

THESE

Présentée devant

L'ECOLE CENTRALE DE LYON

Ecole doctorale MEGA

Spécialité : Mécanique

pour obtenir le titre de Docteur

Par

Mathieu GLADE

Titre de la thèse

**Modélisation des coûts de cycle de vie :
prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité
Application à l'aéronautique**

Soutenue le 21 janvier 2005 devant la commission d'examen

Directeur de thèse	P.Lyonnet	Professeur des Universités, LTDS/ENISE UMR5513
Président du Jury	A.Vautrin	Professeur des Universités, Ecole des Mines Saint Etienne
Rapporteur	J.C Boquet	Professeur des Universités, Ecole Centrale Paris
Rapporteur	M. Chatelet	Professeur des Universités, ISTIT, Troyes
Examineur	J.M Bergheau	Professeur des Universités, LTDS/ENISE UMR5513
Examineur	R.Toscano	Maître de conférences, LTDS/ENISE UMR5513
Examineur	M.Longère	Chef du service maintenance Eurocopter

Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à toutes les personnes qui ont permis le bon déroulement de ces travaux de thèse.

Je remercie sincèrement le Professeur Patrick LYONNET, responsable de recherche sur le thème de la maintenance à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de St Etienne, qui a assuré le suivi de mes travaux en me fournissant le support scientifique et les conseils nécessaires à ma formation de jeune chercheur.

Je souhaite de plus exprimer ma gratitude à M. Jean-Yves LONGERE, responsable du service Maintenance Design de la société EUROCOPTER. Je citerai également MM. Stefan DOMENGE, Joris CEZARD et Frédéric MATHERON avec qui j'ai pris plaisir à travailler durant les trois ans de cette thèse.

Enfin j'accorde une mention spéciale à ma fiancée Thoai-An, ma famille et mes amis pour leur affection et leur soutien constants.

Sommaire

REMERCIEMENTS	1
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	11
CHAPITRE I. CONCEPTION ET COUTS D'EXPLOITATION	13
1. LE PROCESSUS DE CONCEPTION	13
1.1. AVANT PROPOS	13
1.2. L'ACTIVITE DE CONCEPTION	13
1.3. LES METHODES DE CONCEPTION	14
1.3.1. <i>Préambule</i>	14
1.3.2. <i>Historique : de l'analyse de la valeur à la conception par coût objectif du cycle de vie</i>	15
1.3.3. <i>Les méthodes de conception</i>	16
1.3.3.1. L'Analyse de la Valeur	16
1.3.3.2. Conception à coûts objectifs	17
1.3.3.3. Conception par objectifs « Design To Goal »	19
1.3.4. <i>Conception par coûts objectifs : problèmes soulevés.</i>	19
2. CONCEPTION ET CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT	21
2.1. INTRODUCTION	21
2.2. LE CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT	21
2.2.1. <i>Cycle de vie d'un produit</i>	21
2.2.2. <i>Cycle de Vie d'un Projet</i>	22
2.3. LES COUTS GLOBAUX DE POSSESSION	24
2.3.1. <i>Avant propos</i>	24
2.3.2. <i>La modélisation des coûts de cycle de vie</i>	26
2.3.2.1. Introduction	26
2.3.2.2. Définitions	27
2.3.2.3. La modélisation du "life cycle cost"	28
2.3.3. <i>L'impact de la maintenance dans les coûts de cycle de vie</i>	30
2.4. CONCLUSION	32
3. LA MAINTENANCE ET SES COUTS	33
3.1. LA MAINTENANCE : CONCEPTS FONDAMENTAUX	33
3.1.1. <i>Définitions</i>	33
3.1.1.1. Définitions générales	33
3.1.1.2. Maintenance et sûreté de fonctionnement	33
3.1.1.3. Le processus de maintenance	34
3.1.2. <i>Politiques de maintenance</i>	35
3.1.2.1. Les politiques de maintenance	35
3.1.2.2. La maintenance corrective	36
3.1.2.3. La maintenance préventive	36
3.1.2.4. Les indicateurs de performance de la maintenance	37
3.2. LES COUTS DE MAINTENANCE	38
3.2.1. <i>Définition et concepts</i>	38
3.2.2. <i>Les coûts de maintenance indirects</i>	39
3.2.3. <i>Les coûts de maintenance directs</i>	39
3.2.3.1. Analyse des coûts de maintenance	39
3.2.3.2. Le DMC	40

3.3.	ESTIMATION DES COUTS DE MAINTENANCE.....	41
3.3.1.	<i>Description</i>	41
3.3.1.1.	Coût de maintenance d'une usine.....	42
3.3.1.2.	Estimation des coûts de support par l'USAF.....	42
3.3.1.3.	Estimation du coût de maintenance de l'avionique d'un appareil.....	43
3.3.1.4.	Estimation du coût de pièces de rechanges.....	43
3.3.1.5.	Evaluation des coûts de maintenance d'un aéronef en centre d'entretien.....	44
3.3.1.6.	Coût global d'une automobile.....	45
3.3.2.	<i>Limites perçues aux modèles existants</i>	46
4.	LE COSTING : OUTILS ET METHODES	47
4.1.	LES BASES DU COSTING.....	47
4.1.1.	<i>Présentation</i>	47
4.1.2.	<i>Modèle d'évaluation de coûts</i>	47
4.1.2.1.	Méthode d'estimation des éléments de coût.....	48
4.1.2.2.	Influence de la temporalité et conventions économiques de comparaison.....	49
4.1.2.3.	Les méthodes d'estimation de coût.....	52
4.2.	LES MODELES PARAMETRIQUES.....	54
4.2.1.	<i>Introduction</i>	54
4.2.1.1.	Processus de développement d'un modèle paramétrique.....	54
4.2.1.2.	Mesure de la performance de l'estimation.....	55
4.2.2.	<i>Les modèles régressifs</i>	57
4.2.2.1.	Régression linéaire simple.....	57
4.2.2.2.	Régression non linéaire.....	58
4.2.2.3.	Régression multiple.....	59
4.2.2.4.	Combinaison de relations linéaires et non linéaires.....	60
4.2.2.5.	La régression floue.....	61
4.2.3.	<i>Les Modèles cognitifs</i>	62
4.2.3.1.	Les réseaux de neurones.....	62
4.2.3.2.	La logique floue.....	65
4.2.4.	<i>Synthèse sur les modèles paramétriques</i>	67
4.3.	MODELES ANALYTIQUES.....	68
4.3.1.	<i>Introduction</i>	68
4.3.2.	<i>Méthodes "à la main"</i>	69
4.3.2.1.	Présentation du modèle.....	69
4.3.2.2.	Exemple d'application.....	69
4.3.3.	<i>La Méthode ABC</i>	70
4.3.3.1.	Introduction à la méthode ABC.....	70
4.3.3.2.	Exemple d'application.....	73
4.3.3.3.	Commentaires.....	75
4.3.4.	<i>La méthode des Unités de Valeur Ajoutée (UVA)</i>	75
4.3.4.1.	Présentation.....	75
4.3.4.2.	Exemple d'application.....	76
4.3.4.3.	Conclusion.....	77
4.3.5.	<i>Conclusion sur l'usage des modèles analytiques</i>	78
4.4.	LES MODELES ANALOGIQUES.....	78
4.4.1.	<i>Présentation</i>	78
4.4.2.	<i>Conclusions et limites des modèles analogiques</i>	80
4.5.	BILAN SUR LES METHODES D'EVALUATION DE COUTS.....	81
5.	CREATION DE MODELES DE COUTS DE MAINTENANCE.....	83
5.1.	PRINCIPES GENERAUX.....	83
5.1.1.	<i>Mise en œuvre de modèles de coût de maintenance</i>	83
5.1.1.1.	Recherche de zones de coût critiques.....	83
5.1.1.2.	Recherche de paramètres influents.....	83
5.1.1.3.	Quantification de l'influence des paramètres.....	83
5.1.1.4.	Construction du modèle.....	84
5.1.2.	<i>Structure de modélisation des coûts de maintenance</i>	84
5.1.2.1.	Architecture globale des modèles.....	84
5.1.2.2.	Modèle de coût nominal de maintenance.....	85
5.1.2.3.	Modèle de maturité.....	85
5.1.2.4.	Résistance aux contraintes de service.....	86
5.1.2.5.	Typologie d'usage en maintenance.....	86
5.1.3.	<i>Prise en compte de la fiabilité</i>	87
5.2.	MODELE DMC D'ELEMENTS MECANIQUES D'HELICOPTERE.....	87

5.2.1.	<i>Introduction et analyse technique</i>	87
5.2.2.	<i>Modélisation des coûts de maintenance</i>	88
5.2.2.1.	Recherche de zones de coûts critiques.....	88
5.2.2.2.	Recherche de paramètres influents.....	89
5.2.2.3.	Forme du modèle.....	90
5.2.2.4.	Recalage empirique du modèle principal.....	91
5.2.3.	<i>Conclusions et limites du modèle</i>	93
5.3.	COUTS DE MAINTENANCE D'UNE SERVOCOMMANDE D'HELICOPTERE.....	93
5.3.1.	<i>Introduction</i>	93
5.3.1.1.	Servocommande : définition.....	93
5.3.1.2.	Introduction à la modélisation.....	94
5.3.2.	<i>Les réseaux de neurones</i>	94
5.3.3.	<i>La modélisation par réseau de neurones</i>	97
5.3.4.	<i>Résultats et analyse</i>	100
5.3.5.	<i>Bilan</i>	101
5.4.	COUTS DE MAINTENANCE DE SYSTEMES AVIONIQUES.....	102
5.4.1.	<i>Préambule</i>	102
5.4.2.	<i>Analyse des coûts</i>	102
5.4.2.1.	Les coûts logistiques.....	102
5.4.2.2.	Coût des tests de détection et de validation.....	103
5.4.2.3.	Coût de stock.....	104
5.4.2.4.	Coût de l'échange standard.....	105
5.4.2.5.	Eléments de rechange.....	105
5.4.2.6.	Présentation du modèle complet.....	106
5.4.3.	<i>Bilan sur les coûts de maintenance de l'avionique</i>	107
5.5.	CHOIX D'UNE MODELISATION ADAPTEE.....	107
6.	CONCLUSION SUR LA MODELISATION DES COUTS DE MAINTENANCE	110
CHAPITRE II. LA PREVISION DE FIABILITE		113
1.	INTRODUCTION	113
1.1.	PREAMBULE.....	113
1.2.	HISTORIQUE.....	114
1.3.	PRESENTATION DU PLAN.....	115
2.	FIABILITE : PRINCIPES ET DEFINITIONS	116
2.1.	AVANT PROPOS.....	116
2.2.	DEFINITION ET NOTATIONS.....	116
2.2.1.	<i>Fiabilité</i>	116
2.2.2.	<i>Défaillance et taux de défaillance</i>	117
2.2.3.	<i>Temps de fonctionnement</i>	119
2.2.3.1.	Le MTBF.....	120
2.2.3.2.	Fiabilité et maintenance préventive.....	120
2.3.	LES METHODES PREVISIONNELLES DE FIABILITE.....	122
2.3.1.	<i>Introduction</i>	122
2.3.2.	<i>Le retour d'expérience et ses traitements</i>	122
2.3.2.1.	Préambule.....	122
2.3.2.2.	Analyse de fiabilité en exploitation.....	123
2.3.2.3.	Traitement des données.....	124
2.3.2.4.	Les limites du retour d'expérience.....	125
2.3.3.	<i>L'avis d'expert</i>	126
2.3.3.1.	Les données d'expertise.....	126
2.3.3.2.	Recensement des données.....	127
2.3.3.3.	L'usage des expertises.....	127
2.3.3.4.	Le traitement de l'expertise.....	128
3.	LES MODELES PARAMETRIQUES DE FIABILITE	129
3.1.	INTRODUCTION.....	129
3.2.	PRISE EN COMPTE DE L'IMPACT DES STRESS SUR LA FIABILITE.....	129
3.2.1.	<i>Présentation</i>	129
3.2.2.	<i>Nature et classification des stress</i>	130

3.2.3.	<i>Modèle d'influence des stress environnementaux sur la fiabilité</i>	131
3.2.3.1.	Modèles résistance / contrainte	131
3.2.3.2.	Modèles de choc.....	131
3.2.3.3.	Modèles multiplicatifs.....	132
3.2.3.4.	Modèles de durée de vie accélérée	132
3.2.4.	<i>Bilan sur l'influence des stress</i>	133
3.3.	LES MODELES PREVISIONNELS DE FIABILITE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES ET LEURS LIMITES	133
3.3.1.	<i>Prédiction de la fiabilité des systèmes électroniques</i>	133
3.3.2.	<i>Le MIL HDBK 217 F</i>	134
3.3.2.1.	Contexte de cette méthode	134
3.3.2.2.	Présentation générale de la méthode et des modèles	134
3.3.2.3.	Avantages et limites d'une telle méthode	135
3.3.3.	<i>Modèles RDF</i>	136
3.3.3.1.	Contexte de cette méthode	136
3.3.3.2.	Modèle d'évaluation de fiabilité	136
3.3.3.3.	Limites du RDF 2000.....	137
3.3.4.	<i>Modèles PRISM</i>	138
3.3.5.	<i>Autres méthodologies</i>	139
3.3.5.1.	IEC 1709	139
3.3.5.2.	Autres méthodes prévisionnelles de fiabilité.....	139
3.3.6.	<i>Bilan sur les méthodes actuelles</i>	139
4.	FIDES : UN NOUVEAU MODELE PREVISIONNEL DE FIABILITE	141
4.1.	INTRODUCTION	141
4.1.1.	<i>Contexte d'étude</i>	141
4.1.2.	<i>Performances liées à la fiabilité et à sa spécification</i>	141
4.2.	GENESE DU MODELE FIDES.....	142
4.2.1.	<i>Domaine d'application</i>	142
4.2.2.	<i>Les contributeurs à la fiabilité</i>	144
4.2.2.1.	Les attributs technologiques.....	145
4.2.2.2.	Les contributeurs - stress nominaux	145
4.2.2.3.	Les contributeurs – stress accidentels.....	145
4.2.2.4.	Les contributeurs – processus.....	146
4.3.	LE MODELE FIDES	146
4.3.1.	<i>Structure générale</i>	147
4.3.2.	<i>Analyse de la répartition des pannes</i>	148
4.3.3.	<i>Les modèles de physique des défaillances</i>	149
4.3.3.1.	Surcharges accidentelles : π_{induit}	150
4.3.3.2.	Le facteur $\pi_{\text{part manufacturing}}$	150
4.3.3.3.	Le facteur π_{process}	151
5.1.	L'IMPACT DES PROCESSUS SUR LA FIABILITE	151
5.1.1.	<i>Présentation</i>	151
5.1.1.1.	Cycle de vie des équipements électroniques	152
5.1.1.2.	Impact sur la fiabilité.....	157
5.1.2.	<i>Une méthodologie d'évaluation de la fiabilité</i>	158
5.1.2.1.	Introduction.....	158
5.1.2.2.	Niveau de satisfaction aux recommandations.....	159
5.1.2.3.	Calcul du facteur de processus	160
5.1.2.4.	Etalonnage.....	162
5.1.2.5.	La démarche d'audit fiabilité	164
5.1.3.	<i>Une méthodologie de construction de la fiabilité</i>	165
5.1.3.1.	Définitions.....	165
5.1.3.2.	Synopsis du processus de construction de la fiabilité d'un système	165
5.2.	USAGES DE LA METHODOLOGIE	166
5.2.1.	<i>Expérimentation industrielle</i>	167
5.2.1.1.	Fiabilité intrinsèque.....	167
5.2.1.2.	Processus fiabilité.....	167
5.2.2.	<i>Déploiement</i>	167
5.2.3.	<i>Conclusion sur FIDES</i>	168
6.	CONCLUSION SUR L'EVALUATION DE FIABILITE	169

