plus exercée mais, si la traction a été trop forte, il reste une déformation permanente. Dans ce cas, la limite d'élasticité a été dépassée. Si la traction est excessive, il y a rupture de la pièce.

3.2.2 Évaluer la performance

3.2.2.a Choix de la performance

Nous choisissons d'étudier la fiabilité en modélisant le processus de rupture avec deux paramètres. La structure est jugée défaillante si la contrainte subie dépasse un certain pourcentage de la limite d'élasticité.

Ici, notre critère de rupture suit la théorie de l'effort maximum (ou de Rankine) qui admet que la plastification commence là où la contrainte maximum atteint la limite élastique de traction simple. Il s'agit d'un cas très simple que nous utilisons dans notre cas d'étude. Il faut cependant noter que cette théorie est démentie par bon nombre de faits d'expérience. Ainsi, il existe d'autres critères de défaillance qui peuvent s'avérer plus appropriés (Marcovici & Ligeron (1974)) :

- la théorie de Saint Venant qui consiste à admettre que la plastification commence lorsque la dilatation maximale égale la dilatation qui caractérise la limite élastique de traction simple du matériau considéré ;
- la théorie de Guest (ou de la contrainte tangentielle maximum) ;
- la théorie de Von Mises – Henky (énergie de déformation limite).

3.2.2.b Évaluation de la fonction performance

Deux éléments sont essentiels à la détermination du comportement de la structure : la mesure du critère (la contrainte interne) et sa comparaison à un seuil critique donné (la limite d'élasticité).

Soit L le chargement appliqué à la structure (définie par l'ensemble des variables de conception X_i), la mesure du critère dans le mode de défaillance étudié est réalisée par un module de calcul par éléments finis. L'Annexe X rappelle les grandes lignes de la méthode et présente quelques outils logiciels spécialisés dans ce type de calcul (l'Annexe VI.3 présente, elle aussi, des outils spécifiques aux éléments finis).

Notons que pour des structures complexes, les temps de calculs requis par ce type de logiciels peuvent être très longs. Selon les moyens de l'entreprise, elle peut faire appel à des calculateurs dédiés. Pour notre application (Partie D), nous utilisons une modélisation simplifiée, implémentée avec le logiciel de calcul formel *MAPLE*® lors d'un cours de conception assistée par ordinateur (Gakwaya (2001)).

Une fois la contrainte maximale calculée, on calcule la marge existant avec le seuil limite fixé au préalable. La relation (4.3) détermine alors le comportement de la structure :

$$z\left(\{X_i\}_{i=1..n}, L\right) \begin{array}{ll} > 0 & \text{La structure résiste.} \\ \leq 0 & \text{Il y a défaillance de la structure.} \end{array} \quad (4.3)$$

3.3. Formalisation de la génération de prototypes virtuels

Principalement, deux approches se distinguent. Soit l'approche se limite à calculer la performance $z(\cdot)$ de la structure pour estimer la fiabilité (via la formulation de l'état limite $z(\cdot) = 0$). Soit il est nécessaire de poursuivre les calculs afin d'obtenir la valeur de la résistance du produit et atteindre la fiabilité via l'approche contrainte/résistance.

Cette section reprend les résultats de l'article présenté à la conférence internationale *Probabilistic Safety Assessment and Management* (Zwingmann *et al.* (2004)).

3.3.1 Calcul de la distribution de la fonction de performance

Cette approche vise l'évaluation de la fiabilité en analysant la performance du produit dans son contexte d'utilisation (**évaluation contextuelle**). Le principe de base consiste à évaluer un échantillon de prototypes soumis à un échantillon de charges. L'évaluation se fait via la fonction performance $z()$, positive si le produit résiste, négative sinon. Une analyse des valeurs obtenues permet de déterminer la fiabilité.

3.3.1.a La simulation de Monte Carlo

Nous passons rapidement sur la génération des prototypes virtuels par cette technique de Monte Carlo car il s'agit d'une approche exigeante qui n'est pas utilisée sous cette forme dans notre application. Un grand nombre N de prototypes virtuels doit être généré :

1. À chaque prototype p est associé un vecteur qui représente une configuration dans lequel le prototype peut exister et être utilisé :

$$\bar{\mathbf{Y}}^p = \{Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_{n+1}\}^p = \{\bar{\mathbf{X}}, L\}^p = \{X_1, \dots, Y_i, \dots, X_n, L\}^p \quad (4.4)$$
2. Toutes les composantes Y_i^p de ce vecteur sont générées aléatoirement en respectant la distribution qui leur est associée.
3. La valeur de la fonction de performance $z(\bar{\mathbf{Y}}^p)$ est établie en analysant la structure par la méthode des éléments finis.
4. Les étapes 2 et 3 sont répétées jusqu'à ce que tous les N prototypes soient testés.
5. La fiabilité peut être estimée par le rapport du nombre de produits qui ont survécus aux tests sur le nombre total de produits testés.

3.3.1.b Les approches FORM/SORM

Avec la précédente approche, il serait possible de déterminer la distribution de Z en analysant les N valeurs obtenues. Les approches FORM/SORM font l'hypothèse que la distribution de Z est normale et calculent simplement le point de conception et d'utilisation où la défaillance est la plus probable (*MPP* pour *Most Probable Point*). Elles se servent alors de ce point pour calculer l'indice de fiabilité β .

Un prototype virtuel et sa charge sont toujours représentés par un vecteur \vec{Y} (équation (4.4)). Cependant, les distributions du système basé sur \vec{Y} doivent être transformées en distributions normales réduites équivalentes, d'où le nouveau système de coordonnées défini par \vec{Y}' .

Ces approches consistent à déterminer le point de défaillance le plus probable \vec{Y}^* . C'est-à-dire le point le plus proche de l'origine et se trouvant sur l'état limite (il doit vérifier $z(\vec{Y}^*) = 0$). La Figure 4.11 présente le principe de génération des prototypes virtuels, basé sur un simple algorithme d'optimisation, utilisé pour trouver le point \vec{Y}^* .

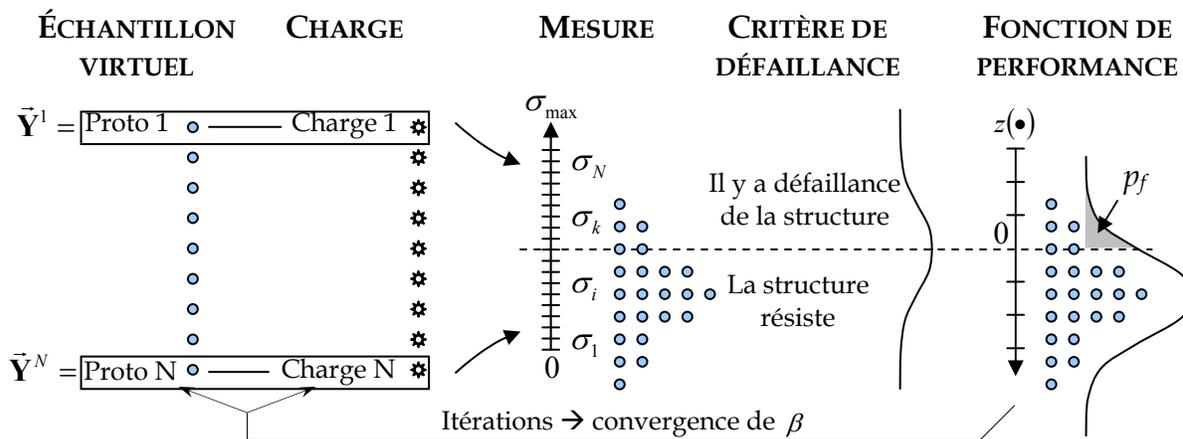


Figure 4.11 : Approche virtuelle basée sur la fonction performance

L'échantillon virtuel aléatoire est constitué selon les variables aléatoires de conception qui définissent le produit. Dans le cas des méthodes FORM/SORM, les

différents prototypes virtuels sont générés selon les besoins spécifiques de l'algorithme de calcul de β . Tous les détails et les formules de cet algorithme, appliqué pour une approximation de premier ordre, sont présentés à la section 4.3.3 du chapitre 3.

1. Le couple prototype/charge de départ $\vec{Y}^{k=1}$ est établi en prenant les valeurs moyennes des variables de conception.
2. La mesure correspond à la contrainte maximale interne à la structure, elle est effectuée par la méthode des éléments finis. Chaque couple prototype/charge va avoir sa propre contrainte maximale, c'est pourquoi il y a une distribution des contraintes internes maximales dans l'échantillon virtuel, entre les différents prototypes.
3. La valeur de la fonction performance $z(\vec{Y}^k)$ est établie selon le mode de défaillance étudié, de même que le gradient de $z()$.
4. Le point de l'itération suivante est calculé, à partir du gradient, selon le principe de Newton-Raphson.
5. La distance entre le point courant et l'origine, de même que l'indice β sont calculés.
6. Les étapes 2 à 5 sont répétées jusqu'à ce que β converge et $z(\vec{Y}^k)$ converge vers 0.
7. Au final, la fiabilité est estimée par $R = \Phi(\beta)$.

3.3.2 Calcul de la distribution de la résistance

Cette approche vise l'évaluation de la fiabilité en analysant la résistance du produit, sans tenir compte du contexte d'utilisation dans un premier temps (**évaluation intrinsèque**). Le principe de base consiste à calculer la résistance d'un échantillon de prototypes, sans considérer le profil de charge. Ce dernier n'est pris en compte qu'une fois la distribution de la résistance établie, par le calcul contrainte/résistance.

3.3.2.a Calcul de la fonction résistance

Pour identifier la distribution de la résistance, une nouvelle fonction de performance $s()$ mesure la fonction résistance du produit. Elle est définie à partir

de la fonction performance $z(\cdot)$. Pour chaque produit p (défini par un vecteur $\bar{\mathbf{X}}^p$, sans faire intervenir le profil d'utilisation L), la fonction $s(\cdot)$ donne la valeur de la résistance du produit $\bar{\mathbf{X}}^p$, correspondant à la valeur de la charge qui provoque sa rupture :

1. La première valeur de la fonction de performance présentée est calculée avec une valeur initiale arbitraire pour $s(\bar{\mathbf{X}}^p)$: calcul de $z(\bar{\mathbf{X}}^p, s(\bar{\mathbf{X}}^p))$.
2. Une nouvelle valeur $s(\bar{\mathbf{X}}^p)$ est calculée par l'algorithme de Newton-Raphson.
3. Ces deux étapes sont répétées jusqu'à ce que $z(\bar{\mathbf{X}}^p, s(\bar{\mathbf{X}}^p)) \approx 0$.
4. La valeur de la résistance du produit $\bar{\mathbf{X}}^p$ est donnée par la valeur $s(\bar{\mathbf{X}}^p)$ calculée.

3.3.2.b Génération des échantillons à tester

La Figure 4.12 présente l'approche suivie pour la génération d'échantillon en vue du calcul de la distribution de la résistance. Ce modèle peut être utilisé par les séries de Taylor (*TSPD*) et par la génération d'échantillons de Monte Carlo. Ce dernier point est essentiellement utilisé à des fins de comparaison dans notre application.

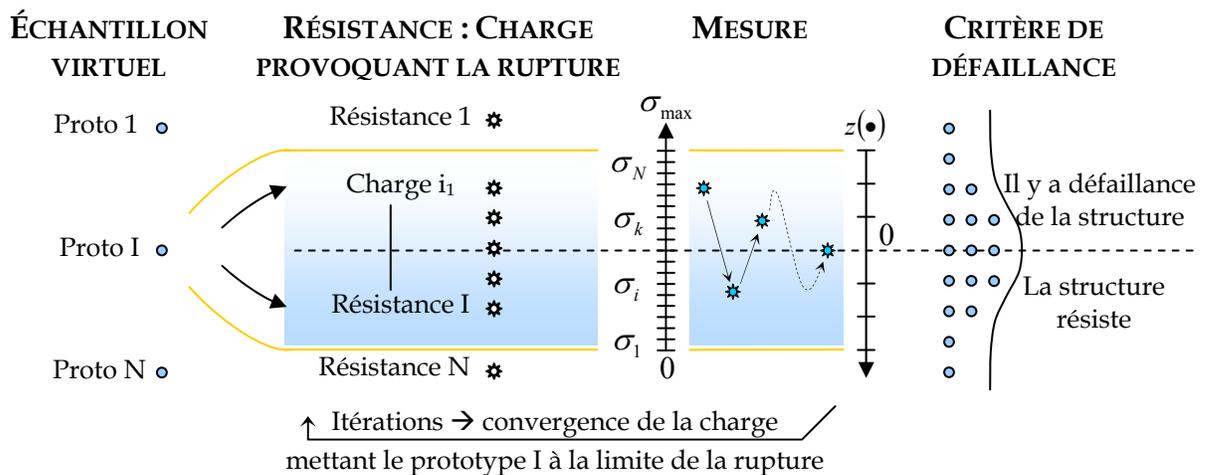


Figure 4.12 : Principe des approches virtuelles basées sur la fonction résistance

1. L'échantillon virtuel est constitué selon les distributions de variables aléatoires de conception. La taille de l'échantillon dépend de la méthode choisie (sections 3.3.2.c et 3.3.2.d). Les étapes 2 à 5 se répètent pour chacun des N prototypes virtuels.
2. La résistance est définie comme étant la charge juste nécessaire pour provoquer la rupture du prototype I .
3. Une charge initiale i_1 est définie.
4. La fonction performance (pour le prototype étudié et la charge appliquée) est évaluée par la méthode des éléments finis.
5. Afin de trouver la charge exacte qui annule la fonction de performance, un certain nombre d'itérations (des étapes 4 et 5 selon Newton-Raphson) est nécessaire pour converger vers la valeur de la résistance du prototype I , $S(\vec{X})$, qui provoque la rupture $z(\vec{X}, S(\vec{X})) = 0$.

À l'issue de ce modèle, les résultats des tests sur l'échantillon de prototypes virtuels permettent de conclure de différentes manières quant à la distribution de la fonction résistance $f_s(\bullet)$ (selon la méthode choisie, sections 3.3.2.c et 3.3.2.d). C'est en ayant identifié $f_L(\bullet)$ séparément que la fiabilité peut-être calculée selon l'approche contrainte/résistance

3.3.2.c Obtention de la résistance par développements en séries de Taylor

Si on s'oriente vers cette méthode (*TSFD* pour *Taylor Series Finite Difference*), la taille de l'échantillon est $N=2.n+1$, où n correspond au nombre de variables de conception qui servent à définir le produit. Cette méthode nous permet de nous affranchir des distributions des variables de conception, ne nécessitant que les moyennes (μ) et écarts-type (σ). Par conséquent, elle ne renseigne que ces deux paramètres pour la résistance : (μ_s, σ_s) . Les formules sont données à la section 4.4.2 du Chapitre 3).

Du fait de la complexité des produits conçus, il est fréquent que le nombre de variables de conception n soit élevé. Cela permet d'utiliser le théorème central limite et justifie l'hypothèse que la résistance suit une loi normale. Ainsi, avec les

deux paramètres qui viennent d'être calculés, la distribution de la résistance est complètement définie.

3.3.2.d Obtention de la résistance par simulation de Monte Carlo

Si l'échantillon est généré par Monte Carlo, la taille N est choisie suffisamment grande pour avoir un bon niveau de précision. Dans ce cas, les N prototypes virtuels sont testés pour calculer leur résistance (et non plus pour compter le nombre de défaillances - section 3.3.1.a). Ainsi, N valeurs $S^k = s(\vec{X}^k)$ résultent des tests des N prototypes \vec{X}^k . La fonction de distribution de la résistance est ensuite identifiée comme étant celle qui ajuste au mieux ces valeurs.

3.4. Évaluation temporelle de la fiabilité

3.4.1 Prise en compte du temps dans notre modèle

Jusqu'à présent, nous avons gardé le formalisme traditionnel de l'approche contrainte/résistance, c'est-à-dire sa forme statique (la fonction de densité de probabilité de la contrainte est issue de l'analyse des efforts d'un scénario d'une durée suffisamment courte pour que le chargement soit considéré *ponctuel* dans le temps et que la distribution de la résistance ne varie pas).

En réalité cependant, la résistance du produit se dégrade sous l'effet du vieillissement. Il devient important d'intégrer cette dégradation si l'application de la charge est répétée dans le temps, en particulier si la durée de la mission devient non négligeable vis à vis de la durée de vie du produit. Nous proposons d'étendre le modèle calculant la fiabilité à partir de la distribution de la résistance (section 3.3.2) afin qu'il intègre cette dimension temporelle.

Notre approche est basée sur celle proposée par Lewis (section 3.4.3.b). Elle a pour objectif d'étudier l'évolution de la fiabilité au fur et à mesure que le produit effectue un scénario donné, en faisant l'hypothèse que le vieillissement ne dépend

que du nombre de cycles. Rappelons qu'il existe d'autres formalismes (section 3.4 du Chapitre 3).

3.4.2 Introduction du temps

3.4.2.a Évolution de la résistance

Pour être compatible avec le modèle statique que nous avons mis en place, nous allons chercher à déterminer la distribution résistance en fonction du temps, soit $f_s(y|t)$, plutôt que $R(t|y)$ comme indiqué dans l'équation (3.37). Ainsi, en transformant cette dernière, la fiabilité est définie par :

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_s(y|t)R(y)dy \quad (4.5)$$

La fonction de densité de la résistance sera alors déterminée en fonction du temps par des simulations à différents instants consécutifs, dont le nombre dépend de la précision recherchée.

La distribution de la résistance variant avec le nombre de cycles d'application de la charge (le temps), il est nécessaire de disposer d'un critère de rupture relié au temps. C'est là la différence majeure avec le fonctionnement général utilisé pour l'étude statique (section 3.3) où le critère de défaillance (la limite élastique) et la distribution associée étaient constants dans le temps (Figure 4.11 et Figure 4.12).

3.4.2.b Modification du critère de rupture

Pour que la résistance que nous cherchons à identifier varie dans le temps, nous introduisons du vieillissement dans le critère de défaillance, ce qui permet alors une estimation temporelle de la fiabilité. La Figure 4.13 illustre le principe utilisé pour atteindre cet objectif.

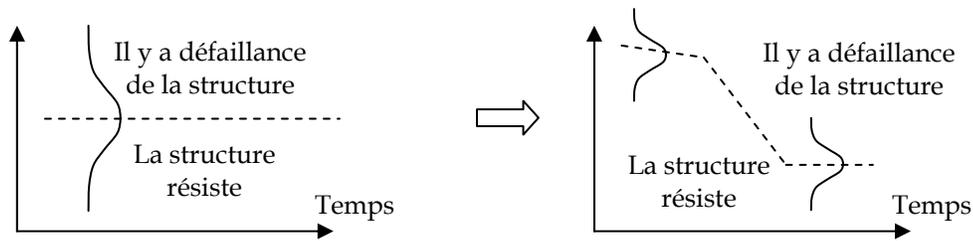


Figure 4.13 : Introduction du vieillissement dans le critère de défaillance

3.4.3 Distribution stochastique et temporelle du critère de rupture

Afin d'intégrer la dimension temporelle dans notre modèle, nous utilisons la caractéristiques de Wöhler pour connaître l'évolution de la limite d'élasticité au delà de laquelle le produit ne peut résister (selon la théorie de Rankine qui a déjà été choisie pour l'étude statique). La difficulté consiste alors à connaître l'évolution de la distribution qui est associée à cette caractéristique. Nous avons besoin de connaître l'évolution de la **distribution de la limite de résistance en terme de contrainte limite (S) pour un nombre de cycles donné (N)**.

3.4.3.a Principe d'obtention de la courbe de Wöhler

La manière dont cette caractéristique matériau est établie fait que nous ne disposons que de la **distribution en terme de nombre de cycles (N) pour une contrainte donnée (S)** : un échantillon de pièces est soumis à une contrainte S et les différents nombres de cycles auxquels les produits brisent constituent la distribution des durées de vie N pour la résistance à S . Cette distribution est établie pour différentes contraintes S , ce qui nous renseigne sur les distributions connues de la Figure 4.14. La contrainte en deçà de laquelle les pièces ne cassent pas est appelée la limite d'endurance (asymptote horizontale).

Par souci de simplification, nous utilisons à la Figure 4.14 l'approximation de Marcovici & Ligeron (1974) mais il existe d'autres modélisations (Daguier & Baudry (2004)) :

- le modèle linéaire : $N = A/(S - E)$;
- le modèle de Whöler 1 : $\log N = A.S + B$;
- le modèle de Whöler 2 : $\log N = A.\log S + B$;
- le modèle de Bastenaire : $N = A.\exp\left[-\left(\frac{S - E}{B}\right)^c\right] / (S - E)$.

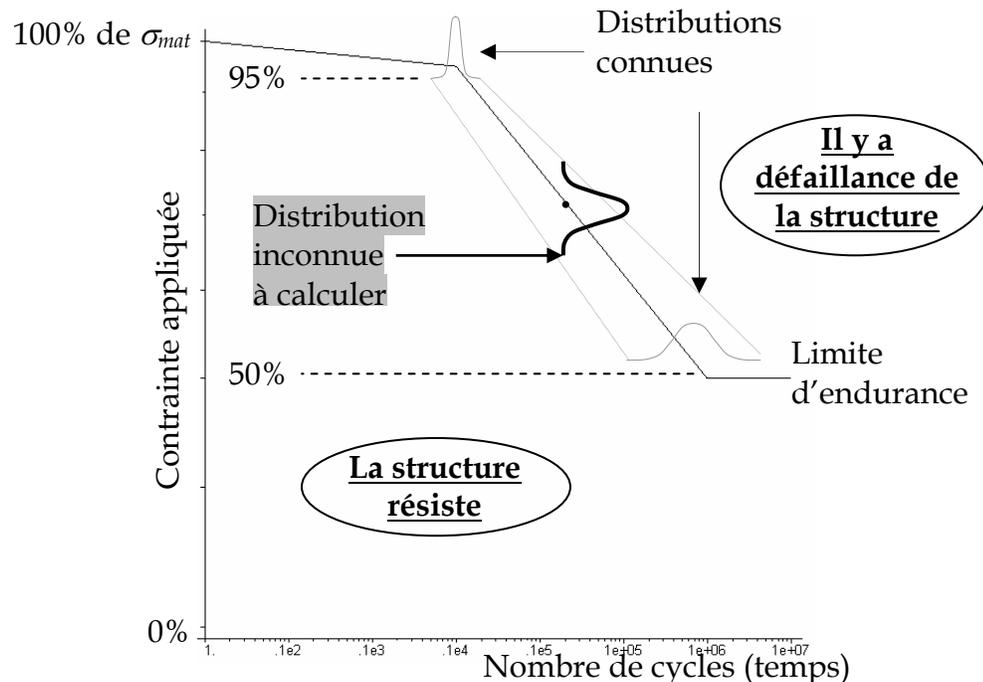


Figure 4.14 : Courbe de Wöhler : critère se dégradant avec le temps, les cycles

3.4.3.b Obtention des données requises

Les distributions connues de la courbe de Wöhler définissent ses propriétés stochastiques mais ne nous permettent pas de faire une analogie temporelle de la démarche statique. En effet, pour continuer dans le même esprit, il faut des seuils de rupture et les distributions de leurs valeurs S à différents instants N constants.

Or, cette distribution est inconnue (en gras sur la Figure 4.14) car elle ne peut être obtenue exactement par des tests. En fait, ce sont les distributions de N à S constants qui sont connues. Marcovici & Ligeron (1974) rapportent les travaux de M. Bastenaire qui avait réussi à montrer que les distributions de S à N constants, et de N à S constants (connues) n'étaient pas indépendantes.

D'autres travaux, ceux de Yokobori & Yokobori (1987) par exemple, utilisent une loi de Weibull à trois paramètres pour modéliser des durées de vie obtenues expérimentalement lors d'essai de fatigue et proposent ainsi un modèle qui permet d'exprimer la courbe de Wöhler sous la forme d'un diagramme $P_f - S - N$ dont l'équation est la suivante :

$$P_f(\sigma, N) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^l \cdot \left(\frac{N - N_c}{N_0}\right)^m\right) \quad (4.6)$$

Cette formulation permet d'exprimer les distributions de S à N constants, aussi bien que celle de N à S constants.

Partant du principe que les données expérimentales ne sont pas toujours disponibles et qu'une telle formulation ne peut pas toujours être atteinte, nous faisons un certain nombre d'hypothèses pour déterminer les distributions dont notre modèle a besoin, à partir de données tabulées.

3.4.4 La résistance en fonction de la durée de vie

3.4.4.a Principe

Afin de pouvoir appliquer notre démarche statique à différents cycles de vie, nous utilisons l'approche de Murty *et al.* (1995) pour obtenir les distributions requises (les travaux de Avakov & Shomperelen (1989) sont similaires). La distribution de la résistance S en fonction du nombre de cycles N est obtenue à partir des distributions du nombre de cycles à deux niveaux de contrainte distincts (Figure 4.15)

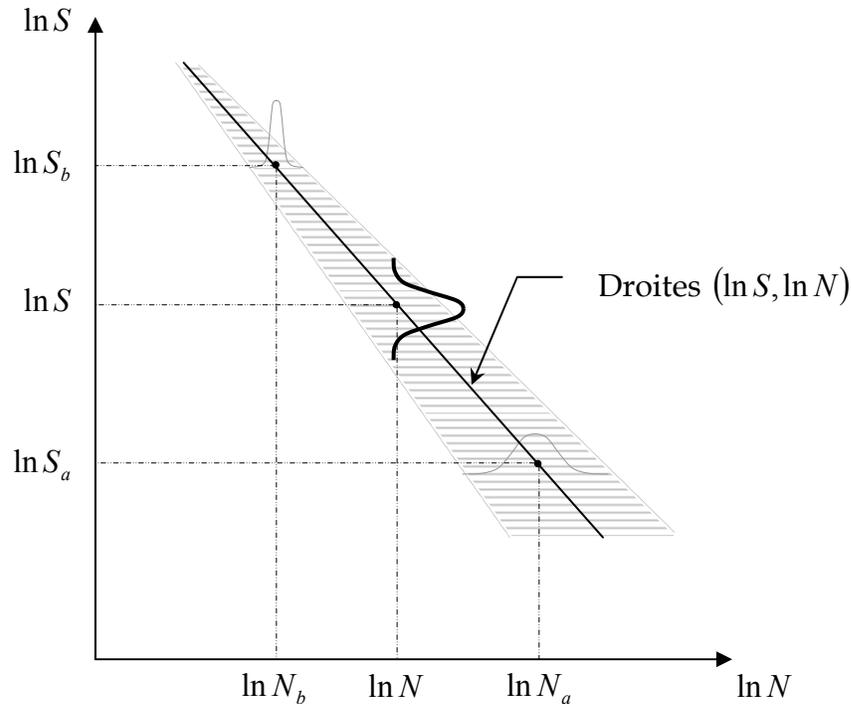


Figure 4.15 : Modèle de la résistance selon la durée de vie – Murty *et al.* (1995)

Murty *et al.* (1995) font les hypothèses suivantes :

- la pente des droites $(\ln S, \ln N)$ est supposée constante ;
- les nombres de cycles à la défaillance aux deux niveaux de contrainte distincts obtenus lors d'expériences suivent une loi log-normale.

Les limitations sont les suivantes :

- l'approximation faite avec l'hypothèse que le logarithme des durées de vie (ou le nombre de cycles) suit une loi normale peut conduire à des erreurs importantes si les prévisions sont faites à des points extrêmes de la distribution, i.e. pour des niveaux de probabilité de défaillance très élevés ou très faibles ;
- la distribution de la résistance qui découle de la démarche de Murty *et al.* (1995) est satisfaisante seulement quand l'écart type est suffisamment restreint de manière à ce que la pente m varie peu dans la bande de distribution (voir la zone hachurée de la Figure 4.15).

3.4.4.b Calcul de la distribution de la résistance

À partir des distributions connues des nombres de cycles à la défaillance N_a et N_b respectivement aux niveaux de contrainte S_a et S_b , nous identifions l'existence d'une bande reliant ces distributions dont la pente est $-1/m$ avec :

$$m = \frac{\ln N_a - \ln N_b}{\ln S_b - \ln S_a} \quad (4.7)$$

Ainsi, pour un nombre de cycles spécifique N , la résistance en fatigue S peut être exprimée par :

$$\ln S = \ln S_b - \frac{\ln N - \ln N_b}{m} \quad (4.8)$$

qui peut également s'écrire :

$$\ln S = \frac{1}{m} \ln N_b + \left(\ln S_b - \frac{\ln N}{m} \right) \quad (4.9)$$

Si on pose les constantes $A = 1/m$ et $B = \ln S_b - \ln N/m$ ainsi que les variables $X = \ln N_b$ et $Y = \ln S$, l'équation précédente devient :

$$Y = A.X + B \quad (4.10)$$

où Y est la variable dont nous recherchons la distribution et X une variable qui suit une loi normale car, par hypothèse, les variables N_a et N_b suivent des lois log-normales, respectivement avec les paramètres $(\mu_{N_a}, \sigma_{N_a})$ et $(\mu_{N_b}, \sigma_{N_b})$. Ainsi, la variable $X = \ln N_b$ suit une loi normale dont les paramètres sont $(\mu_{\ln N_b}, \sigma_{\ln N_b})$. L'expression de ces paramètres en fonction de μ_{N_b} et σ_{N_b} est donnée en Annexe III.

Comme Y est une fonction linéaire d'une variable normale, elle suit également une distribution normale dont la moyenne est donnée par $A.\mu_{\ln Nb} + B$ et l'écart type par $A.\sigma_{\ln Nb}$. On peut alors écrire la fonction de densité de probabilité de Y :

$$f(Y) = \phi \left(\frac{Y - (A.\mu_{\ln Nb} + B)}{A.\sigma_{\ln Nb}} \right) \quad (4.11)$$

Où ϕ est la fonction de densité de probabilité d'une loi normale standard. Ce qui donne, de façon plus explicite :

$$f(\ln S) = \phi \left(\frac{\ln S - \left(\frac{1}{m}.\mu_{\ln Nb} + \ln S_b - \frac{\ln N}{m} \right)}{\frac{1}{m}.\sigma_{\ln Nb}} \right) \quad (4.12)$$

On peut bien sûr, trouver l'expression de $f(S)$ en utilisant les formules données pour la loi log-normale en Annexe III. On dispose alors de la distribution de la résistance pour un nombre de cycles donné, ce qui permet de répéter l'utilisation de notre modèle statique à différents instants et, ainsi, observer l'évolution temporelle de la fiabilité.

4. Conclusion

Ce chapitre expose l'application de la méthodologie de FSC pour créer des prototypes virtuels permettant l'estimation de la fiabilité. Nous avons recensé les besoins et les retombées de plusieurs méthodes de génération d'échantillon de ces prototypes. Les méthodes traditionnelles demandent beaucoup d'informations afin d'être réalisables. Nous proposons une approche nécessitant beaucoup moins de données et donc plus facilement exploitable au stade de la conception, quand le concepteur dispose d'informations incomplètes ou imprécises.

Cette proposition combine les développements en série de Taylor (*TSFD*) avec l'approche contrainte/résistance et propose un compromis intéressant avec des besoins réduits pour la définition des variables de conception et des calculs moins complexes.

4.1. Disponibilité et fiabilité des données requises

Il est important de noter que cette approche requiert un niveau de définition moindre pour ses données d'entrée. En effet, notre expérience dans l'industrie automobile (Zwingmann (2001)) nous a montré que l'obtention des fonctions de densité des variables de conception peut s'avérer très difficile dans la pratique.

Ces données étant acquises en essais de laboratoire, cela pose deux problèmes :

- quelle est la fiabilité des résultats obtenus en essai ?
- quelle est la fiabilité de la transposition de ces résultats d'essai aux composants dans le cadre de leur dimensionnement ?

Selon Daguier & Baudry (2004), la réponse à ces deux questions dépend en particulier du mécanisme d'endommagement en fatigue qui n'a aucune raison d'être universel. Dans l'exemple particulier de la courbe de Whöler utilisée dans notre modèle, ils rapportent que, pour avoir une estimation fiable des résultats, il faut disposer de :

- environ 15 éprouvettes pour la limite d'endurance (ou la courbe de Wöhler moyenne), ce qui est effectivement réalisé en pratique ;
- environ 60 éprouvettes pour la dispersion des résultats autour de cette valeur moyenne, ce qui n'est pas réalisable en pratique. Les estimations de l'écart-type fournies en pratique ne sont donc pas fiables.

Ainsi, si les dispersions sont mal estimées par les essais de laboratoire, l'emploi de coefficients de sécurité est indispensable pour garantir une certaine fiabilité. Or, on se souvient que c'est l'utilisation de tels coefficients de sécurité, utilisés dans les approches déterministes, que nous essayons d'abolir par l'approche probabiliste.

De plus, des courbes de Wöhler locales (à l'intérieur d'un composant complexe) sont indispensables pour apporter des précisions sur la durée de vie des composants. Or, ces courbes doivent être fréquemment déduites des courbes de Wöhler qui ont été déterminées sur des échantillons en laboratoire (des éprouvettes d'une forme bien déterminée). Ainsi, une phase d'extrapolation de l'échantillon de matériau au composant est nécessaire et introduit inévitablement une erreur supplémentaire (Eichlseder & Leitner (2004)).

4.2. Distinction de la charge et de la résistance

Cette approche est également novatrice dans le sens où elle découple le chargement (L) de la résistance et des variables de conception (X_i), contrairement aux dernières avancées en calcul de fiabilité (*SORM* et échantillonnage par importance) qui utilisent la formulation de l'état limite où tout est agrégé dans la fonction performance. Ce découplage a son importance car les transformations en loi normales équivalentes (utilisées par les autres méthodes) sont imprécises si la distribution de départ est asymétrique (Haldar & Mahadevan (2000)) comme l'est souvent la charge (voir l'application en Partie D, Figure 7.2).

4.3. Intégration dans l'architecture logicielle de FSC

Comme notre modèle vise une meilleure intégration au stade de la conception, nous proposons ce module d'évaluation de la fiabilité dans l'architecture générale d'intégration de FSC, proposée par Coulibaly *et al.* (2000) et rapportée au Chapitre 2. La Figure 4.16 illustre l'intégration du modèle d'évaluation de la fiabilité basé sur la détermination de la fonction résistance.

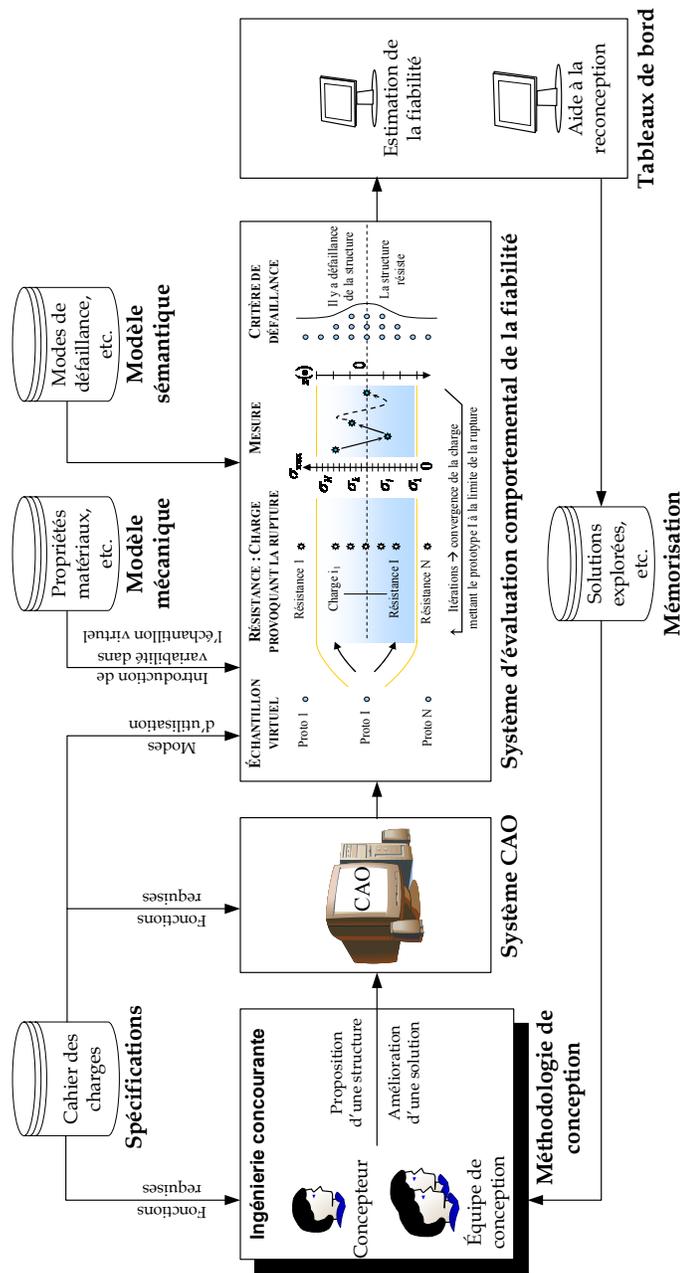


Figure 4.16 : Le processus d'estimation de la fiabilité en CAO

4.4. Limitation de la complexité du mode de défaillance

Dans ce chapitre, nous n'avons considéré que le mode de défaillance dominant. Il est cependant facile de répéter la même étude pour un mode d'importance égale. Il suffirait alors de combiner les résultats selon la façon dont les différents modes interagissent, via un arbre de défaillance par exemple.

Le modèle que nous avons proposé fonctionne avec un mode de défaillance dominant causé par **une seule charge** (ou sollicitation quelconque). Cette dernière engendre des contraintes internes, qui ne doivent pas dépasser un seuil critique (la limite d'élasticité) pour que le produit survive. De plus, la contrainte et la résistance s'expriment dans la même unité, celle de l'axe des abscisses sur le graphe d'interférences contrainte/résistance.

Or, Elegbede (2004), qui étudie une structure conique sujette à une charge axiale P et à un moment de flexion M , se retrouve confronté à **deux** variables aléatoires qui agissent à titre de contrainte appliquée. De plus, pour étudier le flambage, le critère de défaillance est :

$$\frac{P}{P_{crit}} + \frac{M}{M_{crit}} \geq 1 \quad (4.13)$$

Dans ce cas, l'approche contrainte/résistance telle que nous l'avons appliquée (à partir d'une charge à une dimension) n'est plus utilisable. Or, dans la pratique, les composants mécaniques peuvent subir différents chargements au cours de leur vie. La suspension d'une voiture, par exemple, subit des virages, freinages, accélérations, etc. qui provoquent une fatigue en accumulant le dommage selon différentes directions et différentes lois d'évolution.

Partie C

La maintenabilité en conception

Chapitre 5.

La maintenabilité

La fiabilité seule ne suffit pas à définir l'efficacité d'un système, il faut en mesurer la disponibilité lorsque que le système est multi-composants et réparable.

Ce chapitre définit la disponibilité qui fait intervenir la notion de maintenabilité. L'état de l'art rapporte les différentes approches qui permettent d'évaluer la maintenabilité après une période d'exploitation ou à la fin du processus de conception. Afin de préparer l'élaboration d'un indice de maintenabilité, quantifiable lors de la définition du produit, nous effectuons une revue de la littérature des travaux relatifs au désassemblage. Une attention particulière est portée sur la façon dont est estimée la difficulté des actions de désassemblage.

1. Introduction

La fiabilité a longtemps été considérée, au stade de la conception, comme une mesure de l'efficacité du système. Or, il a été prouvé qu'il s'agit d'une mesure incomplète car elle ne considère pas la maintenabilité, un autre aspect important des performances du système (Lie *et al.* (1977)).

D'après la norme NF X 60-010 (AFNOR (1991)), la maintenance regroupe l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management. Notons que les aménagements NTIC⁴ autour du produit dans son emploi impliquent des choix de conception facilitant l'intégration de capteurs, de systèmes d'autodiagnostic et susceptibles de faciliter la maintenance. Ces aspects mécatroniques ne seront pas traités dans le détail.

La complexité croissante des systèmes engendre des coûts d'opération et de maintenance élevés. On a donc cherché à réduire la maintenance et à améliorer la fiabilité. La disponibilité d'un système est alors devenue la mesure de l'efficacité d'un système maintenu en combinant fiabilité et maintenabilité.

1.1. La disponibilité

La disponibilité instantanée, $A(t)$, est la probabilité que le système soit en opération au temps t si, à chaque panne, une action de maintenance est entreprise pour remettre le système en état de fonctionnement. Aït-Kadi (2002) exprime, de façon stationnaire, la proportion du temps de bon fonctionnement sur un horizon infini (*UTR* pour *Up Time Ratio*). L'équation (5.1) montre que la disponibilité fait intervenir la fiabilité (via les temps moyens de bon fonctionnement - *MUT* pour

⁴Nouvelles technologies de l'information et des communications.

Mean Uptime) et la maintenabilité (via les durées moyennes de réparation – *MTTR* pour *Mean Time To Repair*).

$$UTR = \frac{MUT}{MUT + MTTR} = \frac{MUT}{MTBF} \quad (5.1)$$

La Figure 5.1 représente les changements d'états d'un système réparable : (1) en fonction et (0) en panne. Les équations (5.2) et (5.3) montrent que le *MUT* pour *Mean Uptime* ou *Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement*, dont l'acronyme français équivalent est *MTBF_{fr}*, ne doit pas être confondu avec le *MTBF* (*Mean Time Between Failure*).

$$MUT = E(X_i) \quad \text{et} \quad MTTR = E(Y_i) \quad (5.2)$$

$$MTBF = MUT + MTTR \quad (5.3)$$

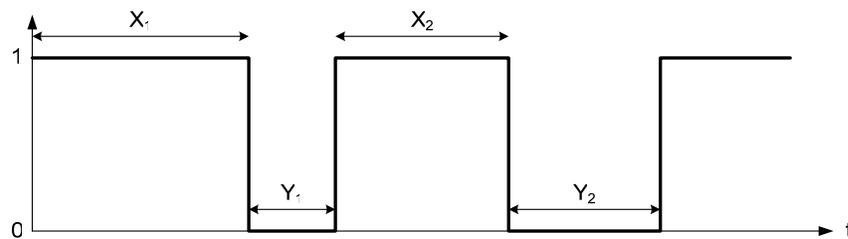


Figure 5.1 : Chronogramme d'un système réparable

1.2. Amélioration de la disponibilité

L'équation (5.1) montre que la disponibilité peut être améliorée par une augmentation des temps moyens de bons fonctionnement (par la fiabilité) et par une diminution des temps moyens de réparations (par la maintenabilité). Avant de présenter la maintenabilité et ses critères, mentionnons les stratégies de maintenance à même de réduire les durées moyennes de réparation.

Aït-Kadi (2002) présente plusieurs stratégies de remplacements périodiques, celles de type âge où les remplacements sont effectués à la panne et après *T* unités de

temps sans panne et celles de type bloc avec des remplacements à des instants prédéterminés, indépendamment de l'âge et de l'état de l'équipement.

Dans ces stratégies, la moyenne des temps de réparation diminue car les actions préventives, généralement mieux préparées et plus rapides, viennent réduire le recours aux actions correctives. L'équation (5.4) donne l'exemple d'une stratégie de maintenance de type âge, avec $R(T) = 1 - F(T)$ la fonction de fiabilité, T_p la durée d'une action préventive et T_c la durée d'une action corrective.

$$MTTR = T_p \cdot R(T) + T_c \cdot F(T) \quad (5.4)$$

Cependant, pour être certain que les actions de maintenance soient plus faciles et rapides, il faut améliorer leur maintenabilité.

1.3. La maintenabilité

1.3.1 Définition

La maintenabilité est la probabilité qu'un matériel, lorsqu'il nécessite une intervention de maintenance, soit remis dans un état de fonctionnement donné, dans des limites de temps spécifiées, lorsque le travail est effectué selon des procédures prescrites et des conditions données (AFNOR (1991), norme NF x 60-010).

1.3.2 Grandeurs fondamentales pour les systèmes réparables

Pour un système réparable, la durée de réparation est une variable aléatoire dont la fonction de densité est $h(t)$, la probabilité que le système hors d'usage soit remis en état d'opération entre t et $t + dt$ est $h(t)dt$. Tout comme pour la fiabilité (section 1.1 du Chapitre 3), la fonction de densité permet de calculer les autres grandeurs représentant la maintenabilité : la probabilité qu'une réparation soit effectuée dans un intervalle donné $H(\bullet)$, la durée moyenne des réparations $MTTR$, le taux de réparation $\mu(\bullet)$.

L'équation (5.5) donne le temps moyen d'une réparation ou *MTTR* dans le cas d'une distribution exponentielle des durées de réparation $h(t)$ dont le taux de réparation μ est constant. Notons cependant que la distribution log-normale s'avère, en général, plus réaliste pour ajuster les durées de réparation des systèmes réparables.

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \tag{5.5}$$

2. Évaluation a posteriori : tester et démontrer la maintenabilité

2.1. Mesure de la maintenabilité d'un système en exploitation

La mesure de la maintenabilité peut se faire par des études statistiques sur la durée des opérations de maintenance effectuées sur des installations qui sont en service depuis un certain temps, de la même manière que l'étude de la fiabilité peut passer par l'analyse d'historiques de pannes.

D'après le Military Handbook - 791AM (1988), les indices de maintenabilité les plus courants et reconnus sont :

- le temps moyen de réparation ;
- le temps maximum de réparation ;
- le temps moyen de maintenance ;
- le temps de réparation de l'équipement ;
- la moyenne géométrique des durées de réparation;
- les heures travaillées en maintenance ;
- le taux de réparation ;
- le taux de maintenance ;
- la probabilité de détection des défaillances ;
- la proportion des défaillances isolables ;
- la capacité de détection automatique de la défaillance ;
- le pourcentage de fausses alarmes ;
- le pourcentage de mauvais remplacements.

Les données de réparation requises peuvent être obtenues de plusieurs sources : entre autres du service de maintenance, des rapports de défaillances et des réclamations de garanties des consommateurs, des expériences passées sur des produits semblables ou identiques, etc.

2.2. Analyse de démonstration de la maintenabilité

Comme pour la fiabilité, il est parfois nécessaire de calculer la maintenabilité avant que ces données ne soient disponibles. On réalise alors des prototypes pour vérifier

la maintenabilité d'un produit qui vient d'être conçu et ainsi acquérir une expérience pratique sur un produit concret, dans un environnement opérationnel.

2.2.1 Préparation

La Figure 5.2 regroupe en 6 catégories les conditions qui doivent être respectées pour une telle étude (Dhillon (1999b)).

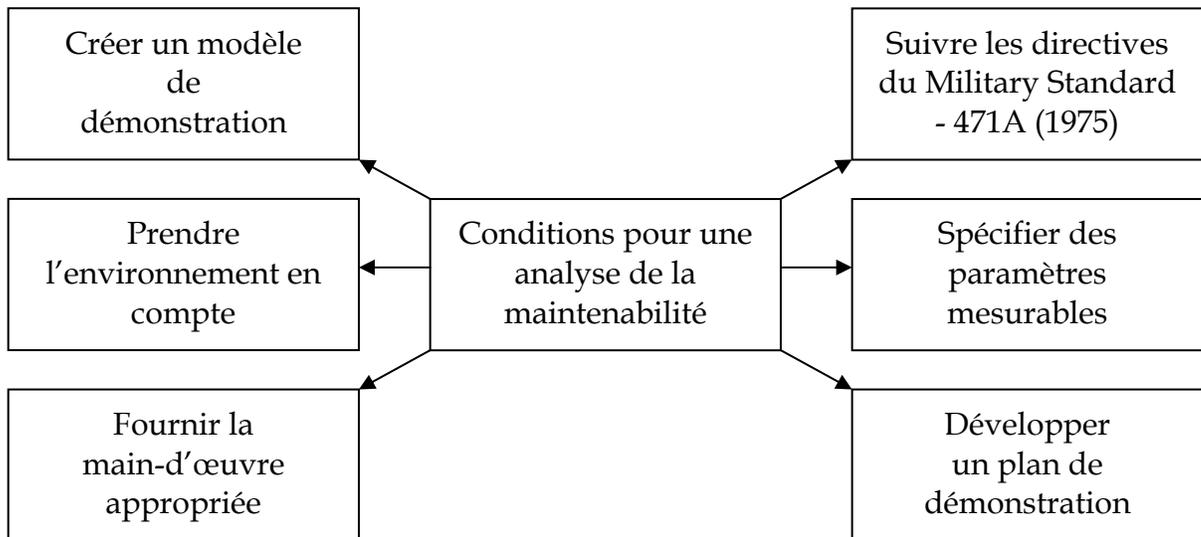


Figure 5.2 : Conditions pour une analyse de la maintenabilité

Le Military Standard - 471A (1973) ou le Military Standard - 471A (1975) traite de plusieurs points :

- les conditions du test, la planification du test : au fur et à mesure que la conception avance, il faut que les contractants se mettent d'accord sur le sujet du test et sur l'équipe qui va le réaliser ;
- la gestion et le contrôle du test : le test doit être effectué avec des contraintes temporelles et budgétaires. Selon la méthode employée, la collecte et l'analyse des données du test font partie de cette gestion ;
- la documentation du test et son analyse : selon la complexité de l'équipement, une documentation doit être produite pendant le test, rapports de défaillance, bon de travail, ...etc.

Le modèle de démonstration est, bien souvent, un prototype : les erreurs évidentes ont pu être corrigées, la réalisation manuelle de la plupart des pièces leur confère une qualité d'ajustement que n'atteindront jamais les pièces fabriquées en série, le

poids des pièces peut être différent de celui des pièces finales (en particulier si elles sont obtenues par prototypage rapide). Le modèle comporte un certain nombre de biais intrinsèques qui ne sont pas forcément représentatifs de la réalité opérationnelle.

De la même manière, le choix de l'équipe qui va effectuer la démonstration et ses conditions de travail est essentiel. La durée de non fonctionnement peut varier énormément entre les conditions (idéales) contrôlées en laboratoire et les conditions en opérations. Ainsi, il est important de considérer les facteurs tels que les aménagements des installations, les ressources matérielles et humaines (expérience et qualifications) et les limitations de la simulation

2.2.2 Le choix du test

L'objectif principal d'une démonstration formelle de la maintenabilité est de vérifier si les paramètres mesurés se conforment bien à ceux qui ont été définis dans le cahier des charges. Tous les tests de maintenabilité n'ont pas pour objectif d'accepter ou de rejeter la conception. Par exemple, avant l'acceptation du design, la gestion administrative, stratégique et logistique de la maintenance a besoin des données issues de ces tests pour mettre au point les actions correctives, revoir les besoins et le support nécessaire aux actions de maintenance. Dhillon (1999b) classe les différents tests en plusieurs catégories : fonctionnels, statiques ou dynamiques, marginaux et en boucle ouverte ou fermée.

3. Évaluation lors de la conception : prévoir la maintenabilité

Si les problèmes de maintenabilité sont détectés trop tard, les défauts sont plus coûteux que s'ils avaient été prévus au stade de la définition du produit. La **prévision de la maintenabilité** a pour objectif d'anticiper les conséquences de la conception sur la réparation du système. Initialement, cette prévision était énoncée par des termes qualitatifs (e.g. points de test appropriés, accessibilité, facilité de maintenance, ...etc.). Par la suite, le besoin d'une définition explicite des caractéristiques prévisionnelles a promu un traitement qualitatif de la maintenabilité.

3.1. La conception pour la maintenabilité (*DfM*)

Pour évaluer la maintenabilité sur des prototypes, il faut que la conception soit suffisamment avancée pour permettre l'élaboration partielle d'un produit. Afin d'agir encore plus tôt dans le stade de la conception, il est nécessaire de penser le système en suivant certains principes de base, énoncés par la conception pour la maintenabilité ou *Design for Maintainability*.

3.1.1 Décomposition et diminution de la durée d'inactivité totale d'un système

La durée de non fonctionnement globale du système, également appelée *Down Time (DT)*, peut se décomposer en plusieurs niveaux. Le Tableau 5.1 donne les 6 niveaux proposés par le Military Handbook - 472 (1966) ou le Military Handbook - 472 (1984) mis à jour. L'amélioration de la maintenabilité vise à réduire la durée de chacun de ces paliers, et ainsi la durée d'inactivité totale. Le Tableau 5.2 détaille les éléments sur lesquels il faut agir (Aït-Kadi (2002)).

3.1.2 Satisfaction des critères de maintenabilité

En recensant les différents moyens d'améliorer la maintenabilité, un certain nombre de mots clés apparaissent : l'accessibilité, l'interchangeabilité, etc., représentant les critères de maintenabilité, définis et normalisés dans AFNOR

(1991). Ces définitions sont introduites au Chapitre 6 (section 2), car la construction de notre indicateur de maintenance utilise une caractérisation avancée de ces critères.

Tableau 5.1 : Composantes de la durée d'inactivité totale d'un système

Les activités élémentaires	Ce sont de simples actions de maintenance de courte durée et relativement peu variables d'un système à un autre. Un exemple d'activité élémentaire est l'ouverture et la fermeture d'une porte.
La durée de réparation active de la défaillance	Elle dépend de l'environnement, de la qualification du personnel et de la disponibilité des ressources. Elle est constituée : <ul style="list-style-type: none"> • du temps de préparation ; • de la durée de vérification de la défaillance ; • de la durée de localisation de l'élément défectueux ; • de la durée d'approvisionnement des pièces ; • de la durée de réparation ; • du temps final de test.
La durée de réparation de la défaillance	Elle est constituée : <ul style="list-style-type: none"> • de la durée de réparation active de la défaillance ; • de la durée administrative du traitement de la défaillance (somme des temps consacrés aux procédures administratives telles que l'obtention des pièces de rechanges et des temps pour compléter les formalités administratives).
La durée de réparation du système	C'est le produit des durées de réparation des défaillances par le nombre de défaillances.
La durée de non fonctionnement du système	Elle inclut : <ul style="list-style-type: none"> • la durée de traitement de la logistique ; • la durée de réparation du système ; • la durée finale du test. Il s'agit d'une combinaison : <ul style="list-style-type: none"> • du retard initial ; • du <i>DT</i> du système.
La durée de non fonctionnement globale du système	Pour conclure, on peut dire que le <i>DT</i> global du système est la somme de deux durées : <ul style="list-style-type: none"> • <i>MTL</i> fait référence à la durée moyenne du traitement logistique (<i>Mean Time for Logistics</i>) ; • <i>MTTR</i> fait référence à la durée de réparation moyenne (<i>Mean Time To Repair</i>).

Tableau 5.2 : Recommandations pour améliorer la maintenabilité

Diminution des durées	Recommandations
Durée de détection des défaillances	<ul style="list-style-type: none"> • Les dispositifs de vérification permettent de suivre le bon fonctionnement des matériels : appareils de mesure (débit, pression, température, ...etc.), voyants, niveaux à visualiser, dispositifs d'essai ou d'étalonnage ; • les dispositifs de recherche de défauts peuvent être manuels ou automatiques.
Durée de diagnostic	<p>Les dispositifs de vérification permettent aussi une réduction de la durée de diagnostic. Mais d'autres éléments interviennent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • le repérage et l'accessibilité des points de mesure ; • la qualité de la documentation de maintenance ; • les procédures logiques, méthodiques de vérification (logigramme de dépannage, tableau de diagnostic, etc.) ; • la connaissance des probabilités de défaillance (arbre de défaillance).
Durée de réparation	<p>Il est possible de rendre minimale la durée d'une intervention de maintenance en agissant sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'accessibilité ; • la facilité de démontage et de remontage ; • l'interchangeabilité.
Durée nécessaire au contrôle	<p>La durée de la phase de contrôle d'un matériel peut être diminuée par les possibilités d'essais en exploitation à l'aide de dispositifs de vérification, d'appareils de mesures spécifiques conçus pour faciliter la maintenance et le contrôle.</p>

Afin d'aider les ingénieurs de l'armée américaine à intégrer le concept de maintenabilité au plus tôt dans les phases de recherche et développement du matériel militaire, le Military Handbook - 791AM (1988) donne, pour chaque critère, des règles de conception visant une maintenabilité optimale. L'Annexe XI traite le critère d'accessibilité et identifie les facteurs qui l'influencent sous la forme d'une liste de questions (généralités, les accès, les poignées et la sécurité).

3.2. Les procédures de prévision de la maintenabilité

La demande pour des méthodes de prévision fiables n'a cessé d'augmenter durant les années. L'objectif est d'être en mesure de faire une évaluation systématique de la maintenabilité pour une proposition de conception donnée et de fournir un indicateur au concepteur afin de lui permettre de comparer différentes

propositions de conception et de les améliorer. Un grand nombre d'approches ont été proposées et la plupart peuvent être classées en trois catégories :

1. l'extrapolation, basée sur le principe que la performance du nouveau produit peut être raisonnablement prévue à partir de l'expérience acquise sur un équipement similaire ;
2. la sommation des temps, qui décompose l'effort de maintenance en tâches élémentaires et somme les durées moyennes pour effectuer chaque tâche ;
3. la liste de contrôle, qui donne les caractéristiques importantes d'un système à classer et à évaluer.

3.2.1 Extrapolation de l'indice de maintenabilité

Pour prévoir un indice de maintenabilité par extrapolation (également appelée procédure de prévision), il faut sélectionner un échantillon de composants existants, pour lesquels une connaissance est disponible. Chaque tâche de réparation à effectuer est alors caractérisée par des difficultés élémentaires : problèmes d'accessibilité, d'outils requis, de qualification de personnel, ...etc. Chacune de ces difficultés est évaluée selon une échelle prédéfinie et la valeur, connue par expérience, est insérée dans l'équation de régression (5.6). Par exemple, Tarelko (1995) identifie un certain nombre de caractéristiques à observer (les entrées du modèle x_i), de même qu'un indice de maintenabilité (la sortie y , e.g. le *MTTR*). Chaque composant de l'échantillon donne un ensemble de valeurs connues (x_i et y) et permet d'écrire une équation. La résolution du système détermine les valeurs des paramètres inconnus b_i .

$$\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_n; b_0, b_1, \dots, b_n) \quad (5.6)$$

Dans ces travaux, Tarelko (1995) propose un simple modèle linéaire : $\hat{y} = b_0 + \sum_i b_i .x_i$. Enfin, pour estimer le *MTTR* (\hat{y}) du nouveau système, il suffit d'évaluer ses caractéristique propres (x_i) et de les utiliser dans l'équation (5.6) dont les paramètres b_i sont désormais connus.

3.2.2 Mesure et somme des temps moyens de travail

Dans ce domaine (*work measurement*), on dispose d'une méthodologie systématique pour établir le temps nécessaire à un opérateur pour effectuer une tâche donnée. Un des systèmes les plus populaires, les méthodes de mesure des temps (*MTM* pour *Methods Time Measurement*) a été développée par le Dr. Harold B. Maynard.

C'est également lui qui est à l'origine d'un système de temps prédéterminé basé sur les *MTM* : le système *MOST*[®] (*Maynard Operation Sequence Technique*). Avec cette technique, trois séquences d'activités permettent de décrire un travail manuel (Zandin (1980)) :

- la séquence de mouvements généraux : pour le déplacement d'un objet libre dans l'espace ;
- la séquence de mouvements contrôlés : pour le déplacement d'un objet qui reste en contact avec une surface ou qui est attaché à un autre objet durant le déplacement ;
- la séquence d'utilisation d'outils : pour l'utilisation d'outils manuels.

Chaque activité est composée de sous activités. Le Tableau 5.3 donne un modèle de séquence type pour les trois types d'activité.

Tableau 5.3 : Modèles de séquences de bases pour des tâches manuelles

Activités	Séquences	Sous activités
Mouvement général	ABGABPA	A : Action des membres (sans objet) B : Déplacement du corps (contournement d'obstacle) G : Prise de contrôle P : Placement
Mouvement contrôlé	ABGMXIA	M : Mouvement contrôlé X : Durée du processus I : Alignement
Utilisation d'outil	ABGABP ABPA	F : Rattachement L : Détachement C : Coupe S : Traitement de surface R : Enregistrement T : Réflexion M : Mesure

Dans le cas du mouvement général, trois phases se distinguent :

- ABG (prendre) : décrit les actions pour atteindre l'objet ;
- ABP (poser) : décrit les actions pour déplacer l'objet à une nouvelle place ;
- A (revenir) : indique la distance parcourue par l'opérateur pour revenir à son plan de travail.

Chacune des sous activités est pondérée par un indice qui représente son niveau de difficulté. La technique renseigne parfaitement sur l'indice à donner en fonction de sa difficulté, par le biais d'une échelle quantitative et d'exemples précis. Pour une séquence générale $A_6B_6G_1A_1B_0P_3A_0$:

- A_6 : marcher de 3 à 4 pas jusqu'à l'objet ;
- B_6 : se pencher et se redresser ;
- G_1 : saisir l'objet ;
- A_1 : déplacer l'objet (à portée) ;
- B_0 : pas de mouvement ;
- P_3 : placer et ajuster l'objet ;
- A_0 : Pas de retour.

Enfin, en sommant les indices et en les multipliant par 10, MOST® permet une estimation du temps requis par la séquence. Pour l'exemple précédent, la séquence requiert $(6+6+1+1+0+3+0).10=170$ unités de temps *TMU* (pour *Time Measurement Unit*, le même système que pour les *MTM*). Sachant qu'1 *TMU* correspond à 0.00001 heure ou 0.036 seconde, il est possible de connaître le temps de l'activité.

3.2.3 Indices de maintenabilité construit à partir de listes de contrôle

Avec cette troisième approche, l'objectif est d'estimer la maintenabilité globale à partir de plusieurs critères pour éventuellement la convertir en coût. Le *Military Handbook - 472* (1966) propose une liste de contrôle de plusieurs critères à évaluer pour estimer cet effort de maintenance. Wani & Gandhi (1999) ont enrichi cette

liste de trois critères, soit la simplicité, la tribologie⁵ et la documentation (Tableau 5.4).

Tableau 5.4 : Critères de l'indice de maintenabilité – Wani & Gandhi (1999)

1	Accessibilité	7	Modularité
2	Désassemblage/ Assemblage	8	Tribologie
3	Standardisation	9	Personnel et ergonomie
4	Simplicité	10	Environnement
5	Identification	11	Outils et équipement de test
6	Diagnosticabilité	12	Documentation

Chaque critère ou interrelation entre deux critères est évalué manuellement. La valeur est comprise entre 0 (nul) et 4 (fort), ce qui représente l'importance de l'apport positif pour la maintenance. Dans leur travaux, Wani & Gandhi (1999) donnent l'interprétation associée à chaque niveau de la pondération. Enfin, grâce à une représentation par graphe orienté ou par matrice, l'indice de maintenabilité est défini par le permanent de la matrice.

Ce type d'approche peut également être spécifique au désassemblage. Das *et al.* (2000) proposent un modèle multi-critère pour évaluer l'effort et le coût de désassemblage d'un produit en fin de vie. Ils proposent l'indice *DEI* (pour *Disassembly effort index*) qui repose sur 7 facteurs requis au désassemblage :

- le temps ;
- l'outillage ;
- la technique d'enlèvement ;
- l'accessibilité ;
- les instructions de désassemblage ;
- les protections ;
- l'effort.

Chaque critère dispose d'une échelle quantitative et qualitative qui lui est propre, incluant la pondération. La Figure 5.3 donne l'échelle du critère *accessibilité*, 1.5

⁵ Science et technologie des frottements des surfaces en contact animées d'un mouvement relatif.

fois plus important que le critère *outillage*. Au final, avec les 7 facteurs proposés, l'indice *DEI* peut varier dans un intervalle de 0 à 100.

Outillage	Improvisé	Spécifique	Fourni par le fabricant	Outillage mécanique	Outil à air comprimé	Aucun	SCORE
	10	8	6	4	2	0	
Accessibilité	Invisible	Mouvements composés	Par le dessous	Profondeur > 15 cm.	Dégagement horizontal	Par le dessus	SCORE
	15	12	9	6	3	0	

Figure 5.3 : Facteurs de maintenabilité du *DEI* de Das *et al.* (2000)

Das *et al.* (2000) proposent également de convertir cet indice en coût C_d afin de faciliter l'analyse économique. Plutôt que de proposer une relation fixe, ils recommandent que la conversion soit adaptée à l'application particulière :

$$C_d = \alpha . \text{Durée totale de désassemblage} + \beta . \text{Indice DEI} \quad (5.7)$$

où α représente le taux horaire de travail ainsi que d'autres coûts basés sur le temps tandis que β est représentatif des coûts généraux et indirects. Il peut être établi à partir de l'expérience sur de précédents produits.