CHAPITRE III. APPLICATION A LA MODELISATION DES COUTS DE MAINTENANCE D'UN SYSTEME AVIONIQUE	171
1. CONTEXTE D'ETUDE	171
1.1. DOMAINE ETUDIE	171
1.2. CONFIDENTIALITE DES RESULTATS	171
1.3. PLAN D'ETUDE	171
1.4. EQUIPEMENT ETUDIE	172
1.4.1. Description technique de l'équipement étudié.....	172
1.4.2. Découpage fonctionnel	172
2. EVALUATION DE FIABILITE	174
2.1. INTRODUCTION	174
2.2. ANALYSE DE FIABILITE EFFECTUEE AVEC LE MIL HDBK217 F	174
2.2.1. Recueil des taux de défaillance.....	174
2.2.2. Hypothèses de calcul.....	175
2.2.3. Résultats.....	176
2.3. APPLICATION DU MODELE FIDES D'EVALUATION DE LA FIABILITE	176
2.3.1. Evaluation de l'impact du processus sur la fiabilité	176
2.3.1.1. Audit pour le calcul du $\pi_{Process}$: périmètre d'étude.....	176
2.3.1.2. Phase de spécification.....	177
2.3.1.3. Phase de conception.....	178
2.3.1.4. Autres phases.....	179
2.3.1.5. Résultats	180
2.3.2. Analyse effectuée avec le modèle "carte ".....	181
2.3.2.1. Mise en œuvre du modèle.....	181
2.3.2.2. Résultats	183
2.3.3. Analyse de fiabilité avec le modèle "composant".....	183
2.3.3.1. Mise en œuvre du modèle.....	183
2.3.3.2. Résultats	184
2.3.4. Conclusions.....	184
2.3.4.1. Comparaison des résultats.....	184
2.3.4.2. Conclusion générale.....	185
2.3.4.3. Limites à l'usage de la méthodologie FIDES	186
3. EVALUATION DES COUTS DE MAINTENANCE	188
3.1. INTRODUCTION	188
3.2. ANALYSE DES COUTS	188
3.2.1. Analyse des paramètres du modèle.....	188
3.2.2. Coûts des tests de détection et de validation.....	188
3.2.3. Eléments de rechange	189
3.2.3.1. Coût de main d'oeuvre	189
3.2.3.2. Coût de l'échange standard	190
3.2.4. Autres coûts.....	191
3.2.4.1. Coûts logistiques.....	191
3.2.4.2. Coût de stock	191
3.2.5. Résultat	191
3.2.5.1. Coût de réparation.....	191
3.2.5.2. Calcul du DMC.....	192
3.2.6. Conclusion	193
4. MAITRISE DES COUTS D'EXPLOITATION	194
4.1. INTRODUCTION	194
4.2. RAPPELS SUR LE MODELE.....	194
4.2.1. Rappel général.....	194
4.2.2. Contributeurs processus	195
4.2.2.1. Le facteur $\pi_{part\ manufacturing}$	195
4.2.2.2. Le facteur $\pi_{Process}$	195
4.3. ANALYSE DES COUTS DE CYCLE DE VIE.....	195
4.3.1. Calcul de coût de stock	195
4.3.2. Calcul de coût de main d'œuvre.....	196
4.3.3. Calcul de coût direct de maintenance.....	196

4.4.	IMPACT DU PROCESSUS SUR LE CYCLE DE VIE	196
4.4.1.	<i>Hypothèses d'étude</i>	196
4.4.2.	<i>Analyse de sensibilité</i>	197
4.4.2.1.	Amélioration du processus équipementier.....	197
4.4.2.2.	Amélioration du processus intégrateur	198
4.4.2.3.	Amélioration du processus client	199
4.4.2.4.	Amélioration simultanée des processus.....	199
4.4.3.	<i>Bilan</i>	200
4.5.	COUT DE LA CONSTRUCTION DE LA FIABILITE	200
4.5.1.	<i>Méthode de calcul employée</i>	200
4.5.2.	<i>Evaluation de coût</i>	201
4.6.	IMPACT TOTAL SUR LE <i>LIFE CYCLE COST</i>	201

CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'ETUDE	203
---	------------

BIBLIOGRAPHIE	205
----------------------------	------------

PUBLICATIONS REALISEES	222
-------------------------------------	------------

Introduction

Depuis la naissance de l'aéronautique au début du siècle dernier avec les premiers vols des frères Wright, les sciences de l'ingénieur n'ont cessé de rechercher des améliorations techniques susceptibles de faire progresser les machines et leur sécurité. Cependant apparaissent aujourd'hui de nouvelles contraintes dans la conception des "engins volants" telles que la maîtrise des coûts d'exploitation ou encore la prévision du service rendu (fiabilité, disponibilité, capacité à être maintenu, etc.)

En effet, dans un contexte de concurrence internationale accru, la complexité croissante des appareils ainsi que la généralisation de la tolérance aux conditions sévères d'usage impliquent non seulement une maîtrise de la qualité mais également une rentabilité en terme de production ou d'exploitation.

Pour se convaincre des risques encourus citons simplement l'étude qui démontre qu'avec l'augmentation constante des coûts d'exploitation, l'US Air Force ne pourra en 2025 et à budget constant n'entretenir plus que deux appareils !

Aujourd'hui, les constructeurs élaborent donc des moyens permettant de proposer aux clients un service plus complet comprenant la livraison d'un produit fiable et maintenable, la mise en place de chaînes logistiques de suivi de produit, ainsi qu'un support efficace à l'utilisateur.

Cette "révolution industrielle" de la qualité passe par une redéfinition complète du processus de conception. On voit ainsi apparaître de nouveaux acteurs, avec d'une part l'intervention classique des concepteurs et de l'usager, d'autre part une forte implication du support client, des tests, des services de maintenance, et des services de qualité.

Mais cette nouvelle donne passe également par une redéfinition des exigences du client. On voit de ce fait se mettre en œuvre des méthodes pour concevoir mieux et surtout meilleur marché. La conception passe donc de l'aspect processus créatif libre à un mode codifié et modélisé de création.

Watzlawick présente ainsi l'aventure de la conception :

« Par une nuit sombre et orageuse, un capitaine doit, sans balise ni rien qui puisse l'aider dans sa navigation, traverser un détroit qui ne figure sur aucune carte marine. Dans cette situation, ou bien il échoue son bateau sur les rochers, ou bien il passe le détroit et retrouve la

sécurité de la pleine mer. S'il perd à la fois le bateau et sa vie, son échec prouve que la route n'était pas la bonne ...

Si par contre il traverse le détroit, son succès prouve simplement que, littéralement, son bateau n'est pas entré en collision avec la forme et la nature (autrement inconnue) de la voie navigable. Mais il ne le renseigne en rien sur le degré de sécurité ou de danger dans lequel il se trouvait à chaque moment de la traversée. Le capitaine a traversé le détroit comme un aveugle. La route choisie a convenu à la topographie inconnue, ce qui ne signifie pas qu'elle lui a correspondu... »

Les enjeux de la conception de demain sont par conséquent de proposer au capitaine cartes et balises pour l'aider dans sa navigation. Et, bien que des méthodes aient déjà permis de réduire ces incertitudes dans la réalisation d'un projet de conception, le travail de l'analyste sera de mettre en œuvre des modèles cherchant à faire tendre vers un point optimal de conception, tant par la maîtrise du produit conçu que par celle des coûts engagés.

Aussi, notre objectif sera d'offrir au navire conception, les méthodes lui permettant d'anticiper et de maîtriser les coûts d'exploitation.

Pour cela, après avoir décrit les méthodes existantes de modélisation des coûts d'exploitation, et montré leurs limites, nous analyserons les modèles de coûts génériques afin d'apprécier leur capacité à s'adapter à nos problématiques. Nous développerons alors de nouveaux modèles de coût de maintenance basés sur ces concepts.

Dans un deuxième temps nous montrerons comment modéliser la fiabilité ainsi que son impact sur les coûts de maintenance des systèmes électroniques.

Le dernier chapitre présentera l'exemple de la modélisation des coûts de maintenance d'un calculateur avionique à travers la prévision de la fiabilité et des coûts de réparation. Il conclura sur l'utilisation de nos outils dans un objectif de maîtrise des coûts d'exploitation.

Chapitre I. Conception et coûts d'exploitation

1. Le processus de conception

1.1. Avant propos

Confrontées à une économie fortement concurrentielle, les entreprises ont l'obligation de développer rapidement de nouveaux produits tout en étant soumises à des contraintes de coût, de délai et de qualité sans cesse plus fortes, ce qui explique que la conception soit devenue un champ important de recherches.

Des travaux ont rapidement prouvé la nécessité de changer de processus de conception, ce qui remet en cause le design séquentiel [EVBU96]. C'est d'ailleurs dans ce cadre que le concept de conception intégrée a été créé afin de mettre en place une nouvelle organisation et de nouveaux outils en vue d'associer tous les métiers à la création des produits industriels [TICH96].

Nous définirons dans ce chapitre ce qui constitue l'activité de conception. Nous effectuerons un état de l'art des différentes définitions et discuterons sur l'environnement de ces activités et des interactions avec le domaine de la gestion des connaissances. Puis nous présenterons le processus de conception et sa modélisation.

1.2. L'activité de Conception

C'est dans l'activité de conception que le processus de création est le plus visible, c'est là aussi qu'il est le plus stratégique, à savoir le plus susceptible de créer de la valeur. C'est pourquoi des travaux cherchent comment s'adapter au plus vite aux marchés, concevoir de nouveaux produits, avoir de nouveaux comportements organisationnels, innover et enfin comment favoriser les processus collectifs d'innovation.

Selon Jean-Louis Le Moigne [LEMO99], la conception est "un processus par lequel le système élabore (ou conçoit) les plans d'actions intentionnels ou les stratégies possibles par lesquels il projette de résoudre le problème formulé dans le processus de l'intelligence décisionnelle". Les heuristiques (raisonnements par tâtonnement, par analogie, ou raisonnements dits rusés) et les algorithmes (raisonnements formalisés de résolution de problèmes) constituent des raisonnements formalisables pour résoudre ces problèmes.

Reprenons également les propos de J. Perrin [PERR99] qui définit l'activité de conception comme "l'ensemble des activités et des processus qui permettent de passer de l'idée d'un nouveau produit ou de l'amélioration d'un produit existant à la fourniture de l'ensemble des informations (plans, descriptifs, logiciels,...), qui permettent de lancer la production de ce produit et d'en assurer l'usage et la maintenabilité". En anglais, le terme qui est utilisé pour décrire cette activité est *design*.

Nous trouvons également dans [KUSI95] une hiérarchisation de l'activité de conception suivant trois niveaux d'abstraction : niveau conceptuel, niveau préliminaire et niveau détaillé.

- Le niveau conceptuel : l'objectif du niveau conceptuel est de déterminer, à partir du cahier des charges, les caractéristiques globales de l'objet physique à réaliser (architecture globale, composants essentiels, paramètres liés à ces composants...).
- Le niveau préliminaire : l'objectif du niveau préliminaire est d'affiner et d'optimiser les descriptions réalisées au niveau précédent. Ceci est réalisé grâce à des expérimentations ou des simulations et optimisations utilisant des modèles plus précis que ceux utilisés au niveau conceptuel.
- Le niveau détaillé : à ce niveau, le travail consiste à détailler pièce par pièce l'objet final et ses composants afin qu'il soit prêt pour la fabrication.

1.3. Les méthodes de conception

1.3.1. Préambule

La conception moderne se caractérise par la priorité donnée à la vitesse plutôt qu'à la fonctionnalité (ce qui pouvait être observé dans un passé encore proche). Même si la performance des produits et des services n'est pas diminuée au profit du délai de conception, ce dernier compte tout autant que la qualité de la conception.

Cette priorité se justifie par le renouvellement des produits qui s'accélère et les coûts de conception qui augmentent. De ce fait, une notion comme le "time to market" est aujourd'hui l'arme de la différenciation concurrentielle. Si l'on ajoute la dimension de la conception à un "coût objectif", c'est-à-dire que les coûts constituent la première ligne du cahier des charges des concepteurs, la complexité du travail des bureaux d'études atteint son paroxysme. Désormais, la mission peut se résumer ainsi, "faire bien du premier coup et au moindre coût".

Pour réussir ce nouveau pari, de nombreuses solutions (nouvelles formes d'organisations) sont élaborées suivant quatre étapes :

- deux étapes sont pilotées directement par l'imaginaire :
 - le management des concepteurs
 - la maîtrise de la créativité : le re-engineering
- deux étapes sont pilotées par l'intégration des fonctions (ou pilotage de l'imaginaire) :
 - la conception au coût objectif : conception et marketing
 - le design to manufacture : conception et fabrication.

Orientons donc notre réflexion vers la conception au coût objectif et les méthodes qui y sont associées : l'Analyse de la Valeur, Design To Life Cycle Cost, conception par objectifs.

1.3.2. Historique : de l'analyse de la valeur à la conception par coût objectif du cycle de vie

Les méthodes d'analyse de coûts ont pris naissance aux Etats-Unis pendant la guerre de 1914-1918 et ont acquis une notoriété mondiale du fait de leur adoption par le Département américain de la Défense. Elles appartiennent à ce que nous avons traduit en français et que nous appelons globalement "Analyse de la Valeur".

Au fur et à mesure du développement de l'analyse de la valeur (vers 1950), ce concept a évolué. Au début était uniquement évoquée la *Value Analysis* (et parfois *Purchase Analysis*), puis ont été confrontés les termes de *Value Analysis* et de *Value Engineering* (le premier terme désigne en fait des produits connus, existants, alors que le second concerne des produits nouveaux en cours d'élaboration). Traduction littérale de l'américain *Value Analysis*, le terme "Analyse de la Valeur" cache en réalité une méthodologie permettant de maîtriser la conception d'un produit ou d'un service.

Dans les années 60-61, pour freiner la croissance rapide du coût des systèmes d'armes, le Département américain de la Défense (D.O.D.) proposa à ses fournisseurs industriels la pratique du *Cost effectiveness* (ou réduction des coûts) qui consistait à réduire les coûts de fabrication tout en ne modifiant pas le produit commandé. En échange, le D.O.D. garantissait une augmentation de la marge bénéficiaire proportionnellement au gain réalisé. Cette méthode ne s'est pas avérée suffisante puisqu'en 1964, il imposa à tous ses fournisseurs la pratique de la *Value Engineering* adoptée par l'US Navy (marine américaine) depuis 1954.

Malgré ces efforts répétés, les dépassements budgétaires continuaient. Le Département de la Défense modifia alors complètement sa politique d'acquisition, tout au moins pour les grands programmes. Il adoptera en 1971 cette nouvelle méthode désignée *Design to cost*, que nous traduisons généralement par "Conception pour un Coût Objectif" (C.C.O.).

Suite à la hausse des coûts d'utilisation et de maintenance induite par cette méthodologie, le Département américain de la Défense s'orienta en 1976-1977 vers le *Design to Life Cycle Cost* ou "conception pour un coût global de durée de vie". La notion de coût global allait ainsi se développer et devenir une exigence pour les appels d'offres.

En France, une Association Française pour l'Analyse de la Valeur (AFAV) est constituée en 1978, afin de rassembler les divers praticiens de la méthode. Des normes (X 50.150 à X 50.153) [\[AFN90\]](#) sont alors établies et éditées en 1985. L'une d'entre elles, portant sur le Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF), mérite une attention toute particulière dans la mesure où la Commission Centrale des Marchés (pour les marchés publics) et les spécialistes de la qualité totale recommandent désormais officiellement l'usage de ce Cahier.

Depuis 1997, une nouvelle norme européenne [\[AFN97\]](#) propose un élargissement de la perspective des approches "Valeur" avec notamment la promotion du management par la valeur. Dans le même temps, des certifications européennes ont été mises en place pour les animateurs et formateurs dans ces disciplines.

Analysons donc plus en détail les différences entre les trois méthodologies de conception les plus utilisées.

1.3.3. Les méthodes de conception

1.3.3.1. L'Analyse de la Valeur

L'analyse de la valeur est une méthode de conception des produits et services permettant d'assurer l'adéquation entre le besoin de l'utilisateur et le produit, mais plus encore, c'est une méthode efficace de résolution des problèmes dans l'entreprise permettant de dégager des axes stratégiques tout en impliquant fortement les personnels dans la recherche des voies de solutions.

Le souci de l'économie, le calage strict sur le besoin et le marché, l'analyse fonctionnelle, l'approche pluridisciplinaire de la conception et le travail de groupe, la mobilisation efficace de l'information et la créativité sont au cœur de cette méthode. C'est un outil d'investigation qui ne laisse rien dans l'ombre et qui implique un croisement de multiples regards sur le produit, sur le besoin de l'utilisateur, sur les coûts, sur les contraintes de l'environnement, sur le marché et donc sur la valeur du produit.

Cette dernière définition réfute l'idée généralement répandue selon laquelle l'Analyse de la Valeur est uniquement une méthode de réduction des coûts. En effet, si la volonté de l'entreprise est de concevoir à coût objectif, l'AV préconise également une affectation

judicieuse des crédits vis-à-vis de la satisfaction du client (évolution de l'entreprise vers une démarche de Qualité Totale). Ainsi, la valeur d'un produit est maximisée (la valeur étant le rapport de la satisfaction des fonctions sur les coûts) plutôt que son coût est minimisé [YANO01].

On peut établir le synoptique suivant pour décrire l'AV :

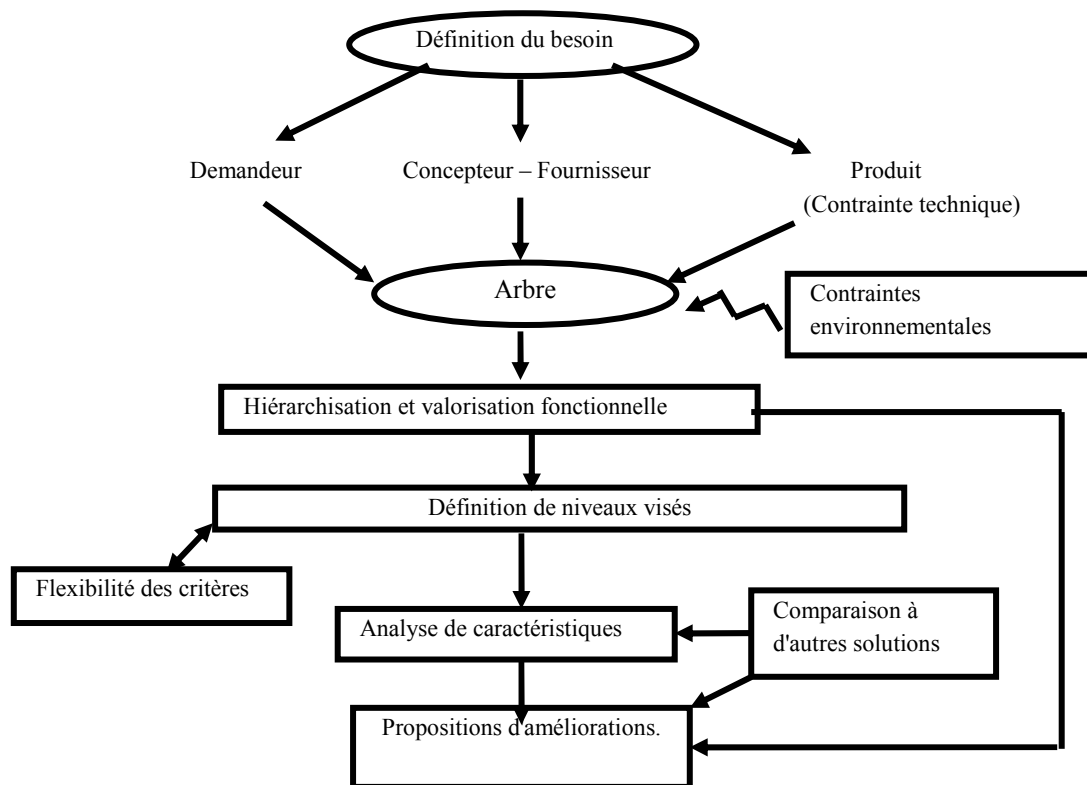


Fig. 1 : Synopsis de l'analyse de la valeur

L'analyse de la valeur qui repose principalement sur l'analyse fonctionnelle est certainement la plus connue des méthodes de conception, c'est cette méthode qui a aujourd'hui évolué vers le Design To Cost ou le Design To Goal.

1.3.3.2. Conception à coûts objectifs

Il fut une époque où les concepts de qualité et de réduction des coûts s'opposaient. Mais aujourd'hui, prendre conscience de l'échec et de l'impérieuse nécessité d'un effort de qualité ne suffit pas, encore faut-il maîtriser parfaitement la conception en éliminant le superflu et en contrôlant les paramètres d'influence.

Pour être compétitive, une entreprise doit mettre sur le marché des produits qui rendent service au client, font dégager des marges commerciales et contribuent au développement technique et technologique. [AFN90]

La juste estimation de la valeur d'un produit représente alors le meilleur équilibre entre les performances techniques et les performances économiques. Cet équilibre est ancré sur un besoin : c'est le rapport "qualité - prix" recherché par le consommateur ou mieux, le rapport "fonction - coût" pour le concepteur. [BELL99]

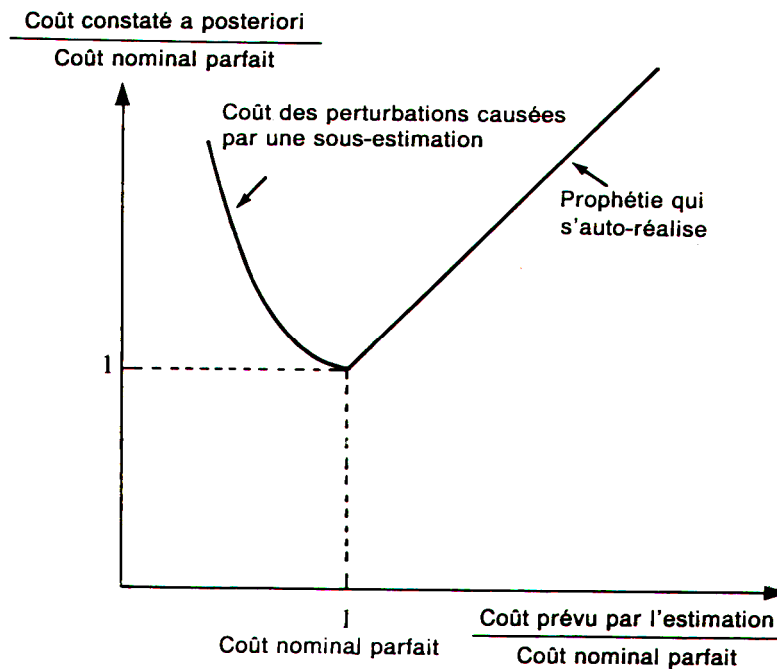


Fig. 2 : De l'importance d'une prévision réaliste

Gardons ainsi à l'esprit que le coût constaté ne sera pas indifférent au résultat de l'estimation prévisionnelle.

Le but est de donner aux objectifs de prix la même importance qu'aux objectifs de performances et de délai. Les arbitrages se font lors du développement au cours duquel l'industriel peut sacrifier des performances non essentielles au profit d'un coût moindre.

Notons que le Design To Cost est également une méthode de gestion prévisionnelle des coûts et non une méthode de réduction de coûts. Elle permet d'imposer une parfaite définition des spécifications techniques et de production, une confiance entre les clients et les fournisseurs, une définition du taux de transaction (coût/performance) et une évaluation des coûts par

méthodes paramétrées. La méthode suppose donc que l'on soit capable de fixer un coût objectif réalisable.

De cette méthode est née son extension au coût de cycle de vie : le Design to Life Cycle Cost, qui cherchera comme le Design To Cost à réduire les coûts de développement et d'industrialisation (coûts récurrents et non récurrents) mais aussi les coûts de possession du produit.

1.3.3.3. Conception par objectifs « Design To Goal »

Cette méthode est fortement inspirée du Design To Life Cycle Cost. Les pressions commerciales exercées sur le marché des produits complexes et de haute technicité poussent les décideurs à mener des actions plus profondes et à développer leurs travaux sur l'anticipation dans le chiffrage économique, tout en gardant un œil attentif au suivi des performances.

La conception par objectifs (*Design To Goals* en anglais) élargit le champ des paramètres dans l'élaboration d'un produit. Ces paramètres peuvent être purement techniques (la masse globale par exemple), stratégiques (fiabilité, satisfaction globale, qualité perçue, etc.) ou économiques (analyse des coûts).

C'est en utilisant cette démarche poussée que nous chercherons à optimiser l'équilibre entre les objectifs de coûts de maintenance, de performances et de délais lors de la conception.

1.3.4. Conception par coûts objectifs : problèmes soulevés.

La conception par coût objectif soulève toutefois certains problèmes.

Tout d'abord, un tel pilotage nécessite de la part de l'organisation une restructuration des informations. Cela implique la constitution d'un réseau de communication qui transfère les données techniques et économiques sans toutefois évincer l'innovation et son rôle prédominant. Dans ce but, liés avec l'activité d'aide à la décision, des outils de pilotage des projets s'avèrent nécessaires.

La possibilité de mettre en œuvre la conception à coût objectif dépend ensuite directement des moyens d'estimation prévisionnelle des coûts. La qualité des estimations dans les phases initiales joue ici un rôle essentiel puisque les marges d'erreur se prélèvent sur l'objectif de rentabilité. La figure suivante montre les deux volets de la démarche :

- d'une part, la détermination de la cible par une approche stratégique et commerciale
- d'autre part, l'analyse de faisabilité économique, réalisée à partir des informations relatives aux coûts et soulignant l'importance du facteur organisationnel.

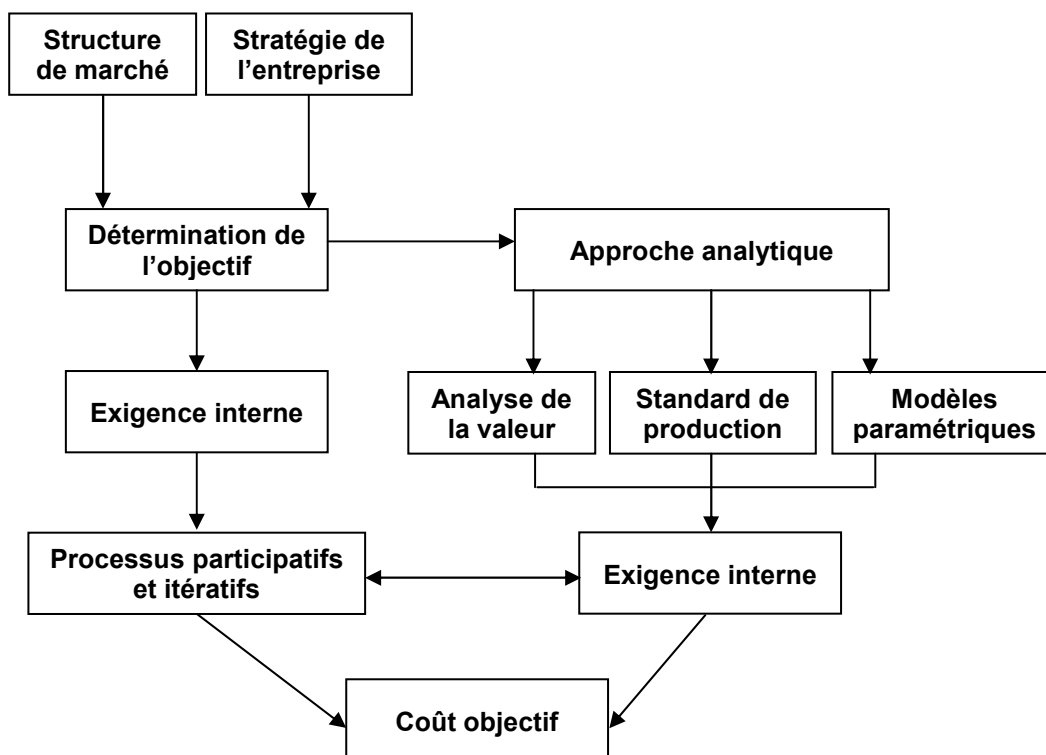


Fig. 3 : La démarche de conception à coûts objectifs

Cette démarche visant à faire converger coût cible et coût estimé engage enfin tous les intervenants du projet dans un système formel de relation client - fournisseur (qu'il s'agisse de départements de l'entreprise ou de fournisseurs externes). Ce principe, qui a pour but d'éviter les dépassements de budget, comporte le risque de ne pas motiver l'intervenant à rechercher les améliorations possibles au-delà du seuil défini par l'objectif partiel qui est le sien. De plus, si l'organisation des phases est séquentielle, le risque se trouve renforcé d'une transmission de solutions et de coûts sous optimaux en cascade. Un système d'incitation à la tenue des objectifs joue donc ici un rôle essentiel. Le concept de relation client - fournisseur fait d'ailleurs l'objet dans de nombreuses entreprises d'une réflexion évoluant vers la notion de contributeur à un objectif commun, davantage adaptée à la mise en oeuvre de la démarche Design To Cost.