3.2.4 Conclusion

En conclusion, tout comme pour les méthodes d'extrapolation, la validité des résultats obtenus par listes de contrôle repose essentiellement sur l'expérience de la personne qui évalue la valeur des coefficients. La technique *MOST* présente l'intérêt d'être plus systématique et moins subjective, mais beaucoup plus lourde à mettre en œuvre.

4. Le processus de réparation

Pendant l'inactivité du produit, la réparation active a une part importante et dépend en grande partie de la manière de désassembler un produit. Cela justifie qu'on s'attarde sur cet aspect. C'est un domaine de recherche à part entière, surtout depuis que la littérature ne traite plus le désassemblage comme étant simplement l'inverse de l'assemblage (Boks *et al.* (1996), Das *et al.* (2000)).

Nous présentons deux façons d'aborder l'analyse des opérations de maintenance. Nous commençons par les outils de simulation, avec leurs avantages et leurs inconvénients (section 4.1). Nous continuons ensuite avec les techniques et algorithmes de désassemblage. Dans une revue de la littérature sur le sujet, Lambert (2003) recense 300 journaux et congrès qui ont publié dans ce domaine, avec divers objectifs : la fabrication ou réparation à distance, la conception et l'optimisation des lignes d'assemblage, l'optimisation de l'assemblage et de la maintenance ainsi que la conception optimale en prévision de la fin du cycle de vie (recyclage, refabrication, etc.).

La présentation des algorithmes se déroule de la manière suivante. Tout d'abord, on présente une classification des approches de détermination des séquences de désassemblage. Les principes de fonctionnement de certaines approches sont reportés à l'Annexe XII. Ensuite, on détaille la modélisation d'un problème de désassemblage (section 4.3) et les critères d'optimalité d'une séquence de désassemblage (section 4.4) que nous pouvons utiliser pour quantifier les critères de maintenabilité.

4.1. Réalité virtuelle et simulation

Le développement de l'utilisation de la maquette numérique (*Digital Mock-Up*) et de la réalité virtuelle a conduit au développement d'outils d'analyse de la montabilité et de la maintenabilité des éléments d'un système mécanique, très

utiles pour modéliser les complexes interactions humaines des actions de maintenance. Dans nos travaux, nous utilisons un indicateur agrégé obtenu à partir des calculs d'outils supposés disponibles. Cependant, un concept réalité augmenté pourrait servir à justifier le choix de ces outils.

Chedmail *et al.* (2002) proposent un état de l'art des différentes méthodes pour aborder l'approche virtuelle : d'une part la simulation des tâches à l'aide d'un mannequin et, d'autre part, la manipulation directe par immersion en réalité virtuelle.

4.1.1 Manipulation directe

Pour vérifier la faisabilité d'une tâche de montage ou de maintenance, il s'agit de générer des trajectoires où les pièces considérées peuvent être montées ou extraites sans collision.

La génération de trajectoires peut se faire par manipulation directe, à l'aide d'une souris, d'un tableau de boutons sur le logiciel ou d'un périphérique de manipulation dans l'espace comme une SpaceMouse® (Logitech®), une SpaceBall® (Spacetec®) ou des gants munis de capteurs de position (Virtual Technologies®). La génération peut également être automatique, mais la vitesse de calcul pose problème pour des environnements très encombrés. Ainsi, la génération peut être assistée, par une combinaison des approches directe et automatique (Jung (2003)).

Cette génération de trajectoire permet de vérifier le passage de la pièce dans son environnement mais ne donne aucun renseignement sur les conditions ergonomiques de l'opération pour l'utilisateur. L'utilisation d'un mannequin virtuel permet de répondre à cette problématique.

4.1.2 Simulation à l'aide d'un mannequin virtuel

Cette approche est couramment utilisée dans les logiciels de réalité virtuelle, comme entre autres *Mockup*[®] de PTC[®], *Jack*[®] de EAI[®], *Robcad*[®] de Tecnomatix[®] ou *Delmia*[®] de Dassault Systèmes[®].

Les logiciels de manipulation de mannequin proposent des outils qui permettent une analyse ergonomique à partir des variables articulaires du mannequin et de la masse de l'objet transporté, selon différentes méthodes standardisées (e.g. proposées par le *NIOSH* pour *National Institute for Occupational Safety and Health*).

De la même manière que pour la manipulation des pièces, les mannequins peuvent être mûs par manipulation directe, ou pourvus de comportements, définis à l'aide d'agent, ce qui automatise leur comportement. Il est également possible d'immerger un utilisateur dans l'environnement virtuel (e.g. par immersion visuelle, capture de mouvements, retour d'effort, etc.) pour manipuler le mannequin directement.

4.1.3 Bilan sur la simulation et la réalité virtuelle

La plupart des outils conventionnels comme les logiciels *RobCad*[®] ou *Catia Fitting*[®] de Dassault Systèmes[®], offrent difficilement une interface intuitive pour la manipulation directe de modèles humains. Ainsi, de nombreux travaux enrichissent ces outils de nouveaux systèmes pour faciliter leur utilisation. On peut citer les travaux de Vujosevic *et al.* (1995) qui proposent une procédure pour l'identification d'une séquence de désassemblage et sa réalisation par un opérateur humain. L'outil (*MAW* pour *Maintainability Analysis Workspace*) est basé sur l'environnement virtuel *Jack*. Il propose la sélection des outils, une analyse de temps et de coût, une analyse des facteurs humains (efforts à fournir, ergonomie, ...etc.). Les tâches de maintenance sont décomposées en séquences de désassemblage qui font appel à des bibliothèques de mouvements humains, de déplacements, de postures, de manipulation d'objets, d'actions élémentaires de maintenance (e.g. prendre un outil, visser, ...etc.).

On retrouve plusieurs cas semblables, comme celui de Loftin (2001) qui fait état d'une utilisation du modèle humain *Jack*[®] (*EAI*[®]) par la *NASA* (*National Aeronautics and Space Administration*) pour améliorer la maintenabilité des nouveaux systèmes. Mais il y a également des initiatives plus modestes qui utilisent les simples outils de la CAO. Hao *et al.* (2002) ont élaboré un système de visualisation d'une analyse de maintenabilité. Ce système s'intègre dans un environnement *AutoCAD*[®] et requiert un support d'informations qui est utilisé par différents modules gérant, entre autres, la définition des gammes de désassemblage, la génération du modèle humain et l'analyse de la maintenabilité.

D'autres travaux contournent la difficulté en s'orientant vers la réalité virtuelle. Cette technique prend de l'ampleur. En France, Laval Virtual (2004) organise en 2005 les septièmes rencontres internationales de la réalité virtuelle où se retrouvent les dernières avancées dans l'utilisation d'environnements de réalité virtuelle. Les outils de réalité virtuelle sont de plus en plus utilisés comme outils de conception, en particulier pour l'étude de la maintenance. Marcelino *et al.* (2003) proposent un système de gestion de contraintes pour intégrer avec réalisme les interactions entre les tâches d'assemblage ou de désassemblage avec l'environnement virtuel.

Cependant, la réalité virtuelle comporte, elle aussi, certains inconvénients, surtout au niveau de la mise en place de l'analyse. Gomes de Sá *et al.* (1999) comparent la réalité virtuelle aux outils conventionnels utilisés pour la simulation dans le cadre de la validation de processus d'assemblage et de maintenance. La Figure 5.4 synthétise les principales différences du point de vue du temps.

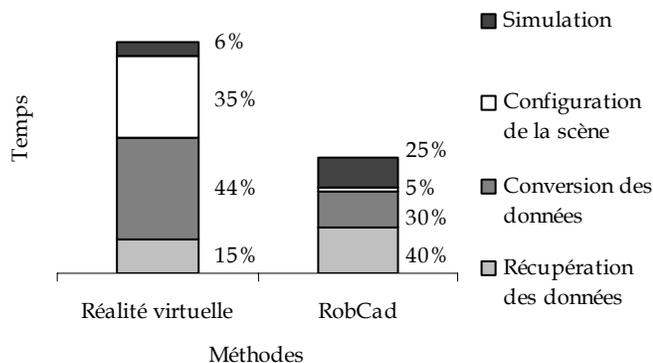


Figure 5.4 : Durées de calcul requis par le conventionnel et la réalité virtuelle

D'une manière générale, ces approches sont longues à mettre en œuvre et nécessitent une grande puissance de calcul. De plus, elles manquent d'autonomie : lorsqu'il s'agit de manipuler un modèle humain, il faut faire intervenir le concepteur pour définir la posture de l'opérateur de maintenance.

4.2. Algorithmes de désassemblage

4.2.1 Classification

Un grand nombre d'approches utilise un formalisme plus abstrait pour étudier la maintenance, sans mettre l'accent sur la représentation réaliste et visuelle du désassemblage, ni sur l'étude de l'ergonomie des opérations. Dans une large étude, Lambert (2003) a classé 137 articles traitant de la détermination des séquences de désassemblage, selon leur modélisation et leur méthode de résolution. Les catégories utilisées sont :

- l'application : orientée assemblage, maintenance ou fin de vie, etc.
- le niveau de détail : processus, ordonnancement ou conception, etc.
- l'approche : mécanique ou arbre hiérarchique, etc.
- la méthode : graphique, mathématique ou heuristiques, etc.
- la caractéristique de l'analyse : analyse de modularité ou relations de précédence, etc.
- le cas d'étude : symétrique axial, polygones 2D, appareil électronique, etc.

La valorisation et le recyclage ont été identifiés comme des objectifs importants du désassemblage (Shyamsundar & Gadh (1996)). La recherche s'est naturellement orientée vers l'analyse des séquences de désassemblage pour le recyclage mais la plupart des méthodes peuvent s'adapter à plusieurs types d'applications.

4.2.2 Les méthodes

Parmi les auteurs qui ont fait progresser ce domaine, on retrouve Shyamsundar, Gadh, Srinivasan, etc. Ils se sont concentrés sur la génération de séquences de désassemblage, sur la profondeur utile de désassemblage, etc., pour maximiser les revenus tout en tenant compte des contraintes environnementales. Il y a plusieurs types d'approches (Lambert (2003)) :

- les méthodes empiriques ;
- les méthodes graphiques ;
- les algorithmes de recherche ;
- les méthodes avancées telles que logique floue, recuit simulé, réseau de neurones, algorithme génétique, multi-agents et réseaux Bayésiens ;
- les approches mathématiques.

L'Annexe XII présente les détails de plusieurs techniques et algorithmiques proposant un désassemblage « automatique » et optimal ou quasi-optimal (optimalité non assurée).

D'après Lambert (2003), les résultats des méthodes empiriques et des heuristiques sont souvent loin du résultat optimal. De plus, les heuristiques ne fonctionnent pas bien pour les problèmes complexes ou non standards. Par exemple, les heuristiques de Kuo *et al.* (2000), Kuo (2000) et Güngör & Gupta (1997) ne s'appliquent qu'aux produits électromécaniques, plus précisément de type ordinateur personnel.

D'autre part, certains travaux ont la particularité d'effectuer des désassemblages séquentiels, c'est-à-dire une pièce à la fois. Notre approche (Chapitre 6) utilise la

programmation mathématique pour contourner cette limitation et trouver une séquence optimale sans pour autant explorer tout le domaine des solutions.

D'après Lambert (2003), les techniques de programmation mathématique requièrent un grand niveau d'abstraction mais permettent de converger vers la solution optimale sans parcourir tout l'espace. Lambert (2001, 2002b) représente le problème de désassemblage sous la forme de graphe ET/OU réduit (Figure 5.7, section 4.3.2) ou d'une matrice de transitions équivalente (celle-ci est introduite au Chapitre 6 – Tableau 6.5, section 3.3.2.c).

4.3. Modélisation d'un problème de désassemblage

4.3.1 Formalisation du système

La génération des séquences de désassemblage a été abordée par plusieurs auteurs, dont De Fazio & Whitney (1987) et Homem de Mello & Sanderson (1991). Les modèles élaborés incluaient diverses représentations des attachements entre les pièces de l'assemblage. Les plus courantes sont basées sur le modèle de Bourjault (1984), soit le *diagramme des liaisons* et les *relations de précedence* entre les connexions.

4.3.1.a Graphe des connexions

Pour être analysés par des algorithmes de désassemblage, les systèmes multi-composants (Figure 5.5a) sont représentés par un graphe qui renseigne sur la structure du produit (Lambert (2003)). Le graphe des liaisons, ou des connexions, peut être directement extrait de l'analyse, visuelle ou automatique, du dessin. Les nœuds sont les pièces élémentaires tandis que les arcs représentent les contacts entre deux pièces.

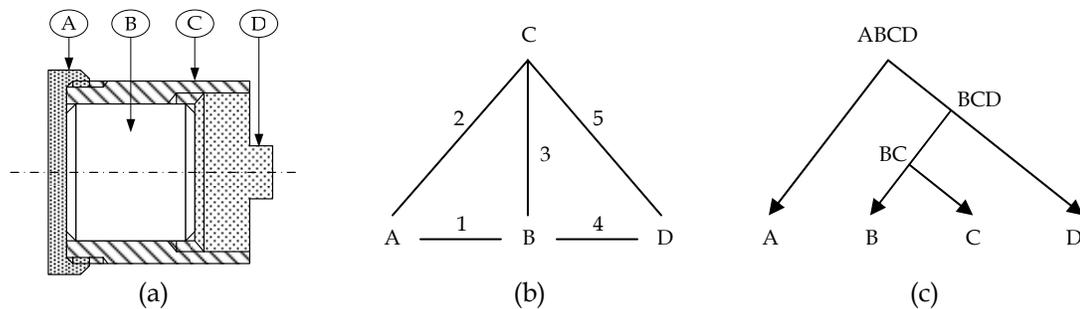


Figure 5.5 : Représentations d'un assemblage simple
 (a) Design. (b) Graphe des connexions. (c) Arbre de désassemblage.

4.3.1.b Les relations de précedence

Pour construire l'arbre de désassemblage, il est nécessaire de respecter les contraintes imposées par la configuration de la structure. Le formalisme des relations de précedence est très utilisé pour savoir dans quel ordre les actions de désassemblage (les ruptures de liaisons) peuvent être effectuées.

Selon le principe établi par Bourjault (1984), l'équation (5.8) donne une relation de précedence pour l'exemple de la Figure 5.5a. Elle doit se lire : les paires de contacts 1 et 2 ou 4 et 5 (numérotés sur la Figure 5.5b) doivent être rompues avant le 3.

$$(R_1 \text{ et } R_2) \text{ ou } (R_4 \text{ et } R_5) \rightarrow R_3 \quad (5.8)$$

L'ensemble de ces relations est déduit en posant plusieurs questions élémentaires à l'utilisateur (dans le cas de l'assemblage : quelles connexions doivent être établies avant et après la $i^{\text{ème}}$ connexion ?). Ce type d'approche a conduit à divers systèmes interactifs où un programme informatique génère des questions, auxquelles répond un expert. Le programme génère alors les relations de précedences entre les connexions ou entre des combinaisons logiques de connexions. Les systèmes se différencient par le nombre et la complexité des questions. Par exemple, Baldwin *et al.* (1991) ont développé SPAS/2 qui propose une interface graphique afin d'aider l'utilisateur à répondre aux questions.

Comme les séances de questions peuvent s'avérer très fastidieuses (deux heures avec SPAS/2 pour un exemple de 11 pièces), plusieurs approches offrent la possibilité d'automatiser cette tâche. Inaba *et al.* (1994) étudient la faisabilité des tâches de désassemblage en analysant la topologie de pièces réduites à des polygones en deux dimensions. D'autres travaux traitent la désassemblabilité en trois dimensions. Par exemple, Ha *et al.* (1996) considèrent les directions d'extraction grâce à des cônes de « visibilité » partant des surfaces de contact.

Les relations de précédence peuvent être orientées connexions, comme dans l'équation (5.8), ou orientées pièces, comme dans l'équation (5.9). Baldwin *et al.* (1991) et (Lambert (2002) ont utilisé ce formalisme modifié, afin d'éviter l'ambiguïté du formalisme orienté connexions qui intervient lors de l'application (ou la rupture) simultanée de plusieurs connexions. Les relations de précédence s'expriment toujours avec l'opérateur R , mais les questions ne portent plus sur la possibilité de défaire des connexions mais sur la détachabilité des sous-assemblages. Pour l'exemple de la Figure 5.5a, l'équation (5.9) se lit : il faut retirer la pièce A ou la pièce D avant de pouvoir retirer la pièce B .

$$R_A \text{ ou } R_D \rightarrow R_B \quad (5.9)$$

Dans de récents travaux, Lambert (2004) remplace ces relations de précédence par des règles de sélection. Cependant, quel que soit le formalisme, l'écriture algébrique n'est pas la seule façon de traduire les relations de précédence. Par exemple, Tseng & Liou (2000) utilisent une représentation graphique, Moore *et al.* (2001) les modélisent par des réseaux de Petri tandis que Güngör & Gupta (2001) génèrent des matrices de désassemblage (DPM pour *Disassembly Precedence Matrices*), tout comme Huang & Huang (2002) qui utilisent des matrices d'interférences.

4.3.2 Représentation des séquences de désassemblage

Une séquence de désassemblage peut être représentée par une liste ordonnée d'actions. Par conséquent, cela peut devenir très lourd de représenter l'ensemble de toutes les séquences de désassemblage par un ensemble de listes, chacune correspondant à une séquence. Comme plusieurs séquences partagent des sous-séquences communes, un certain nombre de représentations tente de rendre cet ensemble de séquences plus compact.

Les représentations schématiques les plus courantes sont : les diagrammes de précédences, les diagrammes de transitions entre états, les arbres inversés, les graphes de séquences de liaisons (De Fazio & Whitney (1987)), les graphes ET/OU (Homem de Mello & Sanderson (1990)) et les graphes de séquences d'assemblage (ASG pour *Assembly Sequence Graph* - Gottipolu & Ghosh (1997)).

En reprenant les travaux de Bourjault (1984), De Fazio & Whitney (1987) ont introduit la représentation par états où un seul graphe de désassemblage rassemblait tous les états dans lequel le produit pouvait se trouver (le nœud A,BCD signifie que A a été désassemblé et que l'ensemble BCD est toujours connecté). Ces diagrammes de transitions entre états pouvaient correspondre à l'état des connexions ou de l'assemblage. La Figure 5.6 donne le diagramme de transitions pour l'exemple de la Figure 5.5a.

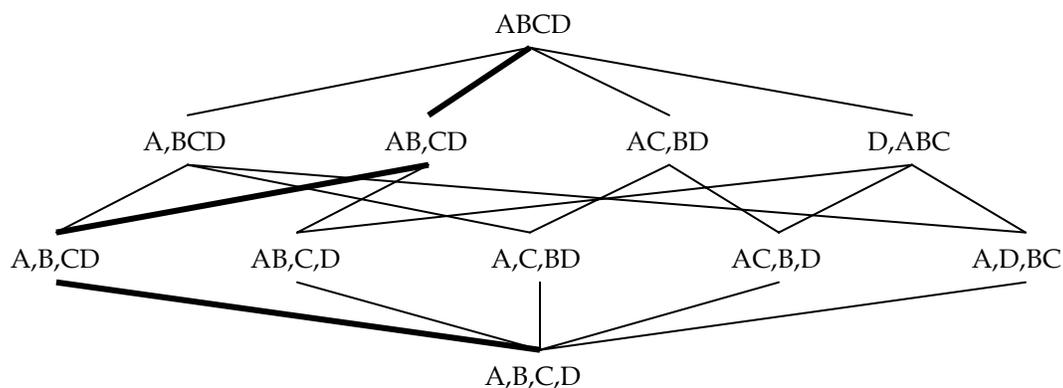


Figure 5.6 : Diagramme de transitions entre états de l'assemblage

Ce type de graphe est également appelé diagramme *Diamant* à cause de sa forme caractéristique. On constate que la manière dont il est construit exploite l'ensemble de toutes les liaisons pouvant être rompues à différents stades. Dans la théorie des graphes, ces ruptures sont appelées des coupes (*cut-sets*) du graphe de liaisons.

Ce diagramme a évolué vers le graphe ET/OU, proposé par Homem de Mello & Sanderson (1990) pour une représentation simplifiée. Les nœuds de ce graphe correspondent aux sous-ensembles de pièces plutôt que sur les états de l'assemblage. Les actions sont représentées par des arcs doubles (hyperarcs) qui partent d'un sous-ensemble « parent » pour se connecter aux **deux** sous-ensembles « héritiers » générés par l'action de désassemblage. Ainsi, le premier arc de la Figure 5.6, entre « *ABCD* » et « *A,BCD* » est transformé en un hyperarc, partant du sommet « *ABCD* » vers les sommets distincts « *A* » et « *BCD* ». L'hypothèse selon laquelle un « parent » est décomposé en deux « héritiers » est couramment utilisée, mais certains travaux utilisent les opérations tertiaires, e.g. Bonneville *et al.* (1995).

Le grand nombre d'arcs de cette représentation lui a valu le surnom de *diagramme spaghetti*. Pour éviter cette surcharge, Lambert (2002) a proposé un graphe ET/OU réduit (Figure 5.7). Il s'agit de n'indiquer qu'un seul des liens entre le parent et un des deux enfants (généralement celui qui a le plus de pièces). Le deuxième enfant étant le complémentaire du premier vis-à-vis du parent. Le deuxième arc est implicite et non représenté.

On note également les travaux de Gao *et al.* (2003) qui proposent plusieurs filtres pour éliminer certains sommets et arcs du graphe, selon la connectivité des sous-assemblages réalisables, de la compatibilité des matériaux pour un usage de fin de vie, etc.

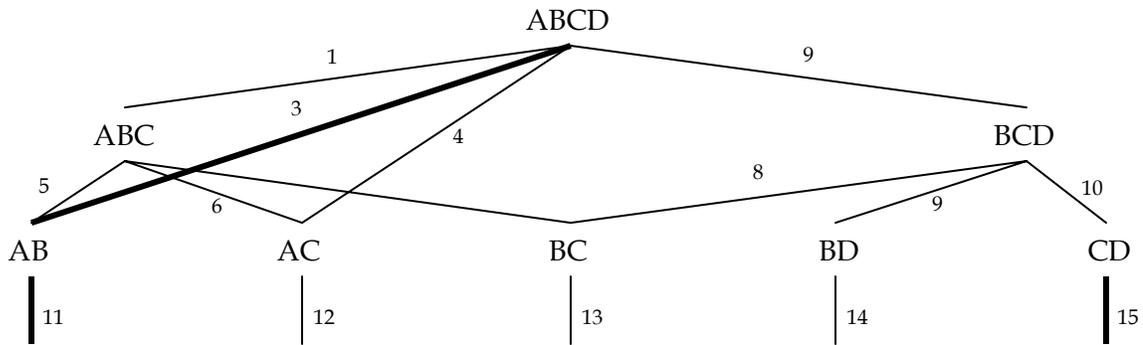


Figure 5.7 : Graphe ET/OU réduit

4.4. Les critères d'optimalité d'une séquence de désassemblage

Quelle que soit l'approche utilisée, si elle propose une séquence de désassemblage optimale, elle doit disposer d'au moins un critère d'optimalité. Généralement, la mesure associée à ce critère est une fonction d'évaluation ou de coût qui sert à quantifier l'effort de désassemblage, la désassemblabilité d'une pièce, le temps requis pour briser une liaison ou, d'une manière plus générale, des critères qui entrent dans la définition de la maintenabilité.

Bien que l'hypothèse d'un coût unique pour toutes les actions de désassemblage élémentaires soit parfois utilisée, la plupart des approches présentées associent un coût à chaque transition de désassemblage. Cette section étudie les différentes fonctions coûts utilisées. Cette analyse porte également sur les paramètres de ces fonctions : le nombre de pièces à démonter, le coût relié au temps requis par le désassemblage, l'énergie nécessaire, la « désassemblabilité », etc.

4.4.1 Les paramètres de l'évaluation du désassemblage

De telles fonctions coûts sont importantes car elles peuvent servir à quantifier des critères de maintenabilité (Chapitre 6). Afin de préparer ce travail, nous proposons une classification quant à la manière d'évaluer l'effort de désassemblage. Le Tableau 5.5 cite quelques uns des principaux travaux dans le domaine. Ils sont classés en 4 catégories selon le type d'approche, chacune d'entre elles se découplant selon les principaux paramètres utilisés.

Tableau 5.5 : Méthodes de quantification de l'effort de désassemblage

Effort déterminé par	Exemples de travaux ⁶
Expérience/Historique	
- Pondération de difficultés opératoires (type de liaisons, etc.)	[2], [4], [26], [30], [31], [35], [37], [42], [43], [44], [57]
- Pondération de la dextérité requise	[23]
- Coûts, énergies ou durées d'opérations connus	[1], [2], [6], [15], [20], [21], [22], [27], [39], [46], [48], [49], [51], [55], [58]
- Fonction de pénalisation des durées	[5], [22], [27], [30], [55]
- Décomposition des mouvements	[38], [53]
Mesure de l'entropie	
- Accessibilité (direction d'extraction, ...etc.)	[25], [52], [56]
- Accessibilité des outils (orientation, ...etc.)	[24]
- Nb. d'op. de séparations pour isoler la cible	[51]
Caractéristiques du produit (via la CAO)	
- Nb. pièces	[7], [50]
- Accessibilité par le volume	[7], [50]
- Accessibilité par les directions d'extraction ⁷	[8], [9], [11], [12], [16], [17], [28], [29], [41]
- Matériaux dangereux	[7], [22], [27]
- Force requise pour défaire les liaisons	[36], [56]
- Stabilité des sous-assemblages	[3], [33], [34], [35], [36], [37], [45]
- Mobilité des sous-assemblages	[35]
Caractéristiques des opérations	
- Nb. de réorientations	[3], [13], [14], [22], [27], [34], [47]
- Nb. changt. d'outils	[22], [27], [40]
- Nb pièces à retirer	[10], [11], [12], [14], [19], [40], [41], [54]
- Ergonomie, Force	[18], [30], [31], [32], [40]
- Visibilité	[40]
- Durée obtenue par simulation	[32]
[1] Lambert (1997) - [2] Das <i>et al.</i> (2000) - [3] Abe <i>et al.</i> (1999) - [4] Ridder & Scheidt (1998) - [5] Güngör & Gupta (1997) - [6] Lee & Xirouchakis (2004) - [7] Gadh <i>et al.</i> (1998) - [8] Lee & Gadh (1998) - [9] Lee & Gadh (1996) - [10] Srinivasan <i>et al.</i> (1999) - [11] Srinivasan & Gadh (2000) - [12] Srinivasan & Gadh (2002) - [13] Wang <i>et al.</i> (2004) - [14] Wang <i>et al.</i> (2003) - [15] Failli & Dini (2001) - [16] Shyamsundar & Gadh (1996) - [17] Siddique & Rosen (1997) - [18] Chedmail <i>et al.</i> (2002) - [19] Dutta & Woo (1995) - [20] Gottipolu & Ghosh (1997) - [21] Tseng & Liou (2000) - [22] Moore <i>et al.</i> (2001) - [23] Sturges (1989) - [24] Diaz-Calderon <i>et al.</i> (1995) - [25] Hsu & Lin (2002) - [26] Wani & Gandhi (1999) - [27] Güngör & Gupta (2001) - [28] Ha <i>et al.</i> (1996) - [29] Inaba <i>et al.</i> (1994) - [30] Ben-Arieh (1994) - [31] Desai & Mital (2003) - [32] Vujosevic <i>et al.</i> (1995) - [33] Hoehmann (1995) - [34] Lee & Yi (1993) - [35] Lee (1994) - [36] Lee <i>et al.</i> (1993) - [37] Lee & Shin (1990) - [38] Zandin (1980) - [39] Lambert (2002) - [40] Hao <i>et al.</i> (2002) - [41] Srinivasan & Gadh (1998) - [42] Kroll <i>et al.</i> (1996) - [43] Das & Naik (2002) - [44] Kuo <i>et al.</i> (2000) - [45] Suzuki <i>et al.</i> (1996) - [46] Suzuki <i>et al.</i> (1993) - [47] Baldwin <i>et al.</i> (1991) - [48] Lambert (1999) - [49] Lambert (2001) - [50] Mani <i>et al.</i> (2001) - [51] Murayama <i>et al.</i> (2001) - [52] Fujimoto <i>et al.</i> (2001) - [53] Boks <i>et al.</i> (1996) - [54] Mascle & Balasoïu (2003) - [55] Tarelko (1995) - [56] Suga <i>et al.</i> (1996) - [57] Military Handbook - 472 (1966) - [58] Kuo (2000)	

⁶ Certains travaux se retrouvent dans plusieurs catégories car ils utilisent une combinaison de plusieurs paramètres.

⁷ Synthétisées par contraintes topologiques ou sphère Gaussienne.

Parmi ces approches, certaines ne sont pas facilement automatisables car elles requièrent de l'expérience (e.g. détermination des valeurs dans les échelles de pondération). D'autres principes utilisent des données disponibles en CAO et sont donc susceptibles de s'intégrer dans notre approche.

4.4.2 Les techniques de calcul du coût ou de la difficulté

4.4.2.a Mesure de l'aspect économique

Les techniques d'analyse du désassemblage mesurant le coût interviennent surtout dans un contexte de recyclage car elles cherchent à équilibrer la valeur des pièces à récupérer avec les coûts de désassemblage. Une des premières méthodes, *ReStar*, développée par Navin-Chandra (1993), faisait une évaluation des revenus selon la recyclabilité et des coûts selon la stratégie de désassemblage.

Das & Naik (2002) font une analyse économique et séparent le coût de désassemblage en trois éléments principaux :

- le coût direct du temps de travail, associé au temps de désassemblage et au coût horaire appliqué ;
- l'effort de désassemblage qui prend en compte l'outillage et les difficultés associées à chaque action ;
- le coût logistique qui s'applique en particulier aux opérations de tri dans un contexte de recyclage.

Le coût direct peut être estimé avec l'expérience. Si cette expertise n'est pas disponible, Kroll *et al.* (1996) ont développé une méthode alternative pour estimer les temps de désassemblage à partir d'une analyse des tâches du travail tandis que Vujosevic *et al.* (1995) ont développé un outil similaire, intégré dans un simulateur, pour l'analyse de la maintenabilité.

L'effort de désassemblage est plus difficile à mesurer précisément. D'après les travaux de Das & Naik (2002) dans l'industrie, deux éléments permettent d'estimer le coût. Pour les actions de désassemblage non destructrices (*UA* pour *Unfastening Action*), le coût est fonction du type d'attache, du nombre et de l'accessibilité à ces

attaches. Pour les actions destructives (*DA* pour *Destructive Action*), le coût est fonction du poids, de la réduction relative de poids et du procédé employé. La relation entre ces deux paramètres et le coût est obtenue par les taux de coût par action (de type *UA* ou *DA*) par unité, eux même renseignés par une approche multi-facteurs (Das *et al.* (2000)).

Le coût logistique est indépendant de la procédure de désassemblage choisie et représente une mesure extrinsèque au produit. Elle ne sera pas détaillée ici.

Les fonctions coût qui traitent de l'aspect économique sont quasiment toutes basées sur des formulaires remplis par un opérateur formé à la maintenance de l'appareil, saisis sur un tableur qui se charge des calculs (Kroll *et al.* (1996), Boks *et al.* (1996) et Das *et al.* (2000)). Ces techniques requièrent une certaine expérience, en particulier pour déterminer les valeurs de différents champs (sur des échelles de 1 à 4 ou de 1 à 10, voir les listes de contrôle section 3.2.3). Les travaux qui utilisent ce type de fonctions se retrouvent dans la première catégorie du Tableau 5.5.

4.4.2.b Mesure de la complexité

Dans leurs travaux, Guide *et al.* (1997) ont eu besoin de mesurer la complexité de la structure d'un produit pour étudier son impact, entre autres, sur les tâches de refabrication. À partir des premiers travaux sur le sujet, ils ont défini un indice de complexité à partir de trois dimensions :

- **la complexité de réassemblage** : rapport entre le nombre d'éléments à coordonner pour effectuer l'assemblage et le maximum de ces nombres pour les produits pris en compte par l'entreprise ;
- **la complexité d'arborescence** : rapport entre le nombre de niveaux dans la nomenclature du produit et le maximum de ces nombres pour les autres produits ;
- **la complexité des opérations** : rapport entre le nombre maximum d'opérations requises par une pièce d'un produit et le maximum de ces nombres, tous produits confondus.

La complexité globale de la structure multiplie les trois dimensions et donne un indice variant de 0 à 1. Plus la valeur de cet indice est grande, plus le produit est complexe.

Mani *et al.* (2001) proposent une autre formalisation qui établit des indices de démontabilité L_s , de compacité δ_s et de complexité γ_s des opérations de désassemblage, à partir de données CAO (e.g. le nombre total de pièces, la profondeur d'une pièce dans l'arborescence de l'assemblage, le rapport du volume de l'enveloppe totale du produit sur le volume occupé par la pièce considérée, etc.).

Ces définitions présentent plusieurs inconvénients. D'une part, elles sont établies à partir de données empiriques (facteur de pondération) dont l'origine n'est pas indiquée (quel type de produits est à l'origine). D'autre part, les raisonnements ne sont pas expliqués. Par exemple, l'indice de compacité fait intervenir la fonction exponentielle et celui de complexité la fonction sinus hyperbolique, mais sans justifications.

Ces deux exemples permettent de constater qu'il y a une certaine disparité dans la définition de la complexité. Cependant, cette notion apparaît également dans un formalisme plus standard qui sera étudié avec la notion d'entropie (section 4.4.3).

4.4.2.c L'énergie de désassemblage

Suga *et al.* (1996) proposent d'évaluer le désassemblage par le biais de l'énergie requise pour défaire les connexions. À titre d'exemple, pour défaire une liaison vissée, l'énergie calculée doit fournir un couple égal à 80 % du couple appliqué lors de l'assemblage. Le calcul fait intervenir : la surface de friction sous la tête de la vis, la force axiale de serrage et l'angle de rotation produisant cette force.

De même, l'énergie pour défaire un clip en plastique (*snap fit*) est celle requise par une déformation égale à la hauteur de son crochet.

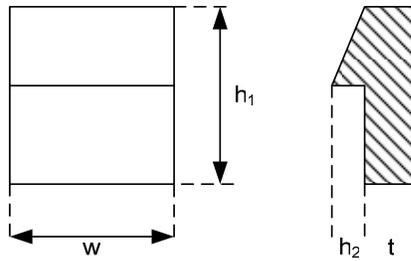


Figure 5.8 : Énergie requise pour défaire un clip ou « *snap fit* »

Suga *et al.* (1996) calculent l'énergie (équation (5.10)) par un simple modèle de poutre en porte-à-faux (le module d'élasticité du matériau est E).

$$E_s = \frac{1}{8} \cdot E \cdot w \cdot t^3 \cdot \frac{h_2^2}{h_1^3} \quad (5.10)$$

Suga *et al.* (1996) ont appliqué cette approche sur six types d'ordinateur et ont observé une corrélation entre l'énergie et le temps de désassemblage. Cette approche est certes très précise, mais elle a l'inconvénient de multiplier les calculs pour les assemblages complexes.

4.4.2.d La difficulté

L'évaluation d'une opération d'assemblage peut également se baser sur des considérations techniques telle que la difficulté. Ben-Arieh (1994) propose une méthodologie pour analyser la difficulté de diverses propositions de séquences d'assemblage. Les principaux paramètres sont la géométrie de la pièce (forme, force requise, etc.) et les opérations d'accouplement (direction, alignement, etc.). Chaque paramètre est valué selon le principe de la logique floue (fonctions triangulaires). Par exemple, le paramètre « forme » peut être décrit par deux valeurs écrites en langage naturel, i.e. propriété *cylindrique* ou *prismatique*. Les valeurs pourront ainsi varier de « très similaires à un cylindre » à « très similaire à un prisme ».

Desai & Mital (2003) abordent la difficulté en proposant des échelles pondérées pour plusieurs facteurs tels que la taille et la forme des composants à désassembler, leur poids, la fréquence de désassemblage, les besoins en main d'œuvre et les outils requis pour la manipulation. Ce principe est semblable à celui évoqué pour la mesure de l'aspect économique (section 4.4.2.a), mais appliqué à des dimensions importantes telles que la force requise, la disponibilité des outils, la forme, la taille et le poids des pièces, etc.

4.4.3 La mesure de la complexité par l'entropie

Plusieurs auteurs abordent les problèmes de complexité de diagnostic de désassemblage du point de vue de l'entropie, en faisant une analogie avec le formalisme de la théorie de l'information.

4.4.3.a Le contenu informatif

Dans la théorie de conception axiomatique, la probabilité de succès d'une opération de conception (ou de maintenance dans notre cas) est liée à l'information requise pour effectuer de cette opération. Pour la mesurer, Suh (1990) définit le contenu informatif :

$$I = \log_2\left(\frac{1}{p}\right) = \log_2\left(\frac{\text{intervalle système}}{\text{intervalle commun}}\right) \quad (5.11)$$

Dans un contexte manufacturier, le contenu informatif représente la probabilité que le système puisse produire une pièce avec les tolérances spécifiées par le concepteur. L'intervalle commun est l'intersection (Figure 5.9) entre l'intervalle système du complexe manufacturier (i.e. sa capacité) et l'intervalle de conception (i.e. les tolérances) spécifié par le concepteur. Un faible contenu informatif traduit une meilleure corrélation entre l'intervalle système et l'intervalle de conception. Ainsi, le système manufacturier requiert moins d'information pour produire une pièce qui répond aux spécifications.

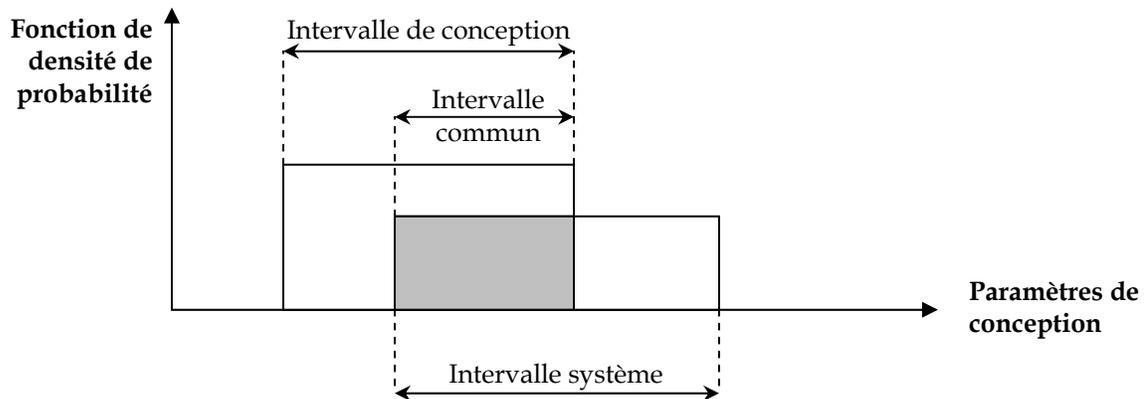


Figure 5.9 : Distribution de probabilité de paramètres systèmes – Suh (1990)

L'entropie est définie comme la valeur moyenne du contenu informatif. C'est l'espérance de la variable aléatoire I . Elle est notée H (équation (5.12)). L'Annexe XIII fait le lien entre ces formules et celles de la théorie de l'information. On y justifie, entre autre, l'emploi du logarithme de base 2.

$$H = -\sum_i p_i \cdot \log_2 p_i \quad (5.12)$$

4.4.3.b Complexité des tâches de maintenance

Pour illustrer l'utilisation de l'entropie dans la mesure de la complexité des tâches de maintenance, nous allons prendre l'exemple de l'accessibilité, de la démontabilité des liaisons et de la complexité structurelle.

- **L'accessibilité :**

Hsu & Lin (2002) définissent l'accessibilité comme étant la réciproque de la quantité d'informations requise pour effectuer une opération d'assemblage. Pour cela, ils définissent la probabilité qu'un opérateur idéal (sans contraintes ou limitations - e.g. force physique - autres que celles dues au produit - e.g. forme) déplace une pièce vers son but avec succès (en ligne droite, sans collision avec les autres pièces) comme étant la probabilité que le même agent détermine avec succès l'espace accessible qui garantit que la pièce va atteindre son but sans encombrer.

Cette probabilité de succès est définie par le rapport de l'espace accessible réel sur l'espace accessible idéal.

Si la probabilité est grande, l'information requise sera moindre et la pièce à assembler subit moins l'influence des autres pièces. Si cette pièce est la première à être installée, l'information requise est nulle et la probabilité de succès est 1. L'équation (5.13) donne l'expression de l'information requise, ou de la complexité.

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{p} \right) = \log_2 \left(\frac{\text{espace accessible idéal}}{\text{espace accessible réel}} \right) \quad (5.13)$$

Enfin, l'accessibilité du composant (*CA* pour *Component Accessibility*) est définie comme la réciproque de la quantité d'information requise : $CA = 1/I$.

Fujimoto *et al.* (2001) décrivent quatre facteurs pour une évaluation plus poussée de la facilité d'accès : le degré de liberté de la pièce, les possibilités angulaires pour avoir prise, l'espace pour soutenir la pièce pendant son retrait et l'angle de retrait.

La formulation de ces quatre facteurs est basée sur l'entropie. Pour le degré de liberté E_{df} (*df* pour *degree of freedom*), la relation (5.14) effectue le calcul avec l'étendue angulaire $\Delta_{\vec{x}}$ dans laquelle il est possible à la pièce de bouger librement (autour de \vec{x}), de même qu'avec les deux autres axes :

$$E_{df} = - \sum_i^{x,y,z} \log_2 \frac{\Delta_i}{180} \quad (5.14)$$

- **La désassemblabilité des liaisons :**

L'idée de Suga *et al.* (1996) pour caractériser la désassemblabilité est basée sur l'influence de l'aspect aléatoire des méthodes de connexion et des opérations de désassemblage ainsi que sur les trajectoires de retrait des pièces. Ils proposent ainsi de définir des indicateurs d'entropie pour les connexions et pour les trajectoires.

L'équation (5.15) détaille le calcul de l'entropie S_I pour les connexions, l'entropie pour les trajectoires étant définie de manière similaire.

$$S_I = \sum_k \left[\ln \left(\frac{N_{Ik}!}{\prod_i n_i!} \right) + \sum_i \ln \left(\frac{n_i!}{\prod_j n_{ij}!} \right) \right] \quad (5.15)$$

où N_{Ik} est le nombre total de connexions entre la pièce ou le sous-ensemble k avec une autre pièce, n_i le nombre de connexions réalisées par la méthode i (e.g. $i=1$ pour les liaisons visées et $i=2$ pour les liaisons clipées) et n_{ij} le nombre de connexions dans la direction j ($j = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ pour $\pm \bar{x}, \pm \bar{y}, \pm \bar{z}$) pour le type de connexion i .

L'entropie devient nulle si toutes les connexions sont de même type, de même direction et que les trajectoires de retraits sont identiques.

Une partie des travaux de Suga *et al.* (1996), reportée à la section 4.4.2.c, ont permis d'observer une corrélation entre l'énergie et le temps de désassemblage, mais pas entre l'entropie et le temps.

- **La complexité structurelle :**

Murayama *et al.* (2001) abordent le désassemblage à l'aide d'une heuristique qui effectue des coupes dans l'arbre de désassemblage. Ils évaluent la performance des sous-assemblages qu'ils obtiennent en mesurant l'efficacité de la progression vers la pièce ciblée par l'entropie. Pour chaque coupe, séparant un sous-assemblage parent D en deux sous-assemblage héritiers D_1 et D_2 , l'entropie E est définie par l'équation (5.16). M_1 représente l'ensemble des pièces cibles et M_2 les autres, $|D|$ est le nombre de pièces incluses dans l'assemblage ou le sous-assemblage D avant la séparation correspondant à la coupe, $|D_i|$ est le nombre de pièces incluses dans D_i et $|D_{ij}|$ est le nombre de pièces de M_j incluses dans D_i .

$$E = \sum_{i=1}^2 \frac{|D_i|}{|D|} \cdot \sum_{j=1}^2 \frac{|D_{ij}|}{|D_i|} \cdot \log_2 \frac{|D_i|}{|D_{ij}|} \quad (5.16)$$

4.4.4 Le diagnostic avant le désassemblage

Bien que l'étude du diagnostic ait eu sa place avant le désassemblage, il est plus facile de l'aborder après la mise en place de l'entropie, introduite avec la mesure de la complexité dans la recherche d'un désassemblage optimal.

Le diagnostic est un processus qui consiste à déterminer les paramètres dont les mesures associées ne sont pas dans l'état voulu mais dans un état responsable d'une défaillance (Paasch & Ruff (1997)).

4.4.4.a Complexité du diagnostic par l'entropie

La difficulté de diagnostic peut être mesurée par le nombre moyen d'interrogations $\langle n \rangle$ auquel l'opérateur doit répondre afin de trouver l'état du système, ou l'origine de la panne. Si le système peut se trouver dans N états, ou configurations, chacun ayant une probabilité d'occurrence p_i , s'il est composé de X machines ou composants dont le fonctionnement est binaire, il y a $N = 2^X$ états. Golay *et al.* (1989) démontrent que le nombre $\langle n \rangle$ augmente de façon monotone avec l'entropie H :

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \cdot \log_2 p_i \quad (5.17)$$

Deux cas sont considérés pour le calcul de l'entropie :

- quand le système est en attente et qu'il est question de déterminer s'il va fonctionner ;
- quand une défaillance est survenue et qu'on veut trouver la panne.

Quand le système est en attente, les probabilités p_i sont les probabilités absolues de trouver le système dans l'état i . Quand il y a eu défaillance, le calcul s'effectue avec les probabilités conditionnelles, connaissant la défaillance survenue.

Pour diminuer l'incertitude du diagnostic, il est possible de réduire le nombre d'états possibles du système ou de surveiller les composants avec des dispositifs de contrôle. Dans ce cas, la probabilité conditionnelle des états dont la défaillance met en jeu des composants surveillés tend vers 0, ce qui réduit l'entropie et par conséquent la complexité de diagnostic.

Pour implémenter cette approche au stade de la conception, on peut utiliser notre module d'évaluation de la fiabilité pour déterminer les probabilités p_i , calculer l'entropie et estimer la difficulté de diagnostic.

4.4.4.b Le diagnostic selon la structure fonctionnelle hiérarchique du système

Il existe cependant une autre approche. Un système doit généralement remplir un certain nombre de fonctions (Fs), qui doivent atteindre une certaine performance mesurable (PMs). Ce concept est souvent décomposé, ce qui donne des sous-fonctions (F) de performance (PM). Ces fonctions sont réalisées par des objets techniques définis à partir de plusieurs paramètres (P). La Figure 5.10 présente deux exemples de décomposition hiérarchique (Paasch & Ruff (1997)).

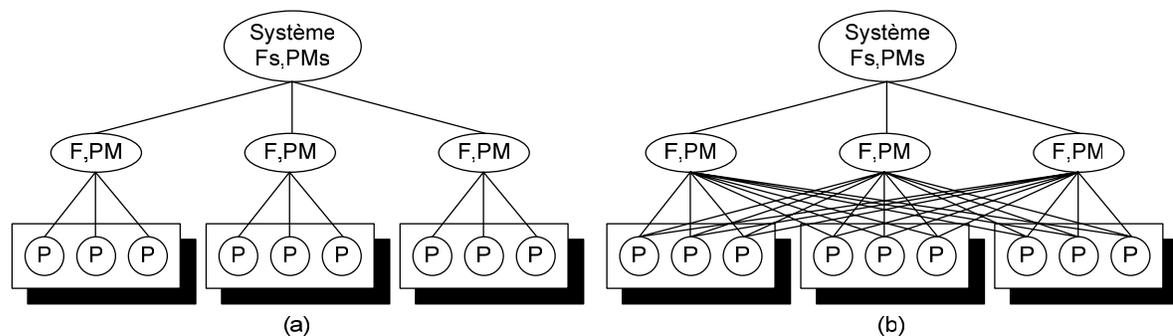


Figure 5.10 : Structure fonctionnelle hiérarchique

(a) Indépendance des groupes de paramètres. (b) Interdépendance des groupes.

La Figure 5.10a représente un système qui conserve l'indépendance entre les groupes de paramètres qui réalisent les fonctions. C'est ce que Suh (1990) a défini comme une conception « idéale » selon les principes de la conception axiomatique . Dans le cas d'une défaillance unique, un maximum de 6 mesures suffit à isoler la panne (3 mesures de performance PM puis 3 mesures de paramètres).

Cette conception idéale n'est pas toujours possible et les groupes de paramètres peuvent être interdépendants. La Figure 5.10b présente un cas où l'interdépendance est totale. Lorsqu'il y a interdépendance, Paasch & Ruff (1997) proposent une mesure de la diagnosticabilité, basée sur quatre éléments :

- le nombre maximum de mesures de paramètres ;
- le coût d'une mesure de paramètre ;
- la complexité d'interaction du système ;
- le nombre moyen de mesures de paramètres.

Ces paramètres ne sont pas observables quand le système est en marche et la mesure requiert bien souvent un arrêt du système et un désassemblage partiel.

4.4.5 Bilan sur la quantification de l'effort de désassemblage

L'utilisation de l'entropie apparaît très utile pour obtenir une mesure quantifiée de la complexité des opérations liées au désassemblage. Bien que l'examen de la littérature donne des formulations relativement diverses, les critères de nos travaux qui utilisent l'entropie adoptent un standard qui confère une homogénéité à l'indice de maintenabilité.

Par exemple, si un de ces critères étudie la difficulté à défaire un certain nombre d'attaches pour libérer une pièce, nous considérons les nombreux éléments qui entrent dans le champ de vision de l'opérateur comme autant d'informations pouvant le perturber et rendre plus difficile la localisation des éléments clés sur lesquels il doit agir dans le cadre de la maintenance.

D'autres critères sont quantifiés plus directement, grâce à une échelle de pondération. Certaines valeurs sont calculées (e.g. l'énergie requise pour défaire les attaches - section 4.4.2.c), mais on peut les fixer au début de l'étude pour éviter la multiplication des calculs et surtout leur redondance (e.g. les attaches de même type conduisent généralement à la même énergie).

Chapitre 6.

Évaluation de la maintenabilité

Les éléments mis en place au chapitre précédent sont à la base de l'élaboration d'un indicateur de maintenabilité. Les critères de maintenabilité sont caractérisés à partir de définitions normalisées puis ils sont définis analytiquement (pour l'essentiel). Leur mesure est utilisée pour quantifier la complexité des opérations relatives à la maintenance du système. L'indicateur de maintenabilité d'un composant est défini par la séquence et la difficulté des actions requises pour l'isoler. Nous avons développé un modèle de recherche automatique des séquences de désassemblage. Il détermine la séquence optimale dont le coût entre dans la définition de l'indicateur de maintenabilité. Chaque entité développée utilise un canevas orienté-objets qui facilite son intégration finale dans l'approche FSC, en particulier pour l'exploitation des données disponibles en CAO ou fournies par un modèle enrichi.

1. Identification des critères

1.1. Prise en compte de la maintenabilité au stade de la conception

Dans la littérature, le *MTTR*, très couramment utilisé comme indicateur de maintenabilité, correspond à la durée moyenne requise par les réparations. Pour définir un indice de maintenabilité temporel, il faut disposer d'un historique sur un produit existant (e.g. utilisation de l'extrapolation – section 3.2.1 du Chapitre 5) ou d'une bonne expertise des opérations de maintenance (e.g. décomposition des tâches et utilisation des *MTM* – section 3.2.2 du Chapitre 5).

1.2. Classification des critères selon la typologie de maintenance

Tableau 6.1 : Classification des critères selon la typologie de maintenance

Critères relatifs à la surveillance et à la maintenance préventive	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Démontabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Aptitude à la pose et à la dépose • Divers (câblage, connexion hydro-pneumatique)
Critères relatifs à la maintenance corrective	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de recherche des pannes ou des défaillances (dispositifs de vérification, dispositifs de recherche de défauts) 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de diagnostic (repérage, point de mesure, listes de vérification)
Critères relatifs à l'organisation de la maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Périodicité du préventif • Regroupement à des périodes identiques d'ensemble d'opérations de maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> • Homogénéité dans la fiabilité des composants constituant la machine • Présence d'indicateurs et de compteurs • Complexité des interventions
Qualité de la documentation technique	<ul style="list-style-type: none"> • Valeur du contenu et disponibilité de la documentation • Mode de transmission de la documentation 	<ul style="list-style-type: none"> • Nomenclature et principes généraux de rédaction et de présentation de la documentation technique
Critères liés au suivi du bien	<ul style="list-style-type: none"> • Évolution des fabrications • Qualité du service après-vente 	<ul style="list-style-type: none"> • Obtention des pièces de rechange

Dans le cas de la fiabilité, le mode de défaillance et le critère mesuré déterminent la sélection des facteurs influents. Pour évaluer la maintenabilité d'un produit selon les critères adéquats, il est important de situer le type de maintenance dans lequel ont lieu les interventions. Aït-Kadi (2002) propose avec le Tableau 6.1 une

classification des critères de maintenabilité, selon les normes NF X 60-300 et X 60-301 (AFNOR (1991)).

1.3. Classification des critères vis-à-vis du produit

Le classement des critères selon la typologie de maintenance fait apparaître une autre distribution : la maintenance préventive se réfère essentiellement à des critères en lien avec la conception du produit tandis que, dans la maintenance corrective, l'organisation, la documentation et le suivi sont plutôt en lien avec des critères contextuels.

Ainsi, on distingue les critères en lien direct avec la configuration du produit de ceux reliés avec le support de la maintenance (Tarelko (1995)). Cette séparation est affinée par Coulibaly *et al.* (2003) qui proposent trois catégories de critères :

- Critères **intrinsèques** (C_{int}) : ils sont directement reliés au système ou à l'un de ses composants ;
- Critères **extrinsèques** (C_{ext}) : ils concernent le système de manière indirecte, mais entrent en compte lors d'une opération de maintenance sur celui-ci ;
- Critères **communs** (C_{com}) : ils se rapportent à la fois directement au produit et à un ou plusieurs facteurs extérieurs.

1.4. Étude des critères

Lors de la définition des critères, nous distinguons les critères intrinsèques qui peuvent être enrichis d'une dimension contextuelle (la version enrichie fait alors partie des critères extrinsèques), les critères strictement extrinsèques et les critères communs, ceux qui sont indissociablement liés aux deux précédentes catégories. Dans ce chapitre, nous concentrons nos efforts sur la formalisation des critères intrinsèques.

À partir de ces critères, il est possible d'évaluer la maintenabilité intrinsèque et/ou la maintenabilité contextuelle. La maintenabilité intrinsèque fait l'hypothèse que toutes les conditions externes sont réunies pour effectuer la maintenance (e.g.

outils et compétences disponibles). Elle sera très utile au concepteur qui veut améliorer son produit mais qui ignore son futur environnement d'utilisation. Quant à la maintenabilité contextuelle, elle tient compte des ressources disponibles. Un acheteur pourra ainsi anticiper les difficultés opérationnelles et décider de « faire » ou « faire-faire » la maintenance, tandis qu'un vendeur pourra offrir le service de maintenance avec une meilleure connaissance de ses engagements.

La Figure 6.1 donne un aperçu des critères qui sont utilisés ou peuvent l'être pour analyser la maintenabilité. Nous proposons, sous la forme d'un diagramme d'Ishikawa, l'intervention des critères les uns par rapport aux autres. Par exemple, le nombre d'attaches a un impact sur la démontabilité qui entre dans la définition de l'aptitude à la dépose. Cette aptitude à déposer chacun des éléments masquant la pièce visée influence l'accessibilité globale à cette dernière et donc sa maintenabilité intrinsèque.

La partie inférieure du diagramme concerne les critères intrinsèques au produit. Pour une évaluation contextuelle de la maintenabilité, il faut intégrer les critères de la partie supérieure. On y retrouve des éléments qui viennent enrichir les critères intrinsèques (e.g. les outils disponibles dans le cas de la démontabilité), des critères extrinsèques (e.g. la disponibilité des pièces de rechange) et des critères communs (e.g. la surveillabilité).

Du point de vue implantation, les critères sont quantifiés par le biais des méthodes (ou fonctions) et des propriétés du modèle orienté objets de FSC qui donnent un nombre positif réel. Quelques uns des intitulés les plus importants (de méthode ou de propriétés) apparaissent surlignés sur la Figure 6.1.

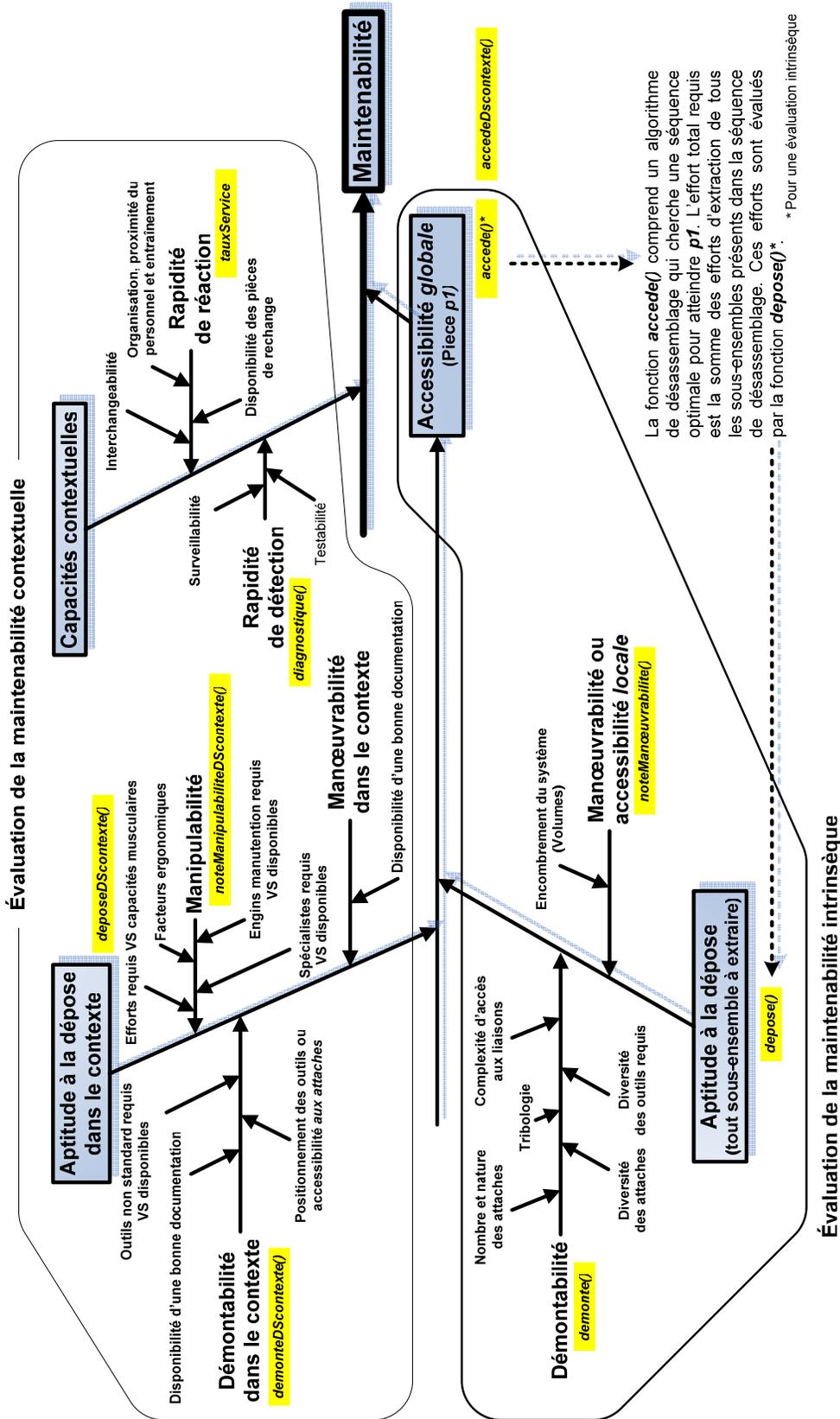


Figure 6.1 : Positionnement des critères de maintenabilité

Il faut noter que pour une évaluation contextuelle, les fonctions d'évaluation des critères intrinsèques enrichis viennent remplacer les fonctions des critères intrinsèques (e.g. *demonteDScontexte()* remplace *demonte()*). La fonction enrichie intègre alors les éléments déjà présents dans la formulation intrinsèque, plus ceux de la partie supérieure du diagramme.

Les éléments qui apparaissent sur le diagramme peuvent être identifiés et organisés par des séances de remue-méninges, en examinant le contenu des normes (e.g. NF X 60-301 (AFNOR (1991)) ou de divers travaux. À titre d'exemple, les facteurs ergonomiques, l'organisation, la proximité du personnel et l'entraînement sont utilisés par Tarelko (1995), la force requise et la manipulabilité par Desai & Mital (2003) et la tribologie par Wani & Gandhi (1999), etc.

2. Caractérisation des critères

2.1. Les critères intrinsèques et intrinsèques enrichis

2.1.1 Accessibilité

Selon la norme NF X 60-301 (AFNOR (1991)), ce critère caractérise la rapidité avec laquelle un élément peut être atteint. Cette rapidité est fonction de l'importance qualitative et quantitative des travaux connexes à consentir pour avoir le libre accès et remettre l'ensemble dans son état initial.

2.1.1.a Caractérisation intrinsèque

L'accessibilité est un critère complexe qui s'applique à un grand nombre d'éléments différents tels que l'accessibilité à l'espace de travail, aux pièces, à leurs attaches, aux points de tests, aux points d'ajustements, etc. Pour englober tous ces aspects, certains auteurs abordent le problème par la réalité virtuelle et son interaction avec l'humain (Vujosevic *et al.* (1995)). Dans notre approche, nous décomposons les nuances de l'accessibilité en plusieurs facteurs :

- la **manœuvrabilité** pour mesurer l'**accessibilité locale** dans les espaces encombrés. La méthode *noteManœuvrabilite()* traite les problèmes d'extraction d'une pièce dans un sous-assemblage initial compact ou encombré ;
- la **séquence d'accès** traduit une **accessibilité globale**. La fonction *accede()* recherche la séquence des opérations de désassemblage (de pièces ou de modules) à effectuer pour atteindre l'élément considéré et retourne un indice de l'effort requis.

L'étude de l'**accessibilité locale** introduit un nouveau facteur, la **manœuvrabilité**, définie par Le petit Robert (1993) comme l'aptitude à être manœuvré¹. Le verbe manœuvrer signifie « effectuer une manœuvre sur un bateau, un véhicule ». Pour une voiture cela signifie « braquer, contrebraquer, reculer, etc. ».

¹ La définition de la *manœuvrabilité* est rappelée pour éviter toute confusion avec le néologisme *manipulabilité* que nous introduisons plus loin.

Pour étudier l'**accessibilité globale** d'un élément donné, nous tenons compte de l'**aptitude à la dépose** (section 2.1.3) de tous les pièces ou ensembles qu'il est nécessaire de retirer avant de pouvoir effectuer la dépose de l'élément étudié. Comme un opérateur de maintenance s'oriente naturellement vers le moyen le plus simple d'isoler cet élément, la méthode recherche la séquence optimale. L'algorithme développé procède automatiquement au retrait de modules complets si cela s'avère plus aisé. La modularité (considérée comme un critère par Wani & Gandhi (1999)) est ainsi prise en compte.

2.1.1.b Prise en compte du contexte

Une troisième nuance traduit l'accessibilité : la difficulté à positionner des outils. La méthode *positionneOutil()* intervient dans l'évaluation du critère de **démontabilité** (avec prise en compte du contexte - section 2.1.2) pour mesurer l'**accessibilité aux attaches** requérant un outil pour être défaits - la main sera considérée comme un outil.

Parmi les facteurs définissant l'accessibilité intrinsèque, la **manœuvrabilité** dans les espaces encombrés, peut être améliorée par la présence d'un **guide** de désassemblage (propriété *disponibiliteDocumentation*), détaillant les mouvements d'extraction, d'orientation et de réorientation des pièces à extraire.

Quant à l'**accessibilité globale**, la fonction *accedeDScontexte()* recalcule la séquence d'accès optimale en utilisant la forme contextuelle de l'aptitude à la dépose des pièces ou sous-assemblages à extraire pour atteindre l'objectif.