En outre la communauté de contribution en conception sera d'autant plus fortement ressentie que les principes de l'ingénierie simultanée mettent davantage en présence les différents intervenants et les amènent à confronter leurs contraintes et leurs méthodes, encore faut-il que ces acteurs aient la possibilité de développer l'apprentissage du langage et des procédures communes.

2. Conception et cycle de vie d'un produit

2.1. Introduction

De l'instant où il est imaginé jusqu'à son retrait de service, un produit passe par de nombreuses étapes qui constituent le cycle de vie.

Comme l'explique [\[BERL88\]](#), la plus grande part des coûts d'un programme est engagée lors de la phase de conception d'un système. De ce fait, la conception apparaît comme une phase majeure pour la maîtrise de la compétitivité. Le graphique ci dessous illustre cette analyse.

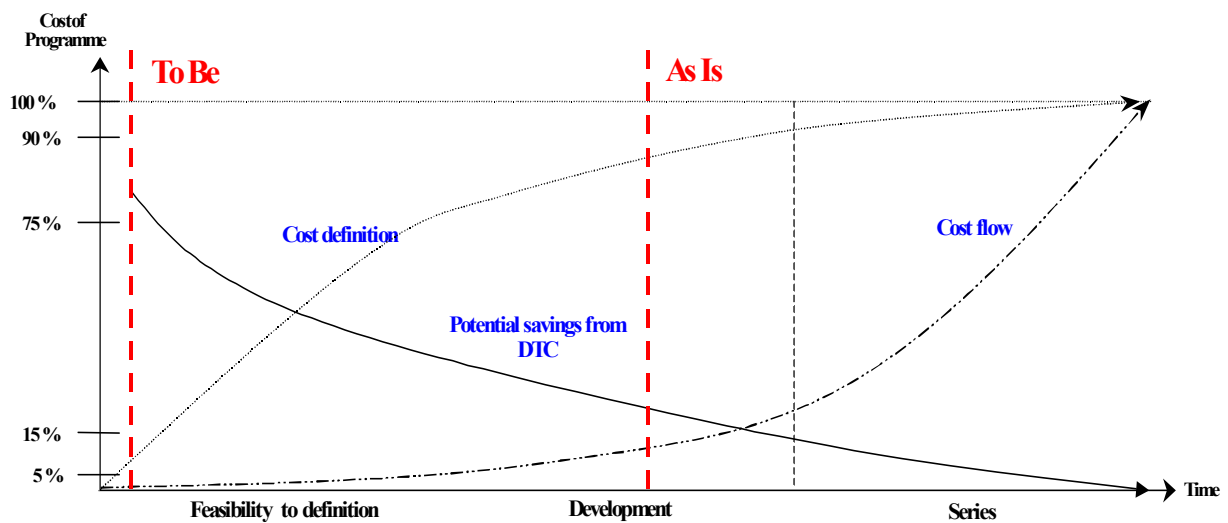


Fig. 4 : L'implication des coûts à la conception

Nous présenterons donc sous un aspect conceptuel la notion de cycle de vie d'un produit et décrirons plus précisément les coûts qui sont associés à chacune des phases (Life Cycle Cost).

2.2. Le cycle de vie d'un produit

2.2.1. Cycle de vie d'un produit

Raisonnant d'un point de vue chronologique, et à l'instar de Decreuse et Feschotte [\[DECRO0\]](#), nous distinguons le cycle de vie d'un produit de sa courbe de vie.

Le cycle de vie représente la succession des phases de développement, de fabrication, de distribution, d'exploitation, de maintenance et de mise au rebut du produit. Il s'inscrit dans le cadre plus général de la courbe de vie d'un produit générique qui représente en quelque sorte

l'ensemble des produits fabriqués suivant ce modèle. Celle-ci se compose de la manière suivante [\[BENC93\]](#) :

- l'introduction (entre développement et lancement)
- le lancement
- le point mort (entre lancement et croissance)
- la croissance
- la saturation
- le déclin
- le retrait.

Pendant la phase d'introduction de la courbe de vie, nous sommes en présence d'un produit que nous pouvons qualifier de "virtuel" en ce sens qu'il n'est matérialisé que par des plans et autres documents permettant de le qualifier au regard d'un marché potentiel.

La phase de lancement correspond au démarrage effectif de la fabrication et au début de la vie du produit qui passe d'un état virtuel à un état matériel.

La phase dite de croissance du produit représente son entrée effective sur le marché. Pendant cette phase, essentiellement liée à la production, le chiffre d'affaires croît rapidement.

Parvenu ensuite à maturité, le produit est figé dans ses attributs morpho-techniques : c'est la phase de saturation. Elle permet de s'assurer du bon positionnement du produit sur le marché tant du point de vue de la qualité technique que de la performance ou du prix :

- la durée de vie est-elle confirmée ?
- la maintenance est-elle aisée ?
- le prix est-il compétitif ?

Enfin, la phase de déclin conduit au recyclage et au retrait progressif du service. Elle va engendrer des coûts d'extinction parfois non négligeables [\[BROU92\]](#) (non pris en compte à ce jour dans l'aéronautique, nous n'évoquerons pas ces coûts dans ce travail).

Après avoir passé en revue les différentes étapes de vie d'un produit, penchons-nous sur la logique de déroulement des étapes du projet qui lui correspond.

2.2.2. Cycle de Vie d'un Projet

Le projet est une suite cohérente d'actions qui intègre complètement le cycle de vie du produit [\[BOUR94\]](#).

Comme nous l'avons entr'aperçu, les phases de développement, de fabrication ou autres sont des activités complexes qui font intervenir de nombreux spécialistes. Bien entendu, l'intervention de ces différents acteurs-métiers suit un ordre logique.

Tout d'abord en fonction des données issues du marketing va être prise la décision de lancement de projet. Le marketing travaille selon quatre axes principaux. L'information [\[PETI90\]](#) représente le premier de ces axes, elle s'obtient au moyen d'observations et d'analyses (du marché et des besoins des utilisateurs) [\[BROU92\]](#). Le second axe représente les études qui ont pour but d'analyser le marché et les consommateurs par des sondages, (études qualitatives ou audits de produit). La stratégie commerciale, troisième axe, va orienter le devenir de l'entreprise sur une longue période en matière de marché et de produit. Elle permet également de définir les prix, les gammes de produit, le conditionnement, etc. Enfin, le marketing a un rôle d'aide à la décision en ce sens qu'il se trouve au carrefour des informations représentant la réalité du marché.

Lorsque la possibilité d'un produit nouveau apparaît, le marketing établit un dossier de demande de programme auquel les designers apportent leur contribution : c'est la phase d'avant-projet. Les décisions prises alors vont avoir des conséquences importantes sur l'avenir du dossier et paradoxalement, elles sont difficiles compte tenu du manque de définition du produit à ce stade de l'étude.

La phase de pré-étude entérine la décision de "faire" le produit. Un investissement global, au regard des considérations stratégiques sur le niveau de charge et sur la rentabilité du projet, est estimé. Dans ce but, des méthodes telles que l'Analyse de la Valeur [\[BOUR94\]](#) ou la Conception pour un Coût Objectif (CCO) seront des aides précieuses permettant d'atteindre la compétitivité industrielle par la maîtrise de la valeur [\[PETI90\]](#).

Vient ensuite la phase d'étude qui permet le passage du produit d'un état spécifié à un état défini. C'est au cours de celle-ci que sont explorés différentes solutions et que le meilleur compromis entre la satisfaction des besoins clients et les marges bénéficiaires est recherché. Cette étape prend en compte tous les facteurs influençant la conception, par exemple les besoins logistiques (documentations, pièces de rechange...) ou environnementaux (recyclage, destruction).

La fin du développement permet de prendre la décision de lancer (ou non) la production. Ainsi, le produit passe peu à peu d'un état de spécifications à un état physiquement réel ou réalisé. Il s'agit alors de définir les moyens, tant humains que matériels, à mettre en œuvre pour aboutir au produit final : ceci relève de la compétence des Méthodes. Suite à quoi, le projet va consister en la gestion des actions de fabrication du produit avant sa mise sur le marché.

L'analyse sus-citée précise le fait que les dépenses engendrées par un projet sont déterminées par les décisions prises pendant les phases allant de l'avant-projet aux études. Concrètement, nous pouvons retenir qu'en général, 80 à 90% des coûts de possession sont fixés dès les phases d'étude.

2.3. Les coûts globaux de possession

2.3.1. Avant propos

Aujourd'hui, à la notion de produit se substitue la notion de services attendus. Le prix d'acquisition fait ainsi place à la notion de coût de possession qui intègre les coûts d'exploitation et de maintenance. Par exemple : le prix d'achat d'une automobile n'est que "la partie visible de l'iceberg", il faudra y ajouter le coût de l'essence, de l'entretien, des réparations, etc. [DHI89] Il faudra également considérer la décote et l'immobilisation du capital (ou bien le coût du crédit) avant d'atteindre le coût de revient réel du produit.

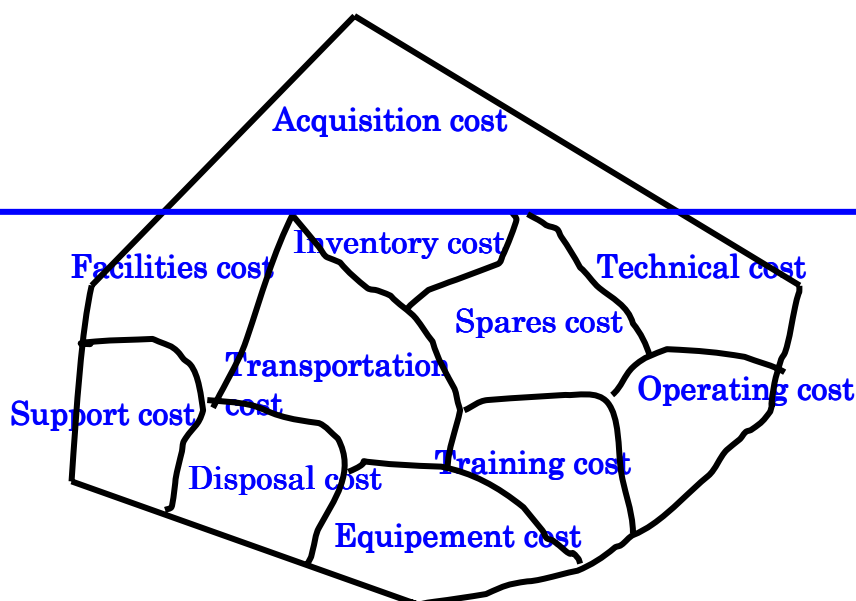


Fig. 5 : L'implication des coûts à la conception

Pour répondre aux exigences de connaissance des coûts du système tout au long de son existence, l'ingénierie industrielle a aujourd'hui remplacé la notion de prix d'achat par celle de coût de cycle de vie ou Life Cycle Cost.

White et Ostwald [WHIT76] définissent en 1976 le coût global ainsi : "le coût de cycle de vie d'un élément est la somme de tous les frais engagés depuis la conception jusqu'à la fin de vie de l'élément". En France, la norme NF X50-150 [AFN98] définit le coût global comme "la somme des dépenses sur l'ensemble de la vie d'un produit pour un usage donné".

Représentant parfois plus du double du coût d'acquisition, le Life Cycle Cost (LCC) se décompose de la manière suivante :

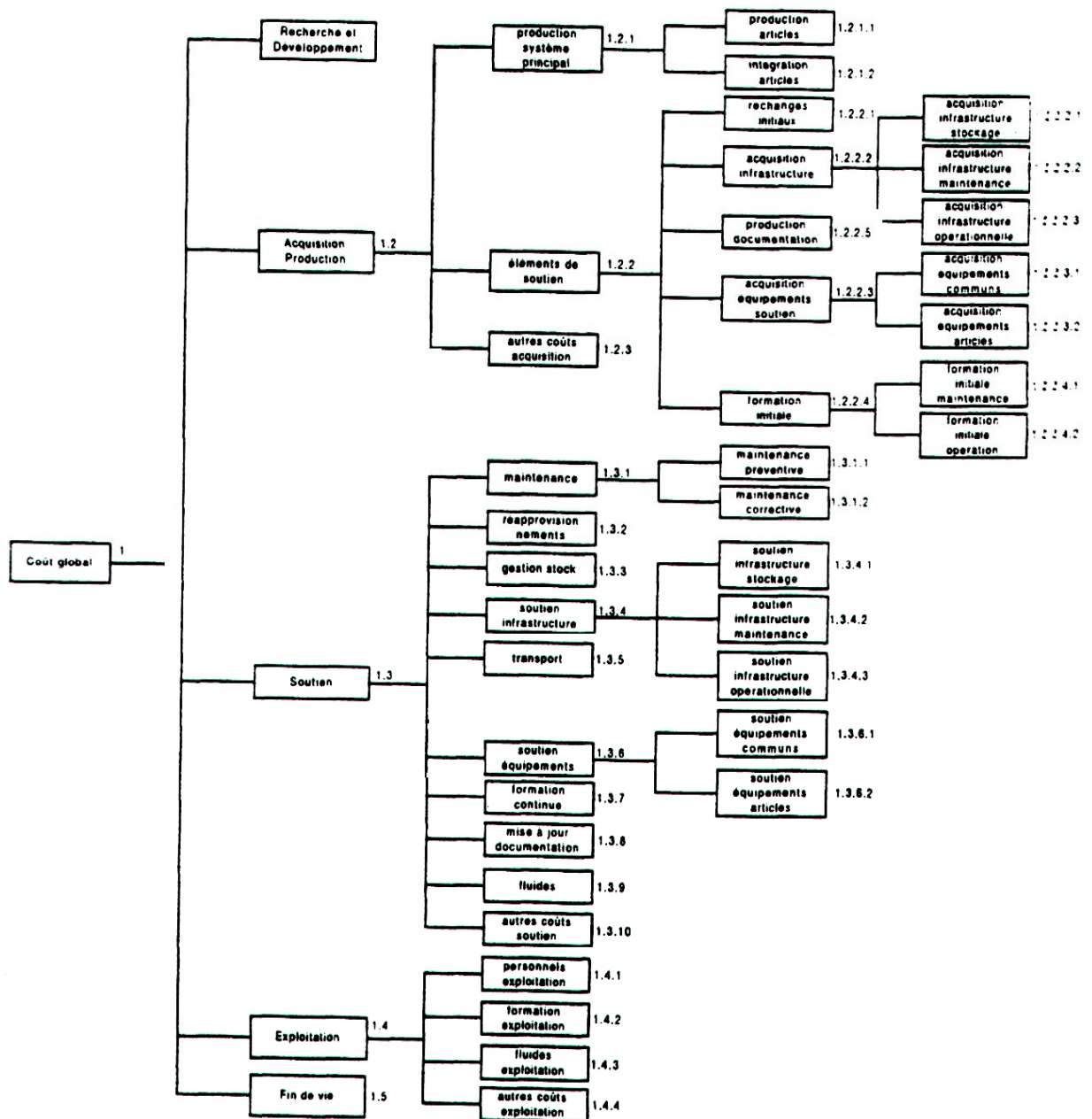


Fig. 6 : Décomposition analytique des coûts de cycle de vie.

Ce cycle de vie peut être cependant appréhendé depuis des angles très différents.

Susman [\[SUSM89\]](#) ou encore Shields et Young [\[SHIEL91\]](#) distinguent le cycle de vie du point de vue du marketing et du point de vue de la production. Pour le marketing, le cycle de vie représente la vie du produit sur le marché, les phases retenues sont donc les suivantes : introduction (ou démarrage), croissance, maturité et déclin. Pour la production, la vie du produit est rythmée par les phases suivantes : conception, design, développement produit/process, production et support logistique.

La distinction de perspectives peut se faire également entre celle de l'industriel et celle de l'utilisateur du produit : l'utilisateur ne voit que les phases d'achat, d'exploitation, de maintenance et éventuellement de mise au rebut [\[ARTT94\]](#).

Pour établir un point de vue référent dans ces travaux, nous retiendrons les phases suivantes pour étudier le cycle de vie du produit : l'initialisation, la conception, le design, la production, la commercialisation, l'utilisation et la maintenance, et enfin la cessation de service avec le recyclage éventuel [\[ROUA02\]](#).

2.3.2. La modélisation des coûts de cycle de vie

2.3.2.1. Introduction

L'homme a-t-il un sens inné d'un prix comme l'oiseau migrateur a le sens inné du nord ?

Faites une expérience simple, achetez des produits de consommation courante et demandez à un groupe de personnes de donner une estimation pour chacun d'eux. L'expérience prouve que les réponses oscillent couramment d'un facteur un à cinq, voire dix, quant à l'appréciation du prix par chacun des acteurs.

Cette dispersion énorme, bien au-delà des écarts sur les marges, prouve bien que l'homme n'a pas le sens inné d'un prix ni même d'un coût. Et, bien qu'acheter et vendre soient des actes courants, il nous arrive quelquefois de les pratiquer avec une certaine anxiété et de nous demander : "Est-ce le juste prix ? N'est-ce pas trop cher ? Est ce le produit qu'il me faut ?"

Ce faisant, nous nous efforçons d'évaluer, de comparer le produit avec la dépense que son acquisition impose.

2.3.2.2. Définitions

L'objectif de ce petit paragraphe est de définir la perception que nous avons eu dans ce travail de notions aussi simples que la modélisation ou les coûts.

2.3.2.2.1. Le modèle, une abstraction de la réalité

La modélisation est un processus qui consiste à identifier les caractéristiques intéressantes d'une entité en vue d'une utilisation précise. Ainsi, l'abstraction désigne le résultat de ce processus, c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques essentielles d'une entité, retenu par un observateur. Le modèle définit alors une frontière entre la réalité et la perspective de l'observateur, néanmoins ce n'est pas "la réalité" mais une vue très subjective de la réalité. Bien qu'un modèle ne représente pas une réalité absolue, il en reflète les aspects importants et en donne une vue juste et pertinente.

Pour être pertinent un modèle doit permettre, au-delà de son caractère abstrait, de faciliter la compréhension du système étudié. Il doit ainsi réduire la complexité du système en reproduisant ses comportements : il décompose la réalité dans le but de disposer d'éléments de travail exploitables par des moyens mathématiques, informatiques ou techniques.

D'après Le Moigne, modéliser un système complexe, c'est d'abord modéliser un système d'actions. La modélisation de l'action complexe se caractérise par la notion générale de processus qui se définit par son exercice et son résultat. [\[LEMO99\]](#) représente donc le processus par trois fonctions : la fonction de transfert temporel, les fonctions de transformation morphologique et de transfert spatial, et propose le modèle à neuf niveaux d'un système complexe.

2.3.2.2.2. Coûts :

L'édition de 1835 du *Dictionnaire de L'Académie française* proposait au terme de "coût" la définition suivante : "COÛT. s. m. Ce qu'une chose coûte. Il n'est plus guère usité qu'en style de Pratique. Les frais et les loyaux coûts. Le coût d'un exploit, d'un jugement. On dit quelquefois, Les menus coûts, Les petites dépenses. Prov. Le coût fait perdre le goût : la trop grande dépense qu'il faudrait faire pour avoir une chose, en ôte l'envie." [\[ACAD35\]](#)

Ce mot, alors désuet, réapparaît avec les différentes révolutions industrielles et on distingue par exemple aujourd'hui : les coûts de transformation (*conversion costs*) qui désignent les dépenses nécessaires à la transformation d'une matière première en produit, les coûts de fonctionnement, plus généraux, qui sont les dépenses dues au fonctionnement d'un système,

ou les coûts de distribution, qui rassemblent l'ensemble des dépenses nécessaires pour faire passer le produit du centre de production au centre de consommation.

2.3.2.3. *La modélisation du "life cycle cost"*

Bien que le concept de Life Cycle Cost soit encore peu utilisé, on trouve régulièrement des articles sur ce sujet depuis le milieu des années soixante période à laquelle le "Department Of Defense" américain présente le concept.

La méthode la plus fréquemment citée pour calculer le coût de cycle de vie d'un produit est celle de Kaufman [\[KAUF69\]](#). Elle passe par sept étapes majeurs que sont :

- la détermination des facteurs d'usages : profil d'utilisation (description des contraintes rencontrées et des taux d'usage) et profils opérationnels (analyse des missions effectuées, temps, cycles)
- l'identification des éléments de coût (design, fabrication, exploitation, maintenance, etc.)
- l'analyse des inducteurs de coût : principaux facteurs d'influence comme la fiabilité ou le temps moyen pour réparer (MTTR)
- le calcul de tous les coûts
- l'ajustement des coûts en monnaie courante
- la sommation de tous ces coûts

Cette méthode analytique de décomposition des coûts, bien que réalisable sans difficulté une fois le produit en service, va se révéler quasiment impossible à établir de manière prévisionnelle. Or nous l'avons vu précédemment, c'est durant la phase de design qu'est engagée la plus grande part de ces coûts. C'est pourquoi des modèles prévisionnels simples ont été proposés pour simplifier cette analyse. Dans ce cadre, nous présenterons par l'intermédiaire de l'ouvrage bibliographique de B.S. Dhillon *Life Cycle Costing* [\[DHIL89\]](#) quelques-uns de ces modèles. Ces travaux ayant été réalisés dans le cadre d'une coopération avec l'hélicoptériste européen Eurocopter, le choix des modèles présentés ci-dessous s'est naturellement porté vers le domaine de l'aéronautique.

2.3.2.3.1. Modèle général de LCC aéronautique

Le Life Cycle Cost d'un avion peut se décomposer en quatre parties : la recherche et développement, les tests et évaluations (RDT&E), la production, le soutien logistique initial et le support opérationnel.

Entre la R&D et la production, les coûts peuvent se décomposer par sous-systèmes principaux du système aéroporté : l'avionique (part électronique des appareils qui représente aujourd'hui un investissement majeur), la cellule et les mécaniques, et les moteurs.

Les coûts associés au support initial sont les suivants : la gestion des données de support, les stocks de rechange, la formation et les équipements spéciaux (outillages, lots de bord...).

Pour finir, les coûts opérationnels peuvent être décomposés en plusieurs parties : par exemple les coûts de maintenance directs, le personnel opérationnel ou encore la formation en maintenance.

Ce modèle général se résume ainsi :

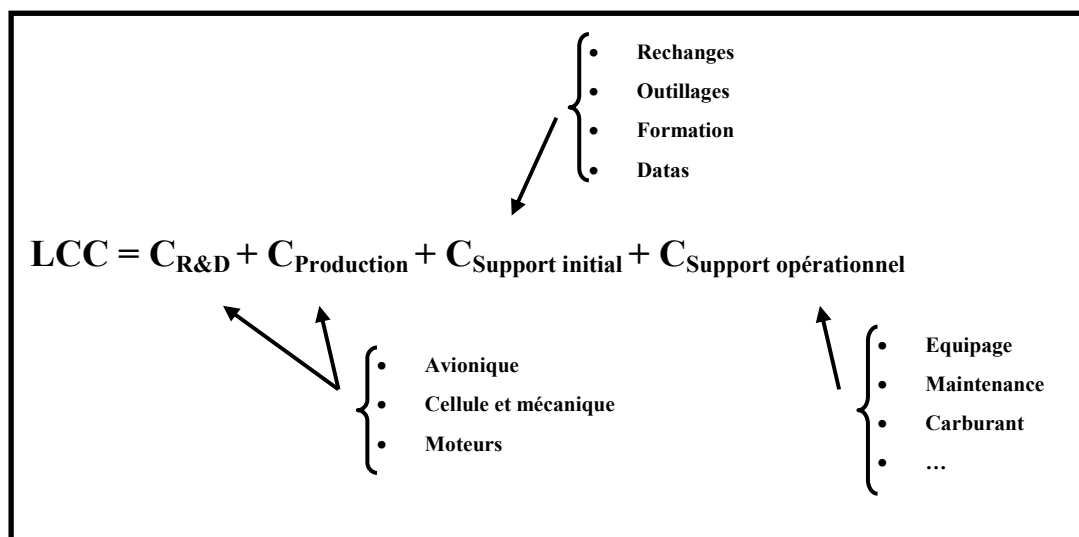


Fig. 7 : Modèle générique de LCC dans l'aéronautique

Ce modèle analytique peut ensuite se décliner aux différents types de porteurs aéronautiques que peuvent être un avion d'arme, un hélicoptère ou un appareil de transport de passagers.

2.3.2.3.2. Inducteurs de coût

Sans toutefois être exhaustif, nous présenterons quelques-uns des principaux "cost drivers" des systèmes aéronautiques.

Comme le montre [\[CARL80\]](#), le Life Cycle Cost suit une loi de Pareto : 90% des coûts sont dus à 15% des équipements.

Aussi l'analyse des inducteurs de coût peut-elle se limiter à ces quelques équipements :

- Avionique générale
- Moteurs
- Transmission mécanique
- Servocommandes et groupes hydrauliques

Nous pouvons en outre évoquer les principaux paramètres révélateurs des coûts de cycle de vie que sont

pour le design :

- les exigences de sûreté de fonctionnement et de fiabilité
- les performances pour une fonctionnalité donnée
- les spécifications techniques générales

pour la production :

- les processus de manufacturing
- les coûts de structure
- les coûts d'achat des équipements
- les matériels de production

Pour le support enfin, nous pouvons résumer les "costs drivers", de façon générale, au moyen du graphique suivant :

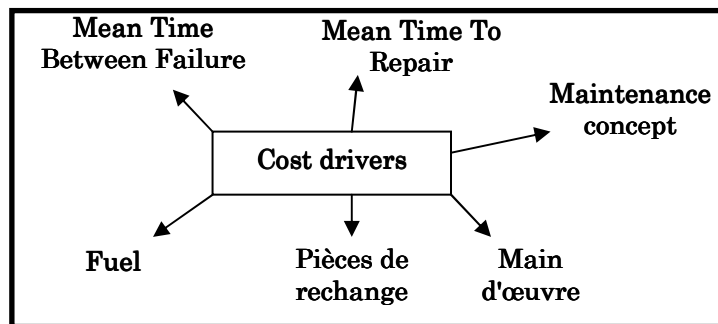
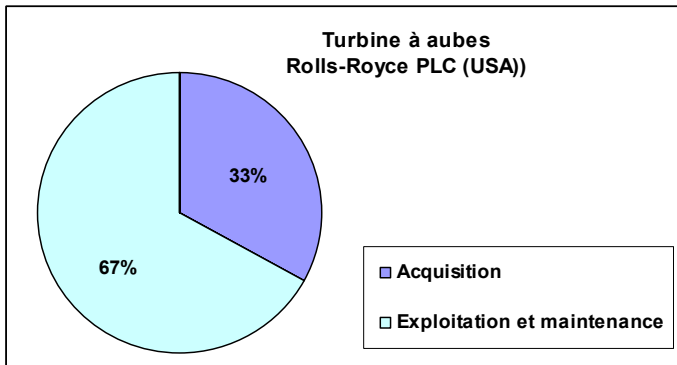


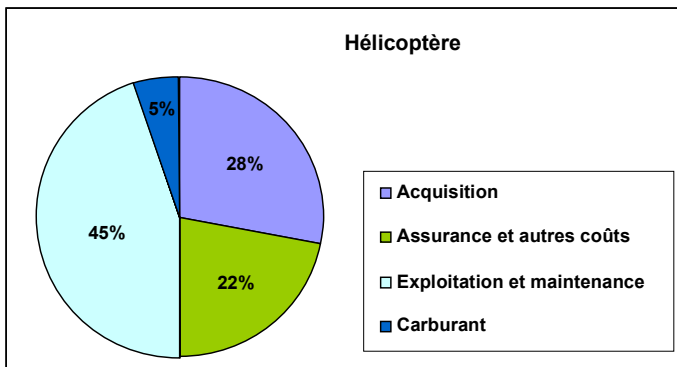
Fig. 8 : Cost drivers pour un appareil aéronautique

2.3.3. L'impact de la maintenance dans les coûts de cycle de vie

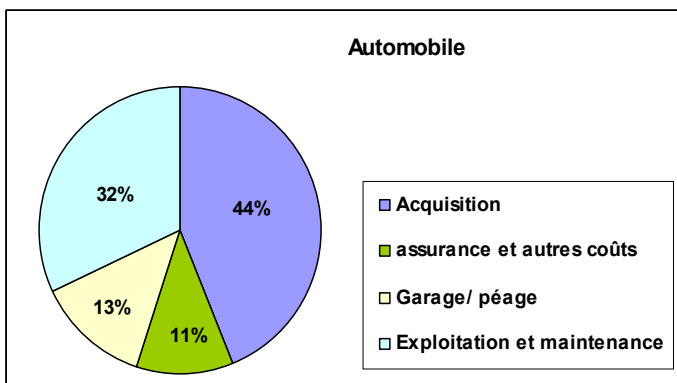
Afin de mieux percevoir la répartition des différents coûts qui constituent le coût global de possession, analysons-les dans le cas d'industries aussi diverses que l'aéronautique, l'automobile ou le secteur énergétique.