2.1.2 Démontabilité

La démontabilité est la possibilité de fractionner, par suppressions conçues en conséquence, un ensemble en sous-ensembles et éléments constitutifs (NF X 60-301 - AFNOR (1991)).

2.1.2.a Caractérisation intrinsèque

Pour étudier la démontabilité d'un composant ou d'un sous-ensemble H (héritier) qu'il faut extraire d'un sous-assemblage P (parent), la méthode *demonte()* doit tenir compte :

- du nombre de liaisons mécaniques entre H et P : méthode *noteNbAttache()* ;
- du type de liaisons entre H et P ou de la difficulté à les rompre : méthode *noteNatureAttache()* ;
- de la **complexité de l'intervention**. La méthode *noteComplexite()* évalue la difficulté qu'un opérateur peut avoir à trouver – méthode *noteEvidence()* – et choisir – méthode *noteChoix()* – les bonnes attaches à défaire ;
- du nombre de fois que l'opérateur doit changer d'outils – méthode *changeOutils()* – ou de directions – méthode *changeDirection()*. Güngör & Gupta (1997) utilisaient ces facteurs pour pénaliser les durées des tâches. L'impact des différents changements sera relié aux propriétés *penaliteChangementOutil* et *penaliteChangementDirection*.

2.1.2.b Prise en compte du contexte

Le critère commun de démontabilité, méthode *demonteDScontexte()*, fait intervenir des éléments extrinsèques dans son évaluation :

- de l'accessibilité aux attaches par ce **matériel d'intervention** et par les **ressources humaines**, selon l'encombrement de P . La méthode *positionneOutil()*, présentée à la section 2.1.1.b, évalue la difficulté à atteindre l'attache avec la main ou un outil ;
- la **disponibilité du matériel** standard ou spécifique (propriété *disponibiliteOutils*) permet de réduire l'influence des besoins en outillage, méthode *noteOutil()*, dépendant du degré de normalisation des attaches employées ;
- la **documentation** (propriété *disponibiliteDocumentation*) avec les instructions de démontage détaillées peut fortement influencer la complexité de l'intervention.

2.1.3 Aptitude à la pose et à la dépose

Ce critère traduit l'aptitude à disposer isolément d'un élément en vue d'assurer son remplacement ou sa maintenance si les opérations sont impossibles à exécuter ou entraînent des délais d'exécution prohibitifs lorsqu'il est accouplé à l'ensemble

(NF X 60-301 – AFNOR (1991)). À partir de ce point, l'expression sera simplifiée par « aptitude à la dépose » et représentée par la méthode *depose()*.

2.1.3.a Caractérisation intrinsèque

Dans une opération de maintenance, l'isolement d'une pièce défaillante est réalisé par une **séquence d'accès** composée de plusieurs actions de désassemblage élémentaire. L'objectif de la méthode *depose()* est d'évaluer l'aptitude à réaliser chacune de ces actions.

Pour chacune d'entre elles, il faut tenir compte de la facilité d'accès aux liaisons qui le rattachent au reste de l'ensemble ainsi que de la facilité des opérations d'accouplement et de désaccouplement. Cette méthode fait appel à la **démontabilité** de l'élément considéré.

Une fois l'élément détaché, la difficulté d'extraction doit être considérée, selon le volume de l'élément et l'encombrement du système dont il est extrait. La méthode *démonte()* utilise la notion **manœuvrabilité**, définie avec l'**accessibilité locale** (section 2.1.1).

2.1.3.b Prise en compte du contexte

La méthode *depose()* étudie l'aptitude à réaliser les actions requises dans des conditions favorables. Pour tenir compte du contexte, il faut vérifier que la capacité à réaliser les actions est bien présente. La méthode *deposeDScontexte()* mesure l'effort de dépose selon les ressources disponibles. En fait, la difficulté de l'intervention peut s'énoncer en termes de manipulation des composants à cause de leur poids, de leur volume, etc.

On introduit alors un nouveau facteur : **la manipulabilité**. Ce terme n'existe pas, mais Le petit Robert (1993) définit le verbe manipuler comme l'action de « manier

avec soin en vue d'expérience ou d'opérations scientifiques ou techniques ». Nous associons donc la manipulabilité à « l'aptitude à être manipulé ».

La méthode *noteManipulabiliteDScontexte()* intervient alors dans le calcul de *deposeDSContexte()*. Elle tient compte :

- des capacités musculaires, morphologiques et ergonomiques moyennes requises de la main d'œuvre (méthode *noteDifficulte()*) ;
- des engins de manutention requis si l'opération doit être mécanisée (méthode *noteEnginManutention()*) et de leur présence dans l'entreprise (propriété *disponibiliteEnginManutention*) ;
- des compétences techniques requises selon la présence d'un danger (méthode *noteSpecialiste()* – e.g. à cause de matières dangereuses, d'un danger électrique), et de leur présence dans l'entreprise (propriété *disponibiliteSpecialiste*).

2.2. Les critères extrinsèques

2.2.1 Le matériel d'intervention

Il caractérise l'outillage et le matériel nécessaires aux interventions de maintenance. Le matériel présent dans l'entreprise doit être adapté, nécessaire et suffisant à la maintenance car c'est une ressource qui affectant la **démontabilité** de pièces (e.g. si l'outil est non adapté à l'attache à défaire) et la **manipulabilité** dans le calcul de l'**aptitude à la dépose** (e.g. absence d'outil de manutention pour des systèmes lourds ou encombrants).

La propriété *disponibiliteOutils* n'influence pas la **démontabilité** si les attaches requièrent des outils standard, par contre, la **démontabilité** sera plus difficile si l'opération nécessite un outillage spécifique (e.g. propre au manufacturier du produit).

Dans le même esprit, Tarelko (1995) mentionne l'importance des installations et équipements, du degré d'automatisation et de mécanisation. Ces notions peuvent être regroupées dans la propriété *disponibiliteEnginManutention* et utilisée dans le calcul de la **manipulabilité**.

2.2.2 Les ressources humaines

Ce critère dépend du personnel exploitant et des techniciens de maintenance : de leur nombre, des qualifications, de la formation ou de l'expérience requises selon le niveau de maintenance appliqué. Il influence la capacité à faire de bons diagnostics rapidement, des réparations plus rapides. Tarelko (1995) considère l'organisation, la proximité du personnel et son entraînement comme des critères importants du support de la maintenance. Nous proposons de les intégrer dans les propriétés *disponibiliteSpecialiste* et *disponibiliteExperience*.

D'autre part, la morphologie des opérateurs doit intervenir dans l'évaluation de l'**accessibilité aux attaches**. Pour tenir compte de cet aspect, il faut disposer d'informations sur la morphologie moyenne des membres (mains, bras, etc.) pour permettre l'utilisation de la méthode *positionneOutil()*, les membres étant les outils dans ce cas.

Ormis l'expérience et la morphologie, la dextérité et les capacités musculaires interviennent également. Sans faire l'objet d'une propriété particulière, cette dimension peut être prise en compte avec les méthodes *noteManipulabiliteDScontexte()* et *noteEnginManutention()*.

2.2.3 Obtention des pièces de rechange

L'approvisionnement en pièces de rechange est un facteur important de la maintenabilité (e.g. Tarelko (1995)). Toutefois, les pièces peuvent également être remises en état par un atelier sur place. Nous simplifions les différents cas de figure en rassemblant leur capacité à répondre à la demande sous la propriété *tauxService*.

2.3. Les critères communs

2.3.1 L'interchangeabilité

C'est la possibilité de remplacer un élément, un sous-système ou système en faisant éventuellement appel à des modifications sommaires de réglage, et/ou à l'adjonction de dispositifs adaptateurs simples (NF X 60-301 - AFNOR (1991)).

Ce critère commun suppose, d'une part, une standardisation des composants (propriété intrinsèque) et, d'autre part, la présence dans l'entreprise d'équipements tiers (propriété intrinsèque) qui utilisent des composants basés sur ces mêmes standards.

L'étude de l'interchangeabilité amène à faire l'hypothèse que la maintenance est effectuée par un atelier en charge de la réparation de plusieurs types de machine. Diallo (2005) a effectué un certain nombre de travaux dans ce domaine pour mesurer le taux de service d'un tel atelier. Nous considérons cette propriété, *tauxService*, comme une donnée connue.

2.3.2 Surveillabilité et testabilité

La surveillabilité sert à caractériser les moyens mis en oeuvre pour détecter rapidement une défaillance d'après les symptômes externes. Il prend en compte la fiabilité et la disponibilité des systèmes de surveillance (Zwingelstein (1995)).

La testabilité correspond à l'aptitude d'une entité à être diagnostiquée dans un état de fonctionnement et l'aptitude de l'entité à permettre la localisation de la défaillance dans un temps donné. Des appareils de mesure fiables et appropriés peuvent alors faciliter la synthèse des données (Zwingelstein (1995)).

Ces deux critères communs tiennent compte des dispositifs d'autodiagnostic intelligents, capables de révéler une défaillance ou un état de dégradation, ainsi que des points d'accès, permettant une inspection visuelle ou une mesure de

performance. La présence de tels dispositifs vient influencer la facilité à émettre un diagnostic (ou **diagnosticabilité**), mesure effectuée par la méthode *diagnostique()*.

Dans ce cas, le diagnostic comporte généralement un petit nombre d'opérations de désassemblage avant de pouvoir effectuer l'inspection. Pour tenir compte de **l'accessibilité pour inspection**, la méthode *accedeInspection()* mesure la difficulté à accéder à la zone d'inspection. Tout comme *accede()*, cette méthode recherche la séquence optimale pour accéder à la pièce, à la différence qu'elle ne la désassemble pas, elle s'arrête aux pièces obstruant son accès.

2.3.3 Les mesures de sécurité

Le Military Handbook - 472 (1966) détermine si l'action de maintenance impose au personnel de travailler dans des conditions dangereuses, telles la proximité d'une source de haute tension, de radiations, la présence de pièces mobiles, de composants brûlants ou d'une structure en altitude, etc.

Une situation dangereuse peut ralentir le personnel. En effet, le personnel peut être amené à prendre des mesures de sécurité avec lesquelles il n'est pas familier, sauf s'il a été spécialement formé ou s'il dispose d'une aide. Pour mesurer l'impact de la sécurité, il est possible d'utiliser les propriétés *disponibiliteSpecialiste* et *disponibiliteExperience*. La maintenabilité est alors pondérée quand les opérations sont dangereuses et/ou effectuées par une personne non préparée.

3. Formalisation des critères de maintenabilité

Par souci de clarté, les méthodes de la classe **Maintenabilite** mesurent les critères intrinsèques de maintenabilité d'une pièce unique au sein d'un composant ou sous-ensemble de plusieurs pièces. En fait, les méthodes doivent être implémentées sous une forme polymorphe afin de mesurer la maintenance d'un sous-ensemble « héritier » au sein d'un sous-ensemble « parent ».

Dans cette section, on retient un formalisme pour chacun des critères intrinsèques de maintenabilité. Le choix repose sur la qualité de la méthode de mesure mais aussi sur la facilité à implémenter la mesure dans un outil de CAO actuel. Nous proposons également d'autres pistes qui peuvent mener à une meilleure évaluation du critère mais qui utilisent des techniques plus complexes.

3.1. Intégration des critères

3.1.1 Agrégation des critères

La maintenabilité est caractérisée par plusieurs critères, chaque critère par plusieurs facteurs. Pour définir un seul indice de maintenabilité intrinsèque, tous les critères sont agrégés. La Figure 6.1 donne un aperçu de l'intégration de ces facteurs. Nous faisons intervenir les interdépendances de façon hiérarchique. Un certain nombre de critères de bas niveau sont formalisés, les critères qui dépendent de ces derniers viennent ensuite, pour enfin arriver à la maintenabilité.

Il existe cependant d'autres alternatives à cette proposition. Une solution simple consiste à les évaluer indépendamment et à effectuer une moyenne (éventuellement pondérée) pour définir l'indice de maintenabilité. Cependant, on perd les fortes interrelations présentes entre les critères. L'utilisation d'une approche multi-critères, de type *AHP* (pour *Analytic Hierarchy Process*) permettrait de les prendre en considération (Schärlig (1985), Saaty (1980)).

Wani & Gandhi (1999) ont utilisé un autre mode pour développer un indicateur de maintenabilité en tenant compte des interrelations. Les critères de maintenabilité (qu'ils nomment attributs) sont représentés par les nœuds d'un graphe orienté où les arcs représentent les interrelations. Ce graphe est valué puis traduit en une matrice, dont le permanent² donne l'indice de maintenabilité.

3.1.2 Système de pénalisation des critères

De la façon dont sont formulés la plupart des critères (traduisant une aptitude à ...), il est attendu qu'une plus grande valeur implique une plus grande facilité. En réalité, dans notre processus de formalisation, les critères débutent avec une difficulté unitaire et vont croissant avec les difficultés qu'ils rencontrent. Par abus de langage, nous appelons « accessibilité » ce qu'il conviendrait d'appeler « problèmes d'accessibilité ».

Pour les critères les plus simples, l'échelle varie de 1 à 4. À titre de comparaison, le Military Handbook - 472 (1966), et Wani & Gandhi (1999) plus récemment, utilisent une échelle de 0 à 4 pour leurs critères. Pour les critères composés, leur valeur maximale va dépendre du nombre des critères de base et de leurs valeurs. Leur système de pénalisation fonctionne de la manière suivante : les critères de base qui portent sur une même pièce se multiplient tandis qu'ils s'additionnent pour des pièces différentes.

3.2. Les critères de la maintenabilité intrinsèque

3.2.1 L'accessibilité en milieu encombré : la manœuvrabilité

Ce critère se penche sur l'accessibilité en espace encombré car la pose ou la dépose d'une pièce $p1$ est d'autant plus compliquée que l'espace ou le composant c dans lequel elle doit être déplacée est restreint.

² Le permanent est une grandeur mathématique propre aux matrices, au même titre que le déterminant dont la définition est analogue.

Nous adoptons un indicateur simple, raisonnant sur l'espace disponible autour de la pièce, sans tenir compte de la forme ni de la complexité des mouvements qu'il faut effectuer pour extraire la pièce. Ce principe a déjà été utilisé par Mani *et al.* (2001) qui tient compte de la compacité du composant par un rapport de volumes.

Dans l'équation (6.1), la méthode *noteManœuvrabilite()* utilise le formalisme de l'entropie pour faire manœuvrer le volume de la pièce *p1* dans le volume disponible, soit le volume enveloppe du composant « parent » *c* auquel les volumes des pièces de *c* (sauf *p1*) sont soustraits.

$$\begin{aligned} \text{noteManœuvrabilite}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = \\ \log_2\left(\frac{1}{p}\right) = \log_2\left(\frac{\text{noteVolumeLibre}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1)}{\text{noteVolume}(\text{Piece } p1)}\right) \end{aligned} \quad (6.1)$$

avec

$$\begin{aligned} \text{noteVolumeLibre}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = \\ \text{noteEnveloppe}(\text{Composant } c) - \sum_{\substack{\text{Piece } p \in \text{Composant } c \\ \text{Piece } p \neq \text{Piece } p1}} \text{noteVolume}(\text{Piece } p) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Cette formulation simplifiée peut être enrichie par les principes utilisés par d'autres auteurs, toujours dans le cadre de l'entropie. Suga *et al.* (1996) établissent l'entropie à partir du nombre de trajectoires qui composent le chemin d'extraction de la pièce considérée, Hsu & Lin (2002) emploient les directions (rectilignes) d'extraction, tout comme Fujimoto *et al.* (2001) qui ajoutent les degrés de liberté et les directions de support.

3.2.2 La démontabilité d'une liaison

3.2.2.a Nature des liaisons

La démontabilité doit connaître le nombre des attaches qui relient la pièce ciblée *p1* au composant « parent » *c* dont elle doit être extraite : c'est la mesure effectuée par la méthode *noteNbAttache(Composant c, Piece p1)*.

La nature de l'attache peut être qualifiée selon une échelle prédéterminée ou analytiquement. Par exemple, Desai & Mital (2003) donnent une échelle pour pondérer l'effort requis pour défaire une attache, tandis que Suga *et al.* (1996) calculent l'énergie requise pour démonter l'attache (l'exemple est donné pour une vis et un clip).

La méthode *noteNatureAttache(Piece p1, Piece p2)* utilise une pondération, qui croît avec la difficulté à rompre le type de liaison considéré (Tableau 6.2). Das & Naik (2002) définissent la difficulté à défaire une attache par l'indice *URating* (*U* pour *Unfastening*) qu'ils ont établi expérimentalement à partir du principe du *DEI* (*Disassembly Effort Index* – Das *et al.* (2000)). Pour une paire de pièces connectées, ils identifient trois relations possibles :

- de type 1 : les pièces sont assemblées par des attaches séparées (une attache implique deux morceaux) ;
- de type 2 : les pièces sont assemblées par des attaches qui font partie intégrante de l'une des pièces ;
- de type 3 : les pièces sont en contact mais il n'y a pas d'attaches.

Tableau 6.2 : Indice de difficulté des attaches de liaisons – Das & Naik (2002)

Attache séparée			Attache intégrée		
	Type d'attache	Difficulté		Type d'attache	Difficulté
1	Clou avec tête	1.5	13	Clip cylindrique	1.6
2	Clou sans tête	1.8	14	Clip emboitement pression	1.3
3	Vis/Écrou à tête standard	1.4	15	Certissage	1.6
4	Vis/Écrou à tête spécifique	2.2	16	Ajustement avec serrage	1.8
5	Boulon+contre-écrou	2.1	17	Pièce fileté intégralement	2.2
6	Rivet/Agrafe	2.0	18	Douille et bouchon	1.2
7	Circlip	2.5			
8	Ruban	1.7			
9	Adhésif	2.1			
10	Soudure	4.0			
11	Velcro/Fermeture éclair	1.0			
12	Ressort amovible	1.8			

Ce type de représentation est relativement répandu, mais peu standardisé. Parmi les normes, le Military Handbook - 472 (1984) donne les temps standards liés au retrait ou au remplacement de plusieurs attaches (les vis standards, Allen, à tête

« papillon », captives, les vis nécessitant un simple quart de tour pour effectuer le maintien en position, les couple vis/écrous – écrous libres – les circlips, etc.).

D'autres documents de référence peuvent venir enrichir l'échelle que nous utilisons. Par exemple, nous employons un facteur de pondération multipliant la difficulté selon le nombre d'attaches employées. Par exemple, pour plusieurs vis/écrous standard, l'indice de difficulté 1.4 doit être majoré.

3.2.2.b Complexité de l'intervention

Ce facteur est mesuré par la fonction *noteComplexite()* qui peut se définir en deux temps. Dans un premier temps, il faut que les attaches qui relient la pièce *p1* au composant *c* soient bien en évidence. Cet aspect peut être valué par un système de pondération dont les valeurs sont prédéfinies selon la situation. Le Tableau 6.3 renseigne sur les valeurs de la méthode *noteEvidence(Composant c, Pièce p1)*.

Tableau 6.3 : Pondération de l'accès aux liaisons – Desai & Mital (2003)

	Paramètre de conception	Score	Interprétation
Dimensions	Longueur, largeur, profondeur, angle	1	Attaches en surfaces, espacées, bien visibles
		1.6	Attaches enfoncées, rapprochées, peu visibles
		2	Attaches très profondes, presque collées, difficiles à localiser
Emplacement	Surface plane	1	Rainures pour un accès facile
	Surface angulaire	1.6	Rainures difficiles d'accès, manipulations requises
	Rainure	2	Rainures très difficiles d'accès

Dans un deuxième temps, il importe au technicien d'agir sur les bonnes attaches, celles qui libéreront la pièce *p1*. Nous proposons une formulation selon l'entropie ou l'information requise par le technicien pour effectuer l'opération. Celle-ci est basée sur le nombre total d'attaches qui composent le composant parent *c* et sur le nombre d'attaches liant le composant *c* et la pièce *p1*, i.e. celles qu'il faut défaire.

L'entropie est mesurée à partir de la probabilité p que le technicien traite les bonnes attaches.

$$\begin{aligned} \text{noteChoix}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = \\ 1 + \log_2\left(\frac{1}{p}\right) = 1 + \log_2\left(\frac{\text{noteNbAttache}(\text{Composant } c, \text{Composant } c)}{\text{noteNbAttache}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1)}\right) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Prenons l'exemple suivant, soit le composant c , contenant au total 10 liaisons dont une seule maintient $p1$ dans c . La probabilité p que le concepteur traite la bonne liaison est de 0.1, la complexité du choix est alors 4.32. Cela signifie que l'information requise par l'opérateur (ou la complexité du choix) est d'autant plus élevée que la probabilité qu'il réalise l'opération sans se tromper est faible, tandis que la valeur minimale est 1.

Finalement, l'équation (6.4) donne la formulation de la **complexité de l'intervention**.

$$\begin{aligned} \text{noteComplexite}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = \\ \text{noteEvidence}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \times \text{noteChoix}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \end{aligned} \quad (6.4)$$

3.2.2.c La méthode *demonte()*

Pour estimer la démontabilité d'une pièce ou d'un composant, la méthode *demonte()* se calcule par l'équation (6.5). Pour toutes les pièces de c (sauf $p1$), on évalue la nature des attaches et la complexité de l'intervention, i.e. la rupture de chaque attache (hypothèse : les interventions sont indépendantes). De plus, à l'instar de Güngör & Gupta (1997), le problème de démontabilité augmente si le nombre de changement d'outils ou de directions de travail est trop important pour briser toutes les attaches.

$$\begin{aligned}
& demonte(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = \\
& \sum_{\substack{\text{Piece } p2 \in \text{Composant } c \\ p2 \neq p1}} \left[\begin{array}{l} noteNatureAttache(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2) \times \\ noteComplexite(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \end{array} \right] \times \\
& changeOutil(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \times penaliteChangementOutil \times \\
& changeDirections(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \times penaliteChangementDirection
\end{aligned} \tag{6.5}$$

3.2.3 L'aptitude à la dépose

Ce critère fait appel à la manipulabilité d'une pièce et la démontabilité d'une liaison. La mesure de ce critère est définie à partir de la séquence optimale pour déposer la pièce étudiée. Cette hypothèse considère que la maintenance est effectuée par un opérateur idéal, bien que le manque d'expérience ne soit pas exclu (cet aspect intervient avec la prise en compte du contexte).

La formalisation intrinsèque du critère d'**aptitude à la dépose**, la méthode *depose()* intègre les éléments de la **démontabilité** des attaches, mais aussi de la **manoeuvrabilité** de la pièce. Soit *p1* la pièce devant être extraite du composant *c*, ce critère est calculé par la fonction *depose()* :

$$\begin{aligned}
& depose(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = \\
& demonte(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \times \\
& noteManœvrabilite(\text{Composant } c, \text{Piece } p1)
\end{aligned} \tag{6.6}$$

3.3. Recherche des séquences d'accès par la programmation par contraintes

L'objectif de cette section est d'évaluer l'**accessibilité globale** d'une pièce donnée. Pour cela, il faut trouver une séquence efficace pour y accéder et évaluer la difficulté propre à cette séquence. Cette recherche est réalisée par la méthode *accede(Composant c, Piece p1)*.

La recherche de la séquence de désassemblage est basée sur l'outil de Zwingmann *et al.* (2005). La séquence d'accès est déterminée en tenant compte des différentes

actions de démontage possibles, des différents regroupements de pièces possibles, et surtout en minimisant les efforts. L'évaluation de ces efforts utilise l'**aptitude à la dépose** - méthode *depose()* - pour chaque extraction de pièces ou sous-ensembles gênants.

L'objectif de cet outil est de limiter au maximum les interventions de l'utilisateur pour générer automatiquement les séquences de désassemblage. Le principe utilisé repose sur la programmation par contraintes. Il permet de trouver toutes les séquences de désassemblage sans explorer la totalité de l'espace de recherche.

3.3.1 Introduction

De façon pragmatique, accéder à une pièce consiste à trouver la séquence de démontage la plus facile, et estimer ce degré de facilité. Prenons l'exemple de la Figure 6.2a, où l'opérateur doit effectuer la maintenance de la pièce A. Intuitivement, il faut enlever la pièce B avant de pouvoir extraire la pièce A pour la réparer ou la remplacer.

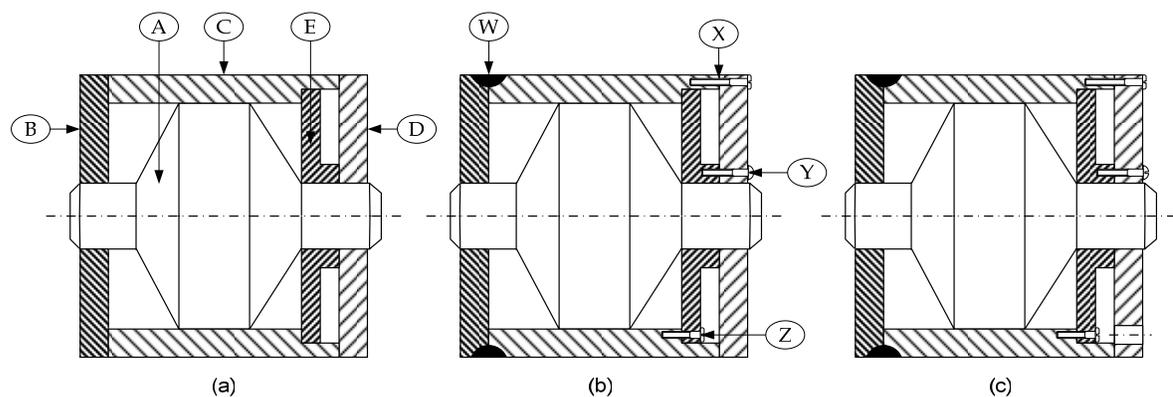


Figure 6.2 : Assemblage simple

(a) Sans liens. (b) Avec liens. (c) Avec dégagement de l'accès à la vis Z.

Supposons maintenant que la pièce B est soudée à la pièce C (Figure 6.2b). Dans ce cas, l'opérateur va choisir de démonter, séquentiellement, D puis E qui sont seulement vissées. En outre, il n'a pas le choix de les retirer séquentiellement car D empêche l'accès à la vis Z. Par contre, l'accès à cette vis est amélioré dans la

conception de la Figure 6.2c. Dans ce cas-ci, l'opérateur a maintenant le choix d'enlever l'ensemble DE dans un même geste ou de procéder séquentiellement (l'ensemble étant trop lourd par exemple).

3.3.2 Principe général

3.3.2.a Modélisation formelle du système

Un système, défini comme un ensemble de composants et un ensemble de liaisons, est souvent représenté par un dessin en CAO. Il n'est pas exploitable tel quel par les algorithmes de désassemblage et doit être formalisé. Notre outil ne requiert que deux éléments clés, proposés par Bourjault (1984) avant d'être repris par De Fazio & Whitney (1987) et Baldwin *et al.* (1991) : le *graphe de connexions* et les *relations de précédence*.

Ces deux éléments ont déjà été introduits à la section 4.3.1 du Chapitre 5. La Figure 6.3a présente le graphe de connexions pour l'exemple de la Figure 6.2, ainsi que la matrice de connexions C équivalente (Figure 6.3b) et les relations de précédence (Figure 6.3c).

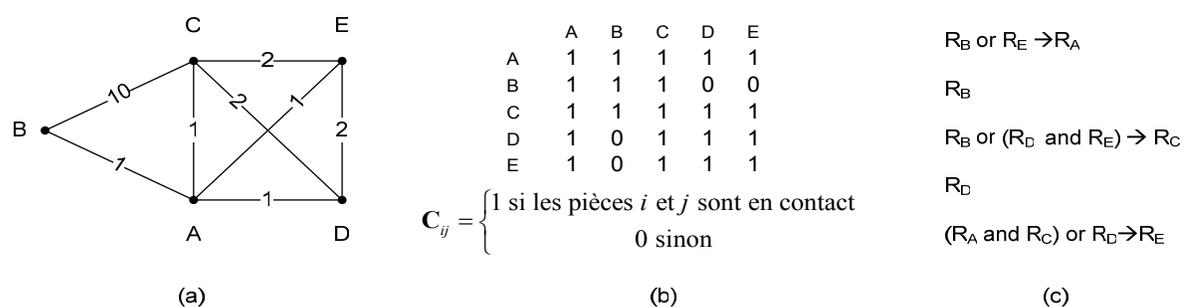


Figure 6.3 : Éléments de la modélisation formelle du design de la Figure 6.2

- (a) Graphe de connexions enrichi. (b) Matrice de connexion.
(c) Relations de précédence.

Les relations de précédence classiques sont conçues pour étudier la faisabilité des actions de désassemblage, considérant l'état du produit à l'étape qui précède. Ce formalisme convient très bien pour des retraits séquentiels des pièces. Cependant,

leur récursivité intrinsèque empêche leur utilisation pour l'analyse des actions de désassemblage parallèles (non séquentielles).

Dans Zwingmann *et al.* (2005), nous proposons une nouvelle formalisation, plus élaborée : les relations de désassemblage enrichies. Elles intègrent la notion de direction de dégagement dans un vecteur qui permet à notre outil de détecter les sous-assemblages qui ne peuvent être obtenus qu'en retirant simultanément plusieurs pièces (désassemblage parallèle). L'Annexe XIV.1 reprend les éléments qui nous ont conduits à cette formulation et détaille l'utilisation des relations et du vecteur de dégagement.

Le Tableau 6.4 donne les relations pour la Figure 6.2. La relation (6.7) donne les conditions de retrait de la pièce A : soit les pièces B ou E ont été retirées à une étape précédente, soit les pièces A et B ou A et E sont retirées simultanément, respectivement par la gauche et par la droite (l'axe \bar{x} est horizontal, orienté à droite).

Tableau 6.4 : Relations de désassemblage enrichies pour la Figure 6.2.

Relations de désassemblage enrichies (étape i)			
Relat. de précédence (étape $i-1$)		Relations de dégagement (étape i)	Pièce
$[R_B \text{ ou } R_E]_{i-1}$	<i>Ou</i>	$[[R_B \text{ et } (\mathbf{d}=-\mathbf{x})] \text{ ou } [R_E \text{ et } (\mathbf{d}=\mathbf{x})]]_i$	$\rightarrow R_A$ (6.7)
			$\rightarrow R_B$ (6.8)
$[R_B \text{ ou } (R_D \text{ and } R_E)]_{i-1}$	<i>Ou</i>	$[[R_B \text{ et } (\mathbf{d}=-\mathbf{x})] \text{ ou } [(R_D \text{ et } R_E) \text{ et } (\mathbf{d}=\mathbf{x})]]_i$	$\rightarrow R_C$ (6.9)
			$\rightarrow R_D$ (6.10)
$[(R_A \text{ et } R_C) \text{ ou } R_D]_{i-1}$	<i>Ou</i>	$[[(R_A \text{ et } R_C) \text{ et } (\mathbf{d}=-\mathbf{x})] \text{ ou } [R_D \text{ et } (\mathbf{d}=\mathbf{x})]]_i$	$\rightarrow R_E$ (6.11)

Ces éléments de modélisation sont des caractéristiques du produit que la méthode *accede()* a besoin de connaître. Pour la renseigner, elle dispose de méthodes privées, qui n'apparaissent pas dans la classe **Maintenabilite**. Par exemple, la méthode *trouveRelationDesassemblage(Piece p1)* va fournir les contraintes topologiques requises.

3.3.2.b Traitement du problème

La première étape consiste à générer les *sous-assemblages réalisables*, correspondant aux sous-ensembles obtenus en enlevant des pièces ou groupes de pièces d'un sous-assemblage donné (et en rompant les liaisons appropriées). Ces actions doivent être réalisées en respectant les contraintes structurelles : la cohérence et la détachabilité. Ainsi, un *sous-assemblage réalisable* est un sous-ensemble non vide de ces N pièces qui répond aux conditions suivantes :

- Il est *cohérent* : toutes les pièces du sous-assemblage sont connectées entre elles, même par l'intermédiaire d'une ou plusieurs pièces de ce sous-assemblage. Ce sont les *contraintes topologiques*.
Avec le diagramme de connexions de la Figure 6.3a, on peut conclure que les sous-assemblages $\{B,E\}$, $\{B,D\}$ et $\{B,D,E\}$ ne sont pas cohérents. Ils seront notés BE , BD et BDE à partir de ce moment.
- Il est *détachable* : il peut être obtenu à partir du produit initial par des actions de désassemblage seulement, sans réassemblage. Ce sont les *contraintes géométriques*.

Par la suite, les *transitions réalisables* doivent être générées. Une transition transforme un (ensemble de) sous-assemblage réalisable en un autre ensemble de sous-assemblages réalisables en créant ou en annulant des liens entre les pièces. Dans ce modèle, une action (de désassemblage) est une transition permettant de passer d'un sous-assemblage « parent » (S) à deux sous-assemblages « héritiers » (S_1, S_2) qui sont des ensembles disjoints : $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ (plus de pièce en commun) et dont le réassemblage permet de retrouver l'ensemble « parent » : $S_1 \cup S_2 = S$. Par exemple, la transition permettant de passer du produit ABC aux deux sous-assemblages AB et C est bien une action de désassemblage si elle satisfait aux deux conditions suivantes :

- AB et C sont tous les deux des sous-assemblages réalisables ;
- la transition peut être effectuée sans qu'il y ait obstruction de la part des autres pièces.

Pour l'exemple de la Figure 6.2c, il y a 2^N-1 (Wolter (1991)), ou 31, sous-assemblages théoriquement possibles. Seulement 28 d'entre eux sont cohérents (voir les contraintes topologiques ci dessus) et 18 sont réalisables : $ABCDE$, $ACDE$, $ABCE$, CDE , ADE , ACE , ABC , DE , CE , BC , AE , AC , AB , A , B , C , D et E . Ceux qui suivent sont cohérents mais non détachables (à cause des contraintes géométriques) : $BCDE$, $ABDE$, $ABCD$, BCE , BCD , ACD , ABE , ABD , CD et AD . Notons que les deux sous-assemblages ADE et DE sont détachables uniquement si l'alésage d'accès à la vis Z est présent.

3.3.2.c Représentation des séquences de désassemblage

Nous utilisons le graphe ET/OU (présenté à la section 4.3.2 du Chapitre 5) pour représenter l'ensemble des séquences de désassemblage de manière compacte. Le graphe de la Figure 6.4 est un réseau (orienté de la gauche vers la droite) où les 18 nœuds sont les sous-assemblages réalisables de la Figure 6.2c. Chacun des 29 hyperarcs (des arcs doubles en V) représente la séparation d'un sous-assemblage parent en deux sous-assemblages héritiers. Par exemple, 2 hyperarcs quittent le nœud CDE pour le diviser en $(C \text{ ET } DE) \text{ OU } (D \text{ ET } CE)$. Par la suite, nous utilisons des graphes ET/OU réduits, tel que proposé à la section 4.3.2 du Chapitre 5 (Lambert (2002)). À partir de ce graphe, les séquences de désassemblages peuvent être déterminées par les chemins partant du produit initial vers la pièce ou le sous-assemblage ciblé.

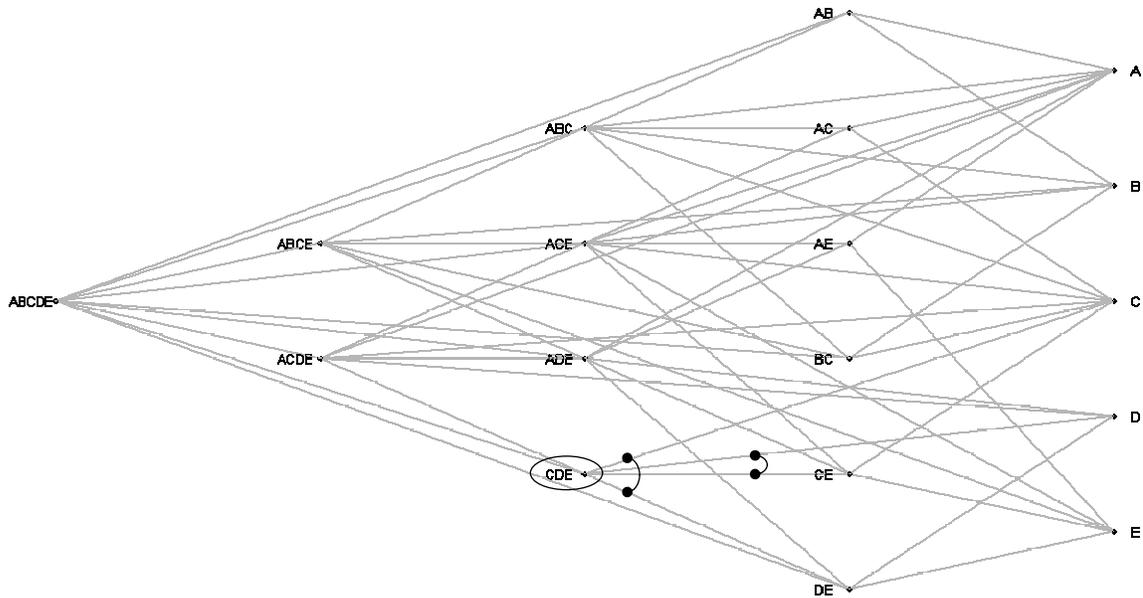


Figure 6.4 : Graphe ET/OU complet pour l'exemple de la Figure 6.2c

La matrice de transition T est une représentation équivalente de ce graphe. Sa taille est $I \times J$, avec I le nombre de sous-assemblages réalisables et J le nombre de transitions réalisables. La première colonne est une transition virtuelle qui initialise les séquences avec le produit initial. Dans la colonne j , on trouve un élément qui vaut -1 , deux éléments qui valent $+1$ et $I-3$ éléments nuls. L'élément T_{ij} vaut -1 si l'action j détruit le sous-assemblage (un parent), $+1$ si l'action le crée (un héritier) et 0 sinon.

Le Tableau 6.5 donne la matrice de transition pour les Figure 6.2b et Figure 6.2c. Les points remplacent les 0 et les lignes donnent deux exemples de séquences, les pointillés indiquant les ensembles retirés. Dans cette matrice, la zone ombrée correspond aux sous-assemblages et transitions qui ne sont pas réalisables pour la configuration de la Figure 6.2b, sans l'alésage d'accès à la vis Z .

Les deux séquences du Tableau 6.5 cherchent à isoler la pièce A pour effectuer sa maintenance. Dans la première, $ABCDE$ est détruit par l'action 13, ce qui crée B et $ACDE$. Ce dernier est désassemblé par l'action 5 pour atteindre la pièce A (CDE est

retiré). L'autre séquence détruit *ABCDE* par l'action 26, ce qui conduit à *ADE* puis à *A*.

Tableau 6.5 : Matrice de transition de la Figure 6.2c

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
ABCDE	1
ACDE	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.	.	.	.	.
ABCE	.	-1	.	.	.	.	-1	.	.	.	.	-1	.	.	.	-1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1
CDE	.	.	-1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.	.	.
ACE	.	.	-1	.	.	.	.	-1	.	-1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ABC	-1	-1	.	.	.	.	.	-1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CE	.	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.	.	.	.	.	.
BC	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
AE	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.	.	.	.	.	.	.
AC	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	1	.	.	.	.	.	.	.
AB	.	1	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A	.	.	1	.	.	1	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
B	1	1	.	.	.	.	.	1	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
C	1	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
D	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	1	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
E	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	1	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ADE	-1	.	.	.	.	.	.
DE	1	1	.	.	.	.	.

3.3.3 Le modèle de génération des séquences de désassemblage

Pour un produit de N composants, il y a $2^N - 1$ sous-assemblages théoriquement possibles. À titre indicatif, pour 29 pièces, il y aurait 536 870 911 possibilités à tester. L'approche de résolution que nous proposons utilise le principe de la programmation par contraintes (ou *CPP* pour *constraint programming program*). L'Annexe XIV.2 explique comment cette technique permet de trouver les sous-assemblages qui satisfont les contraintes topologiques et géométriques, sans pour autant explorer le domaine des solutions au complet.

3.3.3.a Modèle CPP pour l'identification des sous-assemblages réalisables.

L'idée de ce premier modèle consiste à formaliser sous forme de contraintes mathématiques les contraintes inhérentes à la cohérence (la connexion entre les pièces d'un sous-assemblage) et la détachabilité (le respect des contraintes de précédence).

Pour la formalisation de notre modèle, la notation suivante est utilisée :

- N le nombre d'étapes nécessaire à un désassemblage complet - 2 est, en général, suffisant³ ;
- $P = \{A, B, \dots\}$ l'ensemble des pièces du produit ;
- $C_{u,v} \in \{0,1\}$ un élément de la matrice de connexions (Figure 6.3b), entre les pièces u et v ;
- $b_{i,p} \in \{0,1\}$ une variable de décision sur la présence (1) de la pièce p à l'étape i , ou non (0) ;
- $\mathbf{d}_i \in \{-\bar{\mathbf{x}}, +\bar{\mathbf{x}}, \dots\}$ un vecteur variable de décision indiquant la direction d'extraction en vigueur à l'étape i .

Au départ, le produit est composé de toutes ses pièces :

$$b_{0,p} = 1 \quad \forall p \in P \quad (6.12)$$

Si une pièce est désassemblée, elle ne peut être réassemblée. Si la variable associée est mise à 0 (à l'étape i), elle ne peut revenir à 1 aux étapes subséquentes ($i+1$, $i+2$, etc.) :

$$b_{i,p} \leq b_{i-1,p} \quad \forall p \in P \quad (6.13)$$

$$\forall i \in [1..N]$$

Pour les relations de désassemblage enrichies (définies au Tableau 6.4), seule celle de la pièce A de la Figure 6.2 est énoncée. Dans le formalisme Booléen, les « . » représentent l'opérateur « et », les « + » l'opérateur « ou » et la barre supérieure la négation. Autrement dit, le retrait d'une pièce X à l'étape i est marqué par $b_{i,X} = 0 \Leftrightarrow \bar{b}_{i,X} = 1$.

$$\bar{b}_{i,A} \Rightarrow \underbrace{\left[\bar{b}_{i-1,B} + \bar{b}_{i-1,E} \right]}_{\text{relation de précédence}} + \underbrace{\left[\left[\bar{b}_{i,B} \cdot (\mathbf{d}_i = -\mathbf{x}) \right] + \left[\bar{b}_{i,E} \cdot (\mathbf{d}_i = +\mathbf{x}) \right] \right]}_{\text{relation de dégagement}} \quad \forall i \in [1..N] \quad (6.14)$$

³ De façon empirique, nous avons observé que laisser la possibilité au modèle de faire une troisième passe n'apportait aucune nouvelle solution.

De plus, tous les sous-assemblages intermédiaires générés à chaque étape doivent être connectés (ou cohérents). Selon la théorie des graphes, un sous-assemblage est cohérent, ou son diagramme de connexions est un graphe connecté, si et seulement si la deuxième plus petite valeur propre de la matrice de Laplace du graphe est plus grande que 0 (Weisstein (2004)).

Ce modèle de programmation permet de trouver plusieurs solutions qui donnent le même sous-assemblage réalisable. Comme l'existence d'une solution suffit à nous prouver l'existence du sous-assemblage, nous ajoutons une stratégie de recherche au modèle pour éviter toute redondance. Enfin, pour chaque solution, le sous-assemblage réalisable est donné par l'ensemble $\{b_{N,p}\}_{\forall p \in P}$.

3.3.3.b Modèle CPP pour la génération des transitions réalisables

Ce second modèle recherche les transitions en calculant, une à une, les colonnes de la matrice de transition T . Chaque solution correspond à une transition, donc à une colonne. Les sous-assemblages réalisables prérequis sont issus du précédent modèle.

Pour la formalisation de ce deuxième modèle, nous introduisons de nouvelles notations :

- Ω l'ensemble des sous-assemblages réalisables trouvés par le premier modèle ;
- $\Delta_{s,p} \in \{0,1\}$ donnée issue du premier modèle indiquant si la pièce p est présente (1) ou absente (0) du sous-assemblage s ;
- $T_s \in \{-1,0,1\}$ une des variables de décision qui définit une colonne de la matrice. Elle indique si le sous-assemblage s de l'ensemble Ω est un « parent » désassemblé (-1), un nouvel « héritier » créé (1) ou un étranger à la transition en cours (0).

Avant même la résolution du problème, il convient de rajouter une transition virtuelle qui initialise le problème en créant le produit complet. Ainsi, la première

colonne de la matrice doit comporter un 1 sur la ligne du produit complet et des 0 partout ailleurs.

Un parent désassemblé S doit être l'union exacte des deux héritiers S_1 et S_2 qu'il crée. Ainsi, pour chacune des pièces p qui appartient à S , on a $\mathbf{T}_S * \Delta_{S,p} = -1 * 1 = -1$. De plus, une pièce p de S doit être présente dans un, et uniquement un, des deux sous-assemblages, i.e. $\mathbf{T}_{S_1} * \Delta_{S_1,p} = 1 * 1 = 1$ ou $\mathbf{T}_{S_2} * \Delta_{S_2,p} = 1 * 1 = 1$. Ceci se résume en une seule contrainte :

$$\sum_{s \in \Omega} \mathbf{T}_s \cdot \Delta_{s,p} = 0 \quad \forall p \in P \quad (6.15)$$

D'autre part, chaque solution, ou chaque colonne de la matrice \mathbf{T} , ne doit contenir qu'un seul parent, désassemblé par la variable de décision -1 , et deux héritiers, créés par 2 variables de décision $+1$:

$$\sum_{s \in \Omega} |\mathbf{T}_s| = 3 \quad \text{et} \quad \sum_{s \in \Omega} \mathbf{T}_s = 1 \quad (6.16)$$

Ainsi, ce simple modèle nous permet d'identifier toutes les transitions entre tous les sous-assemblages.

3.3.4 Recherche d'une séquence optimale du point de vue maintenabilité

3.3.4.a Principe

Pour quantifier l'*accessibilité globale*, il reste à trouver la séquence optimale et évaluer l'effort requis par l'ensemble des transitions effectuées. L'effort de chaque transition est une caractéristique associée aux hyperarcs du graphe ET/OU ou aux colonnes de la matrice \mathbf{T} . Cet effort est calculé par la méthode *depose(Composant c , Pièce $p1$)* telle qu'elle a été définie à la section 2.1.3. En effet, une transition consiste à déposer une pièce (ou sous-ensemble « héritier ») $p1$ à partir d'un composant (ou sous-assemblage « parent ») c . Le sous-assemblage résiduel $p2$ est choisi plus volumineux que $p1$.

3.3.4.b Optimalité

Grâce au graphe ET/OU enrichi par les valeurs des efforts, il est possible d'appliquer l'algorithme du plus court chemin, l'algorithme de Dijkstra, afin de trouver la séquence pour atteindre la pièce désirée, à moindre coût. Dans nos travaux, nous utilisons le logiciel de calcul formel *MAPLE*®.

Les séquences optimales peuvent également être obtenues par la programmation linéaire. Lambert (2002) a proposé une méthode pour trouver les stratégies et séquences de désassemblage optimale pour un produit en fin de vie. Dans ses travaux, il considère que les I sous-assemblages réalisables représentent des revenus potentiels (renseignés dans le vecteur \mathbf{r}), tandis que les J transitions réalisables ont un coût (vecteur \mathbf{z}). Ainsi, le problème consiste à choisir les transitions j à réaliser (représentées par les variables de décision x_j). La formulation proposée par Lambert (2002) est :

Maximiser le revenu net :

$$\sum_i \sum_j (\mathbf{T}_{i,j} \cdot \mathbf{r}_i - \mathbf{z}_j) \cdot x_j \quad (6.17)$$

$$\text{Sujet à } \sum_j \mathbf{T}_{i,j} \cdot x_j \geq 0 \quad \text{et } x_0 = 1 \quad (6.18)$$

Nous proposons une adaptation de cette approche au contexte de la maintenabilité. En affectant un revenu très important à la pièce ou au sous-assemblage que l'on désire maintenir, et une valeur nulle à tous les autres sous-assemblages, la solution cherche à minimiser les coûts de désassemblage (notre objectif) pour maximiser les bénéfices, qui ne proviennent que de la pièce ciblée, toutes les autres ne générant que des dépenses.

3.3.4.c Illustration

Pour continuer avec l'exemple de la Figure 6.2 et déterminer les séquences optimales de désassemblage, nous quantifions l'effort des transitions de façon

simplifiée. Cet effort ($z \in \mathbb{R}^+$) est donné par l'équation (6.19) où $S1$ et $S2$ sont les deux sous-assemblage « héritiers » résultant de l'extraction de $S1$ du composant « parent » S .

$$z_{S1,S2} = \text{depose}(\text{Composant } S, \text{Piece } S1) = \sum_{p1 \in S1} \sum_{p2 \in S2} \text{noteNatureAttache}(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2) \quad (6.19)$$

Dans cet exemple, la méthode *noteNatureAttache(Piece p1, Piece p2)* utilise la pondération suivante : contact simple (1), connexion vissée (2) et soudure (10).

Le Tableau 6.6 donne les coûts des transitions de la Figure 6.2, calculés selon l'équation (6.19). Par exemple, la transition (1) désassemble $ABCE$ pour créer AB et CE . Le coût calculé représente l'effort requis pour briser les connexions entre B et C (10), A et C (1), et entre A et E (1), ce qui donne un coût total de 12 (les coûts des connexions sont donnés sur le graphe enrichi de la Figure 6.3a).

Tableau 6.6 : Coûts des 29 transitions réalisables de la Figure 6.2 (b) et (c)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
-	12	2	4	13	3	4	2	3	11	3	11	5	11	11	3	5	1	1	1	10	2
22	23	24	25	26	27	28	29														
6	6	2	4	6	3	5	2														

Connaissant le coût de chaque transition réalisable, il est possible de trouver la séquence optimale. Le Tableau 6.7 présente les séquences optimales et les coûts associés pour maintenir chaque pièce individuelle de la Figure 6.2. Les résultats du modèle linéaire et de l'algorithme de Dijkstra sont identiques.

Tableau 6.7 : Séquences pour la Figure 6.2 (b) et (c)

Pièce à maintenir	Séquences pour la Figure 6.2c, avec l'alésage d'accès (matrice T: 18*30)	Coût	Séquences pour la Figure 6.2b, sans l'alésage d'accès (matrice T: 16*22)	Coût
A	0-24-26	8	0-7-15-16	10
B	0-13	11	0-13	11
C	0-28-13	16	0-3-4-21	19
D	0-16	5	0-16	5
E	0-15-16	8	0-15-16	8

La mesure quantitative de l'*accessibilité globale* permet de comparer l'impact des différences de conception entre le Figure 6.2b et la Figure 6.2c. On observe d'ailleurs que la maintenance des pièces A et C est plus facile pour la Figure 6.2c (avec l'alésage d'accessibilité).

3.4. La maintenabilité intrinsèque

L'indicateur d'*accessibilité globale* est un bon moyen d'évaluer la maintenabilité intrinsèque d'une pièce ou d'un sous-ensemble. Plus sa valeur est grande, plus difficile est la maintenance. Grâce à cet indicateur, différentes alternatives de conception peuvent être comparées, la meilleure étant celle qui possède l'indice le plus faible.

Dans le cas de propositions réellement différentes, il est préférable que les indices de maintenabilité soient comparés sur une base commune. Pour cela, l'équation (6.20) établit l'indice de maintenabilité intrinsèque (M^{int}) selon un principe de comparaison entre indice mesuré et indice idéal déjà utilisé par Wani & Gandhi (1999).

$$M^{int} = \frac{I_i}{I_m} \cdot 100\% \quad (6.20)$$

L'indice mesuré (I_m) est l'indice d'*accessibilité globale* déterminé par la méthode *accede()* pour une conception donnée. L'indice idéal (I_i) est établi de la même

manière, mais en faisant deux hypothèses supplémentaires : d'une part, on suppose que toutes les pièces, contacts et liaisons de la conception sont indispensables ; d'autre part, on considère que chacune des opérations élémentaires de désassemblage a une difficulté unitaire et qu'il n'y a pas de problème d'accessibilité locale, ni pour manœuvrer les pièces à extraire, ni pour positionner les outils. L'indice idéal I_i sera inférieur ou égal à l'indice mesuré I_m .

Pour l'indice idéal, la méthode *accede()*, inchangée, se base sur des méthodes d'**aptitude à la dépose** et de **démontabilité** qui font abstraction des différents problèmes. En fait, elles sont principalement influencées par le nombre de pièces et de contacts, sans tenir compte de la nature des liaisons. La séquence d'accès optimale, dont le coût détermine la valeur de I_i , consiste alors à rompre un minimum de contacts.

4. Conclusion

4.1. Bilan

Ce chapitre propose un indicateur de maintenabilité intrinsèque permettant de comparer les performances de deux alternatives de conception dans une situation de maintenance. Nous avons formalisés plusieurs critères intrinsèques qui interviennent hiérarchiquement les uns par rapport aux autres. Dans les cas où un critère peut intervenir à plusieurs niveaux, nous avons distingués plusieurs déclinaisons de ce critère (i.e. **accessibilité locale**, **accessibilité aux attaches** – pour les outils – et **accessibilité globale**).

Le choix de la formalisation retenue pour chaque critère privilégie une implémentation aisée dans les outils de CAO actuels. Certaines techniques alternatives, permettant a priori une évaluation plus sophistiquée de certains critères, ont été mentionnées. Elles ouvrent la porte à une amélioration de l'analyse des critères qui pourra évoluer avec les fonctionnalités des systèmes CAO. Par exemple, l'étude du positionnement d'un outil en action dans un produit est une fonctionnalité qui n'est pas directement disponible mais qui pourrait être programmée.

Les critères formalisés requièrent cependant un système CAO enrichi, par un Système de Gestion des Données Techniques (SGDT) par exemple. Pour les critères utilisant un système de pondération, il est alors possible d'avoir accès aux bibliothèques de valeurs et d'associer ces dernières aux éléments techniques constituant le produit.

Le diagramme des connexions et les relations de désassemblage enrichies, requis par le modèle de recherche des séquences optimales de désassemblage, peuvent être obtenus à partir de l'examen du dessin de définition. En attendant que l'intégration en CAO soit effective, ces deux éléments sont entrés manuellement

dans le SGDT. Ce dernier se matérialise dans l'architecture FSC sous la forme de plusieurs bases de données rassemblant les spécifications du cahier des charges ainsi que les données des modèles mécanique et sémantique.

4.2. Intégration dans l'architecture logicielle de FSC

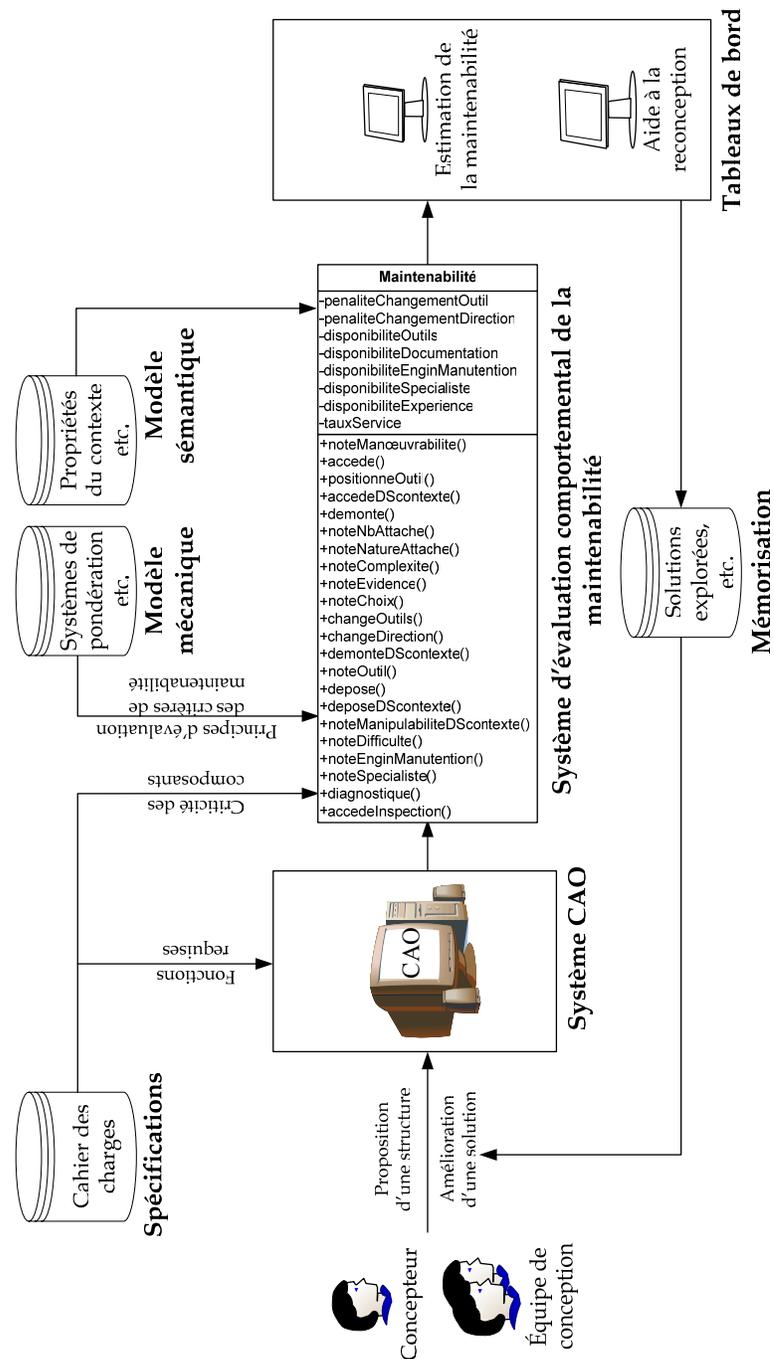


Figure 6.5 : Processus d'estimation de la maintenabilité en environnement CAO

Tout au long de ce chapitre, les mesures des critères et des facteurs se sont traduites par les propriétés et méthodes de la classe **Maintenabilite**. La Figure 6.5 montre cette classe au sein du processus d'estimation de la maintenabilité dans un environnement CAO. Cette classe synthétise l'ensemble des définitions qui ont été apportées tout au long de ce chapitre et qui constituent un cahier des charges de base pour l'élaboration de l'outil informatique associé.

4.3. Limites

Ce chapitre se limite à une évaluation de la maintenabilité intrinsèque et seuls les critères propres au produit sont formalisés. Cependant, on a identifié les critères qui permettront une évaluation de la maintenabilité contextuelle et la manière dont ils vont interagir (Figure 6.1).

L'Annexe XV présente un grand nombre d'éléments qui pourront servir de base à la formalisation des critères intrinsèques enrichis, extrinsèques et communs :

- Annexe XV.1 : Le matériel d'intervention ;
- Annexe XV.2 : L'accessibilité aux attaches par les outils ;
- Annexe XV.3 : La démontabilité contextuelle ;
- Annexe XV.4 : La main d'oeuvre ;
- Annexe XV.5 : La manipulabilité ;
- Annexe XV.6 : L'aptitude à la dépose contextuelle ;
- Annexe XV.7 : L'accessibilité globale dans le contexte ;
- Annexe XV.8 : L'identification de la défaillance ;
- Annexe XV.9 : La rapidité de l'intervention ;
- Annexe XV.10 : Calcul de la maintenabilité contextuelle.

Partie D

Application

Chapitre 7.

Cas des aides à la mobilité

Ce chapitre présente le contexte de la valorisation des aides à la mobilité, impliquant certaines préoccupations de fiabilité et de maintenabilité pour les fauteuils roulants devant être remis en état. On décrit, étapes par étapes, l'application des modèles d'évaluation développés dans la thèse. Le point fort de l'approche proposée pour l'évaluation de la fiabilité repose sur l'utilisation de l'évaluation intrinsèque de la résistance par les développements en séries de Taylor. Nous soulignons les forces et limites de ce modèle. En ce qui concerne le module d'évaluation de la maintenabilité, deux exemples tirés de la littérature servent à démontrer que l'algorithme de désassemblage développé dans la thèse est valide. Dès lors, on montre que les concepts proposés sont valides et permettent de déterminer si un composant est plus maintenable dans une configuration que dans une autre.

1. Introduction

1.1. Contexte de valorisation des aides à la mobilité

Depuis la signature d'un accord cadre en novembre 2000, les centres de réadaptation en déficience physique du Québec sont tenus de valoriser les aides à la mobilité (AM) qu'ils attribuent aux bénéficiaires pour le compte de la RAMQ (Régie d'Assurance Maladie du Québec). Depuis lors, ces instituts font face à des problèmes de déploiement d'un réseau logistique entre les centres, de gestion des stocks, de traitement des AM récupérées, etc. Par conséquent, des questions importantes se posent quant à la fiabilité et la maintenabilité des AM au moment de leur récupération.

- Une AM est-elle suffisamment fiable pour être réattribuée ?
- Peut-on récupérer des pièces de rechanges sur cette AM pour en remettre d'autres en état ?
- Ces pièces sont-elles suffisamment fiables ? Doit-on remplacer par du neuf ou de l'usagé ?
- Est-il économique de procéder au désassemblage de l'AM, en tenant compte du coût de main d'oeuvre, ou est-il préférable d'acheter des pièces neuves ?

Ces questions peuvent être complétées par des questions intervenant lors de l'utilisation d'AM neuves ou valorisées :

- lors de l'attribution : les éléments constituant le fauteuil sont-ils adaptés à l'utilisation que va en faire le client ? Sont-ils fiables ?
- pour garantir un bon niveau de service : peut-on anticiper les défaillances et prévoir les périodes d'inspection et de maintenance de façon à diminuer l'indisponibilité de l'AM pour le client ?

Les travaux de cette thèse contribuent à répondre à ces questions. L'analyse de la fiabilité d'une AM aide à estimer la dégradation du produit due aux précédents utilisateurs ainsi qu'à prévoir la dégradation due à l'utilisateur courant et la durée de vie résiduelle des pièces. L'analyse de la maintenabilité contribue à anticiper les problèmes et les coûts reliés à la récupération d'AM ou de pièces d'AM. Enfin, les

informations fournies par notre approche peuvent servir à mieux définir les règles d'appels d'offres auprès des compagnies, voire à reconcevoir les AM avec de nouvelles contraintes.

1.2. Études préliminaires

Parmi les aides à la mobilité, nous concentrons notre étude sur deux fauteuils roulants manuels (FR). Pour l'analyse comportementale de la fiabilité et de la maintenabilité, il faut modéliser le FR. Selon le formalisme de l'approche FSC, les dimensions fonctionnelle et structurelle du FR doivent alors être définies.

1.3. Dimension fonctionnelle d'un fauteuil roulant

Pour identifier les fonctions d'un FR quelconque, manuel ou motorisé, on utilise l'analyse fonctionnelle. Lors de la conception, on met généralement l'accent sur les fonctions les plus importantes. Pour déterminer l'importance des éléments d'un FR, nous proposons deux études, l'une intervenant au niveau des fonctions de service, l'autre au niveau des fonctions techniques, c'est-à-dire des composants utilisés pour satisfaire les fonctions de services.

1.3.1.a Analyse fonctionnelle

Zwingmann (2002) retient 11 fonctions de service qui remplissent la fonction d'ordre supérieure « *f1* : **Suppléer à la perte de mobilité du client** ». Ces fonctions sont listées à l'Annexe XVI.1 avec un exemple de décomposition d'une fonction de service en sous-fonctions.

1.3.1.b Analyse de criticité fonctionnelle

Ces fonctions sont ensuite hiérarchisées selon l'importance accordée par les clients, utilisant les FR, et par les ergothérapeutes, spécialistes attribuant les FR. On choisit la technique TRIAGE pour cette analyse de criticité car elle est en mesure

d'intégrer les deux points de vue (Annexe XVI.2). Le fonctionnement de cette technique et ses résultats sont donnés de l'Annexe XVI.3 à l'Annexe XVI.5.

1.3.1.c Analyse de criticité technique

Pour une fonction identifiée comme une des plus importantes, on étudie son comportement à travers ses composants (via les fonctions techniques) et leurs modes de défaillance. Pour cela, une analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) a été réalisée sur un fauteuil roulant manuel (Richard (2003)). Un extrait de cette analyse, effectuée à l'aide du logiciel RELEX® (Annexe IV.3) est présenté à l'Annexe XVI.6.