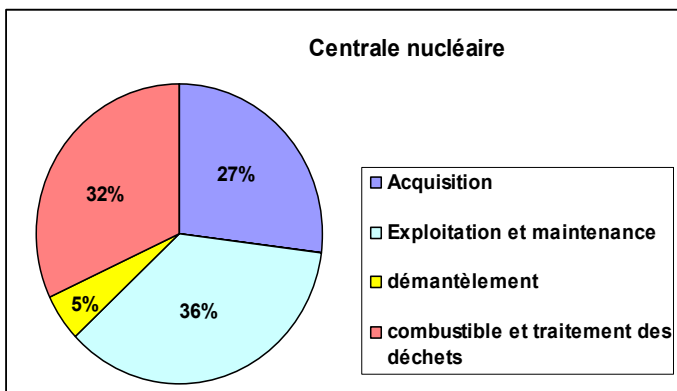
- Turbine à aubes : Rolls-Royce



- Hélicoptère : données



- Industrie automobile : voiture
[\[FFAC02\]](#)



- Centrale nucléaire : [\[BAIT00\]](#)

Fig. 9 : Répartition du LCC dans différentes industries

Ces graphiques montrent donc que, quel que soit le secteur d'activité, les coûts de maintenance représentent une part majeure du coût global de possession d'un produit.

2.4. Conclusion

Comme le montre cette analyse bibliographique, les coûts globaux de possession se maîtrisent d'autant mieux qu'on s'en préoccupe en phase amont d'un projet. D'autre part, il apparaît que la maintenance induit une part majeure de ceux-ci.

Sans toutefois prétendre les maîtriser dès la phase de pré-étude ou celle de spécification, on doit analyser les coûts de maintenance des produits aéronautiques durant la conception. Les paragraphes ci-après décrivent ainsi les notions nécessaires à leur prise en compte au bureau d'étude.



3. La maintenance et ses coûts

3.1. La maintenance : concepts fondamentaux

3.1.1. Définitions

Longtemps jugée par les entreprises comme un poste de dépense inévitable, la maintenance se libère aujourd'hui de cette réputation pour être considérée comme un facteur de compétitivité jouant un rôle fondamental dans la maîtrise des risques, qu'ils soient sécuritaires, financiers ou environnementaux.

Avant de présenter l'impact de la maintenance sur les coûts d'exploitation, attardons-nous sur quelques définitions.

3.1.1.1. Définitions générales

Le dictionnaire *Le Robert* [ROBE95] donne de la maintenance la définition suivante : "Action de maintenir, tech. Ensemble des opérations d'entretien destiné à accroître la fiabilité ou pallier des défaillances".

Ne pouvant nous contenter d'une description aussi peu précise, nous pouvons nous référer à la définition normative [AFN01] : "Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise".

Le management de la maintenance concerne toutes les activités des instances de direction qui d'une part déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance, et d'autre part les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise (y compris dans les aspects économiques).

3.1.1.2. Maintenance et sûreté de fonctionnement

Dans sa définition originelle, le terme "sûreté de fonctionnement" représente "l'ensemble des aptitudes d'un produit qui lui permettent de disposer des performances fonctionnelles spécifiées, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement" [AUG98]. La sûreté de fonctionnement couvre ainsi les quatre notions que sont la fiabilité, la sécurité, la maintenabilité et la disponibilité, auxquelles on peut ajouter, selon les applications, la survivabilité et l'invulnérabilité.

La fiabilité représente "l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée" [AFN98].

La sécurité est "l'aptitude d'un système à accomplir sa fonction sans causer de lésion ou d'atteinte à la santé" [AFN98].

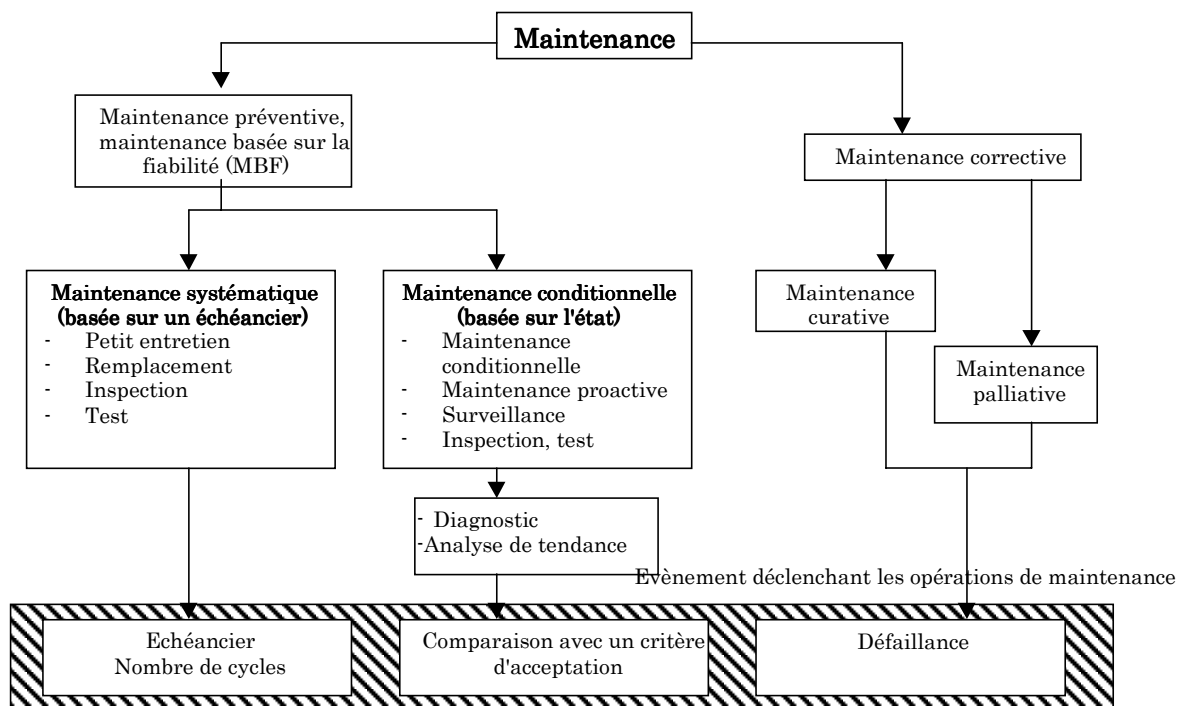
La maintenabilité est "l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits" [AFN98].

La disponibilité est, quant à elle, "l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions de temps déterminées" [AFN98].

Aujourd'hui cependant, on tend à une acceptation élargie de cette définition en étendant le sens de sûreté de fonctionnement à une notion plus générale de maîtrise du risque, maîtrisant tant économique que sécuritaire ou opérationnelle. Ainsi, dans le domaine initial des défaillances techniques, on va s'intéresser également au pilotage des coûts d'exploitation et de la disponibilité. Ces derniers, devenus enjeux majeurs de la compétitivité de nombreux produits, conduisent les industriels à développer des approches qui permettent une maîtrise de ces paramètres par leur prise en compte, dès les phases "avant projet" jusqu'à la phase d'exploitation.

3.1.1.3. Le processus de maintenance

Au-delà des définitions, et pour améliorer la compréhension de ce qu'est l'action de maintenance, G. Zwinglestein [ZWI96] évoque le processus de maintenance ainsi :



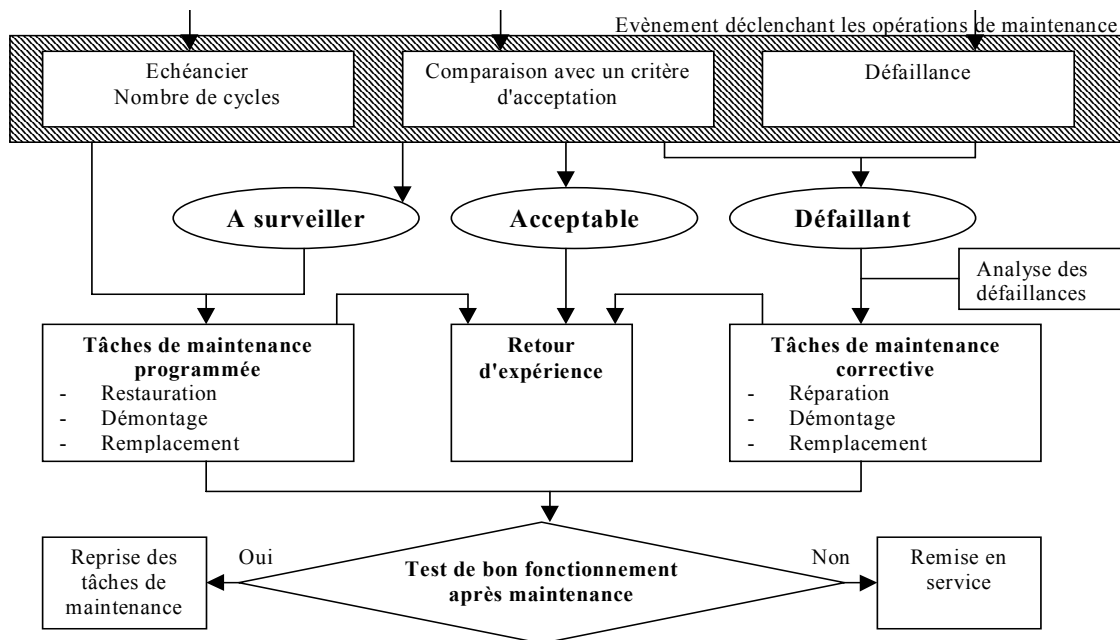


Fig. 10 : Diagramme des différents concepts de maintenance

De l'analyse de ce processus se dessine donc le besoin d'optimiser les politiques de maintenance.

3.1.2. Politiques de maintenance

L'analyse des politiques de maintenance en vue d'optimiser la performance des entreprises (de différents points de vue allant du financier à la disponibilité) est un sujet de recherche exploré par de nombreux laboratoires. Bien que n'étant pas l'objet principal de ce travail de thèse, nous ne pouvons exposer la maintenance et ses coûts sans évoquer l'optimisation par l'amélioration des politiques de maintenance au travers d'une courte analyse bibliographique [\[AUBU97\]](#).

3.1.2.1. Les politiques de maintenance

Faut-il réparer complètement un système lorsqu'il tombe en panne ? Est-il préférable de le réparer à moindre coût en réparant uniquement les composants nécessaires à son bon fonctionnement ? Comment choisir le degré optimal de maintenance corrective ? Voici autant de problèmes industriels auxquels répond l'analyse des politiques de maintenances [\[AFN86\]](#).

La maintenance est en effet un processus qui se caractérise par des choix d'exécution. La juste répartition entre les différents modes de maintenance envisageable, appelée

détermination des politiques de maintenance, a un impact non négligeable sur les coûts de possession d'un système.

Cependant bien que les travaux de recherche sur le sujet soient légion, nous n'entrerons pas dans le détail de cette analyse et nous nous limiterons à la présentation de la partition classique entre maintenance préventive et maintenance corrective. [\[PERE96\]](#)

3.1.2.2. *La maintenance corrective*

La maintenance corrective est une forme délibérée d'entretien qui consiste, une fois la défaillance survenue, à en éliminer les effets et les causes. On distingue généralement [\[AFN02\]](#) :

- la maintenance palliative effectue une remise en état provisoire du matériel ayant subi un dysfonctionnement : c'est un dépannage. Cette maintenance est le plus souvent associée à des systèmes ne présentant pas d'impératif de sécurité.
- la maintenance curative correspond à la remise en état de l'équipement et revêt un caractère définitif. L'équipement concerné par cette maintenance retrouve, après intervention, les caractéristiques qu'il avait avant l'apparition du problème.
- la maintenance corrective d'amélioration représente une forme dérivée de la maintenance curative. Elle ne se limite pas à la remise en état du système mais implique en plus une modification de ses caractéristiques afin d'éviter la répétition du problème.

3.1.2.3. *La maintenance préventive*

La décision d'intervenir précède l'apparition du dysfonctionnement, ce caractère d'anticipation dépend de la présence de ressources appropriées. Ce mode de maintenance permet de diminuer le nombre de défaillances, il doit induire un gain économique substantiel né de la différence entre les coûts générés par l'intervention et la disponibilité qu'elle occasionne. On peut distinguer quatre types de maintenance préventive [\[DASC01\]](#) :

- La maintenance systématique est caractérisée par la connaissance des dates de visite, l'intervalle d'inspection étant déterminé arbitrairement ou en fonction des lois de comportement du système.
- La maintenance conditionnelle se base sur des signes précurseurs annonçant l'imminence d'un dysfonctionnement ou sur l'atteinte par l'équipement d'un certain seuil de dégradation. Le système est alors soumis à des contrôles et inspections.

- La maintenance de conduite, axée sur la surveillance au quotidien du système par son utilisateur, est par conséquent un mode combiné de maintenance conditionnelle et systématique.
- La maintenance préventive d'amélioration est fondée sur le même principe que la maintenance corrective d'amélioration, elle correspond aux campagnes de fiabilisation.

3.1.2.4. Les indicateurs de performance de la maintenance

Il est impossible d'améliorer un système sans en avoir décrit les caractéristiques : dans notre cas, c'est au travers d'indicateurs de performance qu'est analysée la maintenance. Un "indicateur" est une information choisie, associée à un phénomène et destinée à en observer périodiquement les évolutions au regard d'objectifs préalablement définis. [\[BERR02\]](#)

Si le nombre d'indicateurs doit être limité, ils doivent néanmoins permettre d'évaluer l'impact de la maintenance sur le système. Pour cela, la norme française XP X 60-020 [\[AFN95\]](#) présente des indicateurs de coût de maintenance, de disponibilité (et par extension de coût d'indisponibilité), de niveau de sécurité et de coût de la défaillance.

Ces indicateurs sont bien souvent ramenés à des ratios tels que le rapport des coûts de maintenance sur la valeur du bien à maintenir, ou encore le rapport entre les coûts et l'usage :

- coût par heure de vol
- coût par km par siège et par passager
- etc.

Par conséquent, il apparaît que tous les indicateurs (à l'exception des indicateurs de niveau de sécurité) se regroupent autour de problèmes de rentabilité. Les facteurs de performance en maintenance sont représentatifs d'une part, de ce que coûte la maintenance et d'autre part, de la disponibilité associée, à savoir ce que rapporte le système.

En nous appuyant sur ces indicateurs, nous analyserons plus en détail les notions de coûts de maintenance.

3.2. Les coûts de maintenance

3.2.1. Définition et concepts

Les coûts de maintenance représentent l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système complexe. Bien souvent ils sont associés à des exigences de fonctionnement en terme de sécurité, de fiabilité ou encore de disponibilité. [\[DHIL89\]](#).