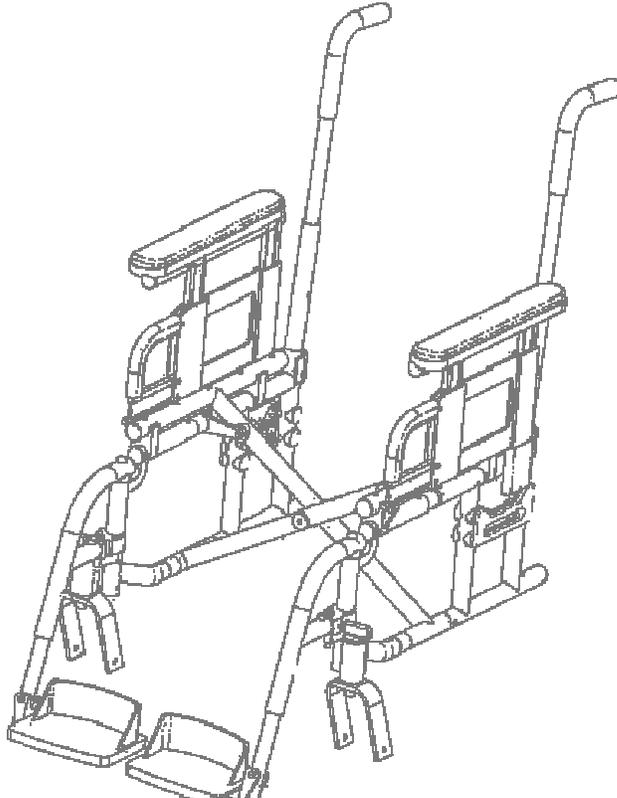
1.3.1.d Bilan

Ces trois analyses renseignent le modèle sémantique de FSC, et les informations recueillies sont exploitées à différents niveaux par les modèles d'évaluation comportementale. Dans ces travaux, on aurait pu se contenter d'une AMDEC rapide pour choisir l'objet de notre étude de fiabilité : la rupture mécanique (l'un des modes de défaillance les plus fréquents) du châssis d'un fauteuil roulant manuel. Cependant, ces trois analyses prennent plus d'importance dans les perspectives de développement de notre approche.

1.4. Dimension structurelle d'un fauteuil roulant

La dimension structurelle des deux modèles de fauteuils est implémentée en CAO, sous Solid Edge® pour le modèle 2B01 et sous Pro/Engineer® pour le modèle 3B01 (Tableau 7.1). Bien que les structures soient différentes, les deux modèles font partie d'une même gamme. Les caractéristiques techniques, le type de clientèle, etc. sont semblables, ce qui permet une comparaison relative des indicateurs obtenus.

Tableau 7.1 : Modélisations CAO de deux fauteuils roulants

Modèle 2B01	Modèle 3B01
	
Modélisé sous Solid Edge®.	Modélisé sous Pro/Engineer®.

2. Évaluation de la fiabilité

2.1. Modèle sémantique et modèle mécanique

2.1.1 Analyse d'un mode de défaillance en particulier

Pour estimer la fiabilité d'un produit, il est nécessaire de connaître les modes de défaillance potentiels. L'AMDEC réalisée en étude préliminaire fait apparaître que le châssis et le mécanisme de pliage ont des modes de défaillance communs : la rupture de leur structure et de leurs soudures (Annexe XVI.6). Dans ce cas d'application, on considère l'ensemble châssis et mécanisme de pliage comme un ensemble monobloc (sans soudure) et on conclut à la rupture quand la contrainte interne à la structure de cet ensemble (appelé châssis par la suite) dépasse 200% de la limite élastique du matériau.

2.1.2 Identification de variables aléatoires de conception et d'utilisation

Le choix du mode de défaillance du châssis régit l'identification des facteurs qui influencent la fiabilité. Ces facteurs entrent dans la définition du vecteur $\vec{Y} = \{\vec{X}, L\} = \{X_1, \dots, X_i, \dots, X_n, L\}$, avec L , les efforts appliqués à la structure (facteurs extrinsèques), et X_i , les variables de conception associées aux facteurs intrinsèques. Les sections 2.1.3 et 2.1.4 traitent de ces deux éléments.

2.1.3 Les conditions d'exploitation

2.1.3.a Charge externe appliquée

L'utilisation du FR diffère suivant le profil de l'utilisateur. Pour cette étude, les FR sont utilisés dans une situation volontairement exigeante : le franchissement de marches d'escalier. La simulation présentée à la Figure 7.1 est réalisée à l'aide de ADAMS® et permet d'identifier les efforts qui s'appliquent sur la structure du châssis d'un FR.

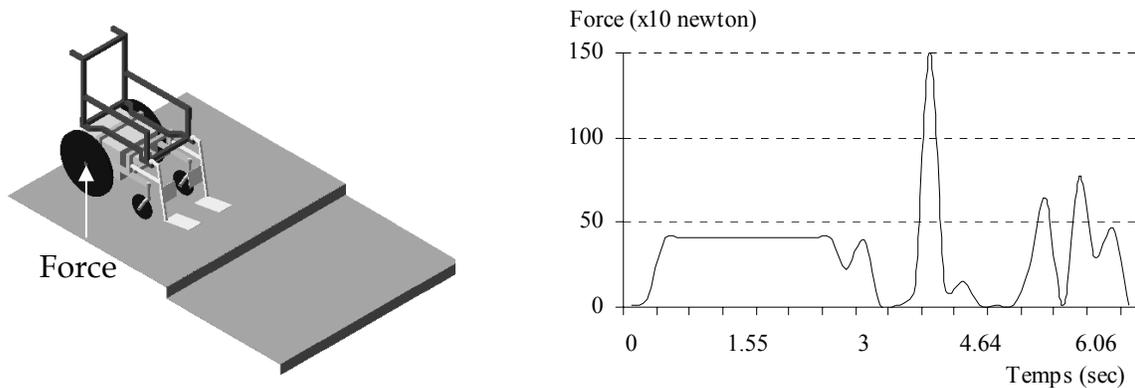


Figure 7.1 : Étude de la charge appliquée au châssis pour une utilisation donnée

2.1.3.b Variable aléatoire L de la charge appliquée

La durée d'utilisation dans ce scénario est suffisamment courte pour que l'on s'affranchisse de l'évolution temporelle de la charge (Figure 7.1). Ainsi, l'amplitude de la charge est traduite en une fonction de densité de probabilité, qui renseigne parfaitement la variable aléatoire L .

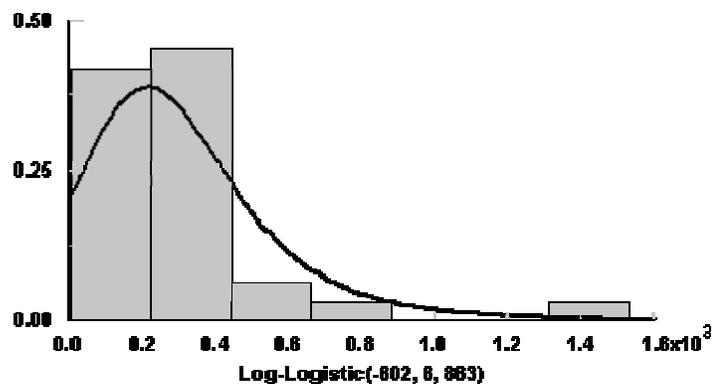


Figure 7.2 : Distribution de la charge appliquée au châssis

La distribution de la Figure 7.2 est obtenue au moyen du logiciel Stat::Fit®. Les amplitudes de la charge sont d'abord regroupées en histogrammes avant d'être assimilées à une loi de densité de probabilité. La loi est choisie en minimisant l'erreur entre les données sources et la fonction de distribution.

2.1.3.c Diversité des scénarios

Notre étude utilise le profil de charge élémentaire de la Figure 7.1. Cependant, nous avons modélisé des petites portions de route (14) qui offrent la possibilité de générer facilement différents scénarios. La Figure 7.3 présente deux exemples de scénarios construits à partir de 7 et 6 portions élémentaires (numérotées sur la figure) ainsi que les historiques associés, assemblés à partir des historiques élémentaires, selon le sens de circulation indiqué (les circuits débutent par la portion 9).

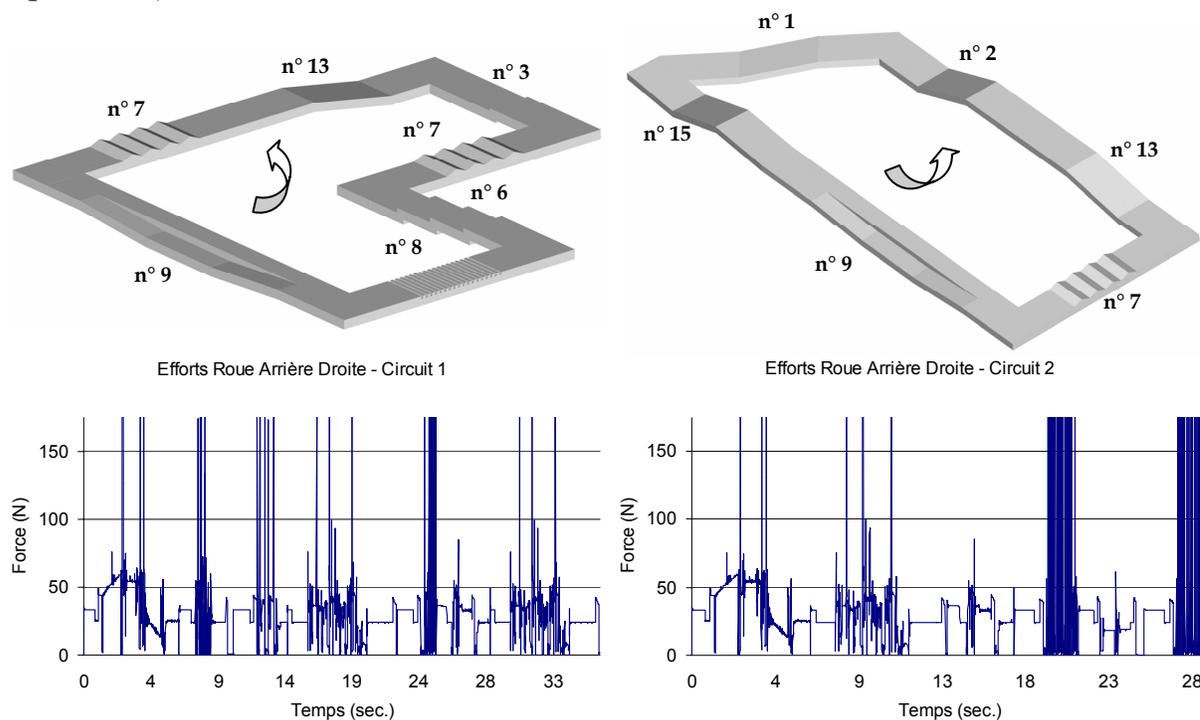


Figure 7.3 : Exemples de scénarios avec historique des efforts

2.1.4 Les variables de conception X_i

Pour la caractérisation intrinsèque du système, nous considérons les propriétés physiques des matériaux (6 variables), les profils – essentiellement tubulaires – des structures de fauteuils (4 variables) et la géométrie des fauteuils (21 variables).

2.1.4.a Les propriétés physiques des matériaux

- On considère deux matériaux (Aluminium AL6061_MNS et Acier ST1020_MNS) dont les paramètres sont donnés au Tableau 7.2.

Tableau 7.2 : Propriétés nominales des matériaux – Roark & Young (1989)

	AL6061_MNS	ST1020_MNS
Densité (ρ)	2700 kg/m ³	7850 kg/m ³
Module d'élasticité (E)	70E9 Pa	207E9 Pa
Limite d'élasticité (σ)	260E6 Pa	360E6 Pa
Mod. d'élast. transversale (G)	26E9 Pa	80E9 Pa
Coefficient de Poisson (ν)	0.345	0.293

Le Tableau 7.3 associe des distributions au module d'élasticité, au coefficient de cisaillement et au module d'élasticité transversale afin de tenir compte de la variabilité de ces propriétés.

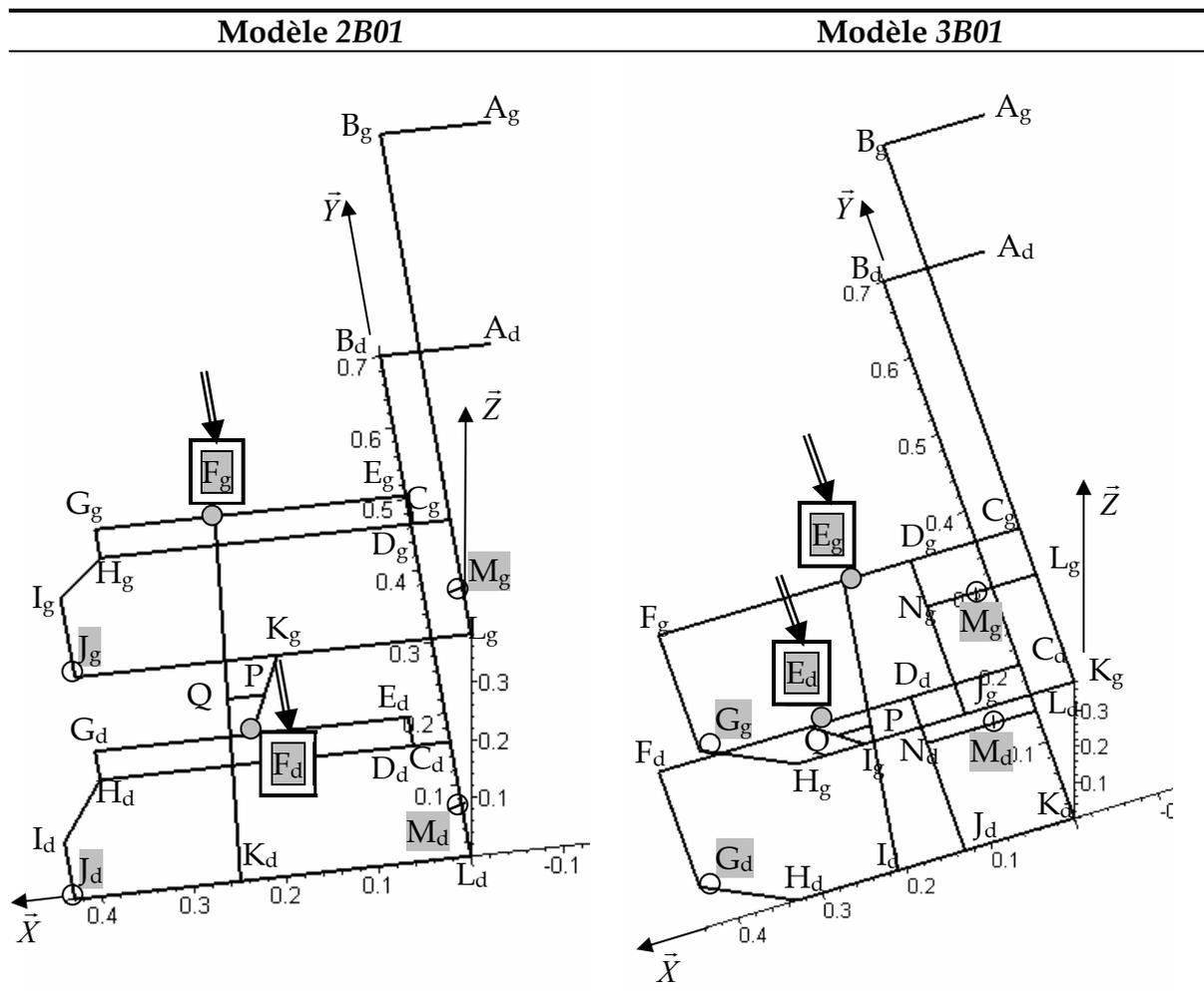
Tableau 7.3 : Distributions de probabilités des propriétés des matériaux

	AL6061_MNS			ST1020_MNS		
	VA	Paramètres		VA	Paramètres	
Module d'élasticité (E)	X_1	Distribution Normale Val. Moy. $\mu_{EA}=70E9$ Écart Type $\sigma_{EA}=35E8$ (5%)		X_4	Distribution Normale Val. Moy. $\mu_{ES}=207E9$ Écart Type $\sigma_{ES}=10E9$ (5%)	
Limite d'élasticité (σ)	X_2	Distribution Log normale Val. Moy. $\mu_{\sigma A}=260E6$ Écart Type $\sigma_{\sigma A}=26E6$ (10%)		X_5	Distribution Log normale Val. Moy. $\mu_{\sigma S}=360E6$ Écart Type $\sigma_{\sigma S}=36E6$ (10%)	
Module d'élasticité transv. (G)	X_3	Distribution Uniforme Val. Moy. $\mu_{GA}=70E9$ Écart Type $\sigma_{GA}=35E8$ (5%)		X_6	Distribution Uniforme Val. Moy. $\mu_{GS}=80E9$ Écart Type $\sigma_{GS}=40E8$ (5%)	

2.1.4.b Les profils des structures

Le fauteuil est constitué de trois sortes de profilés métalliques : tubulaire, carré et cylindrique plein. Le Tableau 7.4 représente les structures simplifiées des deux châssis, avec les points caractéristiques de la géométrie (A_g, A_d, B_g, \dots – l'indice d pour droite et g pour gauche du FR) et les poutres qui les relient (traits pleins). Le détail des coordonnées géométriques des deux structures est donné à l'Annexe XVII, de même que la nature des profils des poutres.

Tableau 7.4 : Châssis simplifiés des deux fauteuils



Pour modéliser la variabilité des profils, on retient les distributions du Tableau 7.5 :

Tableau 7.5 : Distributions des caractéristiques des profils des structures

	Variable aléatoire associée	Type de distribution	Moyenne μ	Écart type (σ : %age de μ)	
Diamètre tube	X_7	Normale	0.025	0.00013	(0.5 %)
Épaisseur tube	X_8	Log-normale	0.002	0.00001	(0.5 %)
Dimension carré	X_9	Normale	0.010	0.00005	(0.5 %)
Diamètre cylindre	X_{10}	Normale	0.008	0.00004	(0.5 %)

2.1.4.c La géométrie des fauteuils

Le Tableau 7.6 montre les différentes dimensions utilisées pour définir la géométrie des châssis (L_{1d} , L_{1g} , L_{av} , ...). On associe également des distributions à ces dimensions pour traduire leur variabilité Le Tableau 7.7 et le Tableau 7.8 rassemblent ces informations.

Tableau 7.6 : Dimensions des deux fauteuils

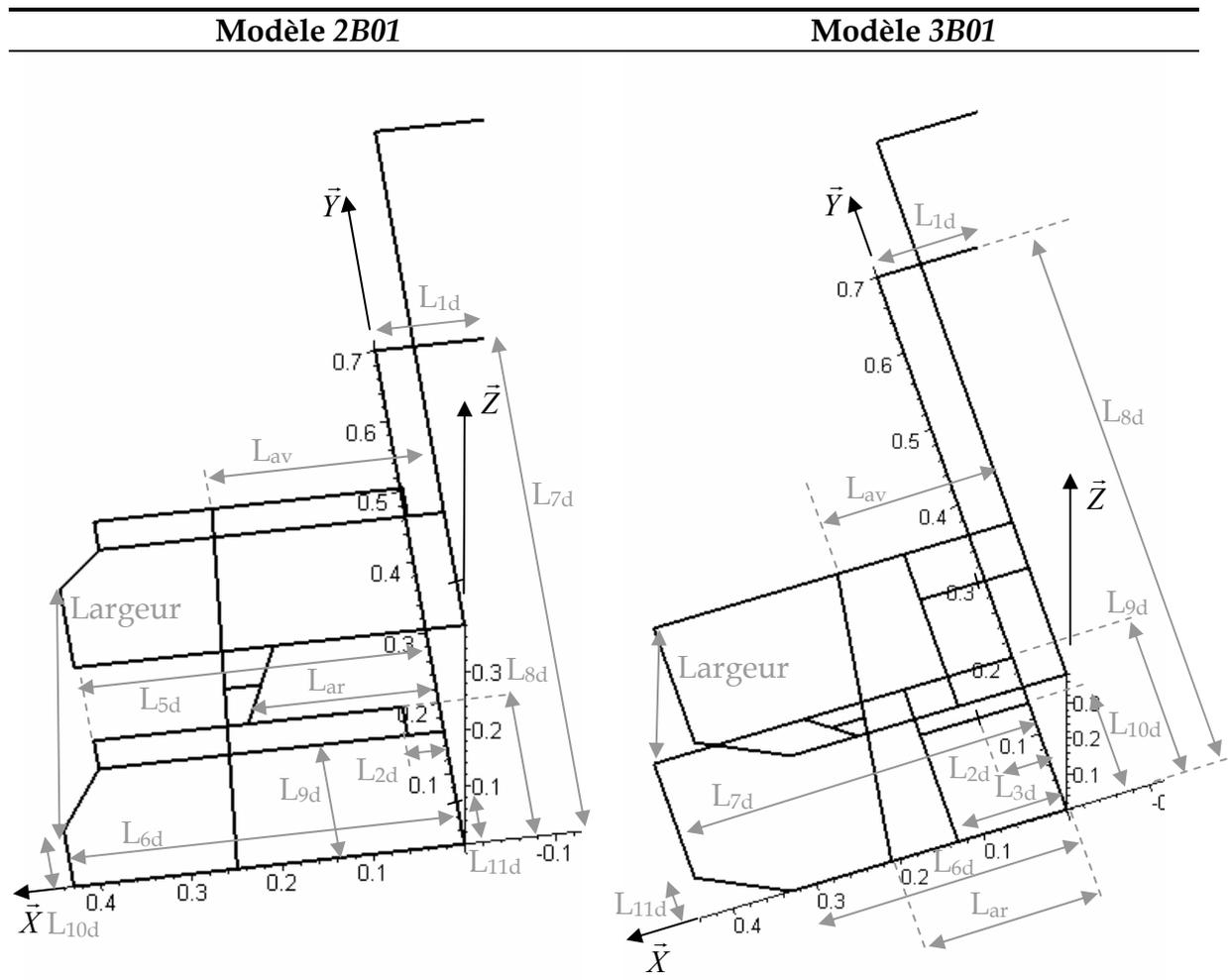


Tableau 7.7 : Distributions géométriques pour 2B01

	Variable aléatoire associée		Type de distribution	Moyenne μ	Écart type	
	Côté droit	Côté gauche			$(\sigma : \% \text{age de } \mu)$	
L ₁	X ₁₁	X ₂₂	Uniforme	0.120	0.00072	(0.6 %)
L ₂	X ₁₂	X ₂₃	Normale	0.040	0.00020	(0.5 %)
L _{ar}		X ₁₃	Normale modifiée	0.210	0.000525	(0.25 %)
L _{av}		X ₁₄	Normale modifiée	0.250	0.000625	(0.25 %)
L ₅	X ₁₅	X ₂₄	Uniforme	0.380	0.00228	(0.6 %)
L ₆	X ₁₆	X ₂₅	Normale	0.430	0.00215	(0.5 %)
L ₇	X ₁₇	X ₂₆	Normale	0.700	0.00350	(0.5 %)
L ₈	X ₁₈	X ₂₇	Normale modifiée	0.200	0.00050	(0.25 %)
L ₉	X ₁₉	X ₂₈	Normale	0.160	0.00080	(0.5 %)
L ₁₀	X ₂₀	X ₂₉	Uniforme	0.110	0.00066	(0.6 %)
L ₁₁	X ₂₁	X ₃₀	Normale	0.050	0.00025	(0.5 %)
Largeur		X ₃₁	Normale modifiée	0.380	0.00095	(0.25 %)

Tableau 7.8 : Distributions géométriques pour 3B01

	Variable aléatoire associée		Type de distribution	Moyenne μ	Écart type	
	Côté droit	Côté gauche			$(\sigma : \% \text{age de } \mu)$	
L ₁	X ₁₁	X ₂₂	Uniforme	0.120	0.00072	(0.6 %)
L ₂	X ₁₂	X ₂₃	Uniforme	0.060	0.00036	(0.6 %)
L ₃	X ₁₃	X ₂₄	Uniforme	0.130	0.00078	(0.6 %)
L _{ar}		X ₁₄	Normale modifiée	0.210	0.000525	(0.25 %)
L _{av}		X ₁₅	Normale modifiée	0.250	0.000625	(0.25 %)
L ₆	X ₁₆	X ₂₅	Uniforme	0.330	0.00198	(0.6 %)
L ₇	X ₁₇	X ₂₆	Normale	0.430	0.00215	(0.5 %)
L ₈	X ₁₈	X ₂₇	Normale	0.700	0.00350	(0.5 %)
L ₉	X ₁₉	X ₂₈	Normale modifiée	0.200	0.00050	(0.25 %)
L ₁₀	X ₂₀	X ₂₉	Normale	0.140	0.00070	(0.5 %)
L ₁₁	X ₂₁	X ₃₀	Uniforme	0.050	0.00030	(0.6 %)
Largeur		X ₃₁	Normale modifiée	0.380	0.00095	(0.25 %)

2.1.4.d Choix des distributions et de leurs paramètres

Dans ce cas d'étude, les distributions et leurs paramètres sont choisis en respectant une certaine logique (voir les recommandations de Shooman (1990) à la section 2.5.1.a du chapitre 4). Par exemple, les tolérances dimensionnelles sont influencées par le mode de fabrication. Le Tableau 7.9 présente d'une manière générale les associations qui ont été faites, tandis que l'Annexe III illustre les différences entre loi uniforme, normale et Cauchy.

Tableau 7.9 : Choix des distributions sur les dimensions de l'AM

Obtention des géométries	Distributions associées aux dimensions
1 Pliage	Loi uniforme : le procédé de fabrication ne comporte pas de pièce d'usure (un outil de coupe par exemple). On fait l'hypothèse d'une erreur semblable sur toutes les pièces.
2 Découpe mécanique	Loi normale : le procédé emploie un outil qui s'use.
3 Découpe d'une pièce qui est assemblée avec précision	Loi normale modifiée : initialement, c'est une loi de Cauchy qui était prévue. Or cette loi n'a pas de moyenne et le code que nous employons utilise la moyenne et l'écart type comme paramètres des distributions. C'est pourquoi nous utilisons une loi normale avec un écart type divisé par deux.

2.2. Évaluation du comportement de la structure

Selon l'approche utilisée pour estimer la fiabilité, il est nécessaire de définir la fonction performance, soit pour définir l'état limite avec les approches *FORM/SORM*, soit pour définir la fonction résistance utilisée par séries de Taylor ou l'approche de Monte Carlo.

2.2.1 Calcul des contraintes internes à la structure

D'après le mode de défaillance étudié, le comportement de la structure est déterminé par la valeur des contraintes internes à la structure.

2.2.1.a Calculs par la méthode des éléments finis

Lorsqu'un prototype de fauteuil donné, défini par son vecteur de variables de conception \vec{X}^k , est soumis à un effort externe L^k , le calcul des contraintes internes à la structure est effectué par la méthode des éléments finis.

Il existe plusieurs outils commerciaux capables d'effectuer cette opération (Figure 7.4). Cependant, la simplicité du système étudié nous permet d'effectuer les calculs de contraintes internes et de déformation à l'aide d'un programme écrit sous *MAPLE*[®], dont le code a été développé dans le cadre du cours de Conception Mécanique Assistée par Ordinateur (Gakwaya (2001)).

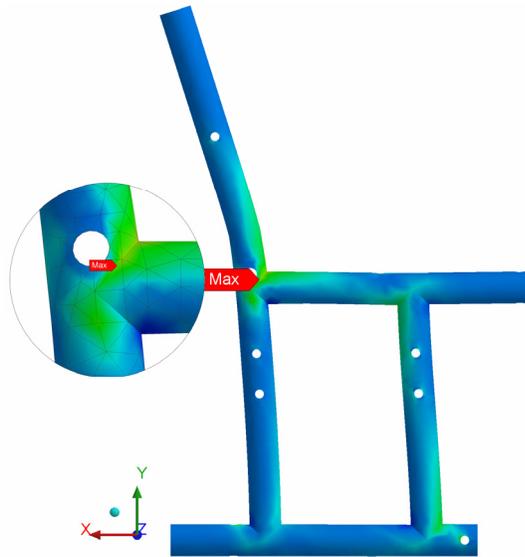


Figure 7.4 : Calcul des contraintes internes au châssis arrière droit de 2B01

Les résultats ainsi obtenus sont satisfaisants pour nos besoins. Les contraintes internes des différentes poutres d'une structure sont représentées à l'Annexe XVIII. La Figure 7.5 illustre la déformée obtenue en exerçant une charge les points *E* de la structure 3B01 qui repose sur ses points *G* et *M*. Cette configuration est conservée tout au long de l'étude. On obtiendrait un résultat similaire pour la structure 2B01, reposant sur ses points *J* et *M*, et soumise à un chargement aux points *F* (Tableau 7.4)

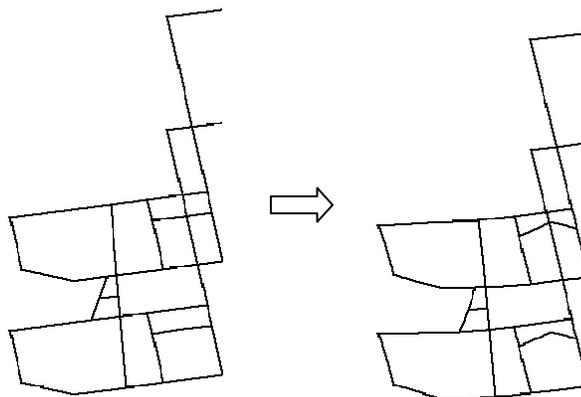


Figure 7.5 : Exemple de déformée du châssis de 3B01 calculée sous MAPLE®

2.2.1.b Comparaison des codes éléments finis

Le Tableau 7.10 compare les besoins et caractéristiques du logiciel de calcul par éléments finis ANSYS® avec ceux du code développé sous MAPLE®, en termes de nombre de nœuds, d'éléments et de temps de calcul.

Tableau 7.10 : Caractéristiques des calculs par éléments finis

	Nb. de Nœuds	Nb. d'éléments	Temps de caluls
Logiciel ANSYS®	14605 (châssis partiel)	7126 (volumiques)	1 min. 45 sec. (avec remaillage)
Code Maple®	30 (châssis entier)	35 (profilés)	10 sec. (maillage prédéterminé)

L'intérêt de la routine simplifiée n'est pas seulement sa rapidité, mais aussi sa capacité à être transformée. En effet, l'objectif étant de comparer plusieurs algorithmes, il est plus facile d'intervenir dans un code ouvert et de modifier, par exemple, les modules de génération aléatoire d'échantillons virtuels.

2.2.2 La fonction performance

La fonction performance $z(\bullet)$ exprime en pourcentage la marge subsistant avant que la contrainte appliquée à une poutre de la structure ne dépasse le seuil maximal, selon le mode de défaillance étudié. Ainsi, en l'absence de toute sollicitation, la marge est unitaire (100%) tandis qu'à la force de rupture L_{rup} , la marge est nulle (Figure 7.6). L'expression de $z(\bullet)$ pour un prototype k est donnée par l'équation suivante :

$$\min \left\{ \frac{\sigma_{\max,i}^k - \sigma_i^k}{\sigma_{\max,i}} \right\}_{i=1..P} \quad (7.1)$$

Où i représente chacune des P poutres de la structure du prototype virtuel défini par \vec{X}^k et $\sigma_i = E_i \cdot \varepsilon_i$ avec E_i le module de Young du matériau de la poutre i et ε_i l'allongement.

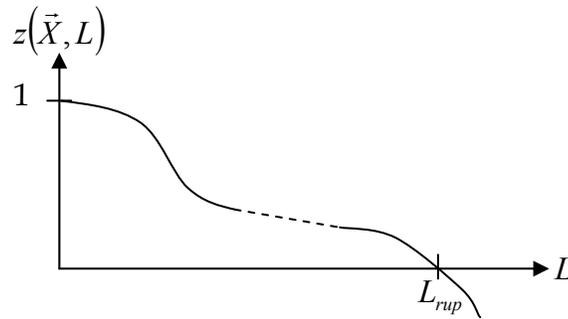


Figure 7.6 : Variation de la performance $z(\bullet)$ selon la charge appliquée L

2.2.3 La fonction résistance

À partir de la fonction de performance, l'équation $z(\bullet) = 0$ définit la surface de défaillance ou l'état limite de la structure. Or, les approches basées sur le concept contrainte/résistance requièrent la valeur de la résistance $S = s(\vec{X}) = L_{rup}$. Cette valeur est obtenue en résolvant l'équation $z(\vec{X}^k, s(\vec{X}^k)) = 0$. Nous utilisons la méthode de la sécante sur l'algorithme de Newton-Raphson pour résoudre cette équation puisque $z(\bullet)$ n'est pas connue explicitement (Kreyszig (1999)).

2.3. Génération des échantillons de prototypes virtuels et calcul de la fiabilité

2.3.1 Évaluation contextuelle de l'indice de fiabilité par la méthode FORM

2.3.1.a Éléments importants de l'algorithme FORM

L'algorithme de calcul de l'indice de fiabilité β , détaillé au Chapitre 3, comporte un certain nombre de points :

- **Le gradient de la fonction performance**

Comme l'expression de cette fonction n'est pas connue de façon explicite en fonction des diverses variables aléatoires, le calcul du gradient ne peut être fait par dérivation. Ainsi, nous employons une méthode similaire à la méthode de la sécante utilisée avec Newton-Raphson pour le calcul de la fonction résistance.

Soit \bar{x}_0 le point d'une itération donnée, on calcule le vecteur gradient du point de l'itération suivante $\bar{\nabla}_z(\bar{y}_1)$ en calculant chacune de ses composantes de la manière suivante :

$$\frac{\partial z}{\partial Y_i}(\bar{y}_1) = \frac{z(y_{01}, y_{02}, \dots, y_{1i}, \dots, y_{0n}) - z(y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0i}, \dots, y_{0n})}{y_{1i} - y_{0i}} \quad \forall i = 1..n \quad (7.2)$$

- **Les fonctions de distribution**

La plupart des fonctions de densité, de probabilité et des fonctions inverses de probabilité sont implémentées dans *MAPLE*[®]. Dans le cas de fonctions moins courantes (e.g. la loi log-logistic qui régit le comportement de la charge) qu'il est nécessaire de maîtriser, en particulier pour l'étape de normalisation des lois non Gaussiennes, nous utilisons les travaux de Kleiber (2002) et de Johnson *et al.* (1995).

- **Transformations à deux paramètres en loi normale équivalente**

La normalisation des lois non Gaussiennes est une étape importante. L'asymétrie de la loi de départ pouvant fortement influencer la validité de la transformation, nous utilisons alternativement la transformation de Rackwitz & Fiessler (1976) et la transformation de Rackwitz & Fiessler (1978) pour trouver la fonction de distribution équivalente de la charge. Les différences entre ces deux transformations sont expliquées à l'Annexe VIII.2.

2.3.1.b Application de l'algorithme

Le Tableau 7.11 résume les calculs effectués aux différentes étapes (en lignes) et lors de différentes itérations (en colonnes) pour déterminer l'indice de fiabilité β du modèle 2B01. Pour le modèle 3B01, le tableau des calculs est donné à l'Annexe XIX.1.

Dans ces tableaux, les variables X_5 , X_8 et X_{32} sont rapportées car elles ne sont pas Gaussiennes. De ce fait, elles illustrent mieux l'étape de normalisation (identique

pour toutes les variables) effectuée à chaque itération selon la méthode de Rackwitz & Fiessler (1976). La valeur grisée représente l'indice β optimal.

Tableau 7.11 : Étapes de FORM2 pour 2B01 – normalisation identique

Étape 1		$z(\bullet)$ est définie de façon implicite				
Étape 2		$z()$ initial : 0.02087641				
Étape 3	μ_{X5}	235233508	216488979	185952576	...	248443036
	σ_{X5}	299719660	107161518	76857504.5	...	167208738
	μ_{X8}	0.00130685	0.00127655	0.00113615	...	0.00138843
	σ_{X8}	0.00166511	0.0006977	0.00052116	...	0.00095987
	μ_{X32}	-140.867787	247.874267	259.599346	...	258.367276
	σ_{X32}	573.346026	196.400778	243.181497	...	248.52842
Étape 4	$\delta z/\delta_{X5}$	2.42E-09	7.61E-09	2.39E-09	...	4.98E-09
	$\delta z/\delta_{X8}$	345.193	940.195807	345.35009	...	749.31727
	$\delta z/\delta_{X32}$	-0.00108792	-0.00108786	-0.00643889	...	-0.00309348
Étape 5/6		Calculs dans l'espace des coordonnées standard				
Étape 7	Nouveau β	0.5474983	1.52160433	1.24892455	...	0.45715235
	$\Delta\beta$		0.97410603	0.27267978	...	0.00229502
Étape 8	Nouveau X_5	128714101	92315271	197069478	...	201279968
	Nouveau X_8	0.00083802	0.00062597	0.00120997	...	0.00115472
	Nouveau X_{32}	34.3172619	307.523004	-40.0711608	...	323.049517
	Nouveau $z()$	0.77924429	-2.69198066	0.87923375	...	0.00658869

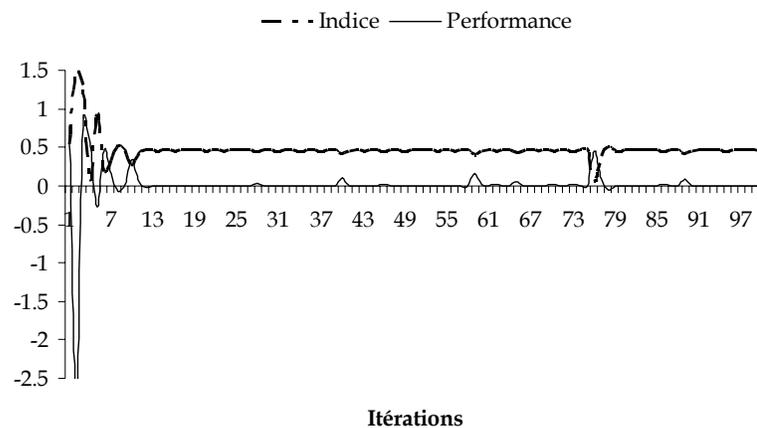


Figure 7.7 : Évolutions de β et $z(\bullet)$ pour 2B01 – normalisation identique

2.3.1.c Application avec re-normalisation de la charge

Comme la distribution de la charge est fortement asymétrique, nous répétons l'exercice en normalisant la charge selon Rackwitz & Fiessler (1978), contrairement à l'application précédente. Le Tableau 7.12 et l'Annexe XIX.3 résument ces calculs, respectivement pour 2B01 et 3B01.

Tableau 7.12 : Étapes de FORM2 pour 2B01 – charge (X_{32}) re-normalisée

Étape 1		z(•) est définie de façon implicite				
Étape 2		z() initial : 0.020876409				
Étape 3	μ_{X5}	235233508	247543542	243948422	...	248305482
	σ_{X5}	299719660	164166776	153765343	...	166728500
	μ_{X8}	0.00130685	0.00138572	0.00137624	...	0.00138778
	σ_{X8}	0.00166511	0.00094911	0.0009153	...	0.00095723
	μ_{X32}	261	261	261	...	261
	σ_{X32}	351.983331	232.756235	233.334383	...	238.249743
Étape 4	$\delta z/\delta X5$	2.42E-09	4.97E-09	4.89E-09	...	4.96E-09
	$\delta z/\delta X8$	343.886	676.79404	710.377946	...	745.501143
	$\delta z/\delta X32$	-0.00108792	-0.00108748	-0.00317125	...	-0.00308615
Étape 5/6		Calculs dans l'espace des coordonnées standard				
Étape 7	Nouveau β	0.17536333	0.50342595	0.45487726	...	0.4571335
	$\Delta\beta$		0.32806262	0.04854869	...	0.00252826
Étape 8	Nouveau X_5	197184393	184691000	201641299	...	200851259
	Nouveau X_8	0.00113999	0.00109939	0.00115845	...	0.00115259
	Nouveau X_{32}	284.58789	288.670248	324.184573	...	321.315597
	Nouveau z()	0.09693395	-0.01058173	0.00719922	...	0.006756

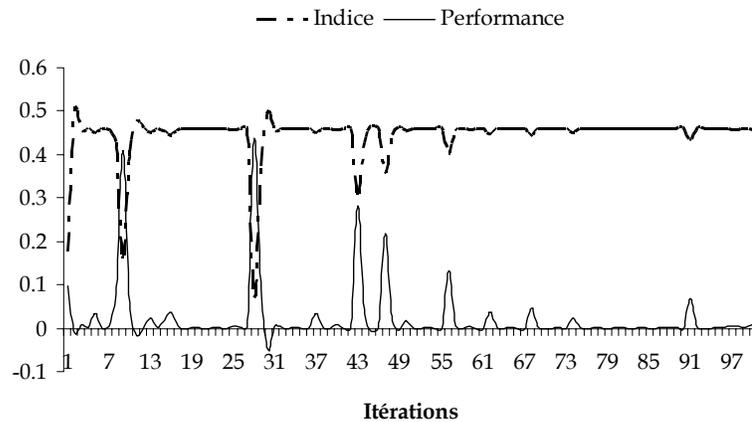


Figure 7.8 : Évolutions de β et $z(\bullet)$ pour 2B01 – charge (X_{32}) re-normalisée

2.3.1.d Synthèse des résultats de FORM2

L'approche *FORM* converge très vite, après 15 à 20 itérations pour les cas simples (Rackwitz (2001)). Dans notre cas, on observe une convergence globale, malgré plusieurs pics (Figure 7.8). Ces brusques variations au cours des itérations de minimisation peuvent s'expliquer par la modification d'une variable qui a une forte influence sur le comportement de la structure (e.g. la limite élastique du matériau).

D'après le Tableau 7.13, on remarque que les fiabilités obtenues sont relativement faibles. Or, il a été montré que les techniques *FORM* deviennent moins précises quand le nombre de variables traitées augmente (Rackwitz (2001)). Les FR étudiés sont modélisés par 31 variables, ce qui nous semble suffisamment élevé pour générer une imprécision importante entre les résultats attendus et les résultats obtenus et ainsi expliquer la faiblesse des valeurs de fiabilité. D'autre part, on attendait une meilleure correspondance des fiabilités (moins que les 7% d'écart obtenus) vu que les structures des deux modèles sont semblables. L'imprécision de la méthode *FORM* peut également être à l'origine de cette différence.

Tableau 7.13 : Bilan des calculs de fiabilité par *FORM2*

Modèle	Normalisation	β	$R = \Phi(\beta)$
2B01	Identique pour toute V.A.	0.45715235	67,62 %
	Charge (X_{32}) re-normalisée	0.4571335	67,62 %
3B01	Identique pour toute V.A.	0.66620375	74,74 %
	Charge (X_{32}) re-normalisée	0.66647111	74,74 %

2.3.2 Évaluation intrinsèque de la résistance par la méthode de Monte Carlo

Pour cette méthode, on génère un grand nombre de prototypes virtuels en assignant des valeurs aléatoires pour les variables de conception. L'Annexe XX illustre, pour 12 des 31 variables de conception, les histogrammes résultant de la génération aléatoire de 1000 valeurs par rapport à la distribution théorique (courbe en gras).

En générant, pour chaque modèle, deux échantillons de 100 châssis et deux échantillons de 1000 châssis, on est capable de déterminer la fonction de densité $f_s(\bullet)$ qui ajuste au mieux les résistances de chacun de échantillons virtuels. La Figure 7.9 présente les courbes obtenues à partir de l'analyse par Stat::Fit® d'un échantillon de 1000 unités.

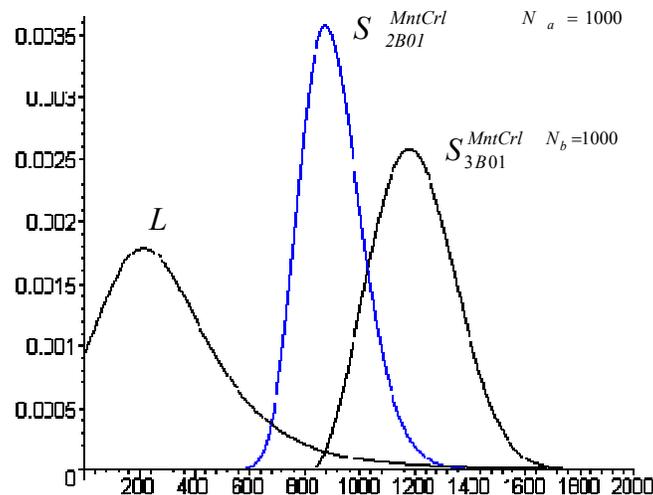


Figure 7.9 : Fonction de densité de la résistance par Monte Carlo

Cette évaluation intrinsèque est réutilisée par l'approche contrainte/résistance, avec la distribution de la contrainte L déterminée auparavant (Figure 7.2), pour calculer la fiabilité des deux modèles.

Tableau 7.14 : La fiabilité à partir de l'évaluation intrinsèque de Monte Carlo

Taille échantillon	Modèle 2B01		Modèle 3B01	
	Loi de la résistance	R (%)	Loi de la résistance	R (%)
$N_a=100$	Loi Weibull (597, 2.98, 325)	85.66	Loi Erlang (604, 15, 38.6)	88.23
$N_b=100$	Loi Log-logistic (-7180, 134, 8080)	85.82	Loi Weibull (787, 3.53, 474)	88.39
$N_a=1000$	Loi Gamma (255, 32.1, 20.2)	85.86	Loi Gamma (416, 26.5, 29.6)	88.30
$N_b=1000$	Loi Erlang (419, 18, 26.9)	85.86	Loi Weibull (831, 2.7, 416)	88.31

Le Tableau 7.14 confirme que plus la taille de l'échantillon est grande ($N=1000$), plus la mesure de la fiabilité est répétable entre deux échantillons de même taille, et ce, sans forcément trouver les mêmes distributions de résistance (Gamma puis Erlang pour 2B01 et Gamma puis Weibull pour 3B01). En effet, si on connaît la résistance d'un grand nombre de prototypes, les paramètres de la fonction de distribution qui ajuste les résistances sont mieux définis et l'erreur minimisée. On observe également que les fiabilités des deux modèles sont proches (moins de 2.5% d'écart).

2.3.3 Évaluation intrinsèque de la résistance par les séries de Taylor (TSFD)

Dans l'approche TSFD, on détermine la moyenne et l'écart type de la résistance, pour ensuite faire l'hypothèse qu'elle suit une loi normale. Cette approche nécessite le calcul de la résistance de $2.n + 1$ prototypes, chaque résistance étant établie pour une configuration spécifique du châssis. Dans notre cas $n=31$, il y a donc 63 prototypes virtuels à tester par modèle de fauteuil.

Tableau 7.15 : Résultats des calculs TSFD pour le modèle 2B01

Variable	S_i^+ (N)	S_i^- (N)	σ_{Si}	Variable	S_i^+ (N)	S_i^- (N)	σ_{Si}
S ₁	957.36	872.18	35E8	S ₁₇	919.21	919.21	0.00350
S ₂	919.21	919.21	26E6	S ₁₈	919.29	919.13	0.00050
S ₃	922.32	915.81	35E8	S ₁₉	918.74	919.65	0.00080
S ₄	879.01	963.37	10E9	S ₂₀	919.21	919.21	0.00066
S ₅	1011.27	827.19	36E6	S ₂₁	919.21	919.21	0.00025
S ₆	910.62	915.09	40E8	S ₂₂	919.21	919.21	0.00072
S ₇	931.27	907.23	0.000130	S ₂₃	919.90	918.53	0.00020
S ₈	922.83	915.59	0.000010	S ₂₄	909.65	926.57	0.00228
S ₉	919.21	919.21	0.000050	S ₂₅	910.37	927.85	0.00215
S ₁₀	919.60	918.83	0.000040	S ₂₆	919.21	919.21	0.00315
S ₁₁	919.21	919.21	0.000720	S ₂₇	925.42	912.87	0.00050
S ₁₂	919.31	919.12	0.000200	S ₂₈	915.84	922.06	0.00080
S ₁₃	923.55	914.91	0.000525	S ₂₉	919.60	918.83	0.00066
S ₁₄	918.79	919.65	0.000625	S ₃₀	917.10	921.32	0.00025
S ₁₅	911.97	921.35	0.002280	S ₃₁	918.26	920.17	0.00095
S ₁₆	917.32	921.10	0.002150				

La moyenne de la résistance de la structure est la résistance obtenue quand toutes les variables de conception sont à leur valeur moyenne, tandis que l'écart type exploite l'ensemble des résultats du Tableau 7.15.

Dans la littérature, la distribution normale est largement utilisée pour représenter la résistance ainsi que la contrainte, essentiellement par commodité de calcul. Dans notre cas, on justifie le choix de la loi normale par le théorème central limite et le nombre de variables de conception relativement grand. Le Tableau 7.16 présente la fiabilité obtenue à partir de cette hypothèse via l'approche contrainte/résistance.

Tableau 7.16 : Bilan des calculs de fiabilité par *TSFD*

Modèle	Paramètres de la <i>pdf</i> de la résistance $f_s(\bullet)$		Fiabilité R (%)
2B01	Moyenne $E(S)$	919.2142745	86.09
	Écart-type $\sigma(S)$	111.737363	
3B01	Moyenne $E(S)$	1202.541563	88.31
	Écart-type $\sigma(S)$	147.5258856	

On observe que la fiabilité obtenue pour les deux modèles est du même ordre de grandeur, avec un écart de 2.2%.

2.4. Analyse comparative des différentes méthodes

2.4.1 Résultats

Le Tableau 7.17 récapitule les estimations de la fiabilité par les trois méthodes utilisées précédemment. Le modèle *3B01* est jugé plus fiable, quelle que soit la méthode employée. Les résultats des méthodes *TSFD* et Monte Carlo sont comparables, de l'ordre de 86% pour *2B01* et 88% pour *3B01*. Généralement, les niveaux de fiabilité réels sont plus élevés (>95%), toutefois les pourcentages obtenus nous paraissent justifiés par les conditions sévères d'utilisation des fauteuils roulants (franchissement de plusieurs marches d'escalier). Ce scénario peut également être à l'origine d'un écart de fiabilité d'environ 2% entre les deux

modèles de FR. La concordance des résultats des *TSFD* et de Monte Carlo valide également l'hypothèse retenue pour les *TSFD* (la résistance suit une loi normale).

Tableau 7.17 : Comparatif des estimations de fiabilité

Méthodes	Modèle 2B01		Modèle 3B01	
	Loi de la résistance	R (%)	Loi de la résistance	R (%)
Séries de Taylor	Loi Normale	86,09	Loi Normale	88,31
Monte Carlo (N=100)	Log Log-logistic	85,82	Loi Weibull	88,39
Monte Carlo (N=1000)	Loi Erlang	85,86	Loi Weibull	88,31
FORM2	$\beta = 0.457$ et $R = \Phi(\beta)$	67,62	$\beta = 0.666$ et $R = \Phi(\beta)$	74,74

Par contre, les résultats obtenus par la technique *FORM* se distinguent de ceux des autres méthodes. Ces différences peuvent s'expliquer par les fondements de la technique (dont la critique a été rapportée à la section 4.5.2.b du Chapitre 3) mais aussi par les transformations des distributions non normales. Plus la distribution originale est asymétrique (c'est le cas de la distribution de la charge appliquée au FR), moins les techniques de normalisation sont appropriées. De plus, comme on l'a dit à la section 2.3.1.d, la technique *FORM* devient moins précise quand le nombre de variables augmente. Bien que nous ne l'ayons pas implémentée, la technique *SORM* est sensée résoudre ce problème, en contrepartie d'un temps de calculs plus long, car les calculs de gradients de *FORM* (sur des vecteurs) sont remplacés par des calculs de Hessiens (sur des matrices).

2.4.2 Besoins en données

Les approximations requises par l'algorithme *FORM* pour transformer les variables non normales en variables normales équivalentes annulent les efforts qui sont déployés pour identifier les distributions de ces variables, en particulier toute la phase de collecte de données.

La distribution des variables de conception n'étant pas requise dans l'approche *TSFD*, ceci constitue l'un de ses principaux avantages. Seuls la moyenne et l'écart type sont requis et ces données sont plus faciles à obtenir, surtout au stade de la

conception et pour des produits innovants, lorsque le concepteur a peu d'information sur les processus de fabrication et d'utilisation.

2.4.3 Durées des calculs

Le Tableau 7.18 présente les durées de calcul pour les trois méthodes. Chaque prototype virtuel nécessite un nombre d'itérations (ou simulations pour le calcul de la fonction performance) qui dépend de la méthode d'estimation de la fiabilité. Pour les simulations de Monte Carlo et les *TSFD*, il faut effectuer environ quatre simulations (itérations de Newton Raphson pour le calcul de la résistance). Dans le cas de la méthode *FORM*, chaque prototype doit être testé n fois (calcul du gradient). Une simulation correspond à l'analyse par éléments finis du comportement de la structure dans une configuration donnée et demande entre 10 et 12 secondes de calcul (avec un processeur *AMD Duron* cadencé à 850 MHz).

Tableau 7.18 : Durée des calculs

	Monte Carlo	FORM2	Séries de Taylor
Taille de l'échantillon virtuel	1000	15-20	63 ($2.n+1$)
Nb. de simulation / prototypes virtuels	4 itérations : Newt. Raph.	31 (n): Calcul du gradient	4 itérations : Newt. Raph.
Nb. de simulation total	4000	465-620	252
Durée des calculs	12 heures	1 à 2 heure	$\frac{3}{4}$ d'heures

Le principe de fonctionnement des simulations de Monte Carlo est intuitif et représentatif de la réalité. Par contre, il est très exigeant car il nécessite un minimum élevé de simulations. Les simulations effectuées par les séries de Taylor sont directement reliées au nombre de variables. Quant à la technique *FORM*, elle requiert un temps de calcul raisonnable, mais ses résultats sont sujets à discussion. A priori, ils pourraient être améliorés par la technique *SORM* qui prendrait alors n fois plus de temps.

2.5. Évaluation temporelle de la fiabilité

Puisque l'évaluation de la fiabilité par la technique *TSFD* donne de bons résultats, nous l'utilisons pour mettre en œuvre l'extension temporelle de notre modèle. On répète alors la démarche d'évaluation selon les *TSFD* à différents cycles.

2.5.1 Les variables de conception du nouveau critère de défaillance

Pour disposer d'un critère qui varie avec le temps, nous utilisons la caractéristique de Wöhler afin d'intégrer la variation temporelle de la limite élastique dans le modèle. Désormais, les limites d'élasticité de l'acier et de l'aluminium ne peuvent plus être représentées par une seule variable aléatoire suivant une loi log-normale comme au Tableau 7.3.

Selon la représentation simplifiée proposée par Marcovici & Ligeron (1974), la courbe de Wöhler est modélisée de la manière suivante : la valeur moyenne de la limite élastique passe linéairement de 100% de sa valeur initiale à 95% au cours des 10^3 premiers cycles, puis elle tombe à 50% pour 10^6 cycles avant de se stabiliser (Figure 4.14).

Nous modélisons les propriétés stochastiques de la caractéristique de Wöhler avec trois variables de conception, dont deux portent sur les deux paliers (*Seuil 1 = 95%* et *Seuil 2 = 25%* – et non pas 50% : pour précipiter la chute de la fiabilité), transformés en variables aléatoires auxquelles sont associées des lois uniformes. La troisième variable concerne le début de la courbe, à 100% de la limite élastique. Elle garde ses propriétés aléatoires, déjà utilisées en statique, avec les variables X_2 et X_5 , pour l'aluminium et l'acier respectivement. Ainsi, pour chacun des deux fauteuils, il y a deux nouvelles variables de conception (les mêmes seuils sont utilisés pour les deux matériaux).

Tableau 7.19 : Variabilité de la caractéristique de Wöhler

	Variable aléatoire associée		Type de distribution	Moyenne μ	Écart type (σ / % de μ)	
	2B01	3B01				
Seuil 1	X_{33}		Uniforme	0.950	0.0475	(20 %)
Seuil 2	X_{34}		Uniforme	0.250	0.0250	(10 %)

2.5.2 Calcul de la résistance en fonction du temps

Dans cette partie, le profil d'utilisation du FR est assoupli : les amplitudes des efforts appliqués à la structure sont divisées par deux par rapport à celles de l'étude statique. $f_L(\bullet)$ suit désormais une loi Log-Logistic(-301,6,431). Cette loi traduit le chargement qui est invariablement appliqué sur les deux châssis, à chaque cycle, à chaque fois que le fauteuil exécute son scénario d'utilisation, i.e. descendre les escaliers. Le Tableau 7.20 présente quelques résultats obtenus à différents instants ou nombre de cycles. Les calculs de fiabilité ont été réalisés par la technique des *TSFD* et répétés pour 130 points.

Tableau 7.20 : Quelques résultats des calculs de fiabilité en fonction du temps

Numéro du cycle	Résistance 2B01 - Loi normale			Résistance 3B01 - Loi normale		
	Moyenne	Écart type	Fiabilité (%)	Moyenne	Écart type	Fiabilité (%)
...
101	639.27	80.48	88.53	824.48	103.76	89.22
1001	436.25	57.22	85.29	557.07	72.62	87.77
10001	279.55	36.34	74.50	354.32	45.49	81.48
100001	179.12	24.94	54.74	225.97	31.05	65.80
500001	131.23	19.80	39.87	165.19	24.64	50.71
...

On observe que la fiabilité décroît bien avec le temps pour les deux modèles, mais, selon la Figure 7.10, il apparaît que la fiabilité du modèle 2B01 chute plus vite que celle du modèle 3B01. Ceci est cohérent avec les comportements observés lors de l'étude statique des deux FR. L'Annexe XXI illustre en quatre étapes la progression des calculs contrainte/résistance des 130 points qui constituent ces deux courbes.

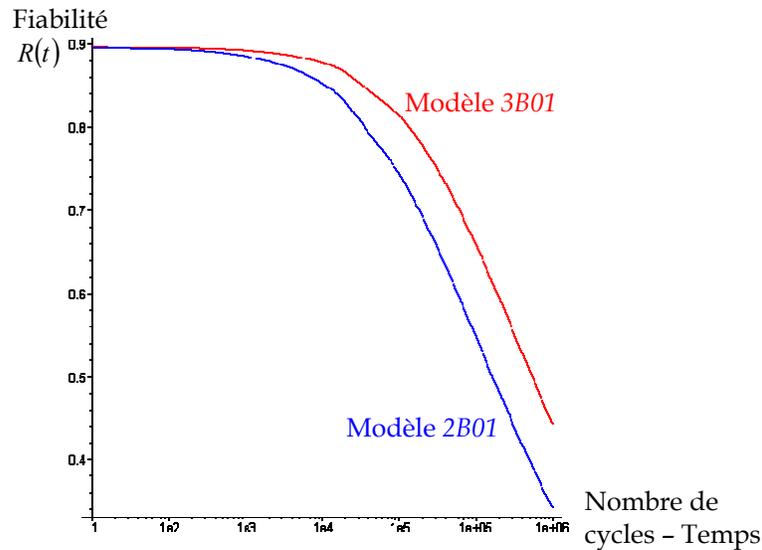


Figure 7.10 : Évolutions temporelles des fiabilités $R(t)$ pour 2B01 et 3B01

2.6. Bilan

2.6.1 Validité des résultats

La technique *TSFD* donne de bons résultats mais, dans notre cas, il faut noter que la précision de l'évaluation de la fiabilité est essentiellement tributaire de la précision avec laquelle la fonction de densité de la contrainte est définie. Comme cette erreur peut être mesurée, il est possible d'associer un intervalle de confiance à l'estimation du modèle et ainsi juger de la validité de la comparaison de deux FR.

Cependant, si la distribution de la contrainte peut générer une erreur, l'approche *TSFD* présente l'avantage de la découpler du reste des calculs, contrairement aux méthodes *FORM/SORM*. Cette séparation est particulièrement intéressante car on évite les problèmes de précision générés par les techniques de normalisation de la charge quand la distribution associée est fortement asymétrique.

2.6.2 Retombées

Pour le concepteur, cette approche permet effectivement de comparer, au stade de la conception, la fiabilité des différentes solutions qu'il propose. En termes de retour d'information, il est possible d'afficher :

- une information statique de la fiabilité : l'estimation est indépendante du temps ;
- une estimation de la fonction de fiabilité : il est alors possible de se servir de cette information pour définir une période de garantie, de connaître la durée de vie résiduelle après une période donnée d'utilisation, etc.

Pour finir, les outils développés ici peuvent facilement être enrichis pour fournir une aide à la reconception. Le concepteur peut s'aider des résultats intermédiaires fournis par les *TsFD* pour trouver les variables ayant le plus d'impact sur la fiabilité. On peut également envisager d'associer notre approche aux plans d'expériences, à des outils d'optimisations, etc. afin de tenir compte de l'influence combinée de plusieurs paramètres.

3. Évaluation de la maintenabilité

3.1. Introduction

La construction de l'indicateur de maintenabilité comporte deux parties distinctes. Dans un premier volet, certains critères sont quantifiés analytiquement à partir d'éléments disponibles ou calculés en CAO. On distingue les **critères de base** des **critères supérieurs** hiérarchiquement. Les premiers enrichissent le graphe de connexions avec des valeurs fixes car propres au système complet, tandis que les seconds sont liés aux transitions et dépendent de la configuration des sous-assemblages parents et héritiers considérés. Ces derniers sont donc recalculés pour chaque nouvelle transition réalisable. Dans le deuxième volet, un algorithme détermine le graphe de désassemblage ET/OU, où chaque transition de désassemblage est enrichie par la valeur du critère d'**aptitude à la dépose** du sous-assemblage isolé. Ce graphe ET/OU enrichi est à la base de la recherche d'une séquence optimale de transitions de désassemblage.

Dans cette partie, nous allons rappeler et éventuellement redéfinir les **critères de base** et les **critères d'ordres supérieurs**. Dans la mesure où l'implémentation de l'outil proposé n'est pas complètement intégré dans un système alliant modelleur CAO et modèle sémantique, certaines fonctions formalisées au Chapitre 6 ne sont pas utilisées. Cette limitation touche principalement la formalisation des critères d'ordre supérieurs et, par conséquent, le critère de maintenabilité mis en place ici repose principalement sur les informations pouvant être contenues dans le graphe de connexions enrichi.

C'est dans ce cadre que nous validons la construction de l'indice de maintenabilité. Dans un premier temps, nous évaluons l'indicateur de maintenabilité de deux exemples de la littérature du désassemblage. Ces exemples nous permettent, entre autre, de valider notre programme de recherche des transitions réalisables.

Ensuite, nous appliquons notre outil au cas plus complexe d'un fauteuil roulant manuel.

3.1.1 Les critères de base du graphe de connexions enrichi

3.1.1.a Formalisation pour les exemples de la littérature

Nous utilisons une version simplifiée pour quantifier les critères de base utilisés pour les exemples tirés de la littérature, tout comme on l'a fait dans l'exemple discuté au Chapitre 6. Ainsi, l'effort requis pour briser une liaison mécanique suit l'échelle suivante : simple contact=1, liaison vissée=2, ajustement serré=4, montage serré avec presse=7.5 et soudure=10. Cette échelle est utilisée pour enrichir les graphes des connexions des exemples de la littérature (Figure 7.11b et Tableau 7.26).

3.1.1.b Formalisation pour le FR

L'étude du FR nécessite, quant à elle, une quantification plus fine des critères. Tout d'abord, on tient compte de la nature des attaches. Le Tableau 7.21 donne la pondération utilisée par la fonction *noteNatureAttache()*. Elle est basée sur le principe énoncé par Das & Naik (2002) reporté au Chapitre 6 (section 3.2.2.a), et intègre l'influence des fonctions *noteNbAttache()* et *changeOutils()*.

Tableau 7.21 : Pondération de la nature des liaisons

Type de liaison	Coût/Difficulté							Type de liaison	Coût	
Contact	1							Ajustement serré	2.8	
Velcro	2							Ressort amovible	2.8	
Clip embout/pression	2.3							Boulon+contre écrou	3.1	
	Nb.	1	2	3	4	5	6	7	Circlip	3.5
Vis standard	2.4	2.65	2.9	3.15	3.4	3.5	3.6	Soudure	5	
Clip cylindrique	2.6									

L'impact de la fonction *noteNbAttache()* est directement intégrée dans la pondération de la fonction *noteNatureAttache()*, en particulier pour la vis qui est le seul type d'attache apparaissant plusieurs fois dans une même liaison entre deux

pièces. Dans ce cas, le coût est augmenté au prorata du nombre d'attaches, en tenant compte d'un certain coefficient d'apprentissage. Pour les vis standard, le coût unitaire est 2.4. Pour chacune des 4 premières vis supplémentaires ($n=2$ à 5), ce coût est majoré de 0.25. Pour les vis subséquentes, le coût est majoré de 0.1.

Lorsqu'une liaison est réalisée par la combinaison de deux types d'attache différents, la formalisation de la **démontabilité** proposée à la section 3.2.2.c du Chapitre 6 utilise la fonction *changeOutils()*. Comme les exemples développés ici ne combinent pas plus de deux types d'attaches, nous intégrons cette notion dans la fonction *noteNatureAttache()* selon l'équation (7.3).

$$noteNatureAttache() = \text{Max}[listeNatureAttache] + \frac{\text{Min}[listeNatureAttache]}{2} \quad (7.3)$$

Par conséquent, la fonction *noteNatureAttache()* évalue une difficulté de 4 si elle est appliquée à deux pièces qui combinent ajustement serré (2.8) et vis (2.4). La fonction *noteNatureAttache()* ainsi définie est utilisée pour le graphe de connexions enrichi du FR (Figure 7.16).

3.1.2 Les critères d'ordres supérieurs

3.1.2.a Importance de l'implémentation CAO

Certaines fonctions ne peuvent être évaluées sans la collaboration du système CAO car elles requièrent des informations qui ne sont disponibles ou calculables qu'avec le modèle géométrique du système. Par exemple, l'étude de la **démontabilité** fait intervenir la fonction *changeDirection()*, qui doit disposer de renseignements sur l'orientation spatiale des liaisons. Ces informations sont propres au système complet mais il en existe d'autres qui dépendent de la configuration des sous-assemblages parents et héritiers détectés réalisables par l'algorithme de la fonction *accede()*. Citons à titre d'exemple :

- la fonction intrinsèque *noteManœuvrabilite()* qui requiert le calcul des volumes enveloppes des composants des sous-assemblages étudiés ;
- la fonction extrinsèque *positionneOutil()* qui doit disposer d'une bibliothèque de modèles informatiques des outils pour les mettre en situation dans le sous-assemblage parent considéré et vérifier les possibilités de mouvements.

Ainsi, bien que nous limitons notre étude à la dimension intrinsèque, l'intégration à la CAO demeure un élément important de l'évaluation des critères. Pour continuer cette application, nous proposons des formalisations alternatives.

3.1.2.b Formalisation pour les exemples de la littérature

Pour les exemples de la littérature, les opérations de désassemblage sont abordées sur une dimension seulement dans le premier cas et sur deux dimensions pour le second. Dans ces cas, il n'est pas justifié de tenir compte d'une complexité de désassemblage supplémentaire, c'est pourquoi la fonction *demonte()* utilisée à la section 3.2.2.c du Chapitre 6 pour quantifier la **démontabilité** se réduit à l'expression (6.5). Les fonctions *noteComplexite()* et *changeDirection()*, de même que les propriétés *penaliteChangementDirection* et *penaliteChangementOutil* ont été supprimées, tandis que l'influence de la fonction *changeOutil()* a été intégrée dans la fonction *noteNatureAttache()*.

$$demonte(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = \sum_{\substack{\text{Piece } p2 \in \text{Composant } c \\ p2 \neq p1}} [noteNatureAttache(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2)] \quad (7.4)$$

Le caractère polymorphe des fonctions de la classe **Maintenabilite** permet de calculer la démontabilité (par exemple) d'une pièce *p1* issue d'un composant *c* mais aussi d'un sous-assemblage héritier *S1* extrait d'un sous-assemblage parent *S*, laissant ainsi un deuxième sous-assemblage héritier *S2=(S-S1)*. Pour intégrer ce cas, la notation utilise *S1* en remplacement de *p1*. La manœuvrabilité n'étant pas étudiée, l'équation (6.19) rend les fonctions *depose()* et *demonte()* équivalentes.

Notons que l'on retrouve la fonction coût utilisée pour l'exemple du Chapitre 6 (équation (6.19) – section 3.3.4.c).

$$z_{S1,S2} = \text{depose}(\text{Composant } S, \text{Piece } S1) = \text{demonte}(\text{Composant } S, \text{Piece } S1) = \sum_{p1 \in S1} \sum_{p2 \in S2} \text{noteNatureAttache}(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2) \quad (7.5)$$

3.1.2.c Formalisation pour l'exemple du FR

L'étude d'un cas réel suppose une plus grande complexité, que nous intégrons dans l'étude de la démontabilité. Dans ce cas, la fonction *demonte()* est enrichie par la prise en compte de la **complexité** de l'intervention, puis directement assimilée par la fonction *depose()*, tel que le montre l'équation (7.6).

$$z_{S1,S2} = \text{depose}(\text{Composant } S, \text{Piece } S1) = \text{demonte}(\text{Composant } S, \text{Piece } S1) = \text{noteComplexite}(\text{Composant } S, \text{Piece } S1) \times \sum_{p1 \in S1} \sum_{p2 \in S2} \text{noteNatureAttache}(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2) \quad (7.6)$$

La fonction *noteComplexite()* définie à la section 3.2.2.b du Chapitre 6 intègre, d'une part, la complexité du choix des attaches à défaire (fonction *noteChoix()*) et, d'autre part, la facilité à les distinguer et y accéder (fonction *noteEvidence()*). Cette dernière fonction considère la profondeur d'intégration des attaches, leur visibilité (dans une rainure ?, sur une surface plane ?), etc. Ces informations ne sont accessibles que dans les systèmes CAO, c'est pourquoi nous n'en tiendrons pas compte ici.

Comme le montre l'équation (7.7), la notion de **complexité** est directement reliée à la complexité du **choix**, telle qu'elle avait été définie au Chapitre 6.

$$\text{noteComplexite}(\text{Composant } S, \text{Piece } S1) = 1 + \log_2 \frac{\text{nbCntctParent}}{\text{nbCntctABriser}} \quad (7.7)$$

Où $nbCntctParent$ correspond au nombre total de liaisons entre toutes les paires de pièces du sous-assemblage parent et $nbCntctABriser$ est le nombre de liaisons à rompre pour séparer les sous-assemblages $S1$ et $S2$.

Remarque : le nombre total de liaisons du sous-assemblage parent utilisé dans le calcul de la complexité devrait être ramené au nombre total de liaisons « à proximité » du sous-assemblage héritier. Seulement, cette notion demande l'implémentation de l'outil dans un système CAO.

3.2. Application à deux exemples de la littérature

3.2.1 Exemple 1 : l'AFI

3.2.1.a Conception

La Figure 7.11a présente l'*Assembly for Industry* (AFI) proposé par De Fazio & Whitney (1987) et fréquemment repris dans la littérature. Nous appliquons notre modèle d'évaluation de la maintenabilité à cet exemple. La Figure 7.11b donne le graphe des connexions. La fonction $noteNatureAttache()$ enrichit les arcs de ce graphe par la difficulté à rompre les liaisons représentées.

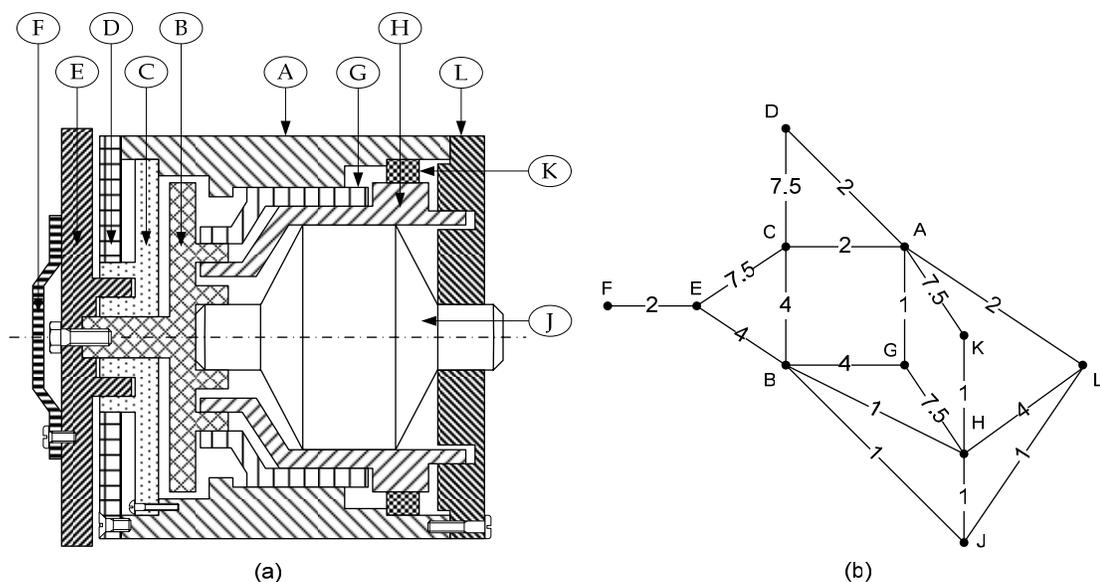


Figure 7.11 : Exemple AFI - De Fazio & Whitney (1987)

(a) Conception CAO. (b) Graphe de connexions enrichi.

3.2.1.b Construction du graphe ET/OU

L'évaluation de la fonction *accede()* pour une pièce donnée requiert la construction du graphe ET/OU. Ce dernier peut être déterminé par le modèle présenté au Chapitre 6, à condition que les relations de désassemblage enrichies soient définies. Le Tableau 7.22 présente les relations de précedence simples, telles que définies par Lambert (2001).

Tableau 7.22 : Relations de précedence de l'AFI - Lambert (2001)

$(R_G \text{ et } R_K \text{ et } R_L) \text{ ou } (R_B \text{ et } R_C \text{ et } R_D) \rightarrow R_A$	$(R_A \text{ et } R_B) \text{ ou } R_H \rightarrow R_G$
$(R_A \text{ et } R_G \text{ et } R_H \text{ et } R_L) \text{ ou } (R_C \text{ et } R_E) \rightarrow R_B$	$R_G \text{ ou } (R_J \text{ et } R_L) \rightarrow R_H$
$(R_A \text{ et } R_B) \text{ ou } (R_D \text{ et } R_E) \rightarrow R_C$	$(R_B \text{ et } R_H) \text{ or } R_L \rightarrow R_J$
$(R_A \text{ et } R_C) \text{ ou } R_E \rightarrow R_D$	$R_A \text{ ou } R_L \rightarrow R_K$
$(R_B \text{ et } R_C) \text{ ou } R_F \rightarrow R_E$	R_L
R_F	

Dans la suite du manuscrit, nous utilisons une notation simplifiée pour les relations de précedence. Ainsi, la première relation du Tableau 7.22 s'écrit $R_G.R_K.R_L+R_B.R_C.R_D \rightarrow R_A$. À partir de cette écriture, le modèle proposé est en mesure de retrouver la relation de dégagement complétant la relation de précedence pour former la relation de désassemblage enrichie. La relation de dégagement donnée pour la première relation du Tableau 7.22 se déduit ainsi en rajoutant le vecteur de dégagement \mathbf{d} :

$$(R_G \text{ et } R_K \text{ et } R_L \text{ et } \mathbf{d} = \textit{gauche}) \text{ ou } (R_B \text{ et } R_C \text{ et } R_D \text{ et } \mathbf{d} = \textit{droite}) \rightarrow R_A \quad (7.8)$$

Ce principe est répété pour la construction des relations de désassemblage enrichies de toutes les pièces.

Notre modèle construit ensuite le graphe de désassemblage ET/OU, présenté à la Figure 7.12 dans sa version complète. Cette représentation est relativement dense, même pour un exemple simple. Lambert (2002) a donc proposé le graphe ET/OU

réduit qui peut, de plus, être représenté sur plusieurs couches, ce qui rend le graphe beaucoup plus lisible et regroupe les actions de séparations selon le nombre de pièces du sous-assemblage héritier extrait de son assemblage parent. La Figure 7.13 montre le graphe ET/OU réduit que nous avons obtenu. Sa représentation multi-couches est donnée à l'Annexe XXII et présente les 221 transitions réparties sur 4 calques :

- 133 transitions extrayant une pièce ;
- 48 transitions extrayant un sous-assemblage de 2 pièces ;
- 26 transitions extrayant un sous-assemblage de 3 pièces ;
- 14 transitions dont 12 extraient un sous-assemblage de 4 pièces et 2 transitions extraient un sous-assemblage de 5 pièces.

Pour cet exemple, les 4 calques sont semblables à ceux présentés par Lambert (2002).

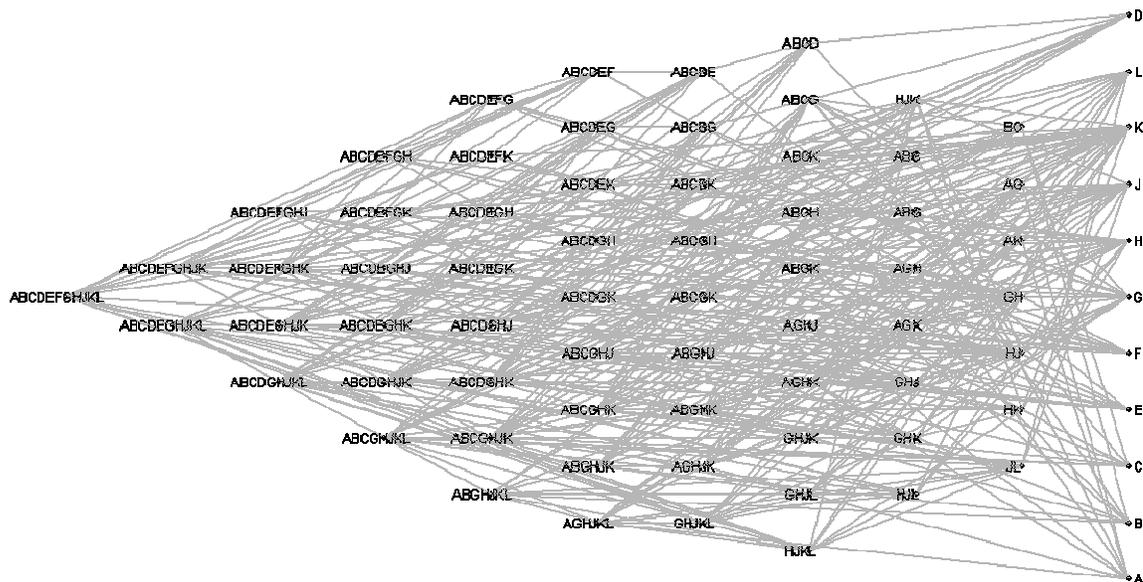


Figure 7.12 : Graphe ET/OU complet de l'AFI, 75 nœuds et 221 hyperarcs

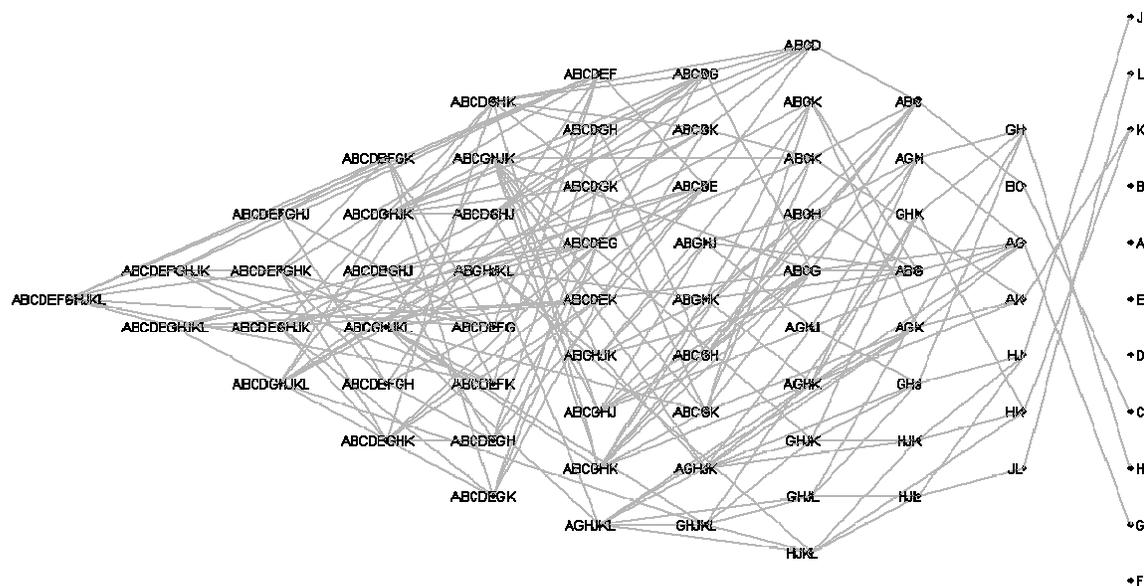


Figure 7.13 : Graphe ET/OU réduit de l'AFI, 75 nœuds et 221 arcs

Sur ces graphes, les 75 nœuds correspondent aux sous-assemblages réalisables, autant de configurations dans lesquelles le système peut se retrouver lors de sa maintenance. Le Tableau 7.23 donne le détail des sous-assemblages compilés par notre programme. Ces résultats concordent avec ceux de Baldwin *et al.* (1991) et de Lambert (2001, 2002).

Remarque : Il existe de légères différences de conception de l'AFI dans la littérature. Toutefois, nous sommes capables, grâce à une modification appropriée des contraintes de notre modèle, de retrouver les résultats de chacun.

Sans détailler l'ensemble des transitions réalisables, le Tableau 7.24 récapitule le nombre total d'actions pour séparer les sous-assemblages réalisables ayant le même nombre de pièces. Sur la Figure 7.13, cela correspond au nombre total d'arcs qui quittent l'ensemble des nœuds alignés sur une même verticale. Par exemple, le Tableau 7.24 indique 7 actions séparant les parents de 2 pièces, ce qui concorde avec les 7 arcs qui quittent les 7 sommets *GH*, *BC*, *AG*, *AK*, *HJ*, *HK* et *JL*. On compte

fonction *accede()* se base sur la séquence de transitions optimale permettant d'isoler la pièce étudiée.

Tableau 7.25 : Séquences et indices de maintenabilité pour l'AFI

Asm. Init.	Séquence des pièces gardées en main	Séquence des coûts (Z)	Indice de maintenabilité mesuré	
ABCDEFGHIJKL	ABCDEFGHIJKL - ABCDGHJKL - A	2+11.5+9.5+9+10.5	42.5	pour A
	ABCDEFGHIJKL - ABCDGHJKL - B	2+11.5+9.5+6+7	36	pour B
	ABCDEFGHIJKL - ABCDGHJKL - C	2+11.5+9.5+6	29	pour C
	ABCDEFGHIJKL - ABCDGHJKL - D	2+11.5+9.5	23	pour D
	ABCDEFGHIJKL - E	2+11.5	13.5	pour E
	F	2	2	pour F
	GHJL - G	10+7.5	17.5	pour G
	ABCDEFGHK - H	8+9.5	17.5	pour H
	ABCDEFGHJK - J	7+2	9	pour J
	ABCDEFGHJK - K	7+8.5	15.5	pour K
	L	7	7	pour L

Le Tableau 7.25 donne les séquences de désassemblage optimales déterminées par l'algorithme de Dijkstra, appliqué au graphe ET/OU enrichi. Pour isoler la pièce *L*, une seule transition est nécessaire, celle qui brise ses liens avec *A* (coût=2), avec *H* (4) et avec *J* (1), soit un indice de maintenabilité mesuré de 7. Pour isoler la pièce *G*, la séquence optimale est composée de 2 transitions. Tout d'abord, le sous-assemblage *GHJL* est isolé, en retirant le sous-assemblage *ABCDEFK*. Cette première transition doit briser les liaisons entre *L* et *A* (coût=2), *H* et *K* (1), *G* et *A* (1), *G* et *B* (4), *H* et *B* (1) ainsi que *J* et *B* (1), soit un total de 10. Ensuite, *G* peut facilement être extraite de *GHJL* en brisant sa liaison avec *H* (coût=7.5). L'ensemble des deux transitions donne un indice de maintenabilité mesuré $I_m=17.5$.

Pour obtenir l'indice de maintenabilité idéal (I_i), il suffit de reproduire la même démarche en utilisant un graphe de liaisons enrichi de façon unitaire, c'est-à-dire que les valeurs renvoyées par la fonction *noteNatureAttache()* sont toutes égales à 1. On peut donc calculer l'indice de maintenabilité intrinsèque M^{int} à partir de l'équation (6.20) du Chapitre 6.

3.2.2 Exemple 2 : les polyèdres 2D

3.2.2.a Conception

L'assemblage parallèle de la Figure 7.14a est tiré de Chen *et al.* (1997). Son désassemblage ne peut être initié qu'en retirant un minimum de 2 pièces simultanément. Cette caractéristique spécifique sert en particulier à démontrer que notre approche est également capable de traiter cette classe de désassemblage. Comme nous n'utilisons pas le même formalisme que Chen *et al.* (1997), nous avons dû identifier les relations de précédences. La Figure 7.14b présente ces relations selon le principe d'écriture établi précédemment. De plus, leur ordre d'écriture prévoit que les directions de dégagement vont respecter la séquence suivante : $-\vec{X}$, $+\vec{X}$, $-\vec{Y}$ et $+\vec{Y}$. Ainsi, les relations de désassemblage enrichies sont déduites en intégrant le vecteur de dégagement \mathbf{d} .

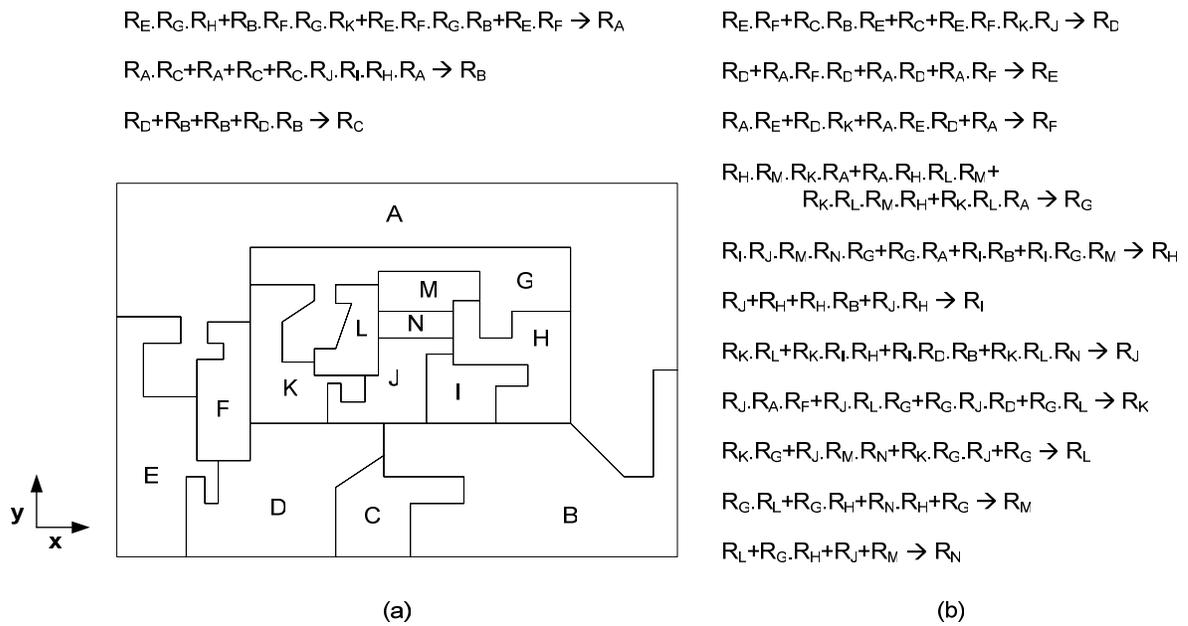


Figure 7.14 : Exemples des polyèdres 2D

(a) Conception. (b) Relations de précédence.

Dans ce cas, nous présentons la matrice des connexions \mathbf{C} (Tableau 7.26), représentation équivalente du graphe de connexions (les points représentent des

zéros). Pour obtenir la matrice représentant le graphe de connexions enrichi, il suffit de remplacer les éléments de la diagonale par 0. En fait, cela signifie que chaque arc reçoit une pondération unitaire de la part de la fonction *noteNatureAttache()* car toutes les liaisons sont considérées comme de simples contacts.

Tableau 7.26 : Matrice des connexions de la Figure 7.14a

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
A	1	1	.	.	1	1	1	1	.	.	1	.	.	.
B	1	1	1	1	.	.	.	1	1	1	.	.	.	.
C	.	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
D	.	1	1	1	1	1	.	.	.	1	1	.	.	.
E	1	.	.	1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.
F	1	.	.	1	1	1	.	.	.	.	1	.	.	.
G	1	.	.	.	.	.	1	1	.	.	1	1	1	.
H	1	1	.	.	.	.	1	1	1	1	.	.	1	1
I	.	1	.	.	.	.	.	1	1	1	.	.	.	.
J	.	1	.	1	.	.	.	1	1	1	1	1	.	1
K	1	.	.	1	.	1	1	.	.	1	1	1	.	.
L	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1	1	1	1	1
M	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	1	1	1
N	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	1	1	1

3.2.2.b Construction du graphe ET/OU

Notre modèle détermine que le graphe ET/OU est composé de 145 sous-assemblages réalisables ainsi que de 614 transitions réalisables. Le Tableau 7.27 et le Tableau 7.28 donnent les éléments caractéristiques de ce graphe, non représenté en raison de sa taille. Ces données n'ont pu être validées puisque, à notre connaissance, aucune étude ne rapporte la construction exhaustive du graphe ET/OU de cet exemple. Nous avons effectué un échantillonnage de vérification manuelle nous permettant de supposer que nos sous-assemblages et transitions sont réalisables. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de garantir que nos résultats sont effectivement exhaustifs.

Tableau 7.27 : Liste des sous-assemblages réalisables pour la Figure 7.14a

14 pièç. (1)	12 pièç. (1)	11 pièç. (2)	10 pièç. (4)	9 pièç. (3)	8 pièç. (5)
ABCDEFGHIJKLMN	ADEFGHIJKLMN	BCDGHJKLMN AEFGHIJKLMN	CDGHIJKLMN BCGHIJKLMN AFGHIJKLMN ADEFJKLMN	DGHIJKLMN BGHIJKLMN AEFGJKLMN	GHIJKLMN CDGJKLMN BCDHIJMN AFGJKLMN AEFGKLMN
7 pièç. (9)	6 pièç.(18)	5 pièç. (25)	4 pièç. (26)	3 pièç. (21)	2 pièç. (16)
DGJKLMN	GJKLMN	HIJMN	IJMN	JMN	MN
CDHIJMN	DHIJMN	GKLMN	HIMN	IJN	JN
BCHIJMN	CDIJMN	DIJMN	HIJN	HMN	IJ
BCDIJMN	CDHIJN	DHIJN	HIJM	HIN	HN
BCDHIMN	CDHIJM	DHIJM	GLMN	HIM	HM
BCDHIJN	BHIJMN	CDJMN	GKLM	HIJ	HI
BCDHIJM	BCIJMN	CDIJN	DJMN	GLM	GL
AFGKLMN	BCHIMN	CDHIJ	DIJN	GKL	GK
ADEFGKLM	BCHIJN	BIJMN	DHIJ	DJN	DJ
	BCHIJM	BHIMN	CDJN	DIJ	CD
	BCDJMN	BHIJN	CDIJ	CDJ	BJ
	BCDIJN	BHIJM	BJMN	BJN	BI
	BCDHMN	BCJMN	BIJN	BIJ	BH
	BCDHIN	BCIJN	BHMN	BHN	BC
	BCDHIM	BCHMN	BHIN	BHM	AF
	BCDHIJ	BCHIN	BHIM	BHI	AE
	AFGKLM	BCHIM	BHIJ	BCJ	
	ADEFGKL	BCHIJ	BCJN	BCI	
		BCDJN	BCIJ	BCH	
		BCDIJ	BCHN	BCD	
		BCDHN	BCHM	AEF	
		BCDHM	BCHI		
		BCDHI	BCDJ		
		AFGKL	BCDI		
		ADEFGK	BCDH		
			AFGK		

Tableau 7.28 : Transitions selon la taille des parents de la Figure 7.14a

Nb. de pièces des parents	Nb. de transitions	Nb. de pièces des parents	Nb. de transitions
2	16	9	15
3	44	10	22
4	87	11	17
5	127	12	6
6	130	13	-
7	93	14	8
8	49		

3.2.2.c Évaluation de l'indice de maintenabilité mesuré

Le Tableau 7.29 présente les séquences de désassemblage et les indices de maintenabilité mesuré pour chacune des pièces de la Figure 7.14a.

Tableau 7.29 : Séquences et indices de maintenabilité pour la Figure 7.14a

Asm. Init.	Séquence des pièces gardées en main	Séquence des coûts (Z)	Indice de maintenabilité mesuré	
ABCDEFGHIJKLMN	AEF - AF - A	7+2+1	10	pour A
	BC - B	6+1	7	pour B
	BC - C	6+1	7	pour C
	ADEFGHIJKLMN - D	6+4	10	pour D
	AEF - E	7+2	9	pour E
	AEF - F	7+2	9	pour F
	AEFGKL - AEFGK - GK - G	11+2+3+1	17	pour G
	BCHI - H	10+2	12	pour H
	BCHI - I	10+2	12	pour I
	BCDHIJ - J	11+4	15	pour J
	BCDGHJKLMN - GKL - K	7+7+2	16	pour K
	AEFGKL - L	11+2	13	pour L
	AEFGKLM - M	11+2	13	pour M
	BCDHIJN - N	11+2	13	pour N

D'autre part, il est possible d'obtenir la maintenabilité pour des sous-assemblages réalisables et non plus pour des pièces unitaires. Pour maintenir le sous-assemblage MN, le modèle nous conseille la séquence *ABCDEFGHIJKLMN - BCDHIJMN - MN*. La première transition désassemble le système initial en deux sous-assemblages : *AEFGKL* et *BCDHIJMN*. Le coût de cette transition est 10 car pour déposer *AEFGKL*, la fonction *dépose()* doit briser 10 liaisons, évaluées par *noteNatureAttache()* comme étant unitaires : *D-E, D-F, D-K, J-K, J-L, N-L, M-L, M-G, H-A* et *B-A*. Ensuite, *BCDHIJMN* est séparé en deux pour atteindre *MN* (l'autre sous-assemblage héritier est *BCDHIJ*). Ici, le coût est 2 car seules les liaisons *M-H* et *N-H* doivent être séparées. Dans ce cas, la maintenabilité mesurée est de 12.

3.2.3 Synthèse

Le premier de ces deux exemples valide le modèle que nous proposons pour évaluer les critères de maintenabilité. En effet, le programme de recherche utilisé par le critère d'*accessibilité globale* retrouve le graphe ET/OU déjà rapporté dans

la littérature. Le deuxième exemple démontre la capacité de notre modèle à aborder le désassemblage parallèle. Ceci nous permet de passer à l'application sur un cas réel : le FR.

3.3. Calcul de la maintenabilité d'un fauteuil roulant

3.3.1 Représentation CAO

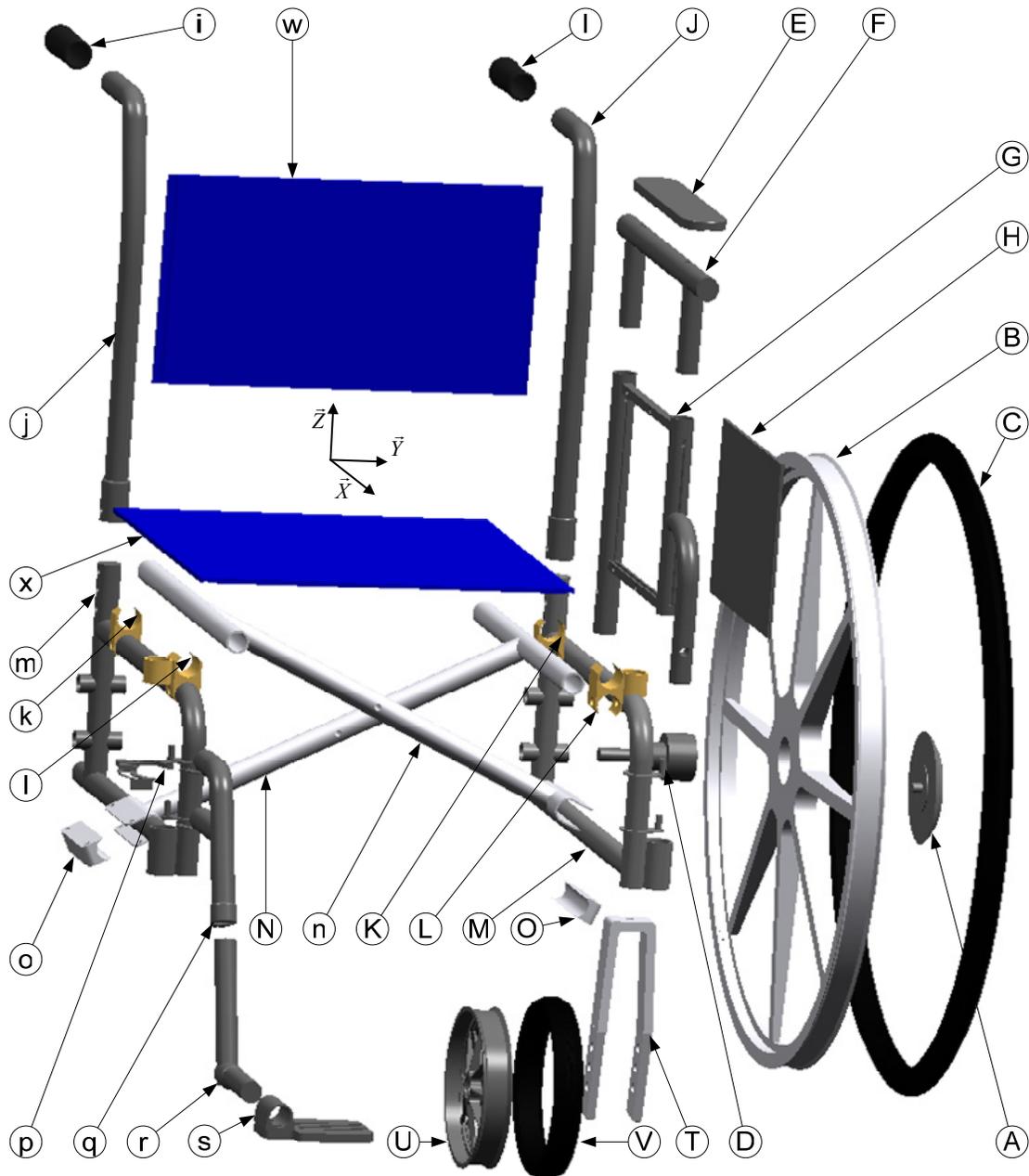


Figure 7.15 : Vue éclatée d'une moitié du fauteuil 2B01

Le fauteuil roulant utilisé pour cet exemple est le modèle 2B01, déjà présenté pour l'estimation de la fiabilité (Tableau 7.1). Nous profitons de la symétrie du fauteuil pour réduire le nombre de pièces à 29. La Figure 7.15 présente la modélisation retenue pour ce modèle. L'intégralité du modèle peut être reconstituée en suivant la convention suivante : les pièces de droite sont indiquées par des lettres majuscules (de A à V), tandis que leurs vis-à-vis sont indiquées par des lettres minuscules (de a à v). Dans cette partie, le produit initial correspond à une suite de 29 pièces : *ABCDEFGHIJKLMNQRSTUUVijmnowx*, dont la plupart sont situées à droite du FR.

3.3.2 Modélisation simplifiée du problème

3.3.2.a Graphe des connexions enrichi

La Figure 7.16 montre le diagramme des connexions enrichi entre les pièces qui constituent le fauteuil de la Figure 7.15. Chacun des liens est pondéré par la fonction *noteNatureAttache()* définie à la section 3.1.1.b, ce qui correspond à l'effort nécessaire pour rompre la ou les liaisons entre les deux pièces considérées.

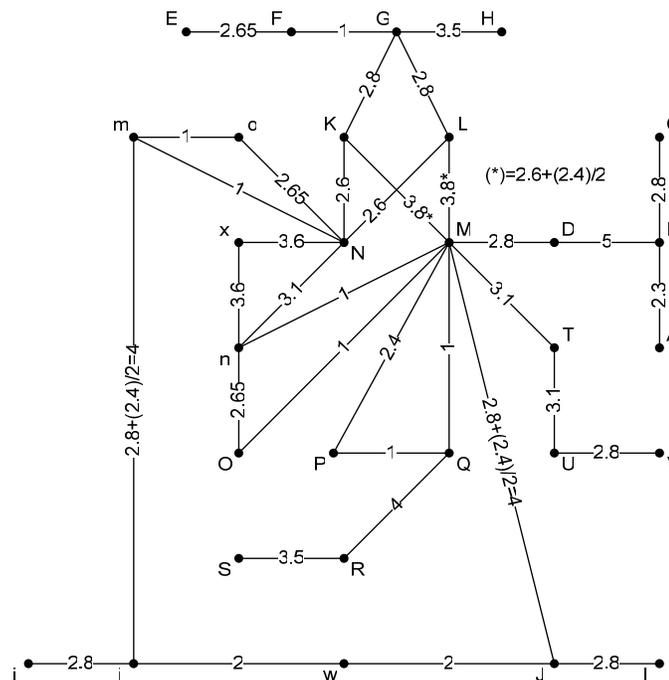


Figure 7.16 : Diagramme des connexions enrichi pour le FR

3.3.2.b Relations de précédence simples et enrichies

Le Tableau 7.30 donne les relations de précédence selon le principe d'écriture déjà utilisé. Toutes les directions d'extraction sont systématiquement examinées, toujours dans le même ordre ($-\vec{X}, +\vec{X}, -\vec{Y}, +\vec{Y}, -\vec{Z}, +\vec{Z}$) :

- Pour chaque direction, les obstacles directement en contact avec la pièce étudiée doivent être pris en compte. Pour les détecter, il suffit d'essayer de déplacer la pièce dans toutes les directions.

Par exemple, pour bouger la pièce A dans une direction quelconque exceptée $+\vec{Y}$, il faut que la pièce B ait été retirée auparavant. Par contre, A peut être retirée selon $+\vec{Y}$ sans condition (toujours vrai = 1). Ainsi, l'expression booléenne résultante pour la relation de précédence de la pièce A devient $B+B+B+1+B+B$, ce qui équivaut à 1. Quand ce cas se présente, nous gardons l'expression intégrale pour faire apparaître sa construction.
- Pour certaines pièces, l'obstruction ne provient pas d'un contact mais de la proximité d'une pièce. Par exemple, pour retirer la pièce C selon $-\vec{Y}$, il faudra vérifier, entre autres, que J est bien absente.
- Comme le modèle est complexe et que les relations de précédence sont définies manuellement, on instaure un contrôle de cohérence entre les contraintes des différentes pièces.

Par exemple, la pièce J intervient dans la relation de précédence de la pièce C . Cependant, il est possible d'oublier la pièce C au moment où on examine la pièce J . Le contrôle de cohérence indique que, si J doit précéder le retrait de C selon $-\vec{Y}$, alors C doit précéder le retrait de J selon $+\vec{Y}$.

On note que le contrôle n'a pas été appliqué à la pièce m car les pièces du côté gauche ont été supprimées. De plus, seule la contrainte de précédence selon $+\vec{Y}$ a été exprimée.

La pièce x est bloquée par la pièce g dans la direction $-\vec{Y}$. Comme cette dernière, à gauche du fauteuil, n'est pas prise en compte, elle est remplacée par m , la pièce la plus à gauche des 29 pièces traitées.

Tableau 7.30 : Éléments de construction des relations de précédence enrichies

Pièce	-X ou +X ou -Y ou +Y ou -Z ou +Z	Pièce	-X ou +X ou -Y ou +Y ou -Z ou +Z
A	$B+B+B+1+B+B$		
B	$ACD+ACD+DGHJM+A+ACD+ACD$		
C	$B+B+GHJM+1+B+B$		
D	$BM+BM+M+B+BM+BHM$		
E	$1+1+1+1+F+1$		
F	$G+G+G+G+G+E$		
G	$FKL+FKL+FKLx+BCFHKL+KL+F$		
H	$1+1+G+BC+D+1$		
I	$1+J+J+J+J+J$	<i>i</i>	$1+j+j+j+j+j$
J	$IMw+M+IM+BCIM+IM+I$	<i>j</i>	$imw+m+im+im+im+i$
K	$GM+Gn+GMn+GMn+M+Gn$		
L	$Gn+G+GMn+GMn+M+Gn$	<i>m</i>	juN
M	$DJNOPQ+DJKNOPQnx+JKLNPNQn+BCDJKLOPQ+DOT+DJKLNQ$		
N	$mKM+mLN+moKL+KLM+mKL+x$	<i>n</i>	$Mmn+M+m+MO+M+x$
O	$M+M+MN+1+1+M$	<i>o</i>	$m+m+1+mn+1+m$
P	$M+M+M+M+Q+1$		
Q	$MR+MR+MR+MR+MR+P$		
R	$Q+QS+QS+QS+S+QS$		
S	$R+1+R+R+R+R$		
T	$1+1+UV+UV+V+M$		
U	$V+V+T+T+V+V$	<i>w</i>	$1+Jj+1+1+1+1$
V	$U+U+T+T+U+UT$	<i>x</i>	$Mm+1+m^{**}+G+Nn+1$

3.3.3 Construction du graphe ET/OU

3.3.3.a Les nœuds du graphe

Le FR étudié ayant 29 pièces, il y a 536 870 911 ($2^{29}-1$) sous-assemblages théoriquement possibles à examiner. Notre modèle réduit ce nombre à 385 860 sous-assemblages réalisables. Bien que ce nombre reste très important, il ne constitue qu'une fraction des sous-assemblages théoriques, soit 0.072%. La Figure 7.17 présente la répartition des sous-assemblages réalisables selon leur nombre de pièces. Pour un nombre de pièces donné, la fraction indique le nombre de sous-assemblages réalisables (en gras au numérateur) par rapport au nombre théorique de sous-assemblages possibles. Par exemple, la fraction 29/29 indique que chacune des 29 pièces unitaires peuvent être isolées, ce qui est normal. Pour les sous-assemblages de deux pièces, seuls 33 sont réalisables par rapport au 406 théoriquement possibles (C_{29}^2).

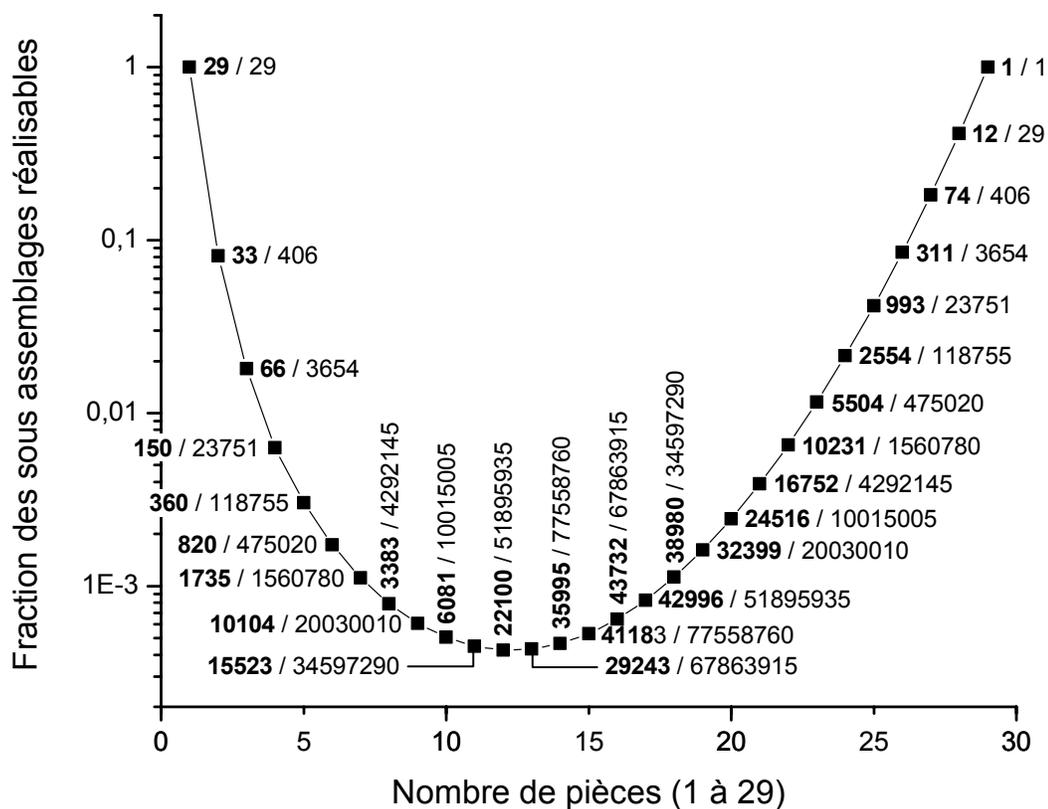


Figure 7.17 : Sous-assemblages réalisables du FR

3.3.3.b Les arcs du graphe de désassemblage ET/OU

Le grand nombre de sous-assemblages réalisables laisse présager un nombre de transitions d'autant plus important. Effectivement, notre modèle détecte 8 276 023 transitions de séparation ou hyperarcs.

Le Tableau 7.31 regroupe les transitions selon le nombre de pièces du sous-assemblage parent qu'elle désassemble. Par exemple, d'après la Figure 7.17, il y a 12 sous-assemblages de 28 pièces. Le Tableau 7.31 indique que 762 hyperarcs partent de ces 12 nœuds. En fait, il y a 67 transitions de désassemblage pour le premier des 12 sous-assemblages (le produit initial auquel on a enlevé la pièce P) et 67, 65, 66, 63, 32, 67, 67, 67, 67, 67 et 67 (total 762) transitions pour les 11 autres sous-assemblages de 28 pièces.

Tableau 7.31 : Nombre de transitions selon la taille du parent pour le FR

Nb. de pièces des parents	Nb. de transitions	Nb. de pièces des parents	Nb. de transitions
2	33	16	909 575
3	132	17	979 912
4	458	18	970 008
5	1 499	19	878 245
6	4 354	20	723 011
7	11 278	21	537 322
8	26 301	22	357 210
9	55 524	23	209 824
10	106 714	24	106 987
11	187 404	25	46 110
12	301 973	26	16 120
13	448 296	27	4 276
14	614 507	28	762
15	778 120	29	68

3.3.4 Évaluation de l'indice de maintenabilité mesuré

La taille du problème de désassemblage du FR dépasse les capacités du logiciel qui implémentait jusqu'alors l'algorithme de Dijkstra utilisé par la fonction *accede()*. Nous sommes actuellement en train d'élaborer une alternative de programmation avec une meilleure gestion de la mémoire disponible.

La limitation réside dans la capacité du logiciel à charger le graphe complet en mémoire. Celui-ci est cependant complètement défini : les nœuds sont connus, de même que les arcs qui sont de plus enrichis par la fonction *depose()*. À titre d'exemple, considérons deux transitions qui désassemblent le produit complet.

La première transition, très simple, consiste à extraire l'assemblage *EF* du FR complet. L'indicateur de maintenabilité calculé par notre modèle est de *6.17*. La deuxième transition crée, à partir du FR complet, les deux sous-assemblages héritiers suivants : *Nmox* et *ABCDEFGHIJKLMOPQRSTUVWXYZVijnw*. Cette transition est peu probable car elle est visiblement difficile à réaliser même si elle reste théoriquement possible. L'indice de maintenabilité calculé est *61.18*. Ce facteur *10* entre les indicateurs de maintenabilité des deux transitions confirme la plus grande complexité de la deuxième transition, que nous avons intuitivement observée.

3.4. Bilan

Avec ces exemples, nous avons démontré que les concepts à la base de la mesure de l'indice de maintenabilité sont tout à fait valides. Ils permettent, à partir de la modélisation d'un système défini en CAO, d'évaluer les différents critères de maintenabilité pour toutes les alternatives de maintenance qui peuvent s'appliquer à toutes les configurations réalisables.

Dans ce chapitre, la formalisation des critères est limitée par l'absence de collaboration avec un modéleur CAO, disposant d'informations importantes pour l'évaluation des critères. Cependant, les critères simplifiés utilisés ici sont suffisants pour une évaluation objective et reproductible de la maintenabilité intrinsèque.

Au Chapitre 6, l'exemple d'illustration a montré qu'il était possible de discriminer une alternative de conception vis-à-vis d'une autre si elle offrait une plus mauvaise maintenabilité de certains composants du système. Dans ce dernier chapitre, nous avons mesuré l'indice de maintenabilité de chaque composant de deux exemples tirés de la littérature. Une évaluation de l'indicateur de maintenabilité mesuré est suffisante pour hiérarchiser les pièces d'un même système entre elles. Ainsi, le concepteur est en mesure de vérifier si les pièces les plus susceptibles de subir des interventions de maintenance fréquentes sont bien celles qui sont classées parmi les meilleures du point de vue de la maintenabilité.

Le FR, un exemple relativement complexe, nous a montré les limites dues à l'utilisation exhaustive du graphe de désassemblage ET/OU. Une piste de solution consiste à ajouter de nouvelles contraintes. Le défi est d'arriver à formuler des contraintes pratiques, fonctionnelles et opérationnelles, sous une forme qui permettra au modèle de réduire le nombre de solutions réalisables en supprimant les moins probables.

Conclusion

Dans cette thèse nous avons présenté une problématique relative à la prise en compte de la fiabilité et de la maintenabilité dès le stade de la conception d'un produit. Ces deux aspects du cahier des charges sont généralement validés une fois la conception et les prototypes réalisés. Ainsi, dans le cas de la fiabilité, un échantillon de plusieurs prototypes doit être testé, tandis que dans celui de la maintenabilité, un seul et même modèle de démonstration peut servir à plusieurs analyses. Ce processus de validation a posteriori est coûteux et retarde la mise sur le marché du produit.

Aussi nos travaux présentent-ils une nouvelle démarche pour évaluer la fiabilité d'un produit en utilisant des prototypes et un banc d'essai virtuels.

Nous avons mis au point des procédures permettant de produire un échantillon virtuel du produit à tester. À partir du modèle CAO, nous générons, selon des distributions appropriées, les caractéristiques sujettes à des variations aléatoires (matériaux, dimensions, sollicitations, etc.). Ces caractéristiques sont déterminées par les critères et facteurs influençant la fiabilité que nous avons choisis de prendre en compte. Nous avons souligné l'importance de ce choix car il influence directement le nombre de données requises par l'analyse.

Pour générer des échantillons de prototypes, nous exploitons les méthodes de Monte Carlo et *FORM/SORM*. Comme ces techniques nécessitent des informations difficilement accessibles au stade de la définition du produit, nous avons proposé une approche alternative basée sur les séries de Taylor (*TSFD*) qui permet d'atteindre de bons résultats (semblables à ceux de la technique de Monte Carlo) sans connaître le type de distribution des caractéristiques du prototype.

Nous avons ensuite exposé deux façons d'analyser le produit, soit par une évaluation contextuelle d'une fonction performance du système en cours

d'utilisation, soit par une évaluation intrinsèque de la résistance du produit. Un module de calcul par éléments finis détermine la ou les grandeurs révélatrices de la tenue du produit soumis aux sollicitations appliquées. Pour ces deux options, nous avons développé une procédure permettant d'évaluer la fiabilité du produit.

En ce qui a trait à la maintenabilité, nous avons redéfini des indicateurs qui permettent d'apprécier le niveau de complexité inhérent à la remise en opération d'un produit après défaillance. L'accent a été mis sur des produits constitués de plusieurs composants, chacun d'entre eux étant assujéti à des défaillances aléatoires.

Nous avons utilisé la définition normalisée de plusieurs critères de maintenabilité (l'accessibilité, l'aptitude à la dépose, la démontabilité), pour ensuite les caractériser par des facteurs et paramètres identifiables en CAO. Une formalisation principale a été élaborée pour chaque critère intrinsèque mais d'autres pistes, plus complexes à implémenter, ont été évoquées. Les mesures de ces critères sont réalisées analytiquement, par simulation ou par algorithme, comme c'est le cas pour la mesure de l'accessibilité globale. Pour ce critère, un programme efficace a été mis au point pour générer des séquences optimales de désassemblage.

Nous avons ensuite proposé une agrégation des critères afin de disposer d'un indicateur unique de la maintenabilité intrinsèque d'un composant. Cet indicateur, comparé à l'indicateur qui serait obtenu pour une conception idéale du point de vue de la maintenabilité, donne la mesure de la maintenabilité intrinsèque.

Ainsi, il est désormais possible de déterminer la meilleure séquence de désassemblage pour accéder à un composant donné. Des modifications à la structure du produit peuvent être apportées pour réduire les temps d'accès à un composant donné. Une étude comparative peut aussi conduire au choix des modes de liaisons entre les différents composants du produit. Cette contribution s'inscrit dans les préoccupations récentes des maintenanciers. En effet, les coûts exorbitants

de la maintenance sont, en grande partie, engendrés par le fait que la maintenance n'a pas été prise en compte au stade de la conception.

Le développement de ces outils a contribué à l'ouverture de la démarche « *Design for X* » à la prise en compte, par une mesure comparative quantifiable, de certaines phases du cycle de vie du produit, encore peu explorées en mécanique lors de la conception. En nous attachant à la phase de validation des caractéristiques comportementales du produit dans son environnement, c'est-à-dire ses conditions d'utilisation, nous participons au développement d'une nouvelle génération d'outils d'aide à la conception. Son principe repose sur une méthodologie FSC (approche Fonctionnelle-Structurelle-Comportementale) pour l'analyse comportementale en temps réel des solutions de conception, à partir de l'environnement CAO. L'approche FSC laisse le concepteur juger du niveau de satisfaction des critères d'évaluation et libre de choisir ou non de nouvelles solutions. L'architecture du système CAO se compose de deux modules :

- un module de CAO commercial basé sur un modeler géométrique ou topologique classique ;
- un module indépendant d'évaluation des critères de fiabilité et de maintenabilité intégrant un système de gestion des contraintes des règles de comportement (compétences métiers).

Les concepts mis de l'avant lors du développement de ces deux modules ont été validés par une application sur des fauteuils roulants. Toutes les procédures développées fonctionnent correctement, tant pour la fiabilité que pour la maintenabilité. Grâce à cet outil d'aide à la conception, il est désormais possible de comparer plusieurs options du produit et d'identifier les améliorations à lui apporter, et ce, à partir de l'environnement CAO, sans avoir recours aux très coûteux prototypes physiques.

La nature des résultats et la logique de la démarche suivie laisse présager une bonne applicabilité en milieu industriel. Il est néanmoins important de considérer

le volume de données que l'utilisateur doit fournir au système pour permettre l'évaluation. Les difficultés allant croissantes avec le nombre de paramètres à définir, il faut prévoir une base de données et de connaissances appropriée pour encourager le concepteur à utiliser l'outil. D'autre part, les environnements CAO actuels offrent la possibilité de développer des routines informatiques, ce qui favorise l'intégration de nos outils dans la plateforme de conception avec laquelle le concepteur est familier.

Les niveaux de fiabilité et de maintenabilité obtenus à partir du concept développé ne sont pas absolus. Des ajustements sont évidemment requis pour réduire les écarts pouvant exister entre les valeurs obtenues en utilisant les prototypes virtuels de celles obtenues par les prototypes physiques.

Perspectives

L'approche présentée permet l'évaluation de la fiabilité d'un composant ou d'un système constitué de plusieurs composants. Pour prévoir la fiabilité d'un système à partir de la fiabilité individuelle de chacun de ses composants, il faudra tenir compte de la dépendance qui s'installe entre les composants lors de leur assemblage. De la même manière, les outils développés pour la maintenabilité associent un indicateur à chaque composant du système. Or, il importe de développer un indicateur permettant d'estimer la maintenabilité du système dans sa globalité. Par exemple, on pourra accorder plus de poids aux pièces sujettes à de fréquentes opérations de maintenance (pièces d'usure, pièces critiques et peu fiables, etc.).

En outre, lors de l'analyse de la maintenabilité, nous avons considéré les critères intrinsèques et fait l'hypothèse que les conditions idéales étaient réunies. Pour considérer la variabilité des conditions d'intervention chez les clients, il faut intégrer les critères extrinsèques. Dès lors, il sera possible de générer des contextes d'intervention virtuels aléatoires, représentatifs de la réalité et ainsi évaluer la

maintenabilité comme une probabilité (à l'instar des prototypes virtuels aléatoires générés pour évaluer la fiabilité).

À terme, nous cherchons à faire en sorte que les essais virtuels fournissent autant d'informations sur la tenue du produit qu'un prototype physique soumis aux mêmes essais. Il est prévu de procéder à une calibration du modèle avec des cas d'application réels. D'ores et déjà, on peut envisager plusieurs pistes : affiner les modélisations (les modes de défaillance considérés, les comportements humains, etc.), agir sur les techniques de résolution, intégrer des critères supplémentaires et étudier d'autres solutions pour les agréger (approches multi-critères).

Suite aux travaux de cette thèse, il est envisageable de développer un module d'analyse de la disponibilité, tandis que l'introduction de préoccupations de sécurité permettra de proposer une évaluation de la sûreté de fonctionnement. Ces dimensions comportementales sont fortement extrinsèques et rendent indispensable l'intégration dans le système CAO telle que définie par l'approche FSC. Actuellement, une maquette informatique de cette plateforme de conception est en cours de développement.

En conclusion, nous avons abordé la prise en compte, lors de la conception, des aspects d'exploitation du produit dans des domaines très complexes, à fort contenu sémantique, mal définis, qu'il nous semble difficile de modéliser dans des bases de connaissances exhaustives et cohérentes, ce qui irait d'ailleurs à l'encontre de la créativité. Aussi, la philosophie de notre approche est de proposer au concepteur des indicateurs simples permettant de le guider dans sa démarche. Cet aspect mérite une réflexion approfondie de l'interface homme-machine (présentation des résultats, traçabilité des causes, outils proactifs d'aide à la conception, etc.).

Bibliographie

- Boothroyd Dewhurst, Inc. (2002). <http://www.dfma.com>
- DNV Software (2004). <http://www.dnv.com/software>
- eMachineshop (2004). <http://www.emachineshop.com>
- Geer Mountain Software Corp. (2004). <http://www.geerms.com>
- Laval Virtual (2004). <http://www.laval-virtual.org>
- PTC/Parametric Technology Corporation (2004). <http://www.ptc.com>
- Altair Engineering Inc. (2004). <http://www.altair.com>
- Autodesk Inc. (2004). <http://www.autodesk.com>
- Dassault Systèmes (2004). <http://www.3ds.com>
- EDS/Electronic Data System Corp. (2004). <http://www.eds.com> - <http://www.solidedge.com>
- Engineous Software Inc. (2004). <http://www.engineous.com>
- Groupe Samtech (2004). <http://www.samcef.com>
- IfM (2004). <http://mechanik.uibk.ac.at>
- LMS International (2004). <http://www.lmsintl.com>
- METAFOR® (2004). <http://www.ulg.ac.be/lta-mct/>
- MSC Software Corp. (2004). <http://www.mscsoftware.com>
- Open Engineering SA (2004). <http://www.open-engineering.com>
- Phimeca Engineering S.A. (2004). <http://www.phimeca.com>
- Relax Software (2004). <http://www.relexsoftware.com>
- Reliasoft Corp. (2004). <http://www.reliasoft.com>
- SolidWorks Corp. (2004). <http://www.solidworks.com>
- Code_Aster (2005). <http://www.code-aster.org>
- Hibbett Karlsson & Sorensen Inc. (2004). <http://www.hks.com>
- Abe, S., Murayama, T., Oba, F. & Narutaki, N. (1999). "Stability check and reorientation of subassemblies in assembly planning". *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics - Proceedings*, pp. 486-491.
- AFNOR (1991). *Association française de normalisation*. Groupe AFNOR, Paris.
- Aït-Kadi, D. (2002). "La fiabilité des systèmes". *Notes de cours*, Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Canada.

- Aït-Kadi, D., El Khair El Idrissi, A. & Gouget, N. (2000). "Prise en compte de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception". *IDMME'2000, 3e Conférence internationale sur la conception et la fabrication intégrées en mécanique - Actes*, Montréal.
- Albano, L. D., Suh, N. P., Pecht, M., Slocum, A., Jakiela, M., Lewis, K., Mistree, F., & Rao, J. R. J. (1999). "Engineering Design" in *Mechanical Engineering Handbook*, F. Kreith, ed., CRC Press LLC, Boca Raton.
- Annis, C. (2005). "Statistical Engineering". <http://www.statisticalengineering.com>
- Associated Press (2004). "Internet machine shop offers custom tooling". <http://www.cnn.com>.
- Avakov, V. A. & Shomperelen, R. G. (1989). "Fatigue reliability functions". *Failure Prevention and Reliability*, S. Sheppard, ed., The American Society of Mechanical Engineers, Montréal, pp. 109-118.
- Baldwin, D. F., Abell, T. E., Lui, M.-C. M., De Fazio, T. L. & Whitney, D. E. (1991). "An Integrated Computer Aid for Generating and Evaluating Assembly Sequences for Mechanical Products". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 1, pp. 78-94.
- Barton, R. R. (1991). "Optimal Accelerated Life-Time Plans that Minimize the Maximum Test-Stress". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 40, no. 2, pp. 166-172.
- Basile, O., Dehombreux, P. & Filippi, E. (2003a). "Computer-aided reliability analysis of mechanical systems ; some comments on estimation errors". *6th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics - Proceedings*, Ghent.
- Basile, O., Dehombreux, P. & Filippi, E. (2003b). "Estimation a priori et a posteriori des lois de fiabilité : quelques réflexions sur l'incertitude des grandeurs fiabilistes". *Pentom'03 du Colloque francophone sur les Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance - Actes*, Valenciennes, pp. 329-346.
- Béal, M.-P. & Sendrier, N. (2004). "Théorie de l'information et codage". *Notes de cours*, Institut Gaspard Monge, Université de Marne-la-Vallée, France.
- Ben-Arieh, D. (1994). "A methodology for analysis of assembly operations' difficulty". *International Journal of Production Research*, vol. 32, no. 8, pp. 1879-1895.
- Birnbaum, Z. W. & Saunders, S. C. (1968). "A probabilistic interpretation of Miner's rule". *Journal of Applied Mathematics - SIAM*, vol. 16, pp. 637-652.
- Boehm, F. & Lewis, E. E. (1992). "A stress-strength interference approach to reliability analysis of ceramics: Part II - Delayed fracture". *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 7, pp. 9-14.
- Bogdanoff, J. L. & Kozin, F. (1985). *Probabilistic Models of Cumulative Damage*. John Wiley & Sons, New York.

- Boks, C. B., Kroll, E., Brouwers, W. C. J. & Stevels, A. L. N. (1996). "Disassembly modeling: two applications to a Philips 21" television set". *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment - Proceedings*, pp. 224-229.
- Bonneville, F., Henrioud, J. M. & Bourjault, A. (1995). "Generation of assembly sequences with ternary operations". Pittsburgh, PA, USA, pp. 245-249.
- Boothroyd, G. & Dewhurst, P. (1991). *Product Design for Assembly Handbook*. Boothroyd Dewhurst Inc., Wakefield, Rhode Island, USA.
- Bourjault, A. (1984). *Contribution à une approche méthodologique de l'assemblage automatisé : élaboration automatique des séquences opératoires*, Docteur des Sciences Physiques, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Franche-Comté, Besançon, France.
- Bourjault, A., Chappe, D. & Henrioud, J. M. (1987). "Élaboration automatique des gammes d'assemblage à l'aide de réseaux de Petri". *RAIRO AP11*, vol. 21, pp. 323-342.
- Bouti, A. & Aït-Kadi, D. (1994). "State of the Art Revue of FMEA/FMECA". *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, vol. 1, pp. 515-543.
- Bouzaiene-Marle, L. (2005). *AVISE, Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts. Application à un matériel passif d'une centrale nucléaire : le pressuriseur*, Thèse de doctorat, École Centrale de Paris.
- Burgess, S. C., Stolarski, T. A. & Karp, S. (1990). "An accelerated life test for bicycle freewheels". *Measurement Science and Technology*, vol. 1, pp. 1-8.
- Caruso, H. (1996). "An overview of environmental reliability testing". *Reliability and Maintainability Symposium - Proceedings - International Symposium on Product Quality and Integrity*, pp. 102-109.
- Chedmail, P., Maille, B. & Ramstein, E. (2002). "État de l'art sur l'accessibilité et l'étude de l'ergonomie en réalité virtuelle: Accessibility and ergonomics study with virtual reality, a state of the art". *Mecanique & Industries*, vol. 3, no. 2, pp. 147-152.
- Chen, S.-F., Oliver, J. H., Chou, S.-Y. & Chen, L.-L. (1997). "Parallel disassembly by onion peeling". *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 119, no. 2, pp. 267-274.
- Chen, X. & Lind, N. C. (1983). "Fast Probability Integration by Three-Parameter Normal Tail Approximation". *Structural safety*, vol. 1, pp. 269-276.
- Coulibaly, A., Ostrosi, E. & Mutel, B. (1998). "An Integrated Mechanical Design Approach Based on the Product Functional, Structural and Technological Specifications Models (FST)". *IDMME'98, 2e Conférence internationale sur la conception et la fabrication intégrées en mécanique - Actes, Compiègne*.