Leur décomposition s'établit comme suit :

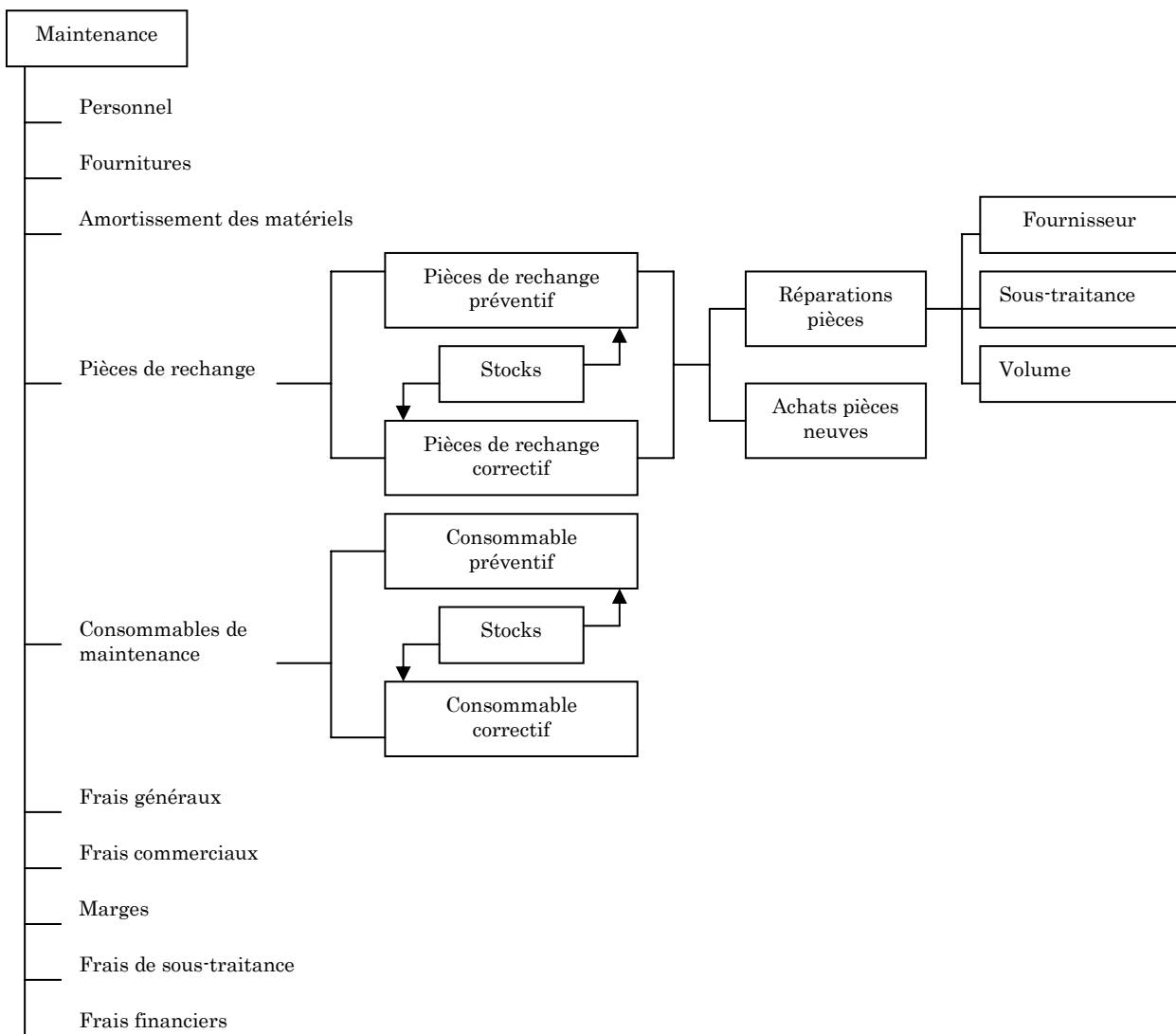


Fig. 11 : Décomposition des coûts de maintenance

Partant de ce graphique, intéressons-nous à la bipartition du coût total de maintenance : Indirect et Direct Maintenance Cost. [\[SAEI92\]](#).

3.2.2. Les coûts de maintenance indirects

L'IMC comprend :

- le coût du personnel non imputable, avec certitude, à une tâche de maintenance
- l'instruction du personnel
- les dépenses d'entretien, de réparation des outillages, spécifiques ou non
- les dépenses liées à l'évolution et à la mise à jour de la documentation technique
- les dépenses d'infrastructures, d'entretien des installations, des véhicules
- les dépenses administratives liées au recours en garantie
- etc.

L'IMC est un coût faiblement compressible, lié presque exclusivement à des charges administratives ou législatives. Ne dépendant pas directement de l'aspect technique, la marge de manœuvre associée pour son optimisation est finalement très mince. L'IMC est souvent exprimé en pourcentage du DMC, ce qui signifie qu'il suffit de calculer ce dernier pour obtenir le coût total de maintenance. Aussi approfondissons notre analyse du DMC.

3.2.3. Les coûts de maintenance directs

3.2.3.1. Analyse des coûts de maintenance

Les coûts impliqués dans une politique de maintenance peuvent être dissociés en coûts compressibles et incompressibles. Dans la première catégorie interviennent le prix des éléments de rechange et la main d'œuvre, quelle que soit la maintenance envisagée. Aucun gain n'est alors possible. En ce qui concerne la deuxième catégorie, une seule variable est à prendre en compte : le coût de l'indisponibilité liée à l'action de maintenance à effectuer. Ce dernier correspond à une perte sèche d'exploitation. [\[MART94\]](#)

Le tableau suivant présente ces coûts ainsi :

Type de coût	Maintenance préventive	Maintenance corrective
Incompressible	Coût de la pièce et coût de main d'œuvre	
Soumis à caution	Indisponibilité (réduite car maintenance en phase d'arrêt)	Indisponibilité (risquée car à tout moment en service)

La perte d'exploitation est un indicateur qui s'applique parfaitement aux systèmes de production. Cependant, dans le cas des systèmes de transport, les coûts de l'indisponibilité peuvent être très variables en fonction du besoin du système.

Il paraît évident que la criticité de l'indisponibilité d'un appareil pour une compagnie aérienne dépend directement du besoin que celle-ci a de son avion. La perte d'exploitation est en outre dépendante de l'usage pour lequel est prévu le système : pour la même indisponibilité d'un jet privé, la perte sera beaucoup plus importante dans le cas d'un voyage d'affaire reporté que dans celui de vacances annulées !

Aussi, bien que ces coûts représentent des sommes considérables, nous limiterons nos études à leur part incompressible : le DMC.

3.2.3.2. *Le DMC*

La notion de DMC pour Direct Maintenance Cost (en français "coût direct de maintenance") est aujourd'hui largement utilisée comme représentation des coûts de maintenance. Cependant sa définition n'est pas toujours rigoureuse, et le périmètre d'analyse qu'elle comprend est trop souvent franchi.

Le DMC dans sa définition selon [\[GOSS99\]](#) représente l'ensemble des coûts directs permettant la maintenance d'un matériel. Il comprend donc les pièces de rechange, les consommables, la main d'œuvre de réparation ou de remplacement, l'amortissement des outillages mais ne comprend pas les coûts logistiques associés à l'entretien des machines, ou encore les coûts de démontage d'un élément en panne. Le DMC peut se décomposer de la manière suivante :

- les dépenses de main d'œuvre technique d'exécution imputables avec certitude :
 - à des tâches de maintenance programmées ou non programmées
 - à l'application des modifications impératives pour des raisons de sécurité
 - aux frais de l'assistance technique du constructeur, du motoriste et des équipementiers pour les travaux de maintenance et de réparation
- les dépenses en pièces de rechange et en éléments consommables, réparables et révisables, effectivement utilisés pour l'entretien, les révisions et les réparations de la structure, des systèmes, des équipements et des moteurs.

De nombreux paramètres influencent ces coûts, ce sont dans l'aéronautique [\[GIFA97\]](#) : la durée moyenne du vol, l'utilisation journalière, l'efficacité de la main d'œuvre, les taux horaires, la part des travaux effectués dans la compagnie par rapport à ceux sous-traités, etc.

Notons que le coût de maintenance n'est pas constant durant la durée de vie de l'appareil et qu'il faut tenir compte :

- de l'effet d'apprentissage ("learning") sur les temps de main d'œuvre
- de l'effet d'évolution des périodicités entre les visites de maintenance programmée et d'évolution des périodicités entre les révisions (TBO)
- de l'effet des garanties applicables à chaque appareil et à chacun de ses équipements, durant les premières années d'utilisation
- de l'effet de vieillissement.

Enfin, signalons que le DMC est un coût généralement exprimé par mesure d'usage : on parle de coût de maintenance par heure de fonctionnement, par Km parcouru ou encore par masse transportée sur une distance donnée. L'aéronautique emploie en général la notion de coût de maintenance par heure de vol comme système de référence.

On a alors l'indicateur suivant :

$$\begin{array}{l}
 \text{DMC} = \underbrace{(\text{coût d'un élément} / \text{MTBF}) + (\text{coût de réparation} / \text{MTBF})}_{\text{Eléments remplacés}} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Correctif} \\ \text{Préventif} \end{array} \right\} \\
 + \underbrace{(\text{coût d'un élément} / \text{TBO}) + (\text{coût de réparation} / \text{TBO})}_{\text{Eléments réparés}}
 \end{array}$$

Fig. 12 : L'indicateur de coûts directs de maintenance

Cet indicateur, classiquement utilisé dans l'aéronautique, sera notre référence dans la suite de ces travaux.

3.3. Estimation des coûts de maintenance

3.3.1. Description

C'est principalement dans le domaine aéronautique qu'une littérature spécialisée évoque des modèles d'évaluation des coûts de maintenance. Outre les documents internes aux sociétés, on peut citer en exemple l'ouvrage de référence de Dhillon [DHIL89] dans lequel plusieurs de ces techniques sont regroupées.

Nous décrirons dans ce paragraphe quelques exemples de modélisation des coûts de maintenance avant d'en montrer les limites.

3.3.1.1. Coût de maintenance d'une usine

Commençons par l'exemple des coûts de maintenance d'une usine. Pour estimer et contrôler ces coûts de maintenance, quatre méthodes sont régulièrement employées : la première se fonde sur les coûts de réparation pour chacune des composantes de l'usine, la seconde est basée sur un pourcentage du coût d'investissement, une autre exprime le coût de maintenance en fonction de la puissance énergétique consommée et enfin, la dernière fait usage d'archives et de comptes-rendus sur des opérations similaires.

L'expression donnée pour de nombreuses installations est la suivante [\[FABR91\]](#) :

Annual Maintenance Cost : $AMC = k.A - q$

Avec $A = \sum_{i=0}^m ST_i \cdot y_i$ et :

ST_i est l'investissement dans l'usine i

y_i est le temps en année correspondant à l'usine i

m est le nombre d'usines à maintenir

q et k sont des facteurs variant en fonction du type d'industrie.

3.3.1.2. Estimation des coûts de support par l'USAF

L'US Air Force a développé un modèle [\[MILH98\]](#) où le coût du support d'un système se définit comme la somme du coût de ses sous-systèmes et de celui qui comprend les pièces de rechange, les nouveaux équipements et la consommation du fuel. On a :

$SSC = K_f + K_{se} + K_{nf} + K_{tp} + K_{mtd} + K_{irs} + K_{oem} + K_{fem} + K_{is} + K_{se}$ où :

- SSC est le coût pour supporter le système
- K_f est la consommation de fuel
- K_{se} est le coût des pièces de rechange moteur
- K_{nf} est le coût des nouvelles installations
- K_{tp} est le coût lié à l'entraînement du personnel et au rodage de l'équipement
- K_{mtd} est le coût lié à la gestion du projet et aux données techniques
- K_{irs} est le coût initial ou celui de remplacement des pièces de rechange
- K_{oem} est le coût de la maintenance de l'équipement embarqué
- K_{fem} est le coût de la maintenance de l'équipement non embarqué
- K_{is} est le coût lié à l'inscription aux inventaires et à la gestion et administration du matériel
- K_{se} est le coût lié au support de l'équipement

3.3.1.3. Estimation du coût de maintenance de l'avionique d'un appareil

Le coût de maintenance de l'avionique est quant à lui décrit par [\[GOSS98\]](#) de la façon suivante :

$CMC = (C_{cam}Y)/1000$ où :

- CMC est le coût de maintenance de l'ordinateur de bord
- Y est le nombre d'années opérationnelles de l'ordinateur de bord
- C_{cam} est le coût annuel de maintenance de l'ordinateur de bord, exprimé en dollars, à une année t (x103)

C_{cam} est donné comme : $\ln C_{cam} = a + b \ln(C_u) - d \ln(MTBF)$ [\[EARL78\]](#),

- C_u est le coût exprimé à une année t
- a, b, d sont des constantes à déterminer
- MTBF est le Mean Time Between Failure exprimé en heures

3.3.1.4. Estimation du coût de pièces de rechanges

Pour calculer le coût des pièces de rechange d'un nouvel avion, Tyszliwick [\[HARV76\]](#) a développé un modèle qui utilise les coûts connus d'un appareil existant et les ajuste avec un facteur de comparaison reflétant les différences en termes de réparabilité, de fiabilité et de complexité :

$SC_a = (CF).(SC_{es})$ avec :

- SC : Spares Cost (coût des pièces de rechange)
- $CF = \alpha.(CIR) \left[\frac{I_{MNS}}{I_{MES}} \right]$
- $\alpha = \sum_{i=0}^n Fi \left[\frac{NFAC_i}{EFAC_i} \right]$ avec i : éléments de l'appareil

I_{MES} est l'indexation établie à l'origine pour le système de maintenance de l'appareil (en heures de main d'œuvre par rapport au nombre d'heures de vol). I_{MNS} est la nouvelle indexation. CIR est un quantificateur de l'impact sur les coûts d'un changement d'élément.

3.3.1.5. Evaluation des coûts de maintenance d'un aéronef en centre d'entretien

Toute une série d'équations paramétriques a été développée pour estimer le coût engendré dans les centres d'entretien par les avions de l'US Air Force. Les variables des équations présentées rendent compte de la puissance des engins, de leur poids, de la pression moteur, du poids à vide, etc. [CHAR99].