- Coulibaly, A., Zwingmann, X., Aït-Kadi, D. & Mutel, B. (2003). "Formalisation des contraintes de maintenabilité des produits mécaniques à partir de modèles CAO". *International Journal of Design and Innovation Research*, vol. 3, no. 1, pp. 67-80.
- Coulibaly, A., Zwingmann, X., Aït-Kadi, D. & Mutel, B. (2000). "Intégration des contraintes de maintenance dès la phase de conception avec les systèmes de CAO Mécanique avancée". *IDMME'2000, 3e Conférence internationale sur la conception et la fabrication intégrées en mécanique - Actes*, Montréal.
- Crow, L. H. (1984). "Methods For Assessing Reliability Growth Potential". *Annual Reliability and Maintainability Symposium - Proceedings*, pp. 484-489.
- Crow, L. H., Franklin, P. H. & Robbins, N. B. (1994). "Principles of Successful Reliability-Growth Applications". *Annual Reliability and Maintainability Symposium - Proceedings*, pp. 157-159.
- Crowe, D., Feinberg, A. & Bunis, C. (2001). *Design for Reliability*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Curbach, M. & Proske, D. (2004). "Application of Monte-Carlo-Simulation in Structural Reliability". *PSAM 7 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, C. Spitzer, U. Schmocker, & V. N. Dang, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 437-443.
- Daguier, P. & Baudry, G. (2004). "Le problème de la caractérisation des matériaux en approche fiabiliste". *SF2M'2004 - 23èmes Journées de Printemps ; Commission de Fatigue de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux - Méthodes fiabilistes en fatigue pour conception et essais*.
- Das, S. K. & Naik, S. (2002). "Process planning for product disassembly". *International Journal of Production Research*, vol. 40, no. 6, pp. 1335-1355.
- Das, S. K., Yedlarajah, P. & Narendra, R. (2000). "An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost". *International Journal of Production Research*, vol. 38, no. 3, pp. 657-673.
- De Fazio, T. L. & Whitney, D. E. (1987). "Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 6, pp. 640-658.
- Desai, A. & Mital, A. (2003). "Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production". *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 32, pp. 265-281.
- Dhillon, B. S. (1999b). *Engineering Maintainability : How to design for reliability and easy maintenance*. Gulf Publishing Company.
- Dhillon, B. S. (1999a). *Design Reliability - Fundamentals and Applications*. CRC Press LLC, Boca Raton.

- Diallo, C. (2005). *Développement d'un modèle d'identification et de gestion des pièces de rechange*, Doctorat (Ph.D), Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Canada.
- Diaz-Calderon, A., Navin-Chandra, D. & Khosla, P. K. (1995). "Measuring the difficulty of assembly tasks from tool access information". *IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning - Proceedings*, pp. 87-93.
- Duane, J. J. (1964). "Learning Curve Approach to Reliability Modeling". *IEEE Transactions on Aerospace*, vol. 2, pp. 563-566.
- Durham, S. D. & Padgett, W. J. (1990). "Estimation for a Probabilistic Stress-Strength Model". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 39, no. 2, pp. 199-203.
- Dutta, D. & Woo, T. C. (1995). "Algorithm for multiple disassembly and parallel assemblies". *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, vol. 117, no. 1, pp. 102-109.
- Eichseder, W. & Leitner, H. (2004). "Fatigue des structures métalliques : extrapolation des données des matériaux des éprouvettes aux structures réelles". *SF2M'2004 - 23èmes Journées de Printemps ; Commission de Fatigue de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux - Méthodes fiabilistes en fatigue pour conception et essais*.
- El Khair El Idrissi, A., Aït-Kadi, D. & Simard, C. (1995). "Utilisation des techniques bayésiennes pour la prévision de la fiabilité et formalisation des connaissances a priori". *Congrès international de Génie Industriel - Actes*, Éditions École Polytechnique de Montréal, Montréal, pp. 1457-1467.
- Elegbede, C. (2004). "Structural Reliability Assessment Based on Discrete Approximation". *PSAM 7 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, C. Spitzer, U. Schmocker, & V. N. Dang, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 1427-1432.
- évariste (1996). "Fiche Technologie-clé n°123 : Prototypage rapide". <http://www.evariste.org/100tc/1996/f123.html>
- Failli, F. & Dini, G. (2001). "Optimization of disassembly sequences for recycling of end-of-life products by using a colony of ant-like agents". *14th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems - Proceedings*, Springer-Verlag, Budapest, Hungary, pp. 632-639.
- Ferrari, T., Galley, P. & Souris, G. (2000). "Validation produit". *Phoebus : La Revue De La Sûreté De Fonctionnement*.
- Fujimoto, H., Ahmed, A. & Sugi, K. (2001). "Product's disassemblability evaluation using information entropy". *Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing - Proceedings EcoDesign*, pp. 353-359.

- Gadh, R., Srinivasan, H., Nuggeshalli, S. & Figueroa, R. (1998). "Virtual disassembly - a software tool for developing product dismantling and maintenance systems". IEEE, Piscataway, NJ, USA, Anaheim, CA, USA, pp. 120-125.
- Gakwaya, A. (2001). "Conception Mécanique Assistée par Ordinateur - Notes de cours". Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Canada.
- Gao, J., Xiang, D., Chen, H., Duan, G. & Wang, J. (2003). "Disassembly AND/OR graph model for "disassembly for recycling"". Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Boston MA, United States, pp. 54-59.
- Garrigues, J. (1999). "La méthode des éléments finis - Notes de cours". École Supérieure de Mécanique de Marseille.
- Gervais, M., Pépin, G. & Carrière, M. (2000). "TRIAGE ou comment adapter une technique de recherche à l'intervention clinique en ergothérapie". *Revue québécoise d'ergothérapie*, vol. 9, no. 1, pp. 11-15.
- Golay, M. W., Seong, P. H. & Manno, V. P. (1989). "A Measure of the Difficulty of System Diagnosis and its Relationship to Complexity". *International Journal of General Systems*, vol. 16, pp. 1-23.
- Gomes de Sá, A., Gaul, H.-D., Klier, R. & Lindemann, U. (1999). "Comparison of Virtual Reality with a Conventional Simulation System for Verification of Assembly and Maintenance Processes". *ICED'99 - International Conference on Engineerig Design - Proceedings*, Munich.
- Gottipolu, R. B. & Ghosh, K. (1997). "Representation and selection of assembly sequences in computer-aided assembly process planning". *International Journal of Production Research*, vol. 35, no. 12, pp. 3447-3465.
- Guérin, F., Dumon, B. & Hambli, R. (2001). "Estimation of failure probability by Bayesian method using Monte Carlo simulation in structural reliability problems". *International Conference on Monte Carlo Simulation - Proceedings*, Schueller é Spanos, ed., Belkema, Rotterdam, pp. 309-316.
- Guide, V. D. R., Srivastava, R. & Kraus, M. E. (1997). "Product structure complexity and scheduling of operations in recoverable manufacturing". *International Journal of Production Research*, vol. 35, no. 11, pp. 3179-3199.
- Güngör, A. & Gupta, S. M. (1997). "Evaluation methodology for disassembly processes". *Computers & Industrial Engineering*, vol. 33, no. 1-2, pp. 329-332.
- Güngör, A. & Gupta, S. M. (2001). "Disassembly sequence plan generation using a branch-and-bound algorithm". *International Journal of Production Research*, vol. 39, no. 3, pp. 481-509.
- Ha, J.-S., Choi, S.-H., Shin, S.-Y., Chwa, K.-Y., Chang, S.-Y. & Woo, T. C. (1996). "On deciding 3D part disassemblability and surface machinability". *IIE Transactions*, vol. 28, no. 10, pp. 847-854.

- Haldar, A. & Mahadevan, S. (2000). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley & Sons, New York.
- Hao, J. P., Yu, Y. L. & Xue, Q. (2002). "A maintainability analysis visualization system and its development under the AutoCAD environment". *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, pp. 277-282.
- Heizer, J. & Render, B. (1999). "Managing Quality" in *Operations Management*, 5 edn, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Hoehmann, A. (1995). "Finding stable subassemblies with backtracking divide and conquer on strongly connected components". *IEEE International Conference on Robotics and Automation - Proceedings*, pp. 1599-1604.
- Homem de Mello, L. S. & Sanderson, A. C. (1990). "AND/OR Graph Representation of assembly Plans". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 2, pp. 188-199.
- Homem de Mello, L. S. & Sanderson, A. C. (1991). "A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 2, pp. 228-240.
- Hsu, H.-Y. & Lin, G. C. I. (2002). "Quantitative measurement of component accessibility and product assemblability for design for assembly application". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 18, pp. 13-27.
- Hu, J. M., Barker, D., Dasgupta, A. & Arora, A. (1992). "Role of Failure-Mechanism Identification in Accelerated Testing". *Annual Reliability and Maintainability Symposium - Proceedings*, pp. 181-187.
- Huang, W. & Askin, R. G. (2004). "A Generalized SSI Reliability Model Considering Stochastic Loading and Strength Aging Degradation". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 53, no. 1, pp. 77-82.
- Huang, Y. M. & Huang, C. T. (2002). "Disassembly matrix for disassembly processes of products". *International Journal of Production Research*, vol. 40, no. 2, pp. 255-273.
- Hugh, J. (2001). "Engineer on a Disk". <http://claymore.engineer.gvsu.edu/eod/>
- Huther, M. (2004). "Approche Probabiliste et Formulation Semi-probabiliste en Calcul de Fatigue". *SF2M'2004 - 23èmes Journées de Printemps ; Commission de Fatigue de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux - Méthodes fiabilistes en fatigue pour conception et essais*.
- Ichikawa, H., Tsurui, A., & Kimura, H. (1987). "Stochastic Fatigue Crack Growth Model and Its Wide Applicability in Reliability-based Design" in *Statistical Research on Fatigue and Fracture - Current Japanese Materials Research*, vol. 2 T. Tanaka, S. Nishijima, & M. Ichikawa, eds., Elsevier Applied Science and the Society of Materials Science, Japan, London, pp. 45-58.

- Ichikawa, M. (1987). "Probabilistic Fracture Mechanics Investigation of Fatigue Crack Growth Rate" in *Statistical Research on Fatigue and Fracture - Current Japanese Materials Research*, vol. 2 T. Tanaka, S. Nishijima, & M. Ichikawa, eds., Elsevier Applied Science and the Society of Materials Science, Japan, London, pp. 71-89.
- Inaba, A., Suzuki, T. & Okuma, S. (1994). "Feasibility study of disassembly task based on topological operations-consideration in 2-dimensional space". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems - Proceedings*, pp. 2131-2138.
- Inderfurth, K. & Teunter, R. H. (2001). "Production planning and control of closed-loop supply chains". *Econometric Institute Report*.
- Johnson, N. L., Kotz, S. & Balakrishnan, N. (1995). *Continuous Univariate Distributions*. John Wiley & Sons.
- Jung, B. (2003). "Task-level assembly modeling in virtual environments". Springer-Verlag, Montreal, Que., Canada, pp. 721-730.
- Kaplan, E. L. & Meier, P. (1958). "Non-parametric Estimation from Incomplete Observations". *Journal of the American Statistical Association* no. 53, pp. 457-481.
- Kececioglu, D. (1977). "Probabilistic design methods for reliability and their data and research requirements". *Failure Prevention and Reliability*, S. B. Bennett, A. L. Ross, & P. Z. Zemanick, eds., The American Society of Mechanical Engineers, Chicago, pp. 285-309.
- Kim, S.-H. & Ra, K.-W. (2000). "Adaptive Importance Sampling Method with Response Surface Technique". *PSAM 5 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, S. Kondo & K. Furuta, eds., Universal Academy Press, Tokyo, Japan, pp. 877-882.
- Kleiber, C. (2002). *Lorenz ordering of order statistics from log-logistic and related distributions*. Fachbereich Statistik, Universität Dortmund, Dortmund, Germany.
- Kreyszig, E. (1999). *Advanced Engineering Mathematics*. 8th edn, John Wiley & Sons, New York.
- Kroll, E., Beardsley, B. & Parulian, A. (1996). "A methodology to evaluate ease of disassembly for product recycling". *IIE Transactions*, vol. 28, no. 10, pp. 837-845.
- Kuo, T. C. (2000). "Disassembly sequence and cost analysis for electromechanical products". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 16, no. 1, pp. 43-54.
- Kuo, T. C., Zhang, H. C. & Huang, S. H. (2000). "Disassembly analysis for electromechanical products: a graph-based heuristic approach". *International Journal of Production Research*, vol. 38, no. 5, pp. 993-1007.
- Lambert, A. J. D. (2004). "Submitted - Generation of assembly graphs by systematic analysis of assembly structures". *European Journal of Operational Research*, vol. x, no. x, p. xx.

- Lambert, A. J. D. (1997). "Optimal disassembly of complex products". *International Journal of Production Research*, vol. 35, no. 9, pp. 2509-2523.
- Lambert, A. J. D. (2003). "Disassembly sequencing: a survey". *International Journal of Production Research*, vol. 41, no. 16, pp. 3721-3759.
- Lambert, A. J. D. (2002). "Determining optimum disassembly sequences in electronic equipment". *Computers & Industrial Engineering*, vol. 43, pp. 553-575.
- Lambert, A. J. D. (1999). "Linear programming in disassembly/clustering sequence generation". *Computers & Industrial Engineering*, vol. 36, pp. 723-728.
- Lambert, A. J. D. (2001). "Automatic Determination of Transition Matrices in Optimal Disassembly Sequence Generation". *IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning - Proceedings*, pp. 220-225.
- Le petit Robert (1993). *Dictionnaire de la langue française*. Dictionnaires Le Robert, Paris.
- Lee, D. H. & Xirouchakis, P. (2004). "A two-stage heuristic for disassembly scheduling with assembly product structure". *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55, no. 3, pp. 287-297.
- Lee, D. W., Chung, C. H. & Kim, C. L. (2000). "Parametric Uncertainty Analysis using Latin Hypercube Sampling in Risk Assessment of Deep Geological HLW Repository". *PSAM 5 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, S. Kondo & K. Furuta, eds., Universal Academy Press, Tokyo, Japan, pp. 1299-1303.
- Lee, K. & Gadh, R. (1998). "Destructive disassembly to support virtual prototyping". *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, vol. 30, no. 10, pp. 959-972.
- Lee, K. & Gadh, R. (1996). "Computer aided design for disassembly: a destructive approach". *IEEE, Piscataway, NJ, USA, Dallas, TX, USA*, pp. 173-178.
- Lee, S. (1994). "Subassembly identification and evaluation for assembly planning". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 24, no. 3, pp. 493-503.
- Lee, S. & Shin, Y. G. (1990). "Assembly planning based on subassembly extraction". *IEEE International Conference on Robotics and Automation - Proceedings*, pp. 1606-1611.
- Lee, S. & Yi, C. (1993). "Subassembly stability and reorientation". *IEEE International Conference on Robotics and Automation - Proceedings*, pp. 521-526.
- Lee, S., Yi, C. & Wang, F.-C. (1993). "Force-based reasoning for assembly planning and subassembly stability analysis". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems - Proceedings*, pp. 1582-1589.
- Lewis, E. E. (1987). *Introduction to Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, New York.

- Lewis, E. E. & Chen, H. C. (1994). "Load-capacity interference and the bathtub curve". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 43, no. 3, pp. 470-475.
- Lie, C. H., Hwang, C. L. & Tillman, F. A. (1977). "Availability of Maintained Systems: A State-of-the-Art Survey". *AIIE Transactions*, vol. 9, no. 3, pp. 247-259.
- Loftin, R. B. (2001). "Design Engineering in Virtual Environments". *Communications of the ACM*, vol. 44, no. 12, pp. 49-50.
- Lustig, I. J. & Puget, J. F. (2001). "Program Does Not Equal Program: Constraint Programming and Its Relationship to Mathematical Programming". *Interfaces*, vol. 31, no. 6, pp. 29-53.
- Mahadevan, S. & Ni, K. (2003). "Damage tolerance reliability analysis of automotive spot-welded joints". *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 81, no. 1, pp. 9-21.
- Mani, V., Das, S. K. & Caudill, R. (2001). "Disassembly complexity and recyclability analysis of new designs from CAD file data". *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment - Proceedings*, pp. 10-15.
- Marcelino, L., Murray, N. & Fernando, T. (2003). "A constraint manager to support virtual maintainability". *Computers & Graphics*, vol. 27, no. 1, pp. 19-26.
- Marcovici, C. & Ligeron, J. C. (1974). *Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique*. PIC Édition, Genève.
- Martz, F. H. & Waller, R. A. (1982). *Bayesian reliability analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- Masclé, C. & Balasoiu, B.-A. (2003). "Algorithmic selection of a disassembly sequence of a component by a wave propagation method". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 19, pp. 439-448.
- Mayer, R. J., Menzel, C. P., Painter, M. K., de Witte, P. S., Blinn, T. & Perakath, B. (1995). *IDEF3 Process Description Capture Method Report*. Knowledge Based Systems, Inc..
- Melchers, R. E. (1992). "Load-space formulation for time-dependent structural reliability". *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 108, pp. 853-870.
- Military Handbook - 189 (1981). *Reliability Growth Management*. Department of Defense, Washington, DC.
- Military Handbook - 472 (1984). *Maintainability Prediction - Notice 1*. Department of Defense, Washington, DC.
- Military Handbook - 472 (1966). *Maintainability Prediction*. Department of Defense, Washington, DC.
- Military Handbook - 791AM (1988). *Maintainability Design Techniques*. Department of Defense, Washington, DC.

- Military Standard - 471A (1975). *Maintainability Verification/Demonstration/Evaluation - Notice 1*. Department of Defense, Washington, DC.
- Military Standard - 471A (1973). *Maintainability Verification/Demonstration/Evaluation*. Department of Defense, Washington, DC.
- Moore, K. E. & Gupta, S. M. (1996). "Petri net models of flexible and automated manufacturing systems: a survey". *International Journal of Production Research*, vol. 34, pp. 3001-3035.
- Moore, K. E., Güngör, A. & Gupta, S. M. (2001). "Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships". *European Journal of Operational Research*, vol. 135, no. 2, pp. 428-449.
- Murayama, T., Oba, F., Abe, S. & Yamamichi, Y. (2001). "Disassembly sequence generation using information entropy and heuristics for component replacement". *IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning - Proceedings*, pp. 208-213.
- Murty, A. S. R., Gupta, U. C. & Radha Krishna, A. (1995). "A new approach to fatigue strength distribution for fatigue reliability evaluation". *International Journal of Fatigue*, vol. 17, no. 2, pp. 85-89.
- Nachlas, J. A., Binney, B. A. & Gruber, S. S. (1985). "Aging Acceleration under Multiple Stresses". *Annual Reliability and Maintainability Symposium - Proceedings*, pp. 438-440.
- Nakayasu, H. (1987). "Method of Pooling Fatigue Data and Its Application to the Data Base on Fatigue Strength" in *Statistical Research on Fatigue and Fracture - Current Japanese Materials Research*, vol. 2 T. Tanaka, S. Nishijima, & M. Ichikawa, eds., Elsevier Applied Science and the Society of Materials Science, Japan, London, pp. 21-43.
- Nakazawa, H. & Kodama, S. (1987). "Statistical S-N Testing Method with 14 Specimens: JSME Standard Method for Determination of S-N Curves" in *Statistical Research on Fatigue and Fracture - Current Japanese Materials Research*, vol. 2 T. Tanaka, S. Nishijima, & M. Ichikawa, eds., Elsevier Applied Science and the Society of Materials Science, Japan, London, pp. 59-69.
- Navin-Chandra, D. (1993). "ReStar: a design tool for environmental recovery analysis". *ICED'93 - International Conference on Engineerig Design - Proceedings*, pp. 780-787.
- Nelson, W. (1990). *Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans and Data Analysis*. Wiley-Interscience Publication, New York.
- Nof, S. Y. & Chen, J. (2003). "Assembly and disassembly: An overview and framework for cooperation requirement planning with conflict resolution". *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, vol. 37, no. 3, pp. 307-320.

- Paasch, R. K. & Ruff, D. N. (1997). "Evaluation of failure diagnosis in conceptual design of mechanical systems". *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 119, no. 1, pp. 57-64.
- Paloheimo, E. (1973). *Eine Bemessungsmethode, die Sich auf Variierende Fraktilen Grundet*. Arbeitstagung des Deutschen Betonvereins, Sicherheit Von Betonbauten, Berlin.
- Pathak, P. K., Singh, A. K. & Zimmer, W. J. (1991). "Bayes Estimation of Hazard & Acceleration in Accelerated Testing". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 40, no. 5, pp. 615-621.
- Paulin, C., Ville, F., Sainsot, P., Coulon, S. & Lubrecht, T. (2004). "Effet de la rugosité de surface sur la fatigue de contact en roulement : Approche théorique et expérimentale". *SF2M'2004 - 23èmes Journées de Printemps ; Commission de Fatigue de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux - Méthodes fiabilistes en fatigue pour conception et essais*.
- Pendola, M. (2000). *Fiabilité des structures en contexte d'incertitudes statistiques et d'écarts de modélisation*, Docteur d'université, Université Blaise Pascal - Clermont II, France.
- Pendola, M., Mohamed, A., Lemaire, M. & Hornet, P. (2000). "Combination of finite element and reliability methods in nonlinear fracture mechanics". *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 70, no. 1, pp. 15-27.
- Previtali, L. (2000). *Apport de l'ingénierie assistée par ordinateur à la validation de la fiabilité*, Renault - Direction de la Recherche.
- Proppe, C., Schuëller, G. I., Hartl, J. & Kargl, H. (2002). "Probabilistic design of mechanical components". *Structural safety*, vol. 24, pp. 363-376.
- Rackwitz, R. (2001). "Reliability analysis - a review and some perspectives". *Structural safety*, vol. 23, pp. 365-395.
- Rackwitz, R. & Fiessler, B. (1978). "Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences". *Computers and Structures*, vol. 9, no. 5, pp. 484-494.
- Rackwitz, R. & Fiessler, B. (1976). "Note on Discrete Safety Checking When Using Non-Normal Stochastic Models for Basic Variables". *Load Project Working Session*, MIT, Cambridge, MA.
- Rathery, S. (1999). *Note Technique n°64130-99-0133*, Renault DIMAT - Direction de l'Ingénierie des Matériaux.
- Reymond, G., Heidet, A., Canry, M. & Kemeny, A. (2000). *Validation of Renault's dynamic simulator for Adaptive Cruise Control experiments*, Renault - Direction de la Recherche - Groupe Perception et Simulation Véhicule.

- Richard, T. (2003). *Réalisation d'une AMDEC sur RELEX®*, Stage de fin d'études, Institut Universitaire de Technologie de Metz – Département de Génie Mécanique et Productique.
- Richir, S. (2001). "L'ingénieur entre dans l'ère du Virtuel". *Instantanés Techniques - Techniques de l'Ingénieur*, vol. 24.
- Ridder, C. & Scheidt, L. G. (1998). "Practical experiences in the Sony Disassembly Evaluation Workshop". IEEE, Piscataway, NJ, USA, Oak Brook, IL, USA, pp. 94-98.
- Roark, R. J. & Young, W. C. (1989). *Roark's formulas for stress and strain*. 6th edn, McGraw-Hill, New York.
- Rosenblatt, M. (1952). "Remarks on a Multivariate Transformation". *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 23, no. 3, pp. 470-472.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process : planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill, New York.
- Salomone, T. A. (1995). *What every engineer should know about Concurrent Engineering*. Marcel Dekker, New York.
- Satari, M., Aït-Kadi, D. & Zwingmann, X. (2003). *La conception probabiliste - Évaluation de la méthode des éléments finis*, Rapport technique, Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Canada.
- Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Schuëller, G. I. (2000). "Recent Software Developments for Structural Reliability Assessment". *PSAM 5 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, S. Kondo & K. Furuta, eds., Universal Academy Press, Tokyo, Japan, pp. 1229-1234.
- Sellgren, U. & Drogou, R. (1998). "A system and process approach to behavior modeling in mechanical engineering". *Royal Institute of Technology - KTH, Stockholm*.
- Shannon, C. E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication". *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423.
- Shimokawa, T. & Tanake, S. (1980). "A statistical consideration of Miner's rule". *International Journal of Fatigue*, vol. 2, no. 4, pp. 165-170.
- Shooman, M. L. (1990). *Probabilistic Reliability: An Engineering Approach*. 2nd edn, Robert E. Krieger Publishing Compagny, Malabar, Florida.
- Shyamsundar, N., Ashai, Z. & Gadh, R. (1998). "Geometry-based metric formulation and methodology to support virtual design for disassembly". *Engineering Design & Automation*, vol. 4, no. 1, pp. 13-26.
- Shyamsundar, N. & Gadh, R. (1996). "Selective disassembly of virtual prototypes". IEEE, Beijing, China, pp. 3159-3164.

- Siddique, Z. & Rosen, D. W. (1997). "A virtual prototyping approach to product disassembly reasoning". *Computer Aided Design*, vol. 29, no. 12, pp. 847-860.
- Sorel, A. (1999). *Note Technique n°64130-99-0772*, Renault DIMAT - Direction de l'Ingénierie des Matériaux.
- Srinivasan, H., Figueroa, R. & Gadh, R. (1999). "Selective disassembly for virtual prototyping as applied to de-manufacturing". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, no. 1, pp. 231-245.
- Srinivasan, H. & Gadh, R. (1998). "A geometric algorithm for single selective disassembly using the wave propagation abstraction". *Computer-Aided Design*, vol. 30, no. 8, pp. 603-613.
- Srinivasan, H. & Gadh, R. (2000). "Efficient geometric disassembly of multiple components from an assembly using wave propagation". *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, vol. 122, no. 2, pp. 179-184.
- Srinivasan, H. & Gadh, R. (2002). "A non-interfering selective disassembly sequence for components with geometric constraints". *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, vol. 34, no. 4, pp. 349-361.
- Stevenson, W. J. & Benedetti, C. (2001). "La conception de produits et services" in *La gestion des opérations - Produits et services*, Chenelière/Mc Graw-Hill, Montréal-Toronto, pp. 114-141.
- Sturges, R. H. J. (1989). "A quantification of manual dexterity: the design for an assembly calculator". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 6, no. 3, pp. 237-252.
- Suga, T., Saneshige, K. & Fujimoto, J. (1996). "Quantitative disassembly evaluation". *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment - Proceedings*, pp. 19-24.
- Suh, N. P. (1990). *The Principles of design*. Oxford University Press, New York.
- Sumitomo, T., Caceres, C. H. & Veidt, M. (2002). "The elastic modulus of cast Mg-Al-Zn alloys". *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 1, pp. 49-56.
- Suzuki, T., Kanehara, T., Inaba, A. & Okuma, S. (1993). "On algebraic and graph structural properties of assembly Petri net". *IEEE International Conference on Robotics and Automation - Proceedings*, pp. 507-514.
- Suzuki, T., Zanma, T., Inaba, A. & Okuma, S. (1996). "Learning control of disassembly Petri net - An approach with discrete event system theory". *IEEE International Conference on Robotics and Automation - Proceedings*, pp. 184-191.
- Syan, C. S. & Menon, U. (1994). *Concurrent engineering: concepts, implementation and practice*. Chapman & Hall, London.

- Tarelko, W. (1995). "Control model of maintainability level". *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 47, pp. 85-91.
- Tassinari, R. (1997). *Pratique de l'analyse fonctionnelle*. 2e edn, Dunod, Paris.
- Tseng, Y. J. & Liou, L. C. (2000). "Integrating assembly and machining planning using graph-based representation models". *International Journal of Production Research*, vol. 38, no. 12, pp. 2619-2641.
- Vidal, J.-C. (2000). *Note Technique n°64130-00-0192*, Renault DIMAT - Direction de l'Ingénierie des Matériaux.
- Vujosevic, R., Raskar, R., Yetukuri, N. V., Jothishankar, M. C. & Juang, S.-H. (1995). "Simulation, animation, and analysis of design disassembly for maintainability analysis". *International Journal of Production Research*, vol. 33, no. 11, pp. 2999-3022.
- Wang, J. F., Liu, J. H., Li, S. Q. & Zhong, Y. F. (2003). "Intelligent selective disassembly using the ant colony algorithm". *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM*, vol. 17, no. 4-5, pp. 325-333.
- Wang, J. F., Liu, J. H., Li, S. Q. & Zhong, Y. F. (2004). "A novel ant colony algorithm for assembly sequence planning". *Advanced Manufacturing Technology - Published online*.
- Wani, M. F. & Gandhi, O. P. (1999). "Development of maintainability index for mechanical systems". *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 65, no. 259, p. 270.
- Weibull.Com (2-1-2003). "Lognormal Distribution". http://www.weibull.com/AccelTestWeb/lognormal_distribution.htm
- Weisstein, E. W. (2004). "Algebraic Connectivity - MathWorld - A Wolfram Web Ressource". <http://mathworld.wolfram.com/AlgebraicConnectivity.html>
- Wen, Y. K. & Chen, H. C. (1989). "Systems reliability under time varying loads: I". *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 115, pp. 808-823.
- Wolter, J. D. (1991). "A combinatorial analysis of enumerative data structures for assembly planning". Publ by IEEE, Piscataway, NJ, USA, Sacramento, CA, USA, pp. 611-618.
- Wu, Y. T. & Wirsching, P. H. (1987). "New Algorithm for Structural Reliability Estimation". *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, vol. 113, no. 9, pp. 1319-1336.
- Xue, J. & Yang, K. (1997). "Upper & lower bounds of stress-strength interference reliability with random strength-degradation". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 46, no. 1, pp. 142-145.
- Yokobori, A. T. & Yokobori, T. (1987). "Characteristics of Fatigue and Time-dependent Fracture with Special Reference to the Range of Low Probability Failure" in *Statistical Research on Fatigue and Fracture - Current Japanese Materials*

Research, vol. 2 T. Tanaka, S. Nishijima, & M. Ichikawa, eds., Elsevier Applied Science and the Society of Materials Science, Japan, London, pp. 211-234.

Yonezawa, M. & Park, Y.-T. (2000). "Hypersphere Division Method for Normal Reliability Assessment of Structures with Non-Normal Distributions". *PSAM 5 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, S. Kondo & K. Furuta, eds., Universal Academy Press, Tokyo, Japan, pp. 1235-1240.

Zandin, K. B. (1980). *MOST® Work Measurement Systems*. Marcel Dekker, Inc., New York.

Zeghloul, A. (2002). "Concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture - Notes de cours". Université de Metz - DEA Matériaux-Mécanique-Structures-Procédés.

Zhang, Y. K., Zhang, X. R., Wang, X. D., Zhang, S. Y., Gao, C. Y., Zhou, J. Z., Yang, J. C. & Cai, L. (2001). "Elastic properties modification in aluminium alloy induced by laser-shock processing". *Materials Science and Engineering A*, vol. 297, no. 1-2, pp. 138-143.

Zou, X. (2004). "Modeling of Random Fatigue Crack Growth Lifetime". *PSAM 7 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, C. Spitzer, U. Schmocker, & V. N. Dang, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 1433-1439.

Zwingelstein, G. (1995). *La maintenance basée sur la fiabilité - Diagnostic et Maintenance*. Hermes.

Zwingmann, X. (2002). *Rapport Technique - Analyse Fonctionnelle d'un fauteuil roulant*, Rapport Technique, Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Canada.

Zwingmann, X. (2001). *Apport de l'ingénierie assistée par ordinateur à la validation de la fiabilité - Rapport final*, Non Publié, Renault - Direction de la Recherche.

Zwingmann, X., Aït-Kadi, D., Coulibaly, A. & Mutel, B. (2005). "Disassembly sequencing model for multi-component products". *IESM'05 - International Conference on Industrial Engineering and Systems Management - Proceedings*, I4e2 ASBL, Marrakech.

Zwingmann, X., Aït-Kadi, D., Mutel, B. & Coulibaly, A. (2004). "Taylor Series Finite Difference for Reliability Assessment at the Design Stage". *PSAM 7 - Probabilistic Safety Assessment and Management - Proceedings*, C. Spitzer, U. Schmocker, & V. N. Dang, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 1369-1374.

Annexes

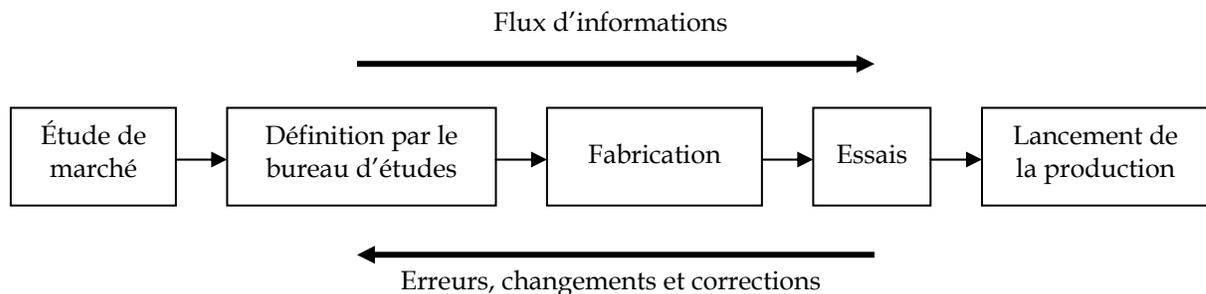
Annexe I. Le processus de conception

Annexe I.1 : Conception séquentielle et simultanée

La conception séquentielle

Traditionnellement, tout projet de conception est décomposé en un ensemble d'activités dont l'exécution ne tient pas forcément compte des activités subséquentes. Elles s'exécutent d'une manière séquentielle. La figure suivante présente la séquence des activités du début du cycle de vie et les flux d'informations. Le résultat d'une activité est documenté puis transféré aux activités suivantes.

Pour des projets de petite taille, impliquant une équipe restreinte, une communication informelle s'installe entre les divers intervenants, leur permettant de se consulter pour éviter les problèmes indus.



Le processus de conception linéaire - Syan & Menon (1994)

Pour des projets de plus grande envergure, impliquant plusieurs équipes spécialisées, la communication devient beaucoup plus difficile. Cela engendre des remises en question des décisions prises en amont et se traduit par des délais plus longs, sans pour autant garantir une meilleure qualité du produit fini et une satisfaction du client.

L'ingénierie concourante

Il s'agit d'une approche systématique d'élaboration de produits qui considère simultanément tous les éléments du cycle de vie, depuis la conception jusqu'à la fin du cycle de vie. Cette collaboration active entre les différents acteurs permet de coordonner leurs expertises, la connaissance des contraintes techniques propres à leurs métiers, etc. Ainsi, la conception définit simultanément le produit, son processus de fabrication, et tout autre processus nécessaire pendant le cycle de vie.

Cette approche est venue pallier les problèmes générés par la conception séquentielle (ou *over-the-wall*). Syan & Menon (1994) rapportent un certain nombre de leçons clés pour la réussite d'un projet exploitant les concepts de l'ingénierie concourante :

- sélectionner au plus tôt, et avec soin, les membres de l'équipe ;
- sélectionner les fournisseurs de composants et d'équipements assez tôt pour participer à tout le processus de conception ;
- prioriser la qualité du produit final en jalonnant le développement de tout composant par des objectifs de qualité ;
- impliquer les manufacturiers retenus pour le déploiement du produit dès la réalisation des prototypes pour fiabiliser la production ;
- valider les nouveaux processus dès ce stade, en fabriquant des pré-séries ;
- partager les informations issues du prototypage avec tous les intervenants, sans limiter la diffusion aux concepteurs ;
- favoriser les attitudes personnelles de communication plutôt que les outils informatiques et recourir, si nécessaire, à des séances d'entraînement aux travaux de groupe.

Annexe I.2 : Les méthodes de conception

L'ingénierie concourante est essentiellement inspirée du « bon sens ». Plusieurs méthodes rendent cette approche applicable. Nous en présentons quatre qui ont la particularité d'intervenir à différents stades du processus de conception. Elles ont pour objectif d'améliorer la prise en compte du besoin, de favoriser la création, d'optimiser la conception et de tenir compte des métiers. Cette liste n'est pas

exhaustive. Hugh (2001) propose, entre autres, la conception axiomatique, la technologie de groupe, l'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), l'analyse de la valeur et la simulation.

Le déploiement de la fonction qualité

Le déploiement de la fonction qualité (DFQ ou *QFD* pour *Quality Function Deployment*) est défini comme un outil traduisant les attentes du consommateur en actions à entreprendre et en ressources à développer pour répondre au besoin (Syan & Menon (1994)). Cet outil peut servir à planifier les activités de l'ingénierie concurrente et à considérer les attributs du produit en accord avec les attentes du consommateur.

Les systèmes de gestion des connaissances

Le concepteur a deux types de tâche : (1) les tâches routinières où il suit un processus qui lui est familier et qui n'exige pas, de sa part, un grand investissement ; (2) les tâches de création où il réfléchit à nouvelles façons de concevoir le produit.

Traditionnellement, ce sont les tâches routinières et la résolution de problèmes classiques qui accaparent la majeure partie du temps. Le système de gestion des connaissances (*KBE* pour *Knowledge-Based Engineering systems*) a pour objectif d'automatiser les tâches routinières et, ainsi, laisser du temps pour la créativité.

Les techniques expérimentales

Ces techniques sont utilisées pour déterminer la sensibilité du produit aux variations des différents facteurs considérés lors de la conception. Salomone (1995) cite plusieurs de ces méthodes qui s'apparentent à la conception robuste proposée par Taguchi (*Robust Design*) : *Pugh process, Experimental Design Techniques, Design Stress Analysis*.

Le principe consiste à identifier un certain nombre de paramètres qui caractérisent le produit. Les valeurs de ces paramètres sont changées selon un nombre limité et adéquat de plans d'expériences. Les résultats de ces essais orientent les choix du concepteur pour atteindre un objectif de performance donné, par exemple rendre les produits moins sensibles aux variations dues au processus de fabrication.

La conception pour X

Lors de la conception, on se concentre bien souvent sur le produit final, sans penser à la fabrication. La philosophie de la conception pour X (*DfX* pour *Design for X*) a pour ambition de concevoir en intégrant les contraintes et le savoir-faire des métiers X. Par exemple, on parle de *DfM* pour *Design for Manufacturability*, de *DfA* pour *Design for Assembly*, de *DfR* pour *Design for Reliability*, de maintenabilité (ou *DfM* pour *Design for Maintainability*), de recyclage (ou *Design for Reuse*), etc.

Le *DfX* prend la forme de simples règles de conception (lignes directrices, bonnes pratiques, ...etc.). Pour concevoir des produits dont l'assemblage sera facile (*DfA*), le manuel de Boothroyd & Dewhurst (1991) propose un certain nombre de principes tels que : minimiser (les pièces, attaches, mouvements d'assemblage), aider (par un alignement naturel, des formes d'orientation non ambiguës) et éviter (gêne visuelle, opérations simultanées).

Les règles de conception regroupent un ensemble de solutions connues et éprouvées. Leur application n'est généralement pas accompagnée de procédures d'application systématiques et bien définies. C'est pourquoi il existe des techniques d'analyse pour évaluer les solutions de manière quantifiée. Dans le domaine de l'assemblage toujours, la compagnie Boothroyd Dewhurst, Inc. (2002) a mis sur le marché la version 2 de *DFMA* (*Design For Manufacture and Assembly - Concurrent Costing software*) qui structure l'analyse des coûts d'assemblage et de fabrication, tant pour des produits mécaniques qu'électriques.

Annexe I.3 : Les outils de la conception

Si les techniques de conception offrent des outils informatiques dédiés, il existe des outils plus généraux qui viennent soutenir le processus de conception.

Les outils de communication

Pour des projets de petite taille, il est possible à un seul concepteur de maîtriser l'ensemble des facettes de son produit. Par contre, pour des projets de plus grande taille, des équipes de plusieurs personnes sont confrontées à des difficultés de communication intrinsèques.

Salomone (1995) a recensé plusieurs outils de communication : les bases de données, les serveurs/clients CAO, les outils de partages, les Système de Gestion des Données Techniques (SGDT), etc. Ces derniers viennent collaborer avec les outils informatiques traditionnels en Conception, Ingénierie et Fabrication Assistées par Ordinateur (CAO, IAO et CFAO).

Le prototypage rapide

Le prototypage rapide désigne différents procédés permettant de restituer physiquement des objets 3D, décrits par leurs données CAO. Bien souvent, il se fait par apport itératif de matière (soit point par point, soit couche par couche), par opposition aux techniques d'usinage qui procèdent par enlèvement de matière (évariste (1996)). Parmi les techniques les plus connues, on retrouve l'agglomération sélective par laser, la stéréolithographie (création d'un objet tridimensionnel par dépôts successifs de fines couches), etc.

Le prototypage rapide permet de détecter les problèmes qui ne pouvaient habituellement être constatés qu'après la fabrication. Selon les matériaux employés, le prototype peut être utilisé pour valider la conception ou réaliser des tests fonctionnels, avant l'industrialisation et le lancement sur le marché.

Réalité virtuelle

La réalité virtuelle est une technologie qui vise à créer des environnements qui simulent le monde naturel, ou un monde imaginaire, et qui donnent à l'utilisateur l'impression de la réalité. Elle est utilisée pour ses propriétés d'immersion de l'utilisateur et d'interaction avec le produit virtuel dans un environnement virtuel (Richir (2001)).

Le défi industriel du prototypage virtuel permet un travail collaboratif entre concepteur, testeur ou client. Elle évite la réalisation de prototypes ou de maquettes réels, longs et onéreux à fabriquer, et permet la variation rapide des paramètres du produit pour l'améliorer en tenant compte de critères subjectifs.

Annexe II. Réalisation d'une analyse fonctionnelle

Annexe II.1 : Recensement des fonctions

Divers outils existent et se complètent pour mener une analyse fonctionnelle. La méthode RÉSEAU (Tassinari (1997)) identifie les fonctions qu'un produit doit satisfaire en employant successivement plusieurs techniques, pour un recensement le plus exhaustif possible, selon le plan suivant :

1. Recherche intuitive ;
2. Étude du cycle de vie et de l'environnement ;
3. *Sequential Analysis of Functional Elements (SAFE)* ;
4. Examen des mouvements et des efforts ;
5. Analyse d'un produit de référence ;
6. Utilisation des normes et des règlements.

Annexe II.2 : Organisation des fonctions selon la méthode FAST

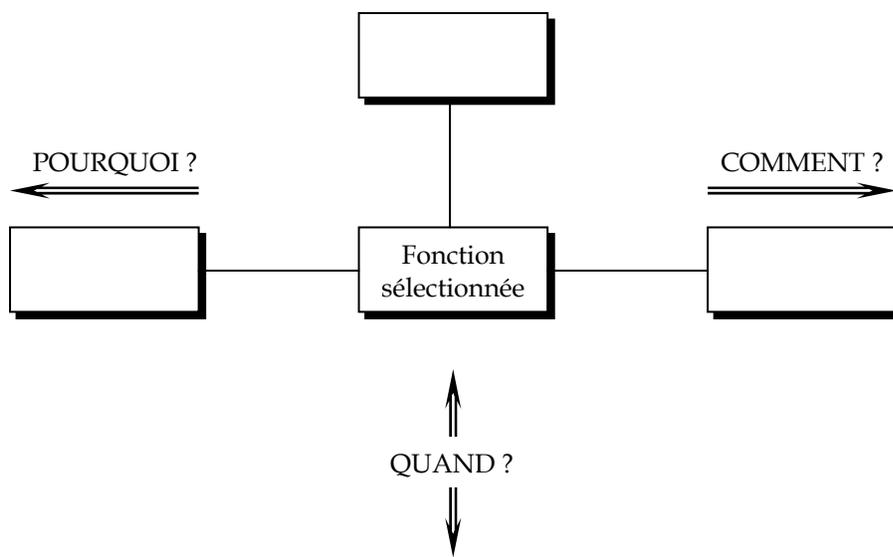
Pour rendre l'analyse fonctionnelle compréhensible, les fonctions recensées doivent être ordonnées selon un ordre logique. La méthode FAST (pour *Functional Analysis System Technique*), imaginée par Charles W. Bitheway, répond aux objectifs suivants :

- ordonner les fonctions identifiées ;
- vérifier la logique fonctionnelle ;
- contrôler l'exhaustivité de l'analyse fonctionnelle ;
- préfigurer le produit à travers sa logique fonctionnelle.

Les fonctions sont représentées sur un diagramme dont la partie centrale concerne le champ du problème à traiter. La figure ci-dessous illustre la logique de construction et de lecture du mode de présentation choisi.

On passe d'une fonction à l'autre, de la gauche vers la droite en se posant la question **comment** (est-elle réalisée), et de la droite vers la gauche en se posant la question **pourquoi**. La ou les fonctions essentielles sont toujours placées à gauche sur le diagramme. Les fonctions indispensables dans la conception du produit,

mais qui ne sont pas l'expression du service rendu, apparaissent en série à la droite des fonctions essentielles et constituent **le chemin fondamental** ou critique des fonctions. Au-dessus ou au-dessous d'une fonction, on place les fonctions qui se produisent tout le temps, ou en même temps qu'elle (on se pose la question **quand**).

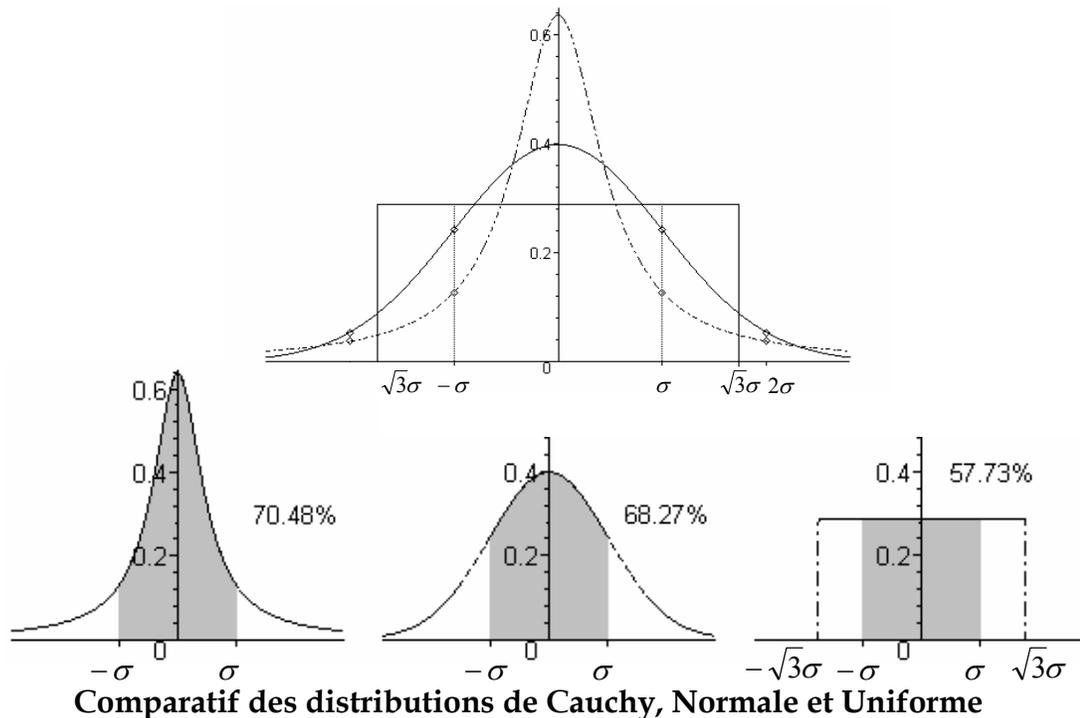


Annexe III. Quelques fonctions de distribution

Loi	Fonction de densité	Paramètres	Utilisation
Uniforme	$f(x) = \begin{cases} 1/b - a & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$	$\mu = \text{Nom.} ;$ $\sigma = \frac{b - a}{2\sqrt{3}} .$ Ainsi (Shooman (1990)), $a = \text{Nom.} - \text{Tol.} ;$ $b = \text{Nom.} + \text{Tol.} ;$ $\text{Tol.} = \sigma \cdot \sqrt{3} .$	Cette loi est souvent utilisée en raison de sa grande simplicité. Elle prédit une probabilité uniforme dans l'intervalle [a,b] (e.g. valeur d'une résistance de précision, Shooman (1990)).
Exponentielle	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ $0 \leq x \leq \infty$	$E = \lambda ;$ $\sigma = \lambda .$	Elle est très utilisée pour les durées de vies (e.g. composants électroniques, Shooman (1990)). On ne l'utilise pas pour modéliser les composants mécaniques des fauteuils.
Normale	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu = \text{Nom.} ;$ $\sigma .$	Cette loi traduit un phénomène qui peut être considéré comme la somme de plusieurs petits effets (Lewis (1987)). Elle est très utilisée pour modéliser les durées de vie lorsqu'un temps moyen d'usure peut être défini (e.g. outil de découpe, Lewis (1987)).
Cauchy	$f(x) = \frac{1}{\pi b \left(1 + \left(\frac{x-a}{b} \right)^2 \right)}$	Pas de moyenne ; Variance infinie. Médiane a ; Dispersion b.	La loi de Cauchy est comparée à la loi normale et uniforme sur la figure de la page suivante (Shooman (1990)). Sur cette figure, elle est beaucoup moins étalée que la loi normale. Pour des raisons pratiques, lors de la modélisation d'un tel comportement dans nos travaux, nous lui préférons une loi normale avec un écart type divisé par 2 pour réduire l'étalement.

Loi	Fonction de densité	Paramètres	Utilisation
Log-normale	Soit, $x' = \ln x$; μ' : moyenne des logarithmes naturels ; σ' : écart type des logarithmes naturels. X suit une loi log-normale si X' suit une loi normale :	$\mu = \text{Nom.}$; σ . D'après Weibull.Com (2003), $\mu = e^{\mu' + \frac{1}{2}\sigma'^2}$; $\sigma = \sqrt{\frac{e^{2\mu' + \sigma'^2}}{(e^{\sigma'^2} - 1)}}$. Ainsi, $\mu' = \ln \mu$ $-\frac{1}{2} \ln\left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1\right)$; $\sigma' = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1\right)}$	Cette loi est utilisée si le phénomène peut être considéré comme le produit de plusieurs petits effets (Lewis (1987)). On l'emploie souvent pour modéliser le vieillissement (Lewis (1987)).
		$f(x') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x' - \mu')^2}{2\sigma'^2}}$	

La figure suivante montre les différents comportements des distributions employées pour modéliser les dispersions de la géométrie des fauteuils roulants. Ces distributions normalisées sont tirées de Shooman (1990).



Pour la loi normale, la valeur moyenne $\mu = 0$ et l'écart type $\sigma = 1$. Pour la loi uniforme, la valeur moyenne est nulle ($b = -a$) et l'écart type $\sigma = b - a / 2\sqrt{3} = 1$ où b et a sont les bornes de la distribution. Pour la loi de Cauchy, la médiane est nulle ($m = 0$) et l'écart type $\sigma = 2\alpha = 1$ où α est la dispersion de la loi. Si on considère que ces distributions traduisent la variabilité d'une dimension d'une pièce, le pourcentage indiqué sur les graphiques individuels correspond au pourcentage des pièces d'un échantillon dont la dimension mesurée est dans l'intervalle $\mu \pm \sigma$.

Annexe IV. Outils reliés à l'analyse de la fiabilité

Annexe IV.1 : Analyse de données et durées de vie

Stat::fit[®] de Geer Mountain Software Corp. (2004) est un outil très utile pour identifier la distribution qui correspond, entre autres, à des durées de vie. La version 2 permet l'identification, manuelle ou automatique, parmi 32 distributions. L'estimation des paramètres se fait par le calcul des moments ou du maximum de vraisemblance. Le choix de la distribution qui ajuste au mieux les données est basé sur des lois du moindre carré, Kolmogorov-Smirnov ou Anderson-Darling.

Weibull++[®], de Reliasoft Corp. (2004), dispose des mêmes fonctionnalités mais orientées vers l'analyse des durées de vie. Ainsi, pour les représentations statistiques descriptives (moyennes, écart-types) et graphiques (histogrammes, fonctions de densité, etc.), il utilise le langage de la fiabilité (MTBF, taux de panne). La version 6 est capable d'analyser les données censurées.

Également dans la suite logicielle *Reliasoft Office*, le logiciel RGA[®] (*Reliability Growth Analysis*) permet de traiter les données issues de tests sur le produit en cours de développement. Ce logiciel n'a pas pu être testé, contrairement à Weibull++[®] et BlockSim[®], mais il est sensé intégrer plusieurs modèles d'analyse de la fiabilité en développement : Crow-AMSAA (N.H.P.P.), Duane, Gompertz standard, Lloyd-Lipow, Gompertz modifié, logistique, etc. Il doit également permettre d'aider à planifier les tests à effectuer : stratégies *test-fix-test*, *test-find-test* ou *test-fix-find-test* et intègre un coefficient d'efficacité pour chacune des modifications apportées pour prévoir jusqu'où la fiabilité pourra être améliorée.

Annexe IV.2 : Modules de calculs de la fiabilité pour des structures complexes

Dans RELEX[®], il existe un module spécifique au calcul de la fiabilité pour les structures complexes. La structure du produit est modélisée par un schéma de blocs représentant les différents composants. Des propriétés de fiabilité (*pdf* des durées de vie, taux de panne ou *MTBF*) et des propriétés de maintenance sont associées à chacun des blocs. Le logiciel est alors capable de calculer, entre autres, la fiabilité et la disponibilité de la structure.

BLOCKSIM[®], de Reliasoft Corp. (2004), dispose des mêmes capacités que le module de RELEX avec quelques améliorations. Un bloc fait référence à un composant, mais il est également capable de faire référence à un schéma bloc prédéfini (à partir de plusieurs composants) dont il hérite alors les propriétés globales de fiabilité et de disponibilité.

RELEX[®] possède également un module pour effectuer des analyses de Markov. Basé sur une interface graphique intuitive pour définir le diagramme de transitions, ce module est capable de mesurer les paramètres de chaque état (en régime permanent et transitoire) et de produire un rapport.

Il s'agit là de logiciels commerciaux qui se suffisent à eux même, mais on peut également trouver des bibliothèques de routines menant aux mêmes résultats et facilement intégrables dans un environnement en développement. Basile *et al.* (2003b) ont développé deux librairies MATLAB, *Reliabilitix* et *Simulatrix*, qui permettent de déterminer la fiabilité d'un système modélisé sous forme d'un schéma blocs décrivant le rôle fonctionnel de ses composants. *Reliabilitix* estime la fiabilité *a priori* (à partir des lois statistiques de fiabilité des composants). Quant à *Simulatrix*, il estime la fiabilité *a posteriori* (à partir des historiques des défaillances des composants). Les distributions des différents composants sont générées par la méthode de Monte Carlo et les paramètres de la fonction de fiabilité sont identifiés

par la méthode de régression ou le maximum de vraisemblance (Basile *et al.* (2003a)).

Annexe IV.3 : Module de support méthodologique pour l'AMDEC

Le logiciel RELEX[®], de Relex Software (2004), propose deux modules capables d'aider le concepteur à créer une AMDEC ou des arbres de défaillances. Dans le mode AMDEC, les modes de défaillance s'appliquent aux les composants comme aux fonctions du produit et les analyses peuvent être produites selon différents standards prédéfinis : MIL-STD-1629, SAE ARP5580 et les formats de plusieurs grandes compagnies (Ford, Chrysler, GM, SAE, AIAG FMEA, etc.).

Dans le mode arbre de défaillance, il y a une recherche déductive des défaillances pouvant conduire à l'événement indésirable : la défaillance du produit. Différentes combinaisons (OR, AND, k parmi n , XOR, NAND, etc.) sont implémentables entre les différentes défaillances. Ainsi, connaissant les probabilités d'occurrence des défaillances élémentaires, le logiciel est capable d'identifier la probabilité de défaillance ou d'occurrence de l'événement indésirable.

Annexe V. Modèles de dommage cumulé

Nous allons commencer par décrire le processus stochastique de dommage cumulatif de façon discrète et stationnaire (Annexe V.1), puis nous présentons le processus pour des phénomènes continus dans le temps, tel que la propagation de la rupture (Annexe V.2). Il existe des extensions pour les phénomènes non stationnaires.

Annexe V.1 : Modélisation markovienne du dommage cumulé par chocs successifs

Le modèle de Bogdanoff & Kozin (1985) est un modèle macroscopique qui repose sur la base des chocs mécaniques comme source du dommage cumulatif. Ils considèrent un cycle de travail (*DC* pour *Duty Cycle*) comme une période répétitive d'opération durant laquelle le dommage est susceptible de s'accumuler. Le temps x est mesuré par le nombre de cycles. Ils supposent également que le dommage est discret, avec les états markoviens $d = 1, 2, \dots, b$, où b représente soit un remplacement nécessaire, soit une défaillance (b représente l'état absorbant). Cette approche se retrouve également sous le nom de *B-model*.

Partant de l'état $d = 1$ à $x = 0$, un choc peut survenir pendant le cycle. Si le choc est en deçà d'un seuil critique, aucun dommage n'est cumulé (le système ne change pas d'état). Par contre, si le seuil est dépassé, une unité de dommage est acquise. En associant des probabilités à chaque transition entre les états, le phénomène de dommage peut être modélisé par les chaînes de Markov. Les hypothèses sont les suivantes :

- le cycle de travail est répétitif et constant ;
- les états de dommage sont discrets et notés $1, 2, \dots, j, \dots, b$ (défaillance) ;
- l'accumulation du dommage dépend seulement du cycle de travail et de l'état du dommage au début de ce cycle
- le dommage peut seulement augmenter durant un cycle, de l'état occupé au début de ce cycle à l'état supérieur d'une unité.

Considérons que le dommage est entré dans l'état j , soit p_j et $q_j = 1 - p_j$ respectivement la probabilité qu'un choc ne dépasse pas le seuil critique sachant que le dommage initial est dans l'état j ($j = 1, 2, \dots, b-1$) et la probabilité qu'un choc dépasse le seuil critique, sachant que le composant est dans l'état j . Ainsi, les probabilités p_j et q_j sont conditionnelles, mais indépendante de x (le nombre de cycles) : le modèle est stationnaire, indépendant du temps.

En continuant la récurrence, le dommage augmente, unité par unité, jusqu'à ce que le modèle stoppe à cause d'une défaillance ou d'un remplacement. Les outils mathématiques associés aux chaînes de Markov permettent ainsi de calculer la probabilité de se retrouver dans chacun des états de dommage, de l'état initial à la rupture.

Annexe V.2 : Modélisation markovienne de la propagation des ruptures

Dans cette modélisation microscopique, le principe de tolérance au dommage consiste à dimensionner les structures en tenant compte de la présence des fissures et en tolérant leur propagation de la taille initiale à une taille admissible (Ichikawa *et al.* (1987), Zou (2004)).

Ichikawa *et al.* (1987) utilisent la modélisation markovienne afin de prendre en compte la distribution spatiale de la résistance. La taille de la fissure est déterminée par la loi de Paris-Erdogan. Les états markoviens correspondent aux différentes longueurs de la fissure. La résolution du modèle conduit à résoudre une équation de Fokker-Planck généralisée pour obtenir la distribution de la taille de la fissure dans le temps. Sans rentrer plus dans le détail de la modélisation, nous présentons le principe de base des analyses de tels mécanismes de rupture.

Loi de Paris et progression des fissures

La loi de Paris est une formule largement utilisée pour connaître la vitesse de fissuration da/dN de la fissure à l'instant de sa découverte.

$$\frac{da}{dN} = C.(\Delta K)^m \quad (\text{V.1})$$

Où a est la taille de la fissure, N le nombre de cycles, C et m les constantes de Paris, et ΔK le facteur d'intensité de contrainte.

Introduction de la variabilité pour une modélisation probabiliste

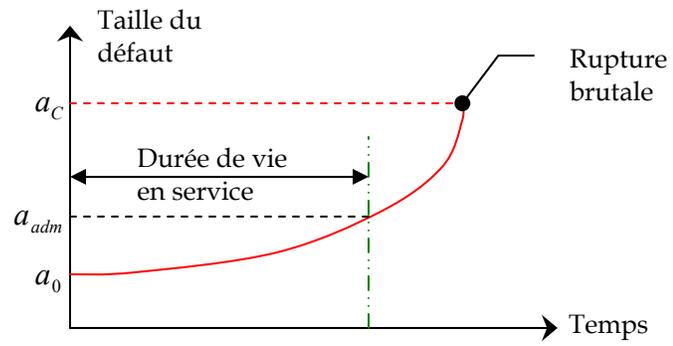
La méthode la plus directe consiste à transformer les constantes C et m en variables aléatoires. Ichikawa (1987) considère deux approches. L'introduction d'une variabilité inter-spécimens et intra-spécimens. Dans le premier cas, C et m sont tenues constantes au sein d'un même spécimen, mais sont différentes entre spécimens. La différence introduite dans le second cas tient dans la variation de C au sein d'un même spécimen (m est gardée constante).

Mesure et critère de défaillance

À l'aide de la méthode des éléments finis, il est possible de mesurer l'évolution d'une fissure. Proppe *et al.* (2002), entre autres, utilisent cette approche pour calculer la fiabilité d'une pièce avec COSSAN™. L'équation (V.2), obtenue à partir de l'équation (V.1), illustre comment la durée de vie N est déterminée à partir de la loi de Paris en fonction de la mesure du défaut et d'un seuil limite donné.

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C.(\Delta K)^m} \quad (\text{V.2})$$

Où a_0 est la taille initiale du défaut et a_c sa taille critique. Pour la durée de service, l'intégration peut s'arrêter à la taille admissible du défaut a_{adm} .



Progression de la taille des fissures

Annexe VI. Les outils CAO industriels

Annexe VI.1 : Les catégories d'outils de la conception de produit

On présente ici une liste d'outils disponibles dans les environnements de conception modernes. Le tableau suivant est tiré de Salomone (1995). On reporte ensuite, à partir des travaux de Previtali (2000) et Zwingmann (2001), certains outils industriels entrant dans ces catégories (Annexe VI.2 à Annexe VI.5).

Outils de développement mécanique - CAO,	Conception électronique CEAO - IAO
IAO	Saisie du routage
CAO 2D	Simulation
CAO 3D	Optimisation logique et analyse
Maillage de surface	Partition de la conception et sélection automatique des composants
Modèles solides	Librairies de composants
Types de modeleurs solides	Saisie détaillée du routage
Modèle explicite	Conception de la carte
Modèle paramétrique	Intégrité du signal
Modèle variationnel	Génération du processus de fabrication
Modèle basé sur les formes (<i>features</i>)	
Détail	Outils génériques - Base de données
Analyse par éléments finis	Bibliothèques d'information
Analyse dynamique	Bibliothèques de pièces
Outils de rendu	Mise en réseau
Bibliothèques informatiques	
Feuilles de calcul	Outils commerciaux
Analyse thermique	Dialogue automatique avec les contacts
Optimisation de la conception	
Fabrication - FAO, IAO	Outils d'équipe
Assemblage électronique	Courrier électronique
Analyse des tolérances	Fichiers de notes
Simulation de coulée dans les moules	Gestion des données du produit
Analyse de l'assemblage	Gestion de tâches
Programmation/simulation des machines à commande numérique	Cadre de travail
Pliage des tôles	
Prototypage rapide	Communication
Simulation des processus	Serveur/client CAO
Stockage des fichiers des processus de fabrication	
Techniques d'assemblage	
Base de données de connaissance	
Analyse du contrôle de la qualité	
Génération de plan de tests	

Annexe VI.2 : Définition de la structure mécanique

Dans le domaine de la conception 3D, il existe de nombreuses propositions commerciales, des versions les plus simples aux plus complètes, telles que CATIA® (Dassault Systèmes (2004)), ProEngineer® (PTC/Parametric Technology Corporation (2004)), SolidWork® (SolidWorks Corp. (2004), une division de Dassault Systèmes), SolidEdge® (EDS/Electronic Data System Corp. (2004)), AutoCAD® (Autodesk Inc. (2004)), etc.

Annexe VI.3 : Le calcul des efforts

Calcul des efforts externes sur la structure

Dans le domaine automobile, le comportement routier du véhicule peut être reproduit par des simulations, réalisées par des logiciels prenant en charge les produits multicorps. Le tableau ci-dessous présente quelques-uns de ces logiciels, dits multi-corps :

Produits	Développeurs	Fonctions
Adams®	MSC Software Corp. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • Simule le comportement dynamique d'un véhicule, le bruit, l'endurance. • Comporte 19 modules, propres aux châssis, aux pneus, aux vibrations, etc.
TecWare/MBS®	LMS International (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse et fait la synthèse des efforts au sein d'un assemblage, en particulier pour des charges multi-axiales. • Extrapole des scénarios d'utilisation client à partir de l'usage fait par un percentile d'utilisateurs donné.
MADA	Renault, INRETS, PSA (Reymond <i>et al.</i> (2000))	<ul style="list-style-type: none"> • Simule le comportement d'un véhicule en utilisant le modèle ARHMM (<i>Advanced Road Handling Multi-body Model</i>). • Permet d'intégrer des données réelles mesurées sur le véhicule pour la validation des calculs.

Calcul des contraintes internes et des déformations

Certains outils permettent l'analyse de pièces à géométrie complexe sous divers chargements par la méthode des éléments finis (*FEM* pour *Finite Element Method*) :

Produits	Développeurs	Fonctions		
		Maillage	Calcul EF	Post-traitement
Abaqus®	Hibbett Karlsson & Sorensen Inc. (2004)	•	•	•
Hypermesh®	Altair Engineering Inc. (2004)	•		
I-DEAS®	Structural Dynamics Research Corp. une division de EDS/Electronic Data System Corp. (2004)	•	•	•
MSC/Nastran®	MSC Software Corp. (2004)	•	•	
MSC/Patran®				•

ANSYS® est un des rares logiciels commerciaux qui intègrent les éléments finis stochastiques. Ainsi, il permet d'associer des lois de probabilités aux paramètres du matériau et d'effectuer des simulations de Monte Carlo (Satari *et al.* (2003)). La plupart du temps, ce sont des fonctionnalités développées en interne dans les laboratoires de recherche universitaires.

ANSYS® ParaMesh permet de modifier directement les paramètres du modèle éléments finis du produit. Cela est particulièrement efficace puisqu'il n'est pas nécessaire de retourner au fichier CAO pour le modifier, ré-effectuer l'opération de maillage et, enfin, relancer les calculs. De ce fait, les modifications peuvent être apportées plus rapidement, ce qui facilite les opérations d'optimisation, les plans d'expériences, etc. Le module ParaBatch permet d'effectuer ces opérations sans intervention de l'utilisateur. ANSYS® peut alors être couplé avec d'autres logiciels d'optimisation comme ISIGHT® et OPTIMUS® qui vont s'occuper des itérations de conception.

Annexe VI.4 : Un environnement de conception intégré

Les logiciels multi-fonctionnels

De plus en plus, les logiciels de CAO actuels ne se contentent plus d'offrir une simple représentation 3D des pièces, avec la mise en plan associée. Ils s'allient également avec des modules de calculs performants et permettent même d'effectuer l'optimisation des formes.

Par exemple, Pro/Engineer Wildfire® s'allie avec le module Pro/Engineer® Simulation® pour effectuer des calculs par éléments finis en statique et en fatigue, tout comme SolidWorks® et COSMOSWorks® (éléments finis). De même, les versions 14 et ultérieures de SolidEdge® permettent de travailler avec ISIGHT® pour effectuer des itérations numériques.

Les logiciels passerelles pour effectuer des itérations améliorant la conception

Dans le processus de conception, les itérations successives permettent d'optimiser la conception à partir d'objectifs fixés par le bureau d'études (valeur de la durée de vie, contraintes maximales, etc.). Avant de passer aux essais physiques sur bancs d'essai, ces boucles numériques, qui consistent à faire varier les paramètres importants du système à chaque itération, peuvent être réalisées par des logiciels dédiés. Ces derniers ont pour intérêt d'automatiser les cycles d'itération, plus précisément l'exécution des différents codes de calcul (selon un pas donné, selon un plan d'expérience, etc.) et de gérer les échanges de données entre les programmes de simulation :

Produits	Développeurs	Fonctions
BOSS Quattro®	Groupe Samtech (2004)	<ul style="list-style-type: none"> Intègre un ensemble d'outils, allant de l'analyse paramétrique à l'optimisation totalement automatisée, en passant par l'analyse statistique, les plans d'expérience, les surfaces de réponse et le recalage de modèles sur des données expérimentales
ISIGHT®	Engineous Software Inc. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> Permet une forte intégration avec les autres logiciels de calcul, leur apportant un large spectre de fonctionnalités : dispersions, plans d'expérience, fiabilité, etc. Permet le développement d'applications spécifiques à différents corps de métier.
LMS Virtual.Lab® basé sur OPTIMUS®	LMS International (2004)	<ul style="list-style-type: none"> Utilise les simulations de Monte Carlo et la méthode <i>FOSM</i> (<i>First Order Second Moment</i>) pour prendre en compte la variabilité des paramètres dans les processus d'optimisation. Évalue la réponse non déterministe (fiabilité, robustesse) du système en fonction des tolérances de la conception.

Annexe VI.5 : Les outils spécifiques à la fiabilité

La plupart des outils développés spécifiquement pour la fiabilité sont issus des travaux d'un laboratoire de recherche. D'une manière générale, ce type d'outil est moins répandu dans le commerce mais certains outils ont atteint la maturité nécessaire à une mise sur le marché.

En France, la société Phimeca Engineering S.A. (2004) valorise les travaux réalisés par l'équipe du Laboratoire de Recherches et Applications en Mécanique Avancée (LaRAMA) dirigée à l'Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA) par le Professeur M. Lemaire¹¹. Les outils développés traitent essentiellement de la mécanique probabiliste des structures. Dans le module fiabilité, deux types de méthodes sont implémentés :

¹¹ Le directeur de Phimeca a effectué sa thèse de doctorat (Pendola (2000)) avec le professeur M. Lemaire.

- Les méthodes de simulation aléatoires (six au total) permettent l'estimation de la probabilité de défaillance du système. L'analyse de distribution permet de connaître le comportement statistique de la réponse mécanique du système.
- Les méthodes d'optimisation : alors que les méthodes directes calculent la valeur de l'état limite en fonction des besoins de l'algorithme, les méthodes de surface de réponse construisent une approximation de la réponse qui va servir aux calculs fiabilistes.

Les résultats fiabilistes sont : l'indice de fiabilité, la probabilité de défaillance au premier et au second ordre, les facteurs d'importance et la configuration de défaillance la plus probable.

En Belgique, le Laboratoire de Techniques Aéronautiques et Spatiales de l'Université de Liège, plus particulièrement l'équipe travaillant sur les Milieux continus & thermomécanique sous la direction de J.P. Ponthot, a développé le logiciel METAFOR® (2004) pour l'analyse non linéaire des systèmes à grandes déformations. L'intérêt de ces travaux réside dans l'utilisation, depuis 2001, de la plateforme *oofelie* (*Object Oriented Finite Element Led by Interactive Executor*). Il s'agit d'une plateforme que la communauté scientifique peut enrichir car elle est développée par Open Engineering SA (2004) selon des principes semblables à ceux du logiciel libre.

En Autriche, l'*Institute of Engineering Mechanics* (IfM (2004)), de l'Université Leopold Franzens à Innsbruck en Autriche, a développé deux logiciels spécifiques à l'analyse de la fiabilité, sous la direction de son directeur G.I. Schuëller¹² :

- COSSAN™ (pour *Computational Stochastic Structural Analysis*) est dédié à l'analyse structurelle, prenant en compte les incertitudes statistiques de différents paramètres (charge, géométrie, etc.). Les résultats traitent, entre autres, la quantification des incertitudes de la réponse de la structure. Son utilisation dans un contexte de conception probabiliste est présentée dans Proppe *et al.* (2002).

¹² Il propose un bilan des outils récents dans le domaine de la conception probabiliste dans Schuëller (2000).

- ISPUD™ (pour *Importance Sampling Using Design Points*) permet de calculer la probabilité de défaillance d'une structure en utilisant les simulations de Monte Carlo et les facteurs d'importance.

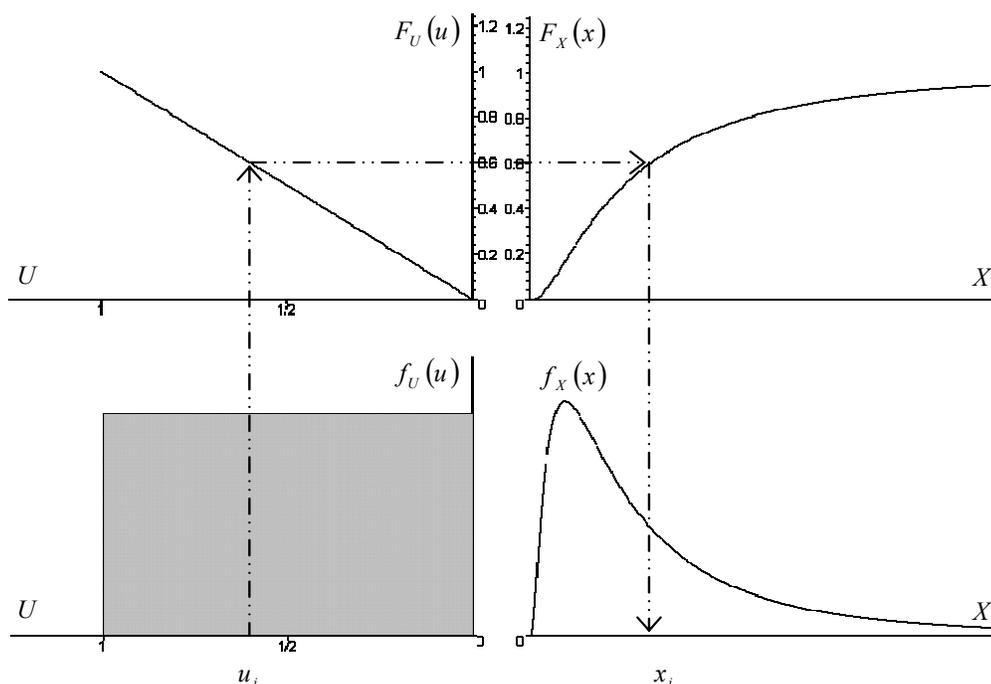
Nous terminons avec le logiciel PROBAN® qui semble un outil très complet et qui est commercialisé par DNV Software (2004) avec la suite SESAM. Ce programme permet des analyses probabilistes, fiabilistes et de sensibilité. À la base, il est développé pour la conception maritime, mais ses fonctionnalités sont très utiles pour la modélisation des incertitudes. Il est possible d'utiliser les méthodes FORM/SORM, les simulations de Monte Carlo, l'échantillonnage hypercube Latin, etc. et les techniques bayésiennes pour intégrer les changements des paramètres. Dans sa thèse, Pendola (2000) a effectué ses calculs avec PROBAN®, couplé à un logiciel d'éléments finis externe.

Annexe VII. La technique de Monte Carlo

Annexe VII.1 : Génération aléatoire des valeurs

La génération aléatoire de nombres selon une distribution bien précise est au cœur de la simulation de Monte Carlo. En général, les ordinateurs modernes sont capables de produire des nombres distribués uniformément entre 0 et 1. En fait, ces nombres sont pseudo-aléatoires, mais les problèmes de répétition (les nombres sont générés selon une séquence qui a déjà été produite auparavant) ne surviennent que lorsque de très grande quantité, de l'ordre de 10^9 , de nombres aléatoires sont générés. D'un point de vue pratique, il est rare d'avoir besoin d'une telle quantité.

La tâche suivante consiste à transformer les nombres u_i , qui suivent une loi uniforme entre 0 et 1, en une loi aux caractéristiques appropriées. Le procédé est illustré par la figure suivante. C'est la technique de transformation inverse ou la méthode de la *cdf* inverse (*Cumulative Density Function*).



Principe de la génération aléatoire d'une loi de distribution

Dans cette méthode, la *cdf* de la variable aléatoire X est égalée avec le nombre généré aléatoirement u_i , soit $F_X(x_i) = u_i$. La valeur x_i équivalente est obtenue en résolvant l'équation :

$$x_i = F_X^{-1}(u_i) \quad (\text{VII.1})$$

Annexe VII.2 : Calcul de l'erreur

La précision de l'analyse de Monte Carlo dépend fortement du nombre de systèmes générés et évalués, ce qui est critique si la sortie observée est une probabilité de défaillance qui peut être faible. Shooman (1990) propose un moyen d'estimer l'erreur (Appendice D). Il considère chaque essai ou simulation comme un tirage de Bernouilli. La probabilité de défaillance d'un essai est p_f et celle de succès $1 - p_f$. Les essais sont indépendants et suivent une distribution binomiale.

En approximant la distribution binomiale par une loi normale, l'hypothèse d'un coefficient de confiance de 95% conduit à :

$$\Pr \left(-2 \cdot \sqrt{\frac{(1-p_f^*) \cdot p_f^*}{N}} < \frac{N_f}{N} - p_f^* < 2 \cdot \sqrt{\frac{(1-p_f^*) \cdot p_f^*}{N}} \right) = 0.95 \quad (\text{VII.2})$$

Où p_f^* est la véritable probabilité de défaillance. L'erreur peut alors être exprimée par (Haldar & Mahadevan (2000)) :

$$\varepsilon\% = \frac{\frac{N_f}{N} - p_f^*}{p_f^*} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{1-p_f^*}{N \cdot p_f^*}} \cdot 200\% \quad (\text{VII.3})$$

Annexe VII.3 : Techniques de réduction de la variance

Il existe un certain nombre de techniques qui permettent de réduire l'erreur sans augmenter la taille de l'échantillon. Elles peuvent forcer l'échantillon à être représentatif ou à faire ressortir les aspects les plus importants de la fonction étudiée. Haldar & Mahadevan (2000) présentent quelques-unes des méthodes les plus connues : l'échantillonnage systématique, l'utilisation des facteurs d'importance (*importance sampling*), l'échantillonnage stratifié, hypercube Latin (un exemple est donné par Lee *et al.* (2000)), etc. Ces techniques font l'objet d'améliorations très poussées, voire d'innovation. Par exemple, l'échantillonnage adaptatif est amélioré par une combinaison avec la surface de réponse (Kim & Ra (2000)) et Yonezawa & Park (2000) proposent une méthode d'échantillonnage par division d'une hypersphère.

Annexe VIII. Fondements des méthodes FORM/SORM

Annexe VIII.1 : Méthode de premier ordre et des moments d'ordre deux

Cette méthode, également appelée *First-Order Second-Moment Method (FOSM)* ou *Mean Value First-Order Second-Moment Method (MVFOSM)* permet de calculer l'indice de Cornell en déterminant la moyenne et l'écart type de la variable aléatoire de performance Z . Il s'agit d'une approximation de la fonction performance par une linéarisation autour des valeurs moyennes des variables aléatoires Y_i . Ensuite, la fonction $z(\bar{\mathbf{Y}})$ est développée en séries de Taylor tronquées au premier ordre.

Le développement en séries de Taylor autour des valeurs moyennes des Y_i s'écrit :

$$Z = z(\mu_{Y_1}, \mu_{Y_2}, \dots, \mu_{Y_{n+1}}) + \sum_{i=1}^{n+1} \frac{\partial z}{\partial Y_i} (Y_i - \mu_{Y_i}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \frac{\partial^2 z}{\partial Y_i \partial Y_j} (Y_i - \mu_{Y_i})(Y_j - \mu_{Y_j}) + \dots \quad (\text{VIII.1})$$

Seule la partie linéaire de ce développement est utilisée pour obtenir une approximation de premier ordre de la moyenne et de l'écart type de Z , à savoir :

$$\mu_Z = z(\mu_{Y_1}, \mu_{Y_2}, \dots, \mu_{Y_{n+1}}) \quad (\text{VIII.2})$$

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \frac{\partial^2 z}{\partial Y_i \partial Y_j} \text{Cov}(Y_i, Y_j) \quad (\text{VIII.3})$$

Si les variables sont indépendantes, la variance se simplifie et devient :

$$\sigma_z^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial z}{\partial X_i} \right)^2 \text{Var}(X_i) \quad (\text{VIII.4})$$

Annexe VIII.2 : Transformations à deux paramètres en loi normale équivalente

La troisième étape de l'algorithme *FORM2* nécessite une normalisation des lois qui ne sont pas gaussiennes. Nous détaillons deux approches.

Rackwitz & Fiessler (1976)

La transformation proposée par Rackwitz & Fiessler (1976) estime les paramètres de la loi normale équivalente, $\mu_{Y_i}^N$ et $\sigma_{Y_i}^N$, en imposant deux conditions : au point de contrôle $(y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*)$, les fonctions de densité et les fonctions de probabilité des variables de départ et des variables normales équivalentes doivent être égales.

Pour toutes les variables non normales statistiquement indépendantes, la fonction de probabilité $F_{Y_i}(\bullet)$ doit évaluer, au point de contrôle, celle de la variable normale équivalente (Haldar & Mahadevan (2000)) :

$$\Phi \left(\frac{y_i^* - \mu_{Y_i}^N}{\sigma_{Y_i}^N} \right) = F_{Y_i}(y_i^*) \quad (\text{VIII.5})$$

Où $\Phi(\bullet)$ est la fonction de probabilité de la loi normale standard, avec $\mu_{Y_i}^N$ et $\sigma_{Y_i}^N$ la moyenne et l'écart type de la variable normale équivalente au point de contrôle. Ainsi, la moyenne est déterminée par :

$$\mu_{Y_i}^N = y_i^* - \Phi^{-1} \left(F_{Y_i}(y_i^*) \right) \cdot \sigma_{Y_i}^N \quad (\text{VIII.6})$$

Si $f_{Y_i}(\bullet)$ est la fonction de densité de la variable non normale de départ, il faut vérifier qu'elle égale, au point de contrôle, la densité de la variable normalisée :

$$\frac{1}{\sigma_{Y_i}^N} \cdot \phi\left(\frac{y_i^* - \mu_{Y_i}^N}{\sigma_{Y_i}^N}\right) = f_{Y_i}(y_i^*) \quad (\text{VIII.7})$$

Où $\phi(\bullet)$ est la fonction de densité de probabilité de la loi normale standard, ce qui permet d'exprimer l'écart type :

$$\sigma_{Y_i}^N = \frac{\phi\left(\Phi^{-1}\left(F_{Y_i}(y_i^*)\right)\right)}{f_{Y_i}(y_i^*)} \quad (\text{VIII.8})$$

Cette méthode permet de réaliser l'étape de normalisation de lois non gaussiennes de l'algorithme *FORM2*. Cependant, elle s'avère imprécise lorsque la distribution de départ très asymétrique.

Rackwitz & Fiessler (1978)

Si une distribution asymétrique doit être normalisée, Rackwitz & Fiessler (1978) proposent deux nouvelles conditions : au point de contrôle, la moyenne et la fonction de probabilité de la variable normale équivalente doivent évaluer la médiane et la fonction de probabilité de la variable de départ respectivement.

Ainsi, $\mu_{X_i}^N$ et $\sigma_{X_i}^N$ peuvent être calculés via :

$$\mu_{Y_i}^N = F_{Y_i}^{-1}(0.5) = \text{médiane de } Y_i \quad (\text{VIII.9})$$

Où $F_{Y_i}^{-1}(\bullet)$ est la fonction inverse de probabilité des variables non normales Y_i , et :

$$F_{Y_i}(y_i^*) = \Phi\left(\frac{y_i^* - \mu_{Y_i}^N}{\sigma_{Y_i}^N}\right) \quad (\text{VIII.10})$$

D'où l'écart type :

$$\sigma_{Y_i}^N = \frac{y_i^* - \mu_{Y_i}^N}{\Phi^{-1}(F_{Y_i}(y_i^*))} \quad (\text{VIII.11})$$

Dans notre cas d'étude, nous limitons notre étude comparative à ces deux méthodes, bien qu'il en existe d'autres, telles que les transformations de Rosenblatt (1952), les approximations de Paloheimo (1973), basées sur l'égalisation des valeurs moyennes et des valeurs pour un percentile donné. Il existe également des transformations en loi normale équivalente à 3 paramètres. Dans ces cas, tant dans les travaux de Chen & Lind (1983) que dans ceux de Wu & Wirsching (1987), le troisième paramètre est un paramètre d'échelle qui vient s'ajouter à la moyenne et l'écart type.

Annexe IX. Algèbre des variables aléatoires

Annexe IX.1 : Relation linéaire connue entre une seule VA et la réponse

Soit S une variable réponse pouvant s'exprimer sous la forme $S = a + b.X$, où X est une VA et a, b des paramètres constants connus. S est facilement calculable si la fonction de densité de probabilité (*pdf* pour *probability density function*) de X est connue. S est une VA de même distribution que X et de moyenne et d'écart type : $E(S) = a + b.E(X)$ et $Var(S) = b^2.Var(X)$, ce qui détermine S , sous l'hypothèse, vraie la plupart du temps, que S suit une loi à deux paramètres.

Annexe IX.2 : Relation non linéaire connue entre une seule VA et la réponse

De façon plus générale, $S = g(X)$ où $g(\bullet)$ est une fonction non linéaire de X . Si la *pdf* $f_X(\bullet)$ de la VA X est connue, alors :

$$f_S(s) = \sum_{i=1}^n f_X[g_i^{-1}(s)] \left| \frac{dg_i^{-1}(s)}{ds} \right| \quad (\text{IX.1})$$

La sommation est présente pour les cas où la fonction inverse de $g(\bullet)$ fait correspondre plusieurs valeurs x_i , à une valeur donnée s .

Annexe IX.3 : Relation connue entre plusieurs VA indépendantes et la réponse

Les problèmes abordés font rarement appel à une seule VA de conception. Les mathématiques impliquées dans ce type de problèmes deviennent plus compliquées. De ce fait, les solutions exactes ne s'obtiennent que dans des cas particuliers.

Si S est la réponse de la somme ou la différence de plusieurs VA suivant des lois normales, la loi de S peut être déterminée. Soit $S = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n$ où les

a_i sont des constantes et où les X_i suivent des lois normales. Alors S est une loi normale de moyenne et de variance :

$$\mu_S = \sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i} \quad \text{et} \quad \sigma_S^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{X_i}^2 \quad (\text{IX.2})$$

Remarque : Si S est la **somme** d'un grand nombre de VA (n tend vers l'infini), quelle que soit leur distribution et si aucune ne prédomine, alors S suit une loi **normale**. C'est le **théorème limite central**.

Si S est le produit ou le quotient de variables log-normales X_i , de paramètres λ_{X_i} et ζ_{X_i} .

$$S = X_1 X_2 \dots X_n = \prod_{i=1}^n X_i \quad (\text{IX.3})$$

Alors S est une variable log-normale dont les deux paramètres sont donnés par :

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n \lambda_{X_i} \quad \text{et} \quad \zeta_S^2 = \sum_{i=1}^n \zeta_{X_i}^2 \quad (\text{IX.4})$$

Remarque : Si S est le **produit** d'un grand nombre de VA (n tend vers l'infini), quelle que soit leur distribution et si aucune prédomine, alors S suit une loi **log-normale**. C'est le **théorème limite central**.

Si S est fonction de VA dont les distributions sont inconnues ou différent l'une de l'autre, la distribution exacte de S ne peut être déterminée. Par exemple, dans le cas d'une relation linéaire :

$$S = \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (\text{IX.5})$$

Les seules informations calculables sont la moyenne et l'écart type de S :

$$\mu_S = \sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i} \quad \text{et} \quad \text{Var}(S) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \text{Cov}(X_i, X_j) \quad (\text{IX.6})$$

Remarque : les expressions sont données même si les VA ne sont pas indépendantes. Si elles l'étaient, les covariances de deux VA différentes s'annuleraient simplement.

Annexe X. La méthode des éléments finis

Déterminer le comportement structurel d'un produit mécanique consiste à trouver une solution satisfaisant à un ensemble d'équations aux dérivés partielles et d'équations ordinaires pour tous les points du produit ou du domaine Ω . Dans le cas d'un simple poutre par exemple, en appui à ses deux extrémités et subissant un moment fléchissant M_F en son milieu, la déformée doit vérifier l'équation différentielle suivante :

$$y'' = -\frac{M_F}{E.I_G} \quad (\text{X.1})$$

Où E est le module d'Young et I_G est le moment quadratique transversal.

Pour des structures complexes, la méthode consiste à rechercher une solution approchée de la solution exacte sous la forme de solutions définies par morceaux sur des sous-domaines de Ω (une structure découpée en plusieurs petites poutres dont le comportement est connu). Garrigues (1999) propose 8 étapes successives pour mener une telle analyse, voici les principales :

- le problème est posé sous la forme d'équations différentielles ou aux dérivés partielles à satisfaire en tout point du domaine Ω , avec des conditions aux limites sur le bord de Ω nécessaires et suffisantes pour que la solution soit unique ;
- le domaine Ω est divisé en sous domaines : c'est le **maillage** et les sous-domaines sont appelés **mailles** ;
- Le problème peut alors être ramené à un problème discret : c'est la **discrétisation** et il peut être résolu.

Le travail de ces différentes étapes est fortement assisté dans les logiciels de calcul par éléments finis, où il n'est plus nécessaire de saisir les équations différentielles relatives au comportement étudié. Le logiciel METAFOR®, par exemple, est capable d'effectuer les mesures de contraintes, déplacements dans les cas linéaires et où il y a des non linéarités :

- géométriques (translations, rotations rigides et déformations d'amplitudes arbitraires) ;
- matérielles (élasticité non linéaire, plasticité, visco-plasticité) ;
- dans les contacts avec frottements.

En effet, tous ces comportements sont modélisés en interne par des lois constitutives adaptées : hyperélastiques (pour les élastomères), viscoplastiques, élasto-plastiques, élasto-viscoplastiques, y compris l'endommagement, les colles et la compaction des poudres.

Parmi la multitude de logiciels éléments finis (voir aussi l'Annexe VI.3), on note la particularité du logiciel Code_Aster, développé par EDF (Électricité de France), qui existe sous license *GPL (General Public License)*, la licence de référence en terme de logiciel libre (Code_Aster (2005)).

Annexe XI. Critère d'accessibilité

Caractérisation de l'accessibilité

L'accessibilité est présentée comme une caractéristique de la conception qui influe sur les facilités d'accès nécessaires aux opérations de maintenance visuelles ou actives. Ainsi, l'accessibilité est liée à la configuration matérielle du système, à savoir le packaging. Si un élément peut être atteint rapidement au moyen d'un minimum d'outils standard et en peu d'opérations, alors l'élément est accessible. Si au contraire, l'accès à cet élément nécessite beaucoup d'outils, spécifiques de surcroît, et des opérations nombreuses ou difficiles, alors l'accessibilité est vraiment mauvaise.

D'autre part, l'accessibilité doit être facilement réalisable. En effet, le technicien doit être dans une position ergonomique pour atteindre l'élément à maintenir ainsi qu'exercer les efforts et mouvements requis par la réparation. De plus, toutes les opérations de désassemblage ou d'extraction d'éléments sans lien direct avec la panne à réparer sont à proscrire, car elles favorisent la perte, la détérioration ou l'encrassement de ces éléments intermédiaires, ce qui occasionne, à terme, de nouveaux problèmes.

L'inaccessibilité peut également avoir des conséquences d'ordre psychologique. Les points de contrôle, les vitres d'inspection et les bouchons de remplissage (lubrification, hydraulique, etc.) sont conçus pour permettre à l'équipement de fournir tout son potentiel. S'il est difficile d'y accéder, l'opérateur va négliger ces opérations ce qui va à l'encontre de l'effet recherché.

Dans le but de maximiser la maintenabilité, on porte attention à au moins deux conditions :

- le degré d'accessibilité : l'accessibilité doit être disponible au niveau extraction-remplacement seulement. Si un élément unitaire doit être éliminé, la tâche est simple. Cependant, si on doit intervenir sur l'élément à un niveau intermédiaire (sans l'extraire complètement du système), l'accessibilité pose des contraintes complémentaires.
- la sécurité : l'accessibilité doit être compatible avec des considérations de sécurité bien précises. Celles-ci ont pour but d'éliminer les risques auxquels les opérateurs ou le personnel de maintenance pourraient être exposés, de même que les risques liés aux actions de maintenance.

La philosophie actuelle favorise le « *remove-and-replace* » par rapport au « *repair-in-place* ». Comme l'accessibilité est fortement associée à ce type d'opération, toutes les parcelles de temps gagnées grâce à son amélioration favorisent la réduction du *DT (Down Time)* et augmentent ainsi la disponibilité.

Pour évaluer l'accessibilité, il faut porter attention aux facteurs qui la régissent. La diversité de taille du personnel influe directement l'accessibilité. Ainsi, nous listons les types d'accès, de capots de protection, les méthodes de montage et les dimensions nécessaires aux interventions.

Facteurs affectant l'accessibilité

Les exigences de ce critère dépendent de l'action envisagée : visuelle (pour inspection), physique (pour remplacement) ou les deux.

D'une manière générale :

- Les éléments à risque, demandant une attention particulière de maintenance, doivent être placés de façon à être visibles et facilement atteignables. La visibilité est de rigueur là où le risque existe.
- Des ouvertures doivent être conçues pour permettre l'accès et allouer l'espace nécessaire aux diverses opérations.

Quelques lignes de conduite sont proposées :

- placer les éléments et sous-assemblages de façon que rien ne bloque leur accès ;
- placer les éléments et sous-assemblages de façon qu'un espace suffisant soit disponible pour les sondes ou autres outils ;
- placer les éléments d'usure (d'une manière générale, ceux que l'on va extraire et remplacer) sans qu'il soit nécessaire d'enlever d'autres pièces ;
- concevoir chaque sous-assemblage de manière à ce qu'il ne faille pas l'enlever complètement pour un problème sur l'un de ces composants.

Les accès de la maintenance

Trois types génériques d'action demandent un accès :

- inspection visuelle ou tactile,
- test,
- réglages, réparation ou remplacement.

Pour réaliser ces actions, il faut pouvoir toucher ou regarder l'objet étudié. Afin de déterminer le type, la taille et la forme de l'ouverture, il faut maîtriser :

- la situation de l'élément et sa configuration dans son environnement,
- la fréquence d'utilisation des accès,
- les actions de maintenance réalisées à travers cet accès,
- la durée requise pour réaliser ces actions,
- les types d'outils et d'accessoires requis,
- les habilitations requises,
- le type de vêtements susceptibles d'être portés,
- jusqu'où le technicien doit-il s'engager dans l'accès,
- les exigences visuelles de la tâche,
- le nombre d'éléments pouvant bloquer cet accès,
- les risques d'utilisation de cet accès,
- la taille, la forme, le poids et les habilitations des membres, outils, etc. qui doivent passer cet accès.

Recommandations

La liste qui suit rassemble un ensemble de recommandations à considérer lors de la conception. Une réponse négative à une question est un argument défavorable pour la conception.

Généralités

- Est-ce qu'une accessibilité optimale est fournie à tous les équipements et composants qui peuvent avoir besoin de maintenance, inspection, extraction ou remplacement ?
 - Est-ce que des vitres transparentes ou des couvercles métalliques faciles à ouvrir sont utilisés pour les inspections visuelles ?
 - Est-ce que les ouvertures sans protection ne sont pas susceptibles de dégrader les performances ?
 - Est-ce qu'une porte articulée est utilisée lorsque l'accès physique est requis (par opposition à un couvercle vissé) ?
 - Si le manque de place empêche la précédente porte de s'ouvrir, est-ce que le couvercle utilisé dispose d'un système d'attache rapide ?
 - Est-ce que l'élément étudié n'est pas placé de telle manière que d'autres éléments, imposants, difficiles à extraire, empêchent son accès ?
 - Est-ce que les composants sont disposés de façon à permettre l'utilisation sans difficultés des sondes de tests, baguettes de soudure et tout autre outil ?
 - La structure du système ne gêne-t-elle pas l'accès aux différents éléments ?
 - Est-ce que les éléments sont montés sur un même plan (i.e. pas empilés les uns sur les autres) ?
 - Est-ce que les composants ou sous-assemblages « jetables » sont accessibles sans le démontage d'éléments supplémentaires ?
 - Est-ce que l'équipement est conçu de façon que l'on puisse cerner le problème d'un assemblage sans avoir à retirer des parties importantes de cet assemblage ?
 - Est-ce que les composants sont présentés pour une procédure de vérification linéaire (i.e. le technicien n'aura pas à revenir sur ces pas) ?
 - Est-ce que le tournevis peut-être utilisé sans gêne ?
 - Quand les ajustements par vis doivent être fait à la main, est-ce que les vis sont montées verticalement pour que le tournevis ne sorte pas de la rainure ? Les têtes *Cruciforme* ou *Allen* ont-elles été préférées aux rainurées ?
 - Est-ce que l'espace est suffisant pour les tâches qui nécessitent l'insertion des deux bras ou des deux mains au travers de l'accès ?
 - Si le technicien doit être capable de voir ce qu'il fait à l'intérieur de l'équipement, est-ce que l'accès fournit un espace suffisant pour ces membres de même qu'une vue satisfaisante ?
 - Est-ce que les extensions telles que les verrous, les guides et les divers raccords sont faciles à retirer avant la saisie de l'objet ?
 - Est-ce que le chemin d'extraction de l'objet est linéaire ou peu courbé ?
 - Est-ce que les objets lourds (plus de 11 kg) sont installés à portée du technicien dans le cas de son remplacement ?
 - Est-ce que la dépose des unités en train d'être retirées ou installées est prévue ?
 - Est-ce que les appuis prévus protègent les éléments délicats des dégradations ?
 - Est-ce qu'une seconde alternative est prévue à chaque fois que c'est possible ?
 - Est-ce que les points d'accès sont étiquetés de façon à les rendre facilement repérables par une procédure de maintenance ?
-

-
- Est-ce que les accès affichent les éléments atteignables pas cette voie (étiquette sur le capot ou à côté) ?
 - Est-ce que les accès affichent l'équipement nécessaire pour les réglages, les inspections par ce point ?
 - Est-ce que les accès présentent la fréquence des opérations par un calendrier de maintenance ou les dates des interventions ?
 - Est-ce que les éléments qui nécessitent une intervention par deux accès différents sont signalés de façon à éviter les retards ou les dommages pouvant résulter d'une intervention par un seul accès ? Est-ce que ces doubles accès sont évités au maximum ?
 - Est-ce que les limites de la force humaine sont prises en comptes dans la conception des composants qui doivent être portés, soulevés, tirés et tournés ?
 - Est-ce que les facteurs environnementaux (temps froid, ambiance sombre, etc.) sont pris en compte dans la conception et le placement des différents composants ?
 - Est-il nécessaire d'éclairer des parties intérieures du système ?
 - Est-ce que les fusibles peuvent être remplacés sans enlever aucun autre élément ?
 - Si les fusibles se ressemblent, sont-ils différenciés ?
 - Est-ce qu'on peut les remplacer sans outils ?
-

Les portes d'accès et les couvercles

- Est-ce que les trous de passage des vis dans le couvercle sont surdimensionnés pour éviter une trop grande précision ?
 - Est-ce que des ouvertures sont prévues pour libérer les composants sans retirer les carters ?
 - Est-ce que les carters sont plus larges que ce qu'ils protègent afin d'éviter les dommages sur les câbles et autres composants ?
 - Est-ce que des guides sont prévus pour éviter le coincement du carter d'un côté ?
 - Si la méthode d'ouverture n'est pas évidente, est-ce que les instructions sont sur le capot ?
 - Quand la protection n'est plus en place, le danger est-il signalé ?
 - Y a-t-il moins de 4 points de fermeture pour le carter ?
 - Est-ce que les points de fermeture sont identiques pour tout l'équipement ?
 - Est-ce que les grilles d'aération sont assez petites pour éviter la pénétration de sondes ou de conducteurs qui pourraient entrer en contact avec des hautes tensions ?
 - Est-ce que les portes d'accès ont des formes permettant le passage des composants et des outils ?
 - Pour les portes articulées, est-ce que la charnière est en bas, ou y a-t-il un moyen d'accrochage pour qu'elle reste ouverte sans être tenue ?
 - Est-ce que les instructions de maintenance sont placées sur la porte, de façon à être lisibles en position ouverte ?
-

Poignées

- Y a-t-il des poignées sur les éléments de plus de 4,5 kg ?
 - Y a-t-il des poignées sur les petits éléments, difficiles à attraper, à extraire ou tenir sans outils de type pinces ?
 - Y a-t-il des poignées sur les carters des ensembles transportables pour faciliter leur manutention ?
 - Est-ce que les poignées sont placées au dessus du centre de gravité et de manière à équilibrer la charge ?
 - Lorsqu'il faut une prise ferme, l'ouverture a-t-elle au moins 115 mm de largeur et 50 mm de
-

-
- profondeur ?
 - Est-ce que les poignées offrent une prise confortable lors de l'extraction et le remplacement de la pièce ?
 - Est-ce qu'elles sont placées de manière à ne pas entrer en contact avec d'autres éléments ?
 - Est-ce que les poignées encastrées sont situées près de l'arrière des équipements lourds afin de faciliter leur manutention ?
 - Est-ce que les poignées sont situées loin des contrôles (activations accidentelles) ?
 - Peuvent-elles servir de support aux équipements de maintenance ?
 - Pour le matériel lourd qui nécessite deux personnes, y a-t-il 4 prises de taille standard ou deux prises larges ?
 - Y a-t-il des poignées ou d'autres moyens pour la prise et le transport des unités qui peuvent nécessiter un remplacement ?
-

Sécurité

- Est-ce que les ouvertures sont sans arêtes vives qui pourraient blesser le technicien ou accrocher ses vêtements ?
 - Est-ce que les éléments qui restent chauds ou qui gardent une charge électrique après que l'appareil ait été mis hors ligne sont bien hors de portée du technicien de maintenance ? Dans le cas où ce risque potentiel ne peut être évité, la porte d'accès alerte-elle le technicien du risque caché ?
 - Est-ce que les trappes d'accès sont éloignées des parties mobiles ou les isolent-elles ? Si le risque caché ne peut être isolé, est-il bien signalé ?
 - Est-ce que les éléments de contrôle (boutons, vis de réglage) sont éloignés des sources de tensions dangereuses ou des parties mobiles ?
-

Annexe XII. Techniques d'analyse du désassemblage

Technique de gestion de production

Au départ, avec l'introduction de l'automatisation des chaînes de montage, la problématique de l'assemblage avait la priorité sur celle du désassemblage. Ainsi, un certain nombre de techniques de gestion de la production ont été ré-utilisées pour aborder la problématique du désassemblage : le *Materials Requirement Planning (MRP)*, le *Just-in-Time (JIT)*, etc. Plus récemment, ces techniques pionnières ont été modernisées pour la création de réseaux logistiques effectuant l'assemblage et le désassemblage de produits (Inderfurth & Teunter (2001), Nof & Chen (2003)).

Ces techniques abordent la problématique de façon globale, sans que le niveau de détail n'atteigne la structure physique du produit. Pour cette précision, une approche formelle orientée technologie, intégrant la conception simultanée du produit et de son système d'assemblage, est apparue : la conception pour l'assemblage (*DfA* pour *Design for Assembly*).

La recherche s'est naturellement orientée vers l'analyse des séquences de désassemblage. Un certain nombre d'auteurs a fait progresser ce domaine, comme Shyamsundar, Gadh, Srinivasan, etc. Leur objectif était d'isoler certains groupes de pièces à coût minimum du point de vue de la maintenance. Ces dernières années, la valorisation et le recyclage ont été identifiés comme un des objectifs importants du désassemblage par Shyamsundar & Gadh (1996).

Technique de propagation d'ondes

La propagation d'ondes est un algorithme pour le désassemblage sélectif : l'approche consiste à déterminer la séquence de désassemblage optimale pour un composant donné (Srinivasan & Gadh (1998)). À partir du composant ciblé, une première onde est constituée de ses prédécesseurs immédiats (ceux qui devront

être désassemblés avant lui). La deuxième vague est constituée des prédécesseurs des composants de la première vague, et ainsi de suite. Connaissant les vagues, il est possible déterminer les séquences de désassemblage réalisables pour ce composant.

Masclé & Balasoiu (2003) ont développé un outil, *WaveDisassembly*, basé sur ce principe et déterminant les séquences optimales selon le nombre de composants à démonter. Cet outil présente à son utilisateur une interface matricielle dans laquelle il est nécessaire d'indiquer de manière binaire, pour chaque composant, l'ensemble des composants qui sont ses prédécesseurs immédiats. Des exemples plus complexes ont été traités par Shyamsundar *et al.* (1998), Srinivasan *et al.* (1999) et Srinivasan & Gadh (2000, 2002) car ils utilisaient des prototypes virtuels pour analyser la détachabilité des composants.

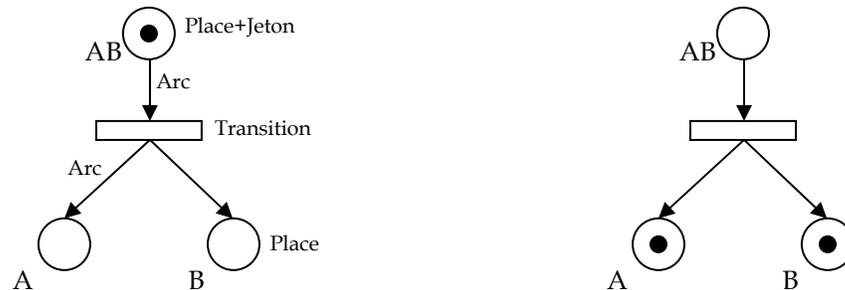
Les travaux de Lee & Gadh (1996, 1998) utilisent le principe de la propagation d'ondes mais surtout proposent des actions destructrices pendant le désassemblage. Cette possibilité apporte une nouvelle classe de solutions de désassemblage d'autant plus qu'elle est parfois inévitable.

Réseaux de Petri

Cette approche a d'abord été utilisée pour modéliser le processus d'assemblage (Bourjault *et al.* (1987)), puis s'est étendue au désassemblage. Moore & Gupta (1996), après avoir publiés plusieurs articles majeurs sur ce thème, effectue une revue de la littérature sur l'utilisation des réseaux de Petri pour le désassemblage.

Le principe de base des réseaux de Petri repose sur quatre éléments : la place (un état du système), la transition, la matrice de changement d'états et les arcs. Le jeton est une entité conceptuelle, sujette à diverses transformations (le nombre peut varier au cours du temps) et sa distribution dans les différentes places du réseaux représente l'état du système. La figure suivante donne l'exemple d'opérations de

désassemblage élémentaire dans un réseau de Petri pour un assemblage composé de deux pièces *A* et *B*. Dans la plupart des cas, le critère déterminant la séquence optimale est le nombre minimal de pièces à retirer.



Les réseaux de Petri peuvent également être jumelés à d'autres approches mathématiques. Suzuki *et al.* (1993) utilisent les réseaux de Petri pour modéliser le désassemblage et la programmation linéaire pour l'optimisation. Dans ce cas, l'optimisation ne se fait pas sur le nombre de pièce mais l'énergie des tâches de désassemblage, une donnée du problème. Plus tard, Suzuki *et al.* (1996) mentionnent des contraintes explicites, reliées au coût des actions de maintenance. En fait, l'optimisation peut se baser sur toute une variété de coûts de désassemblage. C'est le sujet de la section 4.4.

Technique des regroupements de pièces ou clustering

Pour simplifier l'analyse des problèmes de désassemblage, certaines approches se basent sur les modules existant dans l'assemblage. Lambert (1997) classe ces approches en trois catégories :

- *Clustering* : où les activités de désassemblage apparentées sont traitées ensemble ;
- *Lumping* : où le produit est considéré comme un ensemble hiérarchique de modules (e.g. un ordinateur personnel), où les pièces d'un module sont fortement interconnectées ;
- *Parallel clustering* : où les actions similaires sont réalisées en même temps (e.g. le désassemblage de toutes les touches d'un clavier ne constitue qu'une seule opération).

À cette liste s'ajoutent les modules fonctionnels. L'identification des regroupements passe par la recherche des pièces qui réalisent une même fonction du produit. Cela s'apparente au *lumping* car les éléments essentiels à une fonction sont bien souvent très interconnectés.

Les modules peuvent également être déterminés par leur valeur économique. Dans certains cas, les matières premières de certaines pièces, convenablement séparées, ont une valeur à la revente intéressante si le désassemblage a pour fin le recyclage.

La plupart du temps cependant, les regroupements peuvent se faire par « préférences » ou « affinités » structurelles. Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce type de regroupement de pièces, en utilisant différents critères pour quantifier cette « affinité ».

Lee & Shin (1990) et Lee (1994) utilisent une fonction de coût d'assemblage, basée sur le type de connexion, la stabilité de la liaison après que la connexion soit réalisée, les degrés de liberté de séparation des pièces connectées, la tolérance d'assemblage, le nombre de volumes en contact pour la mise en position, le nombre de dispositifs de maintien en position et le poids de la pièce. Ces informations sont intégrées au sein de graphe de liaisons *attribuées*, qui est décomposé par itération pour proposer des modules de l'assemblage. Hoehmann (1995) propose, lui aussi, un algorithme d'identification des sous-assemblages stables en se basant sur le même type d'information.

Dans ces approches, le type de connexion permet de déterminer si la liaison est rigide, démontable, etc. Certains travaux utilisent une formulation plus quantifiable, tel que l'effort supporté par une connexion, pour mesurer la stabilité de l'assemblage. Le graphe des liaisons classique est alors remplacé par un graphe de flux où la capacité de chaque liaison correspond à la force de la connexion. Lee *et al.* (1993) utilisent la théorie des graphes pour identifier les modules de l'assemblage en recherchant le flux maximum.

La notion de stabilité, mentionnée à plusieurs reprises, est particulière car elle dépend de l'orientation du produit (Abe *et al.* (1999)). Ainsi, Lee & Yi (1993) ont cherché à réorienter le produit dans une configuration stable pour continuer son désassemblage.

Algorithmes génétiques

Cette technique est basée sur la génération de solutions, des séquences ou des liaisons à briser (des coupes sur le graphe des liaisons). La génération suit des mécanismes similaires à ceux observables dans les chaînes ADN (croisement et mutation). Les meilleures solutions sont alors réutilisées dans le processus de résolution.

Tout comme les algorithmes génétiques, on retrouve de nouvelles approches s'inspirant de la biologie. Failli & Dini (2001) ont proposé une approche qui cherche une séquence de désassemblage en utilisant des agents de type colonies de fourmis. Wang *et al.* (2003, 2004) ont implémenté ce principe pour l'appliquer à des exemples de la littérature et ont pu déterminer les séquences optimales.

Il faut noter que ces techniques nécessitent un travail d'ajustement des paramètres de l'algorithme souvent long et aux résultats aléatoires.

La programmation mathématique

Le modèle proposé par Lambert (1997, 1999) a pour objectif de maximiser la somme des revenus des sous-ensembles extraits du produit en tenant compte de leur valeur une fois recyclés et du coût associé aux différentes actions (recensées dans la matrice de transitions) effectuées pour les isoler. Ce modèle utilise des variables binaires et est résolu par un logiciel d'optimisation. D'après Lambert (1999), la durée du calcul est faible et n'augmente que modérément avec la taille du modèle. La seule restriction réside dans la disponibilité des données permettant d'établir le coût associé à une action.

Toujours dans un contexte de désassemblage de fin de vie, Lee & Xirouchakis (2004) proposent une heuristique dont le principe est semblable à une forme inversée de *MRP - Material Requirement Planning*. Cette technique ne garantit plus l'optimalité de la séquence de désassemblage obtenue mais elle est plus rapide que les outils de programmation linéaire classiques (CPLEX 6.5 en l'occurrence).

Annexe XIII. Mesure quantitative de l'information

La théorie de l'information est un champ de recherche à part entière. Nous présentons que les bases élémentaires de la mesure quantitative de l'information, définie par Shannon (1948) dans le cas d'un ensemble fini de messages.

Dans un premier temps, si on ne tient pas compte des probabilités des messages envoyés pour mesurer la quantité d'information, et si le nombre de messages possibles est fini, alors ce nombre ou n'importe quelle fonction monotone pourrait servir de mesure d'information.

Information algébrique logarithmique

Cependant, il est très naturel d'utiliser en tant que mesure de la quantité d'information le *logarithme* du nombre de messages possibles. En effet, soit Ω un ensemble fini de messages possibles et désignons par $|\Omega|$ la taille de cet ensemble. Une définition purement « algébrique » de la quantité d'information d'un message choisi dans Ω serait alors :

$$\text{Info}_{\text{alg}}(\Omega) = \log|\Omega| \quad (\text{XIII.1})$$

Bien que cette définition doive encore être généralisée pour tenir compte des probabilités de sélection des différents messages, du moins lorsque ceux-ci ne sont pas équiprobables, discutons d'abord pourquoi la fonction logarithme est en effet un choix raisonnable.

- Les paramètres physiques de systèmes informatiques (temps, largeur de bande, taille) tendent tous à varier de manière logarithmique avec le nombre de possibilités. Par exemple, l'ajout d'une porte logique dans un circuit double le nombre d'états possibles de ce circuit, ce qui se traduit par une augmentation de 1 en base \log_2 .
- Cette mesure est plus proche de notre perception intuitive « linéaire » de l'information. Par exemple, il semble intuitivement normal que la quantité

d'information qu'on puisse stocker dans deux disquettes soit le double de la quantité d'information stockable dans une seule disquette.

Prise en compte des probabilités

À partir de Béal & Sendrier (2004), nous établissons un lien entre l'information fournie par une source et la distribution de probabilité de la sortie de cette source. On considère en effet que l'apparition d'un événement peu probable apporte beaucoup d'information tandis que l'occurrence d'un événement certain ne fournit au contraire aucune information.

Si une lettre a a une probabilité $p(a)$ d'être tirée, son information propre est définie par :

$$h(a) = -\log_2 p(a) \quad (\text{XIII.2})$$

En particulier $h(a)$ vaut zéro si $p(a) = 1$.

Validation du choix de la fonction logarithme

Comme nous venons de le dire, l'information apportée par l'observation d'un symbole ω émis par cette source sera intuitivement d'autant plus grande que ce symbole est improbable. En d'autres termes, nous mesurons cette quantité d'information par une fonction :

$$h(\omega) = f\left(\frac{1}{p(\omega)}\right) \quad (\text{XIII.3})$$

Où $f(\bullet)$ est une fonction croissante. $f(\bullet)$ doit aussi satisfaire à la condition limite suivante :

$$\lim_{x \rightarrow 1} f(x) = 0 \quad (\text{XIII.4})$$

de façon à ce que l'information apportée par un événement certain soit nulle.

D'autre part, nous souhaitons que l'observation conjointe de deux événements indépendants apporte une information égale à la somme des informations apportées par l'observation individuelle de ces deux événements.

En d'autres termes,

$$h(\omega_1, \omega_2) = h(\omega_1) + h(\omega_2) \quad (\text{XIII.5})$$

ce qui conduit à utiliser la fonction logarithme.

Entropie

La valeur moyenne de l'information propre calculée sur l'ensemble de l'alphabet revêt une grande importance. C'est l'espérance de la variable aléatoire I . Étant donné la similarité de la forme mathématique de cette fonction avec la mesure d'entropie définie en thermodynamique, cette mesure porte aussi le nom d'*entropie*. Elle est notée $H(A)$.

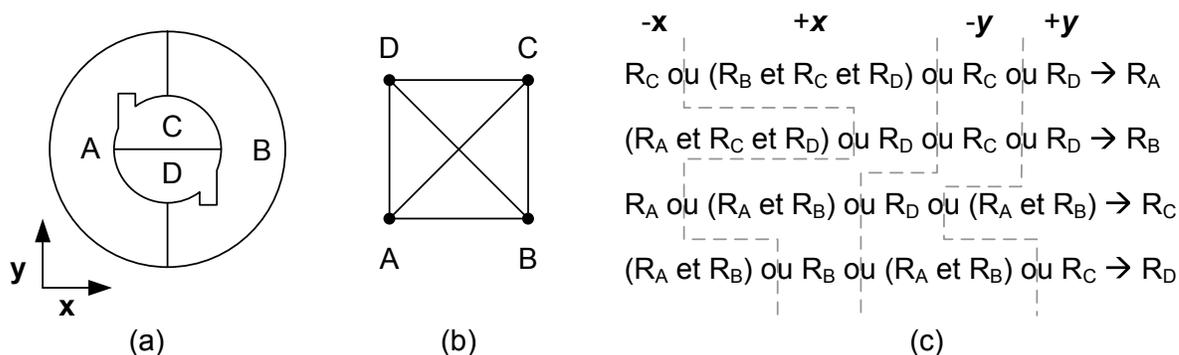
$$H(A) = -\sum_{a \in A} p(a) \log_2 p(a) \quad (\text{XIII.6})$$

On remarque que la base 2 est retenue pour le logarithme. Cela s'explique par le type d'information traitée lors de la définition de cette mesure par Shannon (1948). Si une source émet n symboles équiprobables (ou encore avec une loi de probabilité uniforme), son entropie est $\log_2 n$. Si $n = 2^r$, son entropie est alors r . Or, pour représenter 2^r symboles distincts en binaires, r bits sont nécessaires.

Annexe XIV. Éléments du modèle de Zwingmann *et al.* (2005)

Annexe XIV.1 : Les relations de précedence enrichies

Considérons deux pièces voisines, *C* et *D*, enfermées au cœur d'un assemblage parallèle (Figure a), chacune empêchant l'autre d'être déplacée (en plus de la contrainte de la coque extérieure). Si on considère le graphe des connexions (Figure b), toutes les configurations possibles sont des sous-assemblages cohérents. Les relations de précedence sont, elles, établies en considérant chacune des directions de retrait et en indiquant les pièces qui doivent être retirées au préalable (Figure c).



(a) Design. (b) Graphe des connexions. (c) Relations de précedences.

Les lignes marquent les frontières entre les différentes directions de retrait.

D'après les relations de précedence minimales (Figure c), l'absence de la pièce *D* permet le retrait de la pièce *C* (... ou R_D ou ... $\rightarrow R_C$). Si la pièce *C* est absente, *D* peut alors être retirée (... ou $R_C \rightarrow R_D$). Si on considère des opérations simultanées, on pourrait dire que *C* permet le retrait de *D*, qui elle-même permet de retirer *C*. Cette formulation conduit à penser que *CD* est un sous-assemblage réalisable, ce qui est faux. En fait, la formulation récursive peut conduire à conclure qu'une pièce peut s'autoriser elle-même à être désassemblée, ce qui est problématique.

Pour palier à ce problème, nous établissons les *relations de dégagement*, qui vont exprimer la possibilité d'enlever une pièce en considérant l'état courant de l'assemblage, en plus de l'état précédent auquel se limitent les relations de

précédence. La relation de précédence d'une pièce X peut être établie en déplaçant virtuellement cette pièce vers la gauche, la droite (le haut, le bas, etc.). Toutes les pièces qui viennent interférer avec ce mouvement sont introduites dans une expression Booléenne qui constitue la relation de précédence. Pour la relation de dégagement, nous ajoutons la notion de *vecteur de dégagement* qui renseigne sur la direction d'extraction \mathbf{d}_i pour chaque étape de désassemblage i . Il s'agit en fait de la direction qui prévaut au moment où la pièce se sépare de son ensemble de départ; rien ne l'empêche cependant d'être réorientée pour être extraite complètement.

Le tableau suivant montre que pour retirer la pièce C , une des possibilités est ouverte si la pièce D a déjà été retirée à une étape précédente (1^{er} membre de la première équation) ou si la pièce D est retirée en même temps qu'elle. Dans ce cas, le *vecteur de dégagement* \mathbf{d} doit être égal à la direction de dégagement offerte par D , soit $-\bar{\mathbf{y}}$ (2^{ème} membre de la première équation). Quant au retrait de la pièce D , il est possible de retirer C à la même étape, tout en imposant le *vecteur de dégagement* $\mathbf{d} = +\bar{\mathbf{y}}$. Comme le *vecteur de dégagement* \mathbf{d} ne peut prendre qu'une valeur à chaque étape, il n'est plus possible à une pièce d'autoriser son propre retrait. Enfin, les pièces C et D ne pouvant être retirées sans toucher A ou B , le sous-assemblage CD n'est plus détecté comme étant réalisable et le problème des relations de précédence classique est résolu.

Relations enrichies pour les pièces C et D de la Figure a

Relations de désassemblage enrichies (étape i)			
Relations de précédence (étape $i-1$)		Relations de dégagement (étape i)	Pièce
$[R_A + (R_A.R_B) + (R_D) + (R_A.R_B)]_{i-1}$	Ou	$[R_A.(d=-x) + (R_A.R_B).(d=+x) + (R_D).(d=-y) + (R_A.R_B).(d=+y)]_i$	$\rightarrow R_C$
$[(R_A.R_B) + R_B + (R_A.R_B) + R_C]_{i-1}$	Ou	$[(R_A.R_B).(d=-x) + R_B.(d=+x) + (R_A.R_B).(d=-y) + R_C.(d=+y)]_i$	$\rightarrow R_D$

Annexe XIV.2 : La programmation par contraintes

La programmation par contraintes est une technique logicielle pour énoncer et résoudre des problèmes combinatoires de satisfaction de contraintes (*CSP* pour *Constraint Satisfaction Problems*), plus particulièrement dans les domaines de la planification et de l'ordonnancement, sujets à un certain nombre de contraintes. Une contrainte peut être définie comme une fonction mathématique de plusieurs variables. Le problème de satisfaction des contraintes peut avoir plusieurs solutions, tandis que les programmes linéaires et entiers ont une fonction objectif qui les conduit à une solution optimale.

Dans notre approche de désassemblage, une variable Booléenne est associée à chaque pièce : 0 signifie qu'elle est retirée du système et 1 qu'elle est toujours présente. Au départ, toutes les variables peuvent varier dans un domaine binaire : $\{0,1\}$ et le nombre de combinaison est $2^N - 1$. Quand une pièce est retirée, le domaine de variation de la variable associée est modifié pour le singleton $\{0\}$. Quand le domaine d'une variable est modifié, les effets de cette modification sont transmis à toutes les contraintes qui interagissent avec cette variable. Ce système de transmission est appelé la *propagation des contraintes*. Dans nos travaux, nous utilisons les logiciels OPL Studio et ILOG Solver, qui possèdent leurs propres systèmes de propagation (Lustig & Puget (2001)).

Annexe XV. Pistes de formalisation pour les critères contextuels

Annexe XV.1 : Le matériel d'intervention

Les outils de désassemblage

L'outillage requis par le désassemblage d'une attache entre deux pièces *p1* et *p2* est mesuré par la méthode *noteOutil(Piece p1, Piece p2)* qui utilise une échelle de pondération prédéfinie. Ce système est largement utilisé dans la littérature : par exemple Desai & Mital (2003) proposent 2 échelles (s'étendant de 1 à 3), pour les outils servant à exercer une force ou un moment. Le tableau suivant donne une pondération possible.

Pondération des outils - adaptée de Das *et al.* (2000)

Aucun	1	Fourni par le fabricant	2.8
Outil à air comprimé	1.6	Spécifique	3.4
Outillage mécanique	2.2	Improvisé	4

Une propriété contextuelle est associée à cette méthode : *disponibiliteOutils*. Elle suit l'échelle de ce tableau et va servir à compenser la difficulté amenée par le besoin d'un outil spécifique. Par exemple, si une situation requiert un outil à air comprimé (1.6) et que l'atelier n'en possède pas, la difficulté de l'opération sera 1.6. Par contre, si l'outil approprié est disponible, la difficulté redevient unitaire.

Remarque : contrairement à la construction des facteurs intrinsèques, l'échelle de pondération de ce facteur, ainsi que ceux indiquant la disponibilité d'un élément favorable à la maintenance, est croissante avec la facilité. Ce choix s'explique car ces facteurs interviennent au dénominateur des critères qu'ils influencent (e.g. impact de l'outillage dans le calcul de la démontabilité).

Les outils de manipulation

Selon le poids et le volume des pièces à maintenir, les opérations manuelles peuvent être insuffisantes. Ainsi, il est nécessaire d'utiliser une échelle renseignant sur les besoins d'un treuil, d'un palan, etc. La fonction de la méthode *noteEnginManutention(Piece p1)* est alors définie de la même manière que pour le petit outillage (tableau précédent).

La documentation

La propriété *disponibiliteDocumentation* est un facteur important qui est susceptible de réduire la **complexité** d'une opération de maintenance en aidant le technicien dans son cheminement, mais aussi de faciliter l'extraction (les **manœuvres**) de la pièce en milieu encombré. Pour la quantification de cet attribut, nous proposons l'échelle à trois niveaux de Wani & Gandhi (1999) :

- les procédures de maintenance et la séquence des tâches sont identifiées, les listes de contrôle sont complètes, la documentation est bien rédigée et compatible avec le concept de maintenance (3) ;
- seulement deux des points précédents sont remplis (2) ;
- un seul des points précédents était rempli (1).

Annexe XV.2 : L'accessibilité aux attaches par les outils

La méthode *positionneOutil(Composant c, Piece p1, Piece p2)*, analyse l'**accessibilité à l'attache** entre les pièces *p1* et *p2*, au sein du composant *c*. Elle prend ses valeurs selon l'échelle du tableau suivant qui associe une interprétation à chaque score. Cette pondération est inspirée du système utilisé par Desai & Mital (2003) pour l'analyse numérique de la facilité de désassemblage.

Pondération de la manœuvrabilité – Desai & Mital (2003)

Caractéristique de l'attache	Score	Interprétation
Symétrie	1.2	Pas de précision requise
	2	Peu de précision
	5	Grande précision
Asymétrie	1.6	Pas de précision
	2.5	Peu de précision
	5.5	Grande précision

Il est également possible d'établir un indice en relation avec la localisation de la liaison entre les pièces *p1* et *p2* au sein du composant « parent » *c*. Das & Naik (2002) proposent une échelle de difficulté similaire à celle du tableau précédent, basée sur différentes situations type.

Pour une formalisation moins comparative, Diaz-Calderon *et al.* (1995) ont développé une mesure de la difficulté d'une tâche d'assemblage sur le principe de l'entropie ou l'information contenue dans une tâche. Pour cela, ils s'attardent à 3 facteurs affectant cette tâche, qu'ils illustrent en CAO : (1) l'accès outil, qui mesure l'espace disponible pour amener l'outil à sa cible, (2) le facteur opérationnel de l'outil, qui mesure la difficulté à opérer quand les conditions ne sont pas idéales, (3) le dégagement pour les mains, qui mesure la difficulté à utiliser l'outil considérant les obstacles voisins.

Remarque : cette méthode évalue la difficulté à positionner l'outil (ou la main) qui doit défaire l'attache. Dans le cadre d'une utilisation CAO, la technique doit recourir à une bibliothèque d'outils et de membres.

Annexe XV.3 : La démontabilité contextuelle

Prise en compte des ressources et de leur disponibilité

Contrairement à la **démontabilité intrinsèque**, évaluée par la méthode *demonte()*, la **démontabilité contextuelle**, méthode *demonteDScontexte()*, va tenir compte de l'environnement en intégrant :

- la difficulté à positionner l'outillage ;
- le petit outillage requis, et éventuellement sa disponibilité ;
- la disponibilité de documentation pour réduire la complexité.

La méthode *demonteDScontexte()*

Pour estimer la **démontabilité contextuelle** d'une pièce, la méthode *demonteDScontexte()* se calcule de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 demonteDScontexte(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) = & \\
 & \sum_{\substack{\text{Piece } p2 \in \text{Composant } c \\ \text{Piece } p2 \neq \text{Piece } p1}} \left[\begin{array}{l} noteNatureAttache(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2) \times \\ \frac{noteOutil(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2)}{\text{Max}(disponibiliteOutils; noteOutil(\text{Piece } p1, \text{Piece } p2))} \times \\ positionneOutil(\text{Composant } c, \text{Piece } p1, \text{Piece } p2) \end{array} \right] \times \quad (XV.1) \\
 & \frac{noteComplexite(\text{Composant } c, \text{Piece } p1)}{disponibiliteDocumentation} \times \\
 & changeOutil(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \times penaliteChangementOutil \times \\
 & changeDirections(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \times penaliteChangementDirection
 \end{aligned}$$

Remarque : la fonction **Max** veille à ce que la valeur de la fraction n'affiche pas une difficulté inférieure à 1 en ce qui a trait à l'outillage.

Annexe XV.4 : La main d'oeuvre

Profil morphologique

Selon la morphologie des opérateurs de maintenance, leurs capacités musculaires, il est possible de dire si les outils de manipulation doivent intervenir. Ce facteur est difficile à prendre en compte et de nombreux travaux utilisent des modèles de simulation humaine en CAO, proches de la réalité virtuelle. Par exemple, Vujosevic *et al.* (1995) emploient l'environnement Jack pour calculer les efforts en jeu dans les poignets, coudes, épaules, etc.

Plus simplement, il est possible de considérer les dimensions morphologiques des membres équivalentes à l'encombrement des outils. Elles sont alors intégrées dans l'évaluation de la méthode *positionneOutil()*. Quand aux capacités musculaires, elles sont traitées par les méthodes *noteManipulabiliteDScontexte()* et *noteEnginManutention()*.

La dextérité

La dextérité est un facteur complexe mais qui a son importance lors d'une opération manuelle comme la maintenance. Heureusement, il existe des modèles pour traiter les mouvements humains sans recourir à la simulation ou à la réalité virtuelle. Dans un contexte d'assemblage, Sturges (1989) propose une mesure quantitative de la dextérité humaine, basée sur la loi de Fitts, un modèle psychologique des mouvements humains. Cette mesure intègre la taille des éléments de dextérité (doigts, bras, épaules, etc.), leur force, pour ensuite servir à l'élaboration d'un instrument de calcul : le *DFA Calculator*, qui permet à un concepteur de comparer la prédisposition de diverses conception pour l'assemblage (*DFA*). Nous proposons ici d'intégrer ce facteur au facteur **compétences**.

Profil des compétences

Le niveau de compétence sert également à qualifier la main d'œuvre. En effet, un certain niveau de certification peut être requis pour défaire une liaison ou intervenir sur un composant (e.g. matière dangereuse). Ce facteur, évalué par la méthode *noteSpecialiste(Piece p1)*, peut être défini comme un système de pondération. Le Military Handbook - 472 (1966) en propose un qui dépend du nombre de techniciens spécialisés requis (un seul, deux, plus de deux), mais aussi l'effort (minimal, au dessous ou au dessus de la moyenne, etc.) de concentration, de raisonnement logique, d'initiative, etc.

On définit une propriété de l'environnement, *disponibiliteSpecialiste*, selon ce même système pour éventuellement compenser la difficulté amenée par un besoin particulier des opérations de maintenance.

Annexe XV.5 : La manipulabilité

Pour établir la valeur de la méthode *noteManipulabiliteDScontexte(Composant c, Piece p1)*, nous proposons d'utiliser un système de pondération (tableau suivant), dont les valeurs sont fournies par la méthode *noteDifficulte(Piece p1)*. Si, à l'instar des outils de la réalité virtuelle (e.g. Vujosevic *et al.* (1995)), l'outil est assez élaboré pour les considérations ergonomiques, il est possible d'affiner l'estimation de la manipulabilité.

Pondération pour la manipulation – Desai & Mital (2003)

Paramètre de conception		Score	Interprétation
Taille des composants	Dimensions (très grandes ou très petites)	2	Facile à saisir
		3.5	Difficulté modérée
	4	Difficile à saisir	
	Importance du poids	2	Léger (<7.5 lb)
		2.5	Moyen (<17.5 lb)
3	Lourd (<27.5 lb)		
Symétrie des composants	Les composants sont faciles à saisir	0.8	Léger et symétrique
		1.2	Léger et semi symétrique
		1.4	Léger et asymétrique
		2	Moyennement lourd, symétrique
		2.2	Moyennement lourd, semi symétrique
		2.4	Moyennement lourd, asymétrique
		4.4	Lourd, symétrique
		4.6	Lourd, semi symétrique
5	Lourd, asymétrique		

D'ailleurs, si la dextérité avait été évaluée selon le formalisme de Sturges (1989), la manipulabilité aurait pu être établie en conséquence : une partie du calculateur de la difficulté d'assemblage de Sturges (1989) est consacrée à la difficulté d'acquisition (tâches de saisie et de déplacement). Cinq facteurs contribuent à la quantification de cette difficulté selon le principe de l'entropie parmi lesquels 3

touchent à la manipulabilité telle que définie : le relief de la pièce, sa forme et sa taille.

Finalement, la manipulabilité peut s'exprimer en fonction de la difficulté exprimée dans le tableau précédent et de l'aide qui peut être obtenue, i.e. les engins de manutention ou l'expertise d'un spécialiste.

$$\begin{aligned}
 & \textit{noteManipulabiliteDScontexte}(\textit{Composant } c, \textit{Piece } p1) = \\
 & \quad \textit{noteDifficulte}(\textit{Piece } p1) \times \\
 & \quad \frac{\textit{noteEnginManutention}(\textit{Piece } p1)}{\text{Max}(\textit{disponibiliteEnginManutention}, \textit{noteEnginManutention}(\textit{Piece } p1))} \times \quad (\text{XV.2}) \\
 & \quad \frac{\textit{noteSpecialiste}(\textit{Composant } c, \textit{Piece } p1)}{\text{Max}(\textit{disponibiliteSpecialiste}, \textit{noteSpecialiste}(\textit{Composant } c, \textit{Piece } p1))}
 \end{aligned}$$

Annexe XV.6 : L'aptitude à la dépose contextuelle

Pour la formalisation de la fonction *deposeDScontexte()*, on fait intervenir la définition contextuelle de la démontabilité, la méthode *demonteDScontexte()*, en plus des facteurs qui viennent d'être introduits.

$$\begin{aligned}
 & \textit{deposeDScontexte}(\textit{Composant } c, \textit{Piece } p1) = \\
 & \quad \textit{demonteDScontexte}(\textit{Composant } c, \textit{Piece } p1) \times \\
 & \quad \frac{\textit{noteManœvrabilite}(\textit{Composant } c, \textit{Piece } p1)}{\textit{disponibiliteDocumentation}} \times \quad (\text{XV.3}) \\
 & \quad \textit{noteManipulabiliteDScontexte}(\textit{Composant } c, \textit{Piece } p1)
 \end{aligned}$$

Annexe XV.7 : L'accessibilité globale dans le contexte

Cette mesure s'effectue toujours par la recherche de la séquence d'accès optimale, tout comme la mesure intrinsèque *accède()*. Pour tenir compte du contexte, la mesure de l'accessibilité contextuelle, méthode *accèdeDScontexte()*, utilise le même modèle de programmation par contraintes, à la différence que la difficulté des

transitions de désassemblage n'est plus mesurée par la méthode *depose()*, mais par le méthode *deposeDScontexte()*.

Annexe XV.8 : L'identification de la défaillance

Avant d'effectuer toute réparation, il faut identifier le ou les composants responsables de la défaillance. Deux critères communs peuvent être utilisés pour évaluer la difficulté de cette opération.

Diagnosticabilité

Pour mesurer la complexité à effectuer un diagnostic, on peut utiliser la formulation par l'entropie, proposée par Golay *et al.* (1989) et rapportée au Chapitre 5. Cette formulation est basée sur la probabilité d'occurrence des différents états du système, qui peuvent être calculés grâce à au module d'évaluation de la fiabilité, mis en place au Chapitre 4.

Afin de simplifier les calculs, il est possible de ne tenir compte que des composants les plus importants, c'est-à-dire ceux qui réalisent les fonctions critiques du produit, identifiées lors de l'établissement de la dimension fonctionnelle du modèle FSC (Chapitre 2) et pondérées par un coefficient de criticité (compris entre 1 et 5).

Supposons que le produit soit composé de deux composants C_1 et C_2 dont la criticité est supérieure à un seuil prédéfini (e.g. 3.5). Le système peut se trouver dans 4 états, selon que les composants fonctionnent C^1 ou non C^0 . Les probabilités d'occurrence de chaque état, équationx (XV.4), sont requises pour le calcul de l'entropie de diagnostic, méthode *diagnostique()*.

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \Pr(C_1^1 \cup C_2^1) = R_1 \cdot R_2 & P_1 &= \Pr(C_1^0 \cup C_2^1) = (1 - R_1) \cdot R_2 \\
 P_2 &= \Pr(C_1^1 \cup C_2^0) = R_1 \cdot (1 - R_2) & P_3 &= \Pr(C_1^0 \cup C_2^0) = (1 - R_1) \cdot (1 - R_2)
 \end{aligned}
 \tag{XV.4}$$

La propriété contextuelle qui est associée à cette mesure est la présence d'une expérience dans l'entreprise, propriété *disponibiliteExperience*. En effet, le personnel disposant d'une bonne connaissance du système va converger plus vite vers la panne, en considérant l'ensemble des facteurs visibles et surtout son vécu.

Surveillabilité, testabilité

Si le système est équipé de dispositifs de surveillance, facilement accessibles, le diagnostic peut être fait rapidement et ne dégrade pas la maintenabilité. Par contre, si les éléments participant à la fonction de surveillance (capteur, jauge, etc.) ne sont pas visibles et/ou accessibles, le diagnostic et donc la maintenance sont plus longs.

Pour tenir compte de cet aspect, nous proposons de mesurer la difficulté à dégager l'accès aux éléments de surveillance et de tests. Tout d'abord, il est nécessaire de connaître les pièces qui obstruent l'accès à ces composants. Elles peuvent être renseignées dans une base de données ou recherchées à partir du modèle CAO. Hao *et al.* (2002) illustrent cette deuxième solution en conduisant une analyse de la visibilité avec des cônes de vision partant d'un modèle humain virtuel.

Enfin, il suffit d'appliquer la méthode *accedeDScontexte()* à chacune des pièces d'obstruction, pour connaître la difficulté à les retirer et pouvoir accéder aux éléments de tests. La valeur moyenne des différentes mesures est ensuite calculée par la méthode *trouveAccesInspection()*.

Annexe XV.9 : La rapidité de l'intervention

Deux derniers éléments extrinsèques interviennent sur la rapidité de remise en état de l'équipement : le niveau de service de l'équipe qui doit effectuer l'intervention et la disponibilité des pièces de rechange.

La disponibilité de l'équipe de maintenance

Ce niveau dépend de la stratégie de maintenance de l'entreprise : maintenance corrective, maintenance préventive (systématique, conditionnelle ou réglementaire), maintenance d'amélioration, maintenance productive totale (*TPM* pour *Total Productive Maintenance*), maintenance d'exploitation, maintenance dirigée, maintenance par échange standard ou par réparation ; mais elle dépend aussi du choix d'effectuer la maintenance à l'interne ou de la sous-traiter. Cette organisation de la maintenance va influencer la disponibilité de l'équipe, la répartition de son temps de travail, etc.

Disponibilité des pièces

De plus, selon de la stratégie de maintenance, du coût des pièces, des stratégies de gestion des stocks, les pièces de remplacement ne sont pas toujours disponibles, il peut être nécessaire de les commander, d'attendre leur livraison, etc.

Le niveau de service

Nous proposons de synthétiser ces deux éléments par un taux de service unique, propriété *tauxService*, celui du fournisseur des pièces de remplacement. Ce dernier peut être un magasin de pièces de rechange, un atelier de réparation, une entreprise de sous traitance, etc. On peut citer les travaux de Diallo (2005) qui calculent le taux de service d'un atelier de réparation, connaissant le taux de panne du matériel de l'entreprise.

Annexe XV.10 : Calcul de la maintenabilité contextuelle

Finalement, la maintenabilité contextuelle peut être normalisée en comparant l'indice contextuel mesuré (I_m^{contxt}), à l'indice idéal (I_i), tout comme cela est fait pour la maintenabilité intrinsèque.

$$I_m^{contxt} = \text{accedeDScontexte}(\text{Composant } c, \text{Piece } p1) \times \frac{\text{diagnostique}(\bullet)}{\text{disponibiliteExperience}} \times \text{trouveAccesInspection}(\bullet) \times \text{tauxService} \quad (\text{XV.5})$$

Annexe XVI. Analyses des fauteuils roulants

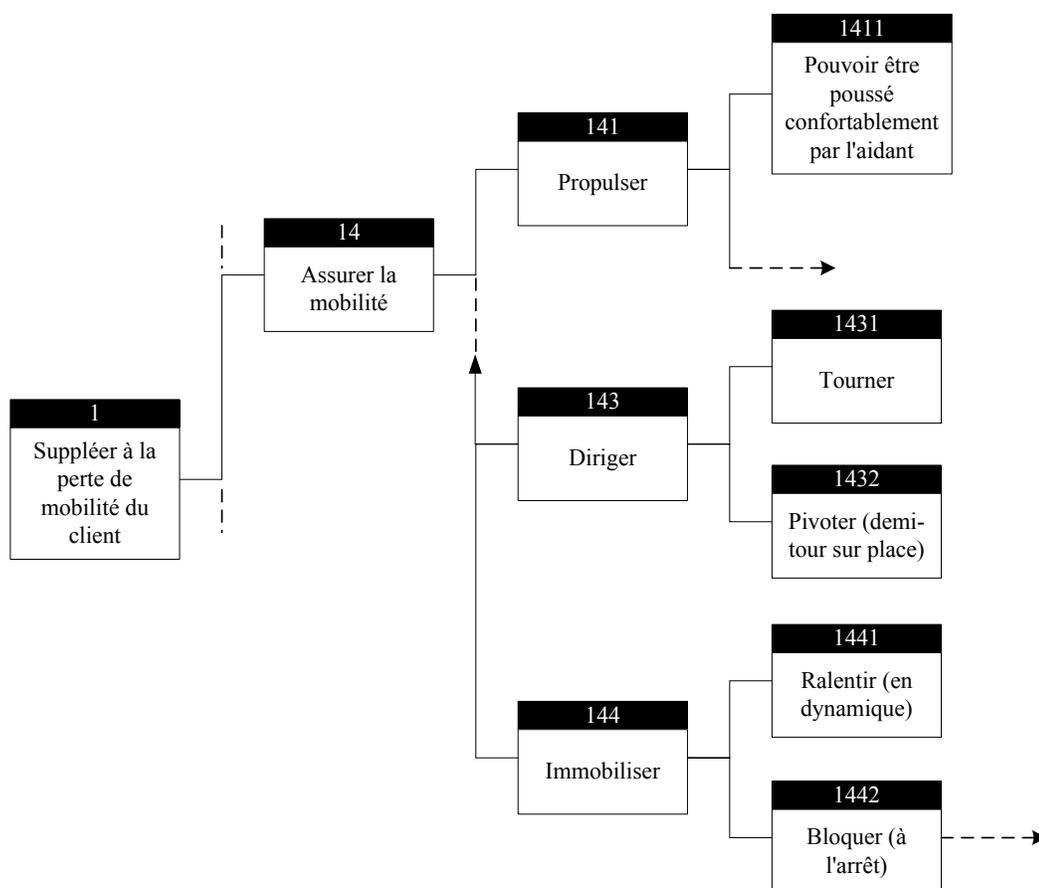
Annexe XVI.1 : Analyse fonctionnelle d'une AM

Cette étude, décrite par Zwingmann (2002) et menée en collaboration avec une ergothérapeute (Brigitte Gagnon) et deux ingénieurs (Claver Diallo et Marc Chouinard), a identifiée 11 fonctions principales en utilisant l'approche RESEAU de Tassinari (1997), présentée à l'Annexe II.1,.

L'étude de criticité (Annexe XVI.3) comporte une phase de validation de l'énonciation des fonctions. Le bilan des différentes rencontres conduit aux 11 intitulés suivants. Vis-à-vis de l'utilisateur, un fauteuil roulant :

- facilite le transfert et le positionnement (*f11*) ;
- assure soutien et confort (*f12*) ;
- assure la stabilité de l'ensemble (*f13*) ;
- assure la mobilité (*f14*) ;
- demeure confortable en déplacement (*f15*) ;
- optimise le déplacement et le contrôle (*f16*) ;
- facilite le fonctionnement au quotidien (*f17*) ;
- minimise les ajustements et les réparations (*f18*) ;
- permet l'accès et l'utilisation des items de l'environnement (*f19*) ;
- assure la santé et la sécurité de l'utilisateur (*f1a*) ;
- satisfait des besoins et goûts personnels (*f1b*).

La figure suivante présente un extrait de la décomposition fonctionnelle issue de cette étude. Le numéro de chaque sous-fonction est établi de la façon suivante : les chiffres à gauche permettent de retrouver les fonctions « parent », tandis que le dernier chiffre de droite donne le rang de la sous-fonction. Dans cette étude, l'identification des sous-fonctions s'est limitée aux fonctions de service, communes à la majeure partie des fauteuils. Une étude plus poussée, avec les fonctions techniques, limiterait la portée à un modèle de fauteuil en particulier.



Extrait de l'analyse fonctionnelle d'un fauteuil roulant

Annexe XVI.2 : Choix de la technique TRIAGE

On a vu que le déploiement de la fonction qualité pouvait être utilisé pour intégrer le point de vue du client dans le processus de mise au point du produit ou du service. Cependant, dans le cas particulier des fauteuils roulants, où le client n'est pas le seul décideur dans l'attribution d'un fauteuil roulant, nous avons utilisé la technique TRIAGE : Technique de Recherche de l'Information par l'Animation d'un Groupe Expert (Gervais *et al.* (2000)).

Cette technique d'animation de groupe est inductive et structurée. Elle se réalise avec l'aide d'un support visuel stimulant pour les participants. Elle offre l'avantage de faire interagir un groupe d'experts afin d'atteindre un consensus, tout en évitant de lourds traitements de données. Cette technique, réputée efficace, a été utilisée avec succès dans les domaines de la santé et de l'éducation,

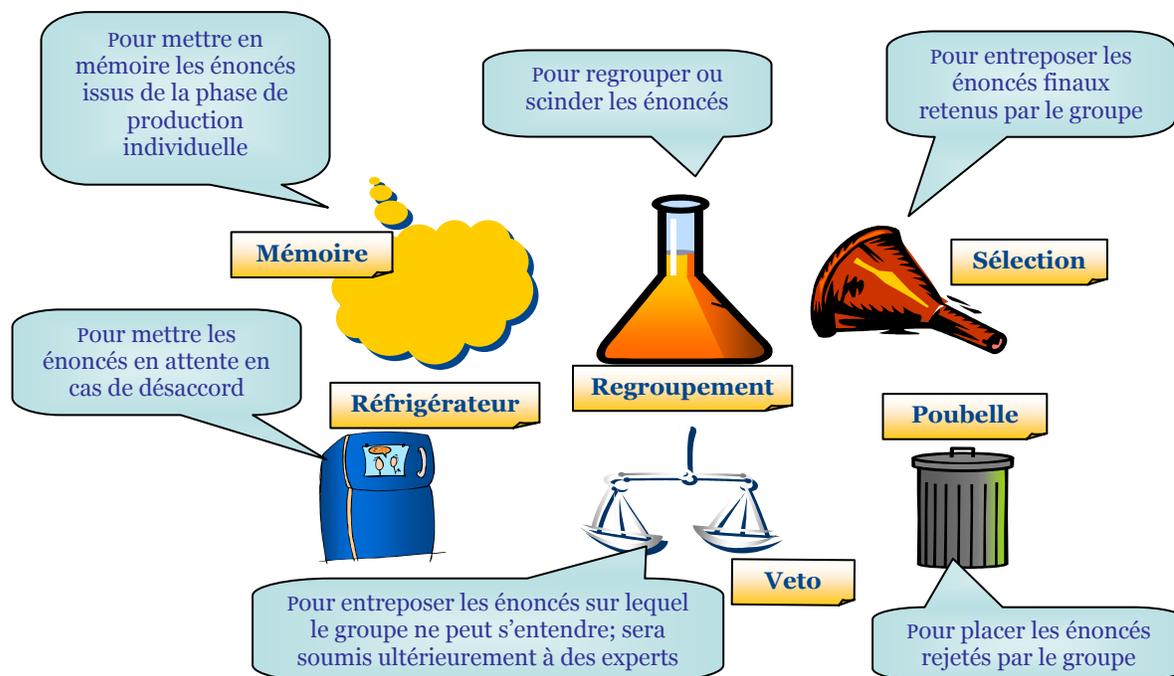
(Gervais *et al.* (2000)). La méthodologie de la technique TRIAGE, modifiée pour intégrer les résultats de l'analyse fonctionnelle, est donnée à l'Annexe XVI.3.

Annexe XVI.3 : Méthodologie de la technique TRIAGE

La technique TRIAGE est issue des méthodologies qualitatives de recherche utilisant des groupes d'individus. Elle est constituée de deux phases d'activités, la phase de production individuelle et la phase de production de groupe. Dans la phase de production individuelle, les participants sont invités individuellement à émettre des idées ou des opinions sur certains sujets déterminés. Dans la présente recherche, qui utilise une technique TRIAGE modifiée, cette étape a débuté par une analyse fonctionnelle (Annexe II). La phase de production individuelle permet alors au groupe de valider les fonctions pré-déterminées.

Par la suite, les participants sont conviés à une phase de production collective, pendant laquelle ils ont à classer les éléments dans différentes catégories (Figure ci-après) :

- les résultats de la production individuelle sont dans un premier temps placés dans la catégorie **Mémoire** ;
- les participants peuvent les déplacer dans la catégorie **Poubelle**, s'ils ne désirent pas les retenir ;
- ils peuvent également les déplacer dans la catégorie **Regroupement**, s'ils souhaitent les regrouper ou les modifier ;
- à partir de cette catégorie, les fonctions peuvent être placées dans la catégorie **Sélection**.
- si, pour un certain temps, les participants ne peuvent se décider sur la destination d'un énoncé, ils peuvent le placer dans la catégorie **Frigo**.
- les énoncés sur lesquels les individus ne peuvent se mettre en accord sont, finalement, placés dans la catégorie **Veto**, afin d'être soumis à des juges externes qui décideront de leur destination finale.



Exemple des sections visuelles de TRIAGE

Annexe XVI.4 : Composition des trois groupes d'experts

- Premier groupe d'usagers. 4 personnes qui :
 - o sont 1 femme et 3 hommes ;
 - o ont 39, 41, 43 et 51 ans (moyenne : 43,5 ans) ;
 - o dont les incapacités sont la quadriplégie (n=2), la tétraplégie (n=1) et la faiblesse musculaire (n=1) ;
 - o ont fauteuil roulant motorisé (n=3) ou fauteuil roulant manuel (n=1) ;
 - o utilisent un fauteuil roulant depuis 4 ans (n=1), 22 ans (n=2) et 31 ans (n=1) ;
 - o ont déjà eu 4, 6 et 10 fauteuils différents.
- Groupe d'ergothérapeutes. 6 personnes qui :
 - o sont 5 femmes et 1 homme ;
 - o ont 5, 8, 9, 9, 15 et 16 années d'expérience (moyenne : 10,3 ans) dont une grande partie est en relation avec l'attribution de FR : 4, 5, 8, 9, 14, 15 années d'expérience (moyenne : 9,2 ans) ;
 - o attribuent des FR quotidiennement (n=4) ou quelques fois par semaine ou quelques fois par mois (n=2) ;
 - o dont la clientèle est encéphalopathe (n=1), myélopathe (n=2) et des aides techniques (n=3).
- Deuxième groupe d'usagers. 6 personnes qui :
 - o sont 4 femmes et 2 hommes ;
 - o ont 25 (n=2), 28, 45, 52 et 53 ans (moyenne : 38 ans) ;

- o dont les incapacités sont la Spina-bifida (n=2), la blessure médullaire - parésie post trauma (n=1), la sclérose en plaque (n=1), la paraplégie (n=1) et aphasie et le manque de coordination (n=1) ;
- o ont un fauteuil roulant motorisé (n=1) et/ou un fauteuil roulant manuel (n=6) ;
- o utilisent un fauteuil roulant depuis 5, 10, 15, 19, 23 et 26 ans ;
- o ont déjà eu 2 (n=2), 3, 5 et 8 fauteuils différents.

Annexe XVI.5 : Résultat des trois rencontres avec les groupes experts

La technique TRIAGE a été choisie pour sa capacité à connaître ce que les individus privilégient, mais également **pourquoi** ils le font. Nous ne reportons ici que la hiérarchisation des fonctions, sans mentionner les raisons de ces choix. Afin d'augmenter la validité de l'analyse, la tenue de trois groupes successifs a été privilégiée. Les deux premiers groupes sont menés auprès d'utilisateurs de FR et le troisième auprès d'ergothérapeutes, afin d'illustrer les différences entre leur perception de la criticité des fonctions des FR. Le principe de triangulation des sources de données peut être évoqué pour justifier ce choix. La composition de ces groupes est donnée à l'Annexe XVI.4.

Pour l'étude, nous avons demandé aux participants de sélectionner puis hiérarchiser 5 des fonctions, retenues et validées, à partir des 11 initiales. Le tableau suivant présente les fonctions retenues ainsi que celles écartées. Pour chaque groupe, seules 9 fonctions subsistent. Cela est dû à la phase de validation, où certaines fonctions ont été scindées puis fusionnées avec d'autres. En fait, les énoncés issus de la validation par chacun des groupes sont tous légèrement différents. Le tableau suivant utilise les énoncés finaux obtenus en intégrant les commentaires de tous les groupes.

Hiérarchisation des fonctions d'une aide à la mobilité par TRIAGE

Fonctions sélectionnées		
Grp. d'utilisateurs 1	Grp. d'ergothérapeutes	Grp. d'utilisateurs 2
1 • assure la mobilité	• facilite le transfert et le positionnement	• assure la mobilité
2 • assure la santé et la sécurité de l'utilisateur • assure ... le confort	• assure la mobilité	• optimise le déplacement et le contrôle
3 • optimise le déplacement et le contrôle	• assure la santé et la sécurité de l'utilisateur	• assure la santé et la sécurité de l'utilisateur
4 • assure la stabilité de l'ensemble	• assure soutien et confort	• facilite le fonctionnement au quotidien
5	• permet l'accès et l'utilisation des items de l'environnement	• assure soutien et confort
Fonctions écartées		
Grp. d'utilisateurs 1	Grp. d'ergothérapeutes	Grp. d'utilisateurs 2
5 • minimise les ajustements et les réparations		
4 • permet l'accès et l'utilisation des items de l'environnement	• demeure confortable en déplacement	• demeure confortable en déplacement
3 • facilite le fonctionnement au quotidien	• optimise le déplacement et le contrôle	• permet l'accès et l'utilisation des items de l'environnement
2 • demeure confortable en déplacement	• facilite le fonctionnement au quotidien	• facilite le transfert et le positionnement
1 • satisfait des besoins et goûts personnels	• satisfait des besoins et goûts personnels	• satisfait des besoins et goûts personnels

En conclusion, les participants ont bien saisi le principe de l'analyse fonctionnelle à la base de l'étude et ont corrigé les énoncés en gardant le formalisme (verbe transitif+complément). Cette étude permet de tirer un certain nombre de conclusions en mettant l'accent sur les hiérarchisations relatives identiques, les priorités différentes selon qu'on soit usager ou clinicien et les non priorités identiques.

Annexe XVI.6 : Extrait de l'AMDEC d'un fauteuil roulant réalisée à l'aide de RELEX® - Richard (2003)



Pièce	Fonction	Mode de Défaillance	Effet Local	Effet Suivant	Conséquence Finale	Mode de détection	Gravité	Remarques
Châssis	Élément principal du fauteuil	Rupture	La pièce casse, soumise à des forces extérieures	Le fonctionnement du fauteuil est gêné	La défaillance de la pièce entraîne l'immobilisation du fauteuil roulant	Visuelle	I. Catastrophique	Remplacer le châssis
		Rupture de soudure	La soudure de la pièce se rompt du fait de sa trop grande sollicitation	Le fonctionnement du fauteuil est fortement perturbé	La défaillance de la pièce entraîne l'immobilisation du fauteuil roulant	Visuelle	I. Catastrophique	Remplacer le châssis
Mécanisme de pliage	Permettre de ranger le fauteuil dans un espace restreint	Rupture	La pièce casse, soumise à des forces extérieures	Gêne dans l'utilisation du fauteuil	Le fonctionnement du fauteuil est gêné	Visuelle	I. Catastrophique	Remplacer le mécanisme de pliage ainsi que le châssis
		Rupture de soudure	La soudure de la pièce se rompt du fait de sa trop grande sollicitation	Gêne dans l'utilisation du fauteuil	La rupture de soudure de la pièce va désolidariser le châssis	Visuelle	II. Critique	Réparer la soudure
		Désassemblage	Les éléments de la pièce se désassemblent, ou elle se désolidarise du châssis	Le fauteuil perd de sa stabilité	Difficultés pour replier le fauteuil	Visuelle	III. Marginale	Resserrer les vis d'assemblage du mécanisme
		Grippage	Le mécanisme se bloque du fait d'un manque de lubrification	Le fauteuil est très dur à replier	Le fauteuil est impossible à replier	Visuelle	IV. Mineure	Lubrifier le mécanisme de pliage

Annexe XVII. Définition des géométries des fauteuils

Annexe XVII.1 : Coordonnées nominales des points de la structure droite 2B01

	Num. Noeud	Coord. en X (m)	Coord. en Y (m)	Coord. en Z (m)
Point Ad	1	-0.120	+0.700	+0.000
Point Bd	2	+0.000	+0.700	+0.000
Point Cd	3	+0.000	+0.160	+0.000
Point Dd	4	+0.040	+0.160	+0.000
Point Ed	5	+0.040	+0.200	+0.000
Point Fd	6	+0.210	+0.200	+0.000
Point Gd	7	+0.380	+0.200	+0.000
Point Hd	8	+0.380	+0.160	+0.000
Point Id	9	+0.430	+0.110	+0.000
Point Jd	10	+0.430	+0.000	+0.000
Point Kd	11	+0.250	+0.000	+0.000
Point Ld	12	+0.000	+0.000	+0.000
Point Md	13	+0.000	+0.050	+0.000

Annexe XVII.2 : Coordonnées nominales des points de la structure gauche 2B01

	Num. Noeud	Coord. en X (m)	Coord. en Y (m)	Coord. en Z (m)
Point Ag	14	-0.120	+0.700	+0.380
Point Bg	15	+0.000	+0.700	+0.380
Point Cg	16	+0.000	+0.160	+0.380
Point Dg	17	+0.040	+0.160	+0.380
Point Eg	18	+0.040	+0.200	+0.380
Point Fg	19	+0.250	+0.200	+0.380
Point Gg	20	+0.380	+0.200	+0.380
Point Hg	21	+0.380	+0.160	+0.380
Point Ig	22	+0.430	+0.110	+0.380
Point Jg	23	+0.430	+0.000	+0.380
Point Kg	24	+0.210	+0.000	+0.380
Point Lg	25	+0.000	+0.000	+0.380
Point Mg	26	+0.000	+0.050	+0.380

Annexe XVII.3 : Coordonnées nominales des points des bras centraux 2B01

	Num. Noeud	Coord. en X (m)	Coord. en Y (m)	Coord. en Z (m)
Point P	27	+0.210	+0.100	+0.190
Point Q	28	+0.250	+0.100	+0.190

Annexe XVII.4 : Définition des poutres de la structure droite 2B01

	Extrémité 1	Extrémité 2	Matériau	Section
Élément 1	1	2	Aluminium	Tube évidé
Élément 2	2	3	Aluminium	Tube évidé
Élément 3	3	4	Aluminium	Tube évidé
Élément 4	4	5	Acier	Carré
Élément 5	5	6	Aluminium	Tube évidé
Élément 6	6	7	Acier	Carré
Élément 7	7	8	Aluminium	Tube évidé
Élément 8	4	9	Aluminium	Tube évidé
Élément 9	8	9	Aluminium	Tube évidé
Élément 10	9	10	Aluminium	Tube évidé
Élément 11	10	11	Aluminium	Tube évidé
Élément 12	11	12	Aluminium	Tube évidé
Élément 13	12	13	Aluminium	Tube évidé
Élément 14	13	3	Aluminium	Tube évidé

Annexe XVII.5 : Définition des poutres de la structure gauche 2B01

	Extrémité 1	Extrémité 2	Matériau	Section
Élément 15	14	15	Aluminium	Tube évidé
Élément 16	15	16	Aluminium	Tube évidé
Élément 17	16	17	Aluminium	Tube évidé
Élément 18	17	18	Acier	Carré
Élément 19	18	19	Aluminium	Tube évidé
Élément 20	19	20	Acier	Carré
Élément 21	20	21	Aluminium	Tube évidé
Élément 22	17	21	Aluminium	Tube évidé
Élément 23	21	22	Aluminium	Tube évidé
Élément 24	22	23	Aluminium	Tube évidé
Élément 25	23	24	Aluminium	Tube évidé
Élément 26	24	25	Aluminium	Tube évidé
Élément 27	25	26	Aluminium	Tube évidé
Élément 28	26	16	Aluminium	Tube évidé

Annexe XVII.6 : Définition des poutres des bras centraux 2B01

	Extrémité 1	Extrémité 2	Matériau	Section
Élément 29	6	27	Aluminium	Tube évidé
Élément 30	27	24	Aluminium	Tube évidé
Élément 31	11	28	Aluminium	Tube évidé
Élément 32	28	19	Aluminium	Tube évidé
Élément 33	27	28	Acier	Disque plein

Annexe XVII.7 : Coordonnées nominales des points de la structure droite 3B01

	Num. Noeud	Coord. en X (m)	Coord. en Y (m)	Coord. en Z (m)
Point Ad	1	-0.120	+0.700	+0.000
Point Bd	2	+0.000	+0.700	+0.000
Point Cd	3	+0.000	+0.200	+0.000
Point Dd	4	+0.130	+0.200	+0.000
Point Ed	5	+0.250	+0.200	+0.000
Point Fd	6	+0.430	+0.200	+0.000
Point Gd	7	+0.430	+0.050	+0.000
Point Hd	8	+0.330	+0.000	+0.000
Point Id	9	+0.210	+0.000	+0.000
Point Jd	10	+0.130	+0.000	+0.000
Point Kd	11	+0.000	+0.000	+0.000
Point Ld	12	+0.000	+0.140	+0.000
Point Md	13	+0.060	+0.140	+0.000
Point Nd	14	+0.130	+0.140	+0.000

Annexe XVII.8 : Coordonnées nominales des points de la structure gauche 3B01

	Num. Noeud	Coord. en X (m)	Coord. en Y (m)	Coord. en Z (m)
Point Ag	15	-0.120	+0.700	+0.380
Point Bg	16	+0.000	+0.700	+0.380
Point Cg	17	+0.000	+0.200	+0.380
Point Dg	18	+0.130	+0.200	+0.380
Point Eg	19	+0.210	+0.200	+0.380
Point Fg	20	+0.430	+0.200	+0.380
Point Gg	21	+0.430	+0.050	+0.380
Point Hg	22	+0.330	+0.000	+0.380
Point Ig	23	+0.250	+0.000	+0.380
Point Jg	24	+0.130	+0.000	+0.380
Point Kg	25	+0.000	+0.000	+0.380
Point Lg	26	+0.000	+0.140	+0.380
Point Mg	27	+0.060	+0.140	+0.380
Point Ng	28	+0.130	+0.140	+0.380

Annexe XVII.9 : Coordonnées nominales des points des bras centraux 3B01

	Num. Noeud	Coord. en X (m)	Coord. en Y (m)	Coord. en Z (m)
Point P	29	+0.210	+0.100	+0.190
Point Q	30	+0.250	+0.100	+0.190

Annexe XVII.10 : Définition des poutres de la structure droite 3B01

	Extrémité 1	Extrémité 2	Matériau	Section
Élément 1	1	2	Aluminium	Tube évidé
Élément 2	2	3	Aluminium	Tube évidé
Élément 3	3	4	Aluminium	Tube évidé
Élément 4	4	5	Aluminium	Tube évidé
Élément 5	5	6	Aluminium	Tube évidé
Élément 6	6	7	Aluminium	Tube évidé
Élément 7	7	8	Aluminium	Tube évidé
Élément 8	8	9	Aluminium	Tube évidé
Élément 9	9	10	Aluminium	Tube évidé
Élément 10	10	11	Aluminium	Tube évidé
Élément 11	11	12	Aluminium	Tube évidé
Élément 12	12	13	Acier	Carré
Élément 13	13	14	Acier	Carré
Élément 14	14	10	Aluminium	Tube évidé
Élément 15	4	14	Aluminium	Tube évidé
Élément 16	3	12	Aluminium	Tube évidé

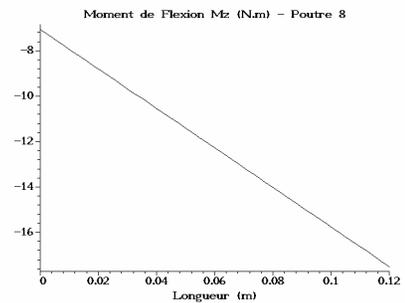
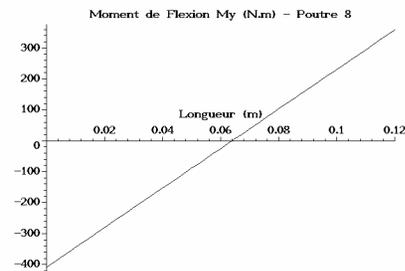
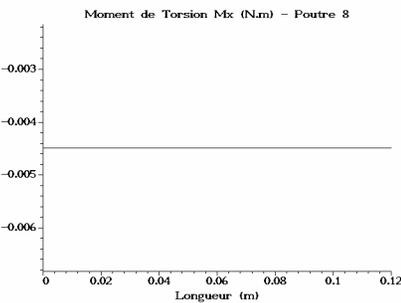
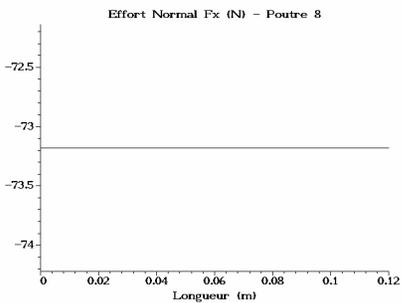
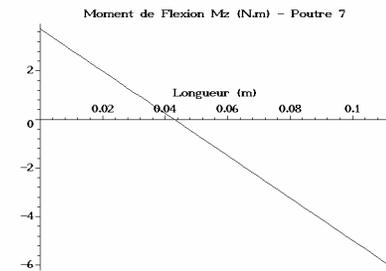
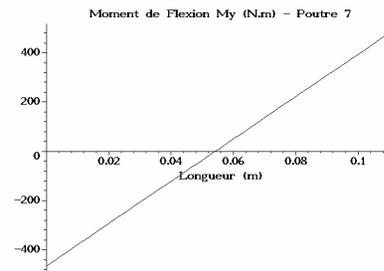
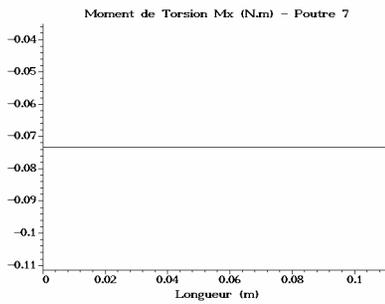
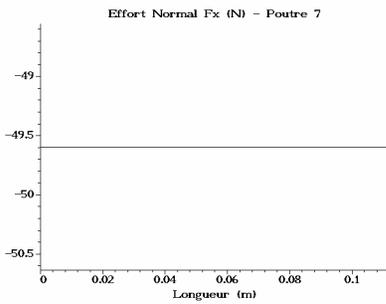
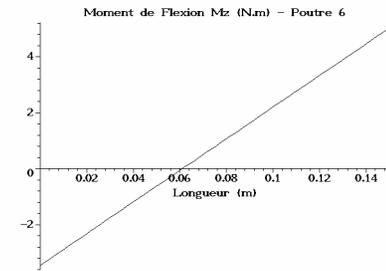
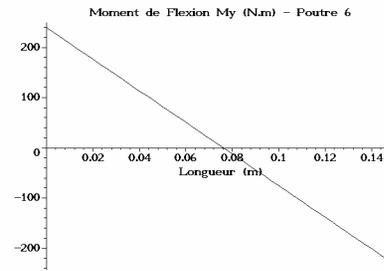
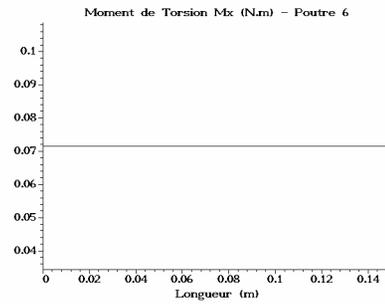
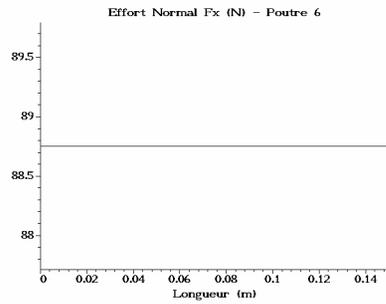
Annexe XVII.11 : Définition des poutres de la structure gauche 3B01

	Extrémité 1	Extrémité 2	Matériau	Section
Élément 17	15	16	Aluminium	Tube évidé
Élément 18	16	17	Aluminium	Tube évidé
Élément 19	17	18	Aluminium	Tube évidé
Élément 20	18	19	Aluminium	Tube évidé
Élément 21	19	20	Aluminium	Tube évidé
Élément 22	20	21	Aluminium	Tube évidé
Élément 23	21	22	Aluminium	Tube évidé
Élément 24	22	23	Aluminium	Tube évidé
Élément 25	23	24	Aluminium	Tube évidé
Élément 26	24	25	Aluminium	Tube évidé
Élément 27	25	26	Aluminium	Tube évidé
Élément 28	26	27	Acier	Carré
Élément 29	27	28	Acier	Carré
Élément 30	28	24	Aluminium	Tube évidé
Élément 31	18	28	Aluminium	Tube évidé
Élément 32	17	26	Aluminium	Tube évidé

Annexe XVII.12 : Définition des poutres des bras centraux 3B01

	Extrémité 1	Extrémité 2	Matériau	Section
Élément 33	9	29	Acier	Tube évidé
Élément 34	29	19	Acier	Tube évidé
Élément 35	23	30	Acier	Tube évidé
Élément 36	30	5	Acier	Tube évidé
Élément 37	29	30	Acier	Disque plein

Annexe XVIII. Calculs des efforts dans la structure du modèle 3B01

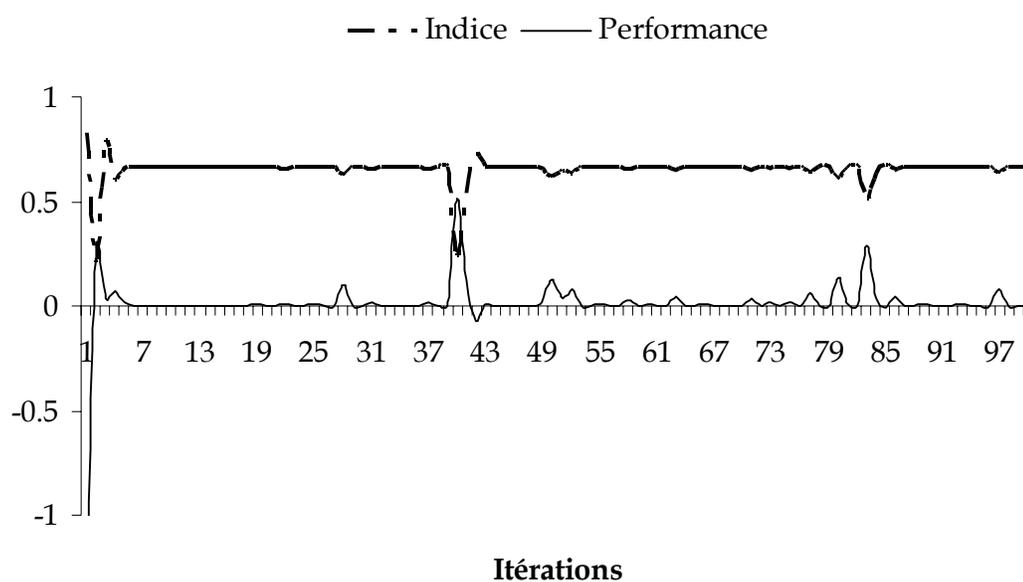


Annexe XIX. Calculs de l'indice de fiabilité

Annexe XIX.1 : Étapes de FORM2 pour 3B01 - normalisation identique

Étape 1		$z(\bullet)$ est définie de façon implicite				
Étape 2		$z()$ initial : 0.00201428				
Étape 3	μ_{X5}	235233508	160316599	229769995	...	241863577
	σ_{X5}	299719660	58242805.1	125572672	...	148626147
	μ_{X8}	0.00130685	0.00115997	0.0013745	...	0.00136596
	σ_{X8}	0.00166511	0.00054621	0.00090962	...	0.00088353
	μ_{X32}	-589.270019	214.21283	260.042473	...	255.050539
	σ_{X32}	791.83409	178.401903	219.142047	...	258.849753
Étape 4	$\delta g / \delta_{X5}$	2.44E-09	1.43E-08	1.60E-08	...	5.59E-09
	$\delta g / \delta_{X8}$	311.638	1152.1691	1963.20395	...	764.228553
	$\delta g / \delta_{X32}$	-0.00079842	-0.00057484	8.16E-05	...	-0.00278876
Étape 5/6		Calculs dans l'espace des coordonnées standard				
Étape 7	Nouveau β	0.82778167	0.20643845	0.78104381	...	0.66620375
	$\Delta\beta$		0.62134323	0.57460537	...	7.7381E-05
Étape 8	Nouveau X_5	69956738.3	150828151	156624348	...	178217753
	Nouveau X_8	0.00065606	0.00109257	0.00090284	...	0.00105846
	Nouveau X_{32}	-212.213495	217.800098	258.9041	...	351.36312
	Nouveau $z()$	-1.40960102	0.28110453	0.0380405	...	0.00020992

Annexe XIX.2 : Évolutions de β et $z(\bullet)$ pour 3B01 - normalisation identique

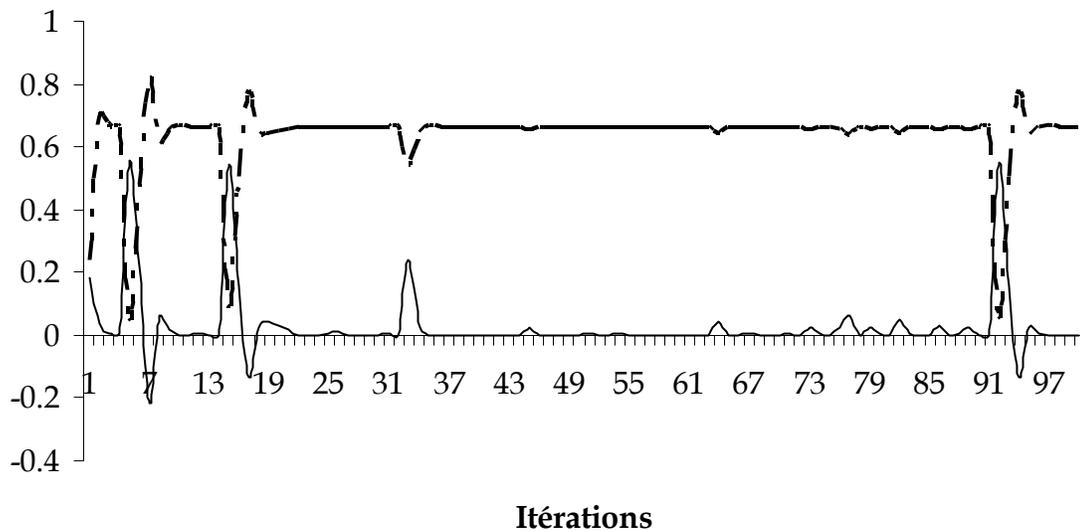


Annexe XIX.3 : Étapes de FORM2 pour 3B01 - charge (X_{32}) re-normalisée

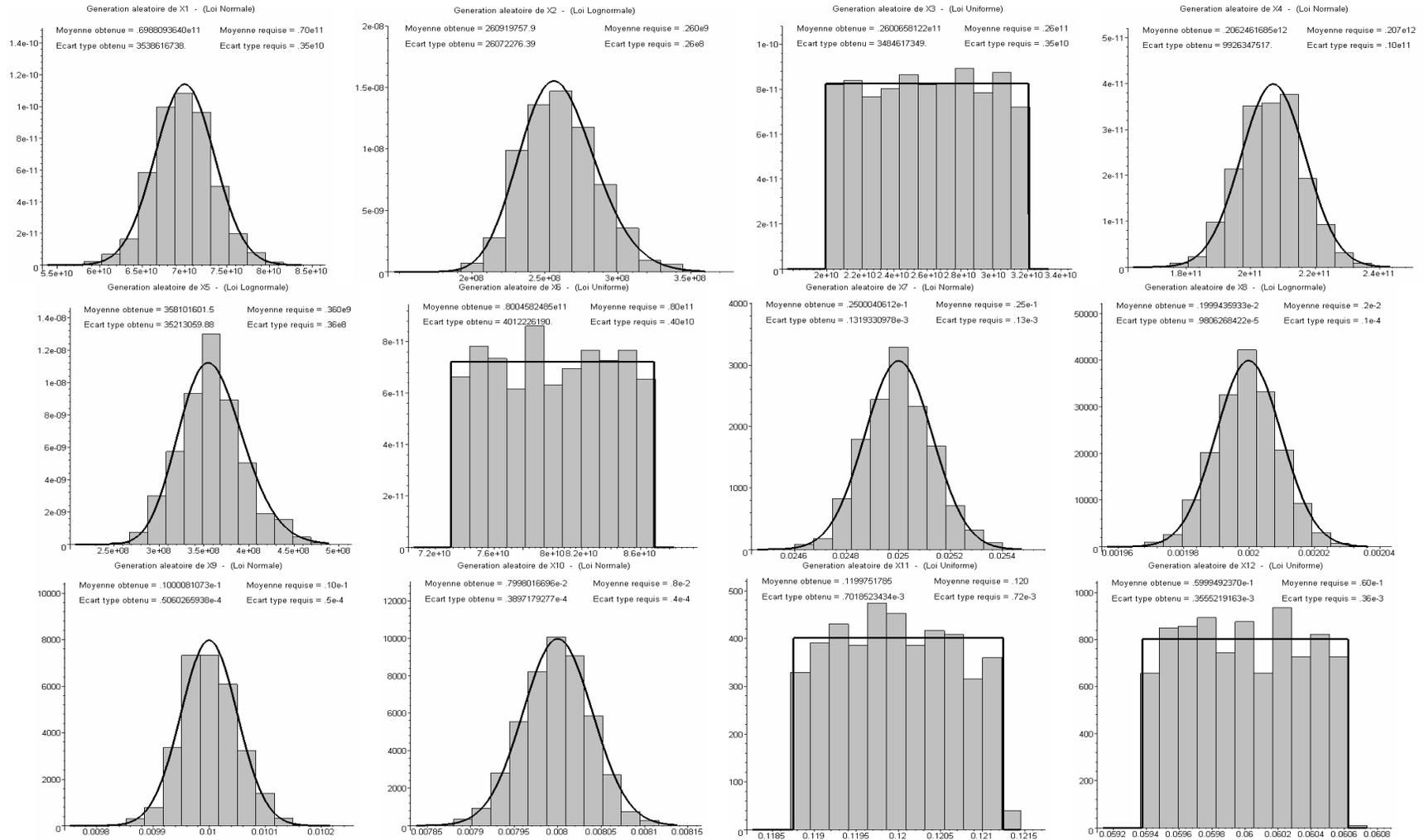
Étape 1		$z(\bullet)$ est définie de façon implicite				
Étape 2		$z()$ initial : 0.0020144269				
Étape 3	μ_{X5}	235233508	242296618	234043301	...	241396930
	σ_{X5}	299719660	149652142	132755429	...	147542426
	μ_{X8}	0.00130685	0.00137358	0.00135149	...	0.00136376
	σ_{X8}	0.00166511	0.00090667	0.00084462	...	0.00087725
	μ_{X32}	261	261	261	...	261
	σ_{X32}	415.550589	234.366694	233.678679	...	242.268261
Étape 4	$\delta g / \delta X_5$	2.44E-09	5.55E-09	5.13E-09	...	5.63E-09
	$\delta g / \delta X_8$	310.678	655.660782	653.027648	...	769.531719
	$\delta g / \delta X_{32}$	-0.00079842	-0.00082207	-0.00271425	...	-0.00280373
Étape 5/6		Calculs dans l'espace des coordonnées standard				
Étape 7	Nouveau β	0.24208708	0.70478002	0.66615871	...	0.66647111
	$\Delta\beta$		0.46269294	0.0386213	...	0.00042284
Étape 8	Nouveau X_5	179750542	159455520	178603058	...	177027052
	Nouveau X_8	0.00108902	0.00101449	0.00106574	...	0.00105282
	Nouveau X_{32}	295.866233	291.083278	351.91256	...	347.404594
	Nouveau $z()$	0.18224309	0.03721843	0.00622015	...	8.48E-06

Annexe XIX.4 : Évolutions de β et $z(\bullet)$ pour 3B01 - charge (X_{32}) re-normalisée

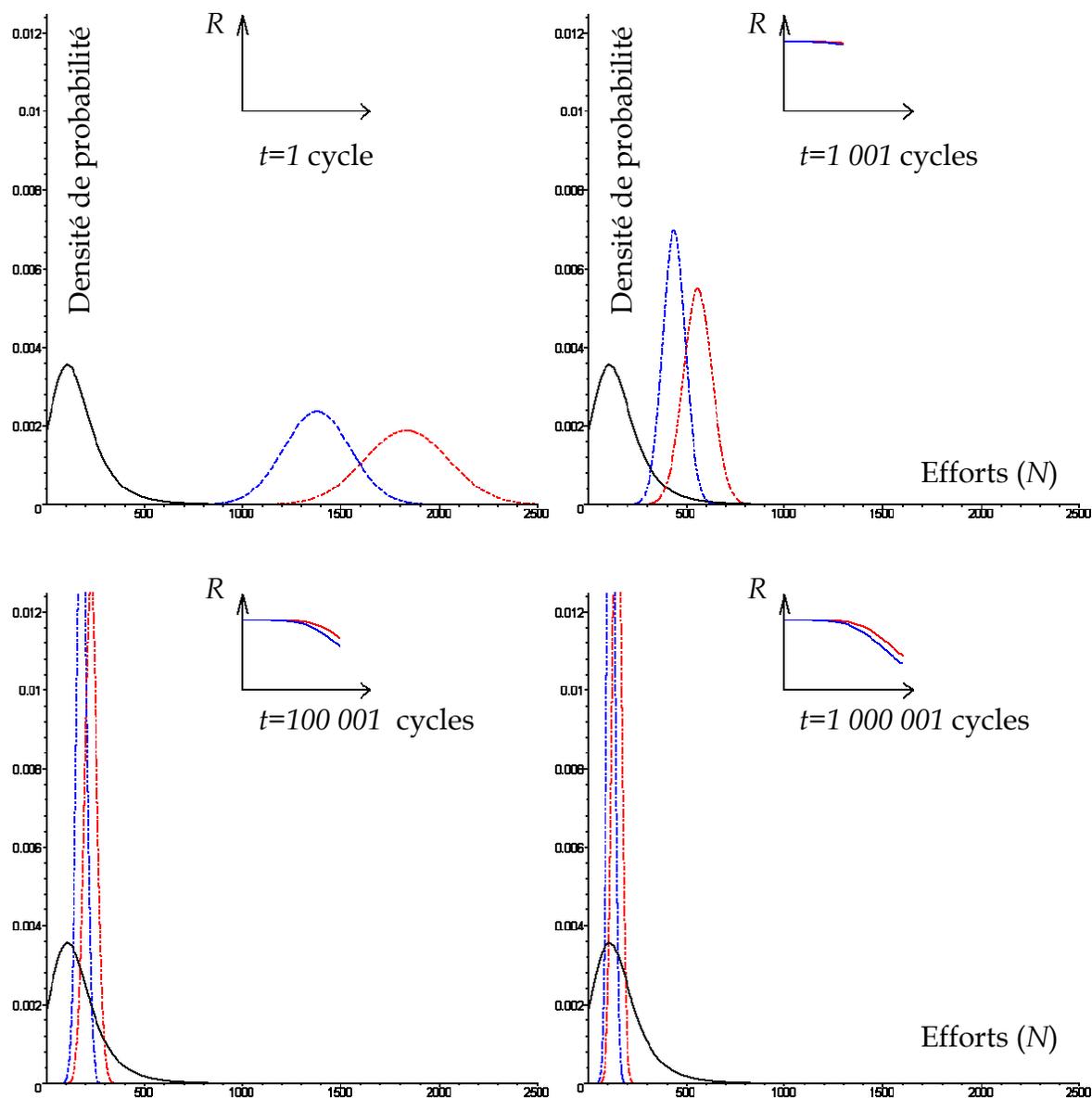
— - - Indice ——— Performance



Annexe XX. Génération aléatoire des variables de 3B01 par Monte Carlo

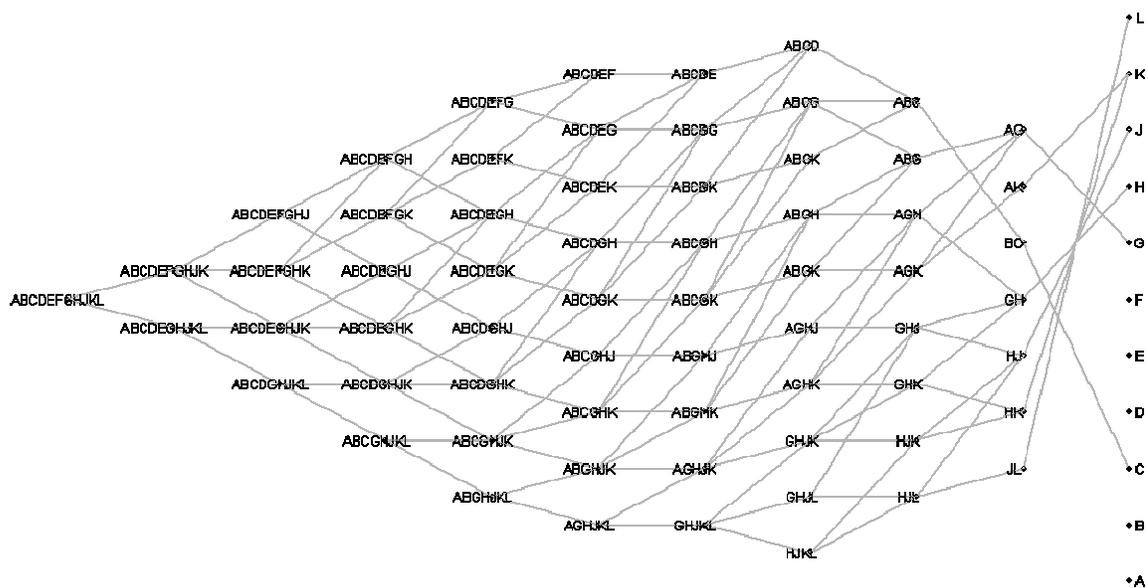


Annexe XXI. Évolution temporelle de la fiabilité et de la résistance

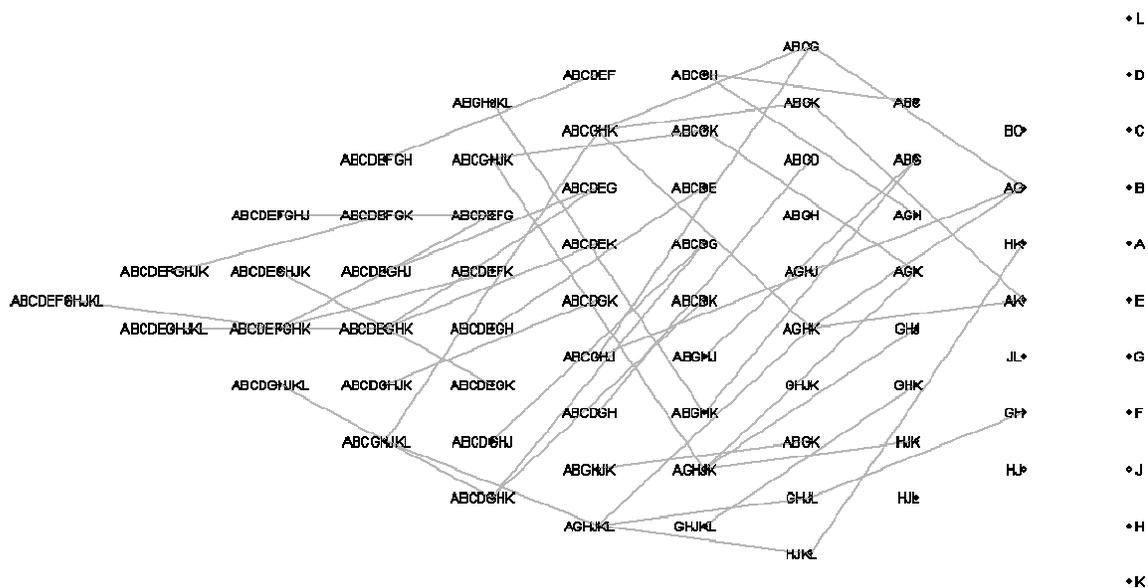


Annexe XXII. Représentation multi-couches du graphe ET/OU de l'AFI

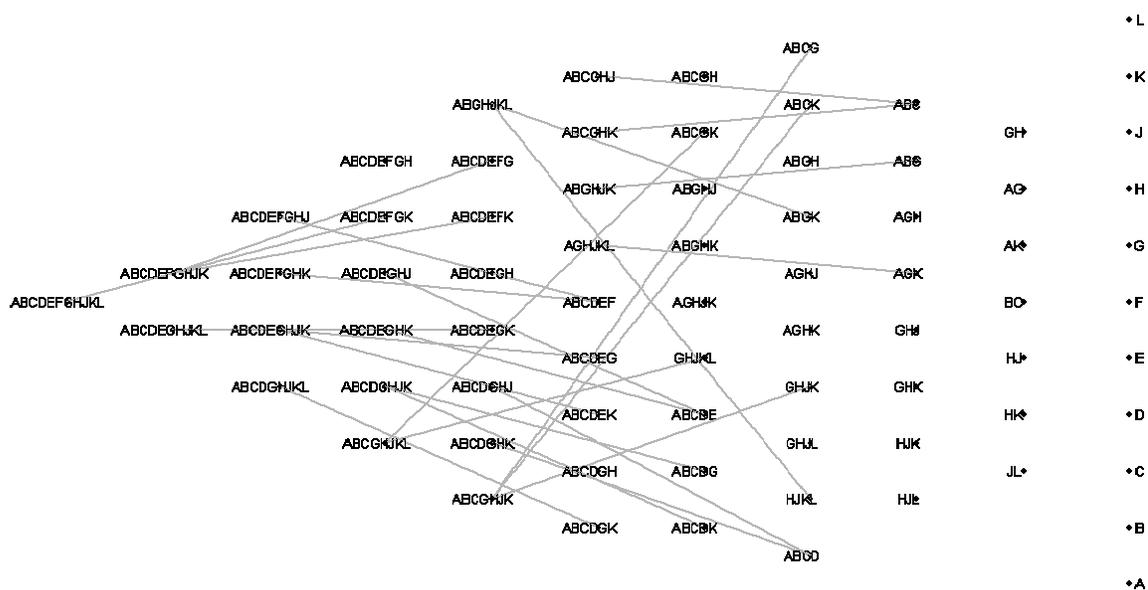
Annexe XXII.1 : 133 actions de séparation d'une pièce seulement



Annexe XXII.2 : 48 actions de soustraction d'un sous-assemblage de 2 pièces



Annexe XXII.3 : 26 actions de soustraction d'un sous-assemblage de 3 pièces



Annexe XXII.4 : 14 actions de soustraction d'un sous-assemblage de 4 pièces (12) et de 5 pièces (2)