La première équation étudiée concerne les coûts de réparation des moteurs et de leurs accessoires :

$$C_{\text{car}} = \alpha_e \cdot (Pe)^{\beta_e} \cdot (Wed)^{\theta_e} \text{ avec :}$$

- C_{car} le coût de réparation des composants et accessoires par moteur et par an
- Pe est la pression du moteur
- Wed est la masse sans carburant
- les autres données sont des constantes variant selon l'appareil

La suivante concerne le coût annuel engendré par une réparation (tout ce qui concerne l'appareil sauf le bloc moteur) et exprimé par appareil :

$$C_{AFR} = \alpha_a \cdot (We)^{\beta_a} \cdot (Mpd)^{\theta_a} \text{ avec :}$$

- C_{AFR} est le coût de reprise d'une cellule par appareil
- We est le poids à vide de l'appareil
- Mpd est l'entretien programmé
- Les constantes étant spécifiques à l'appareil

Un autre modèle concerne l'estimation du coût annuel pour réparer un moteur :

$$C_{YER} = \alpha_y \cdot (Pe)^{\beta_y} \cdot (Wed)^{\theta_y} \text{ avec :}$$

- C_{YER} est le coût annuel de réparation
- Pe est la pression du moteur

Un quatrième concerne le coût annuel engendré par la réparation de la structure de l'avion (fuselage et voilure) :

$$C_{\text{ar}} = \alpha_c \cdot (We)^{\chi_c}$$

- C_{ar} est le coût annuel de réparation d'un des composants d'une cellule d'appareil

- Web est le poids à vide de l'appareil

Enfin la dernière équation suppose que le MTBO (Mean Time Between Overhaul) joue un rôle important dans l'estimation des coûts. Elle est donnée par cette formule :

$$MTBO_e = \alpha_m \cdot (Pe)^{-\beta_m} \cdot (Dm)^{\theta_m} \text{ avec :}$$

- Pe est la pression du moteur
- Dm représente un type de mission (par exemple bombardier, chasseur/attaque...)

3.3.1.6. Coût global d'une automobile

P. Lyonnet [\[LYON00\]](#) s'est intéressé aux coûts de maintenance d'une automobile. D'après lui, ces derniers peuvent s'analyser par nature, par destination au sens comptable des termes, et par type d'intervention. Ils peuvent être imputés soit en exploitation, soit en investissement. Certains postes peuvent inclure des frais financiers : par exemple, l'immobilisation du stock de maintenance. Cette publication indique aussi que l'analyse des coûts de maintenance inclut par nature le personnel, les outillages et équipements de maintenance, les produits et matières consommés, ainsi que la sous-traitance. Le coût global d'une automobile est dépeint ainsi :

$$\Gamma(t) = A_0 (1 - \varphi(t)) + \psi(t) \text{ où :}$$

- Γ est le coût global pour la revente d'un véhicule
- φ est la fonction de dépréciation de l'équipement obtenue à partir de l'argus
- ψ est le coût d'entretien

Cette expression est employée plus particulièrement pour déterminer le temps optimum de remplacement.

En tenant compte de l'actualisation, le coût global (fonction des coûts d'entretien et des pertes de valeur sur la revente) s'écrit de la façon suivante :

$$\Gamma_n = n \cdot A \cdot r + \sum_{i=1}^{i=n} R_i \cdot (1+r)^{n-i} + \sum_{i=1}^{i=n} P_i \cdot (1-(n-i))r \text{ où}$$

- A est le prix d'achat initial,
- R_i est le coût d'entretien pour la période i,
- P_i est la dévaluation de l'équipement pour la période i, et r l'actualisation,
- Γ_n est le coût global pour la revente d'un véhicule au bout de n périodes.

3.3.2. Limites perçues aux modèles existants

Les modèles présentés dans cette dernière partie donnent une idée de ce qui existe dans le domaine du calcul du coût de maintenance, qu'ils soient paramétriques, analogiques ou analytiques. Assez anciens pour la plupart, ils doivent cependant être critiqués.

Tout d'abord, notons que la plupart d'entre eux sont spécifiques à un domaine d'application. Ils présentent un degré de généralisation assez faible et pour la majorité ne peuvent être réutilisés. Par conséquent, nous avons affaire à des modèles peu flexibles et limités dans l'usage, ce qui pose le problème de leur adaptation face à d'autres besoins.

Ensuite, ces techniques relativement simples ne semblent pas avoir été conçues pour répondre à un besoin décisionnel : elles s'intègrent difficilement au sein d'un programme de pilotage d'un projet car elles ne fournissent pas de moyen d'aide à la décision pour des choix techniques, stratégiques et financiers.

Enfin, et c'est sans doute le point le plus sensible, ces méthodes montrent des lacunes quant à leur précision. En effet, très peu d'entre elles prennent en compte l'incertitude liée aux données d'entrée et fournissent un intervalle de confiance sur le résultat.

De manière générale, beaucoup de ces outils se basent sur une représentation très simplifiée du système étudié sans tenir compte de la complexité engendrée par l'environnement (marché, conjoncture, etc.), la technologie employée, l'activité de l'entreprise et la spécificité ou l'usage du produit.

Dans le domaine de l'aéronautique plus particulièrement, on remarque que les modèles décrits fonctionnent suivant la notion du "global appareil", principe peu précis qui limite les possibilités de prise de décision.

Ces insuffisances soulignent donc la nécessité de créer de nouvelles méthodes d'estimation de coût de maintenance, adaptées aux besoins actuels et donnant des résultats avec une précision suffisante pour aider à la prise de décision des choix technologiques. Par conséquent, il est intéressant de se pencher sur les méthodes de prévision de coût utilisées dans des domaines autres que celui de la maintenance.

C'est pourquoi le chapitre suivant s'attarde sur les méthodes d'estimation de coûts de production et de développement. De cette analyse nous déduirons alors comment ces outils peuvent être réutilisés et adaptés pour l'étude des coûts de maintenance.



4. Le costing : outils et méthodes

4.1. Les bases du costing

4.1.1. Présentation

Les activités de conception et de développement ont un impact important sur les coûts de production et de commercialisation des nouveaux produits : en effet, ce qui constitue un critère de performance des activités de conception et de développement, ce ne sont pas seulement les dépenses effectives mais surtout les coûts consécutifs aux décisions prises par les ingénieurs chargés de la conception. Aussi faut-il maîtriser les dépenses à venir dès les activités de conception et de développement.

L'objectif premier de l'évaluation du coût est d'estimer et/ou d'optimiser les coûts du cycle de vie d'un produit tout en satisfaisant aux spécifications de performances, de sécurité, de fiabilité ou autres exigences. Le modèle de coût devra :

- représenter les caractéristiques du produit analysé, y compris son utilisation et son environnement futurs
- être suffisamment détaillé pour inclure et mettre en valeur tous les éléments relatifs au coût
- être assez simple pour être facilement compris et permettre son utilisation judicieuse dans le processus décisionnel
- anticiper les mises à jour et modifications ultérieures
- être conçu de telle façon qu'il permette l'évaluation d'éléments spécifiques du coût de cycle de vie indépendamment d'autres éléments.

4.1.2. Modèle d'évaluation de coûts

Les modèles d'évaluation de coût sont particulièrement nombreux, néanmoins certains types de modèle sont devenus des références dans l'industrie. Nous pouvons entre autres citer le modèle *PRICE*[®], le modèle *Depot* (développé par le US Airforce Logistic Command), le *Logistics Composite Model (LCM)*, le *Development and Production of Aircraft (DAPCA)* (modèle statistique publié dès 1974 [\[MARK78\]](#)) et enfin le modèle *MOD-METRIC* (modèle multi paramètres développé par Rand Corporation). Cependant, nous ne parlerons pas de l'application commerciale de ces modèles mais nous essaierons d'en montrer le principe et la

construction. Nous verrons donc au travers de l'analyse suivante quelles peuvent être les méthodes pertinentes d'estimation de coût.

4.1.2.1. *Méthode d'estimation des éléments de coût*

Cette méthode basique consiste à décomposer un système en éléments de coût, chaque élément de l'arborescence étant estimé au travers de Relations d'Estimation de Coûts (REC) ou Cost Estimating Relationship (CER). "Cost Estimating Relationships (CER's) are mathematical expressions relating cost as the dependent variable to one or more independent cost driving variables" [\[FAIO93\]](#) en est une définition couramment utilisée.

Ces relations peuvent prendre la forme de simples moyennes et pourcentages, ou celle d'équations complexes qui résultent d'analyses de régression statistique et relient le coût (la variable dépendante) aux particularités physiques du produit telles que la performance, la masse, le volume, etc.

Bien entendu, ces relations de coût s'appuient sur des sous-modèles et, qu'ils soient paramétriques, analytiques ou comparatifs, on peut retenir les remarques suivantes :

- les estimations sont avant tout le fruit d'une réflexion humaine et ne découlent pas exclusivement d'outils (même si leur prédominance est claire dans le cas des méthodes paramétriques)
- toutes les estimations basées sur des comparaisons s'appuient sur des (bases de) données propres à l'entreprise ou partagées
- pour estimer, il faut acquérir au préalable la connaissance du contexte, des outils et des techniques utilisées.

Notons que la question stratégique de ce type d'évaluation porte sur le choix de la décomposition du système : c'est un compromis entre précision (décomposition très fine) et temps d'évaluation.

Enfin, retenons que la description d'un système peut se faire soit à un niveau de description physique du produit, soit à un niveau processus : de la conception à la distribution en passant par l'approvisionnement, le stockage, la fabrication, le contrôle, ou encore la formation du personnel. [\[FABR93\]](#)

Sur cette première base de travail, des sous-modèles sont utilisés pour la description des coûts élémentaires.

4.1.2.2. *Influence de la temporalité et conventions économiques de comparaison*

Dans le cadre des coûts de cycle de vie, la difficulté majeure est liée à la qualité de l'estimation des coûts dans le périmètre temporel retenu. En effet, des facteurs tels que les lois du marché (offre et demande), le contexte économique (reprise, etc.), le progrès technique ou encore les coûts des salaires peuvent avoir un impact important sur les prix. Afin d'être le plus objectif possible, il est nécessaire de fixer des conventions temporelles de comparaison des données économiques. Voici donc les principaux modèles utilisables pour la prise en compte de la temporalité sur les coûts.

L'actualisation de la valeur de l'argent (la valeur d'un dollar d'il y a 10 ans est moindre que celle d'un dollar actuel, et un dollar dans dix ans n'aura pas la même valeur). L'actualisation consiste à ramener au présent toutes les dépenses, ou recettes, qui s'étalent très différemment dans le temps et ce à des fins de comparaison [UTECC00]. La méthode la plus courante d'actualisation suppose le calcul de la valeur actualisée nette (NPV) :

$$NPV = \sum_{n=0}^T C_n (1 + X)^{-n}$$

où C_n est la marge brute d'autofinancement nominale dans l'année n ;
 n est une année spécifique de la période d'évaluation du CCV ;
 X est le taux d'actualisation ;
 T est la durée en années de la période de temps prise en compte.

L'inflation est difficile à prévoir avec justesse. Elle traduit une érosion monétaire que l'on compense en général d'un point de vue contractuel par une formule de révision de prix (FRP) et d'un point de vue économique par une formule d'actualisation des prix (FAP) [BELL95].

$$\frac{P}{P_0} = pf + a \cdot \frac{S}{S_0} + b \cdot \frac{Psd}{Psd_0} + c \cdot \frac{M}{M_0} \quad \text{FRP}$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{a.S}{(1-pf).S_0} + \frac{b.Psd}{(1-pf).Psd_0} + \frac{c.M}{(1-pf).M_0} \quad \text{FAP}$$

P_0 : Prix aux conditions économiques de référence
 P : Prix aux nouvelles conditions économiques voulues
 S : Indice salaire dans le secteur d'activité
 Psd : Indice produit et service divers

M : Indice générique représentant les approvisionnements matières

a, b, c : Pondération des sources de coût dans le prix total

pf : Partie fixe (entre 0 et 15 %)

Du point de vue de l'estimation des coûts et de la constitution d'une banque de données, c'est la FAP qui doit être utilisée pour s'affranchir des spécificité du contrat, et non la FRP.

La parité économique entre monnaies est liée au taux de change. Elle recherche "la lame de fond" qui produit les richesses et s'intéresse aux facteurs de production [UTECC00a]. En clair, elle permet de savoir combien est sur ou sous-côtée une monnaie par rapport à une autre, c'est-à-dire de connaître les tendances à moyen terme et la zone d'équilibre autour de laquelle le marché financier reviendra.

Le graphe ci-dessous synthétise ce problème [JOSE03] :

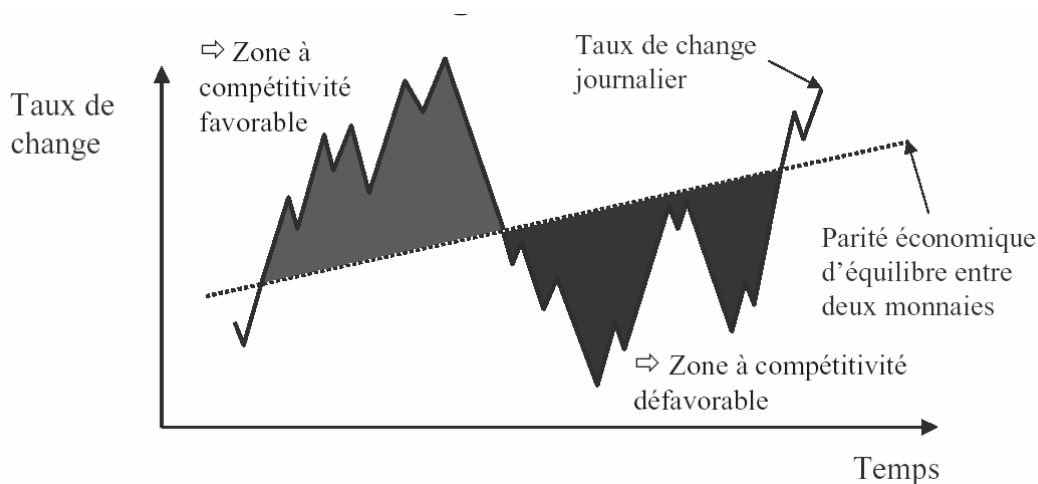


Fig. 13 : Parité économique entre monnaies

La courbe d'amélioration des coûts est une adaptation de la courbe d'expérience issue de la théorie de l'apprentissage. La théorie de l'apprentissage, appliquée à une entreprise, signifie qu'avec la répétition de tâches identiques, le personnel devient de plus en plus expérimenté et permettant ainsi de développer des gains de productivité [BELL90]. Les observations faites dans l'aéronautique américaine dans les années 30 par l'officier Wright ont montré qu'avec le temps, notamment en fonction de la production cumulée d'avions, le nombre d'heures de travail nécessaires pour chaque nouvelle unité produite décroissait régulièrement : à chaque doublement de la production cumulée correspondait une économie de temps de 20%.

Dans les "courbes d'expérience", la baisse des coûts unitaires de production n'est pas expliquée par le seul effet d'apprentissage, elle dépend aussi d'économies d'échelles et de l'introduction de l'innovation. Ainsi dans la méthodologie des courbes d'amélioration des

coûts, ces derniers diminuent d'une proportion fixe (à titre indicatif 0,9 pour l'industrie mécanique) à chaque fois que la quantité double.

On a l'équation suivante : $Y = aX^b$ (1)

Ou celle-ci : $Y' = aX^b$ (2)

avec :

Y coût moyen de l'unité à la $X^{\text{ième}}$ unité

Y' coût moyen cumulé de l'unité à la $X^{\text{ième}}$ unité

a coût de la première unité

X Nombre d'unités

b coefficient de la courbe d'apprentissage avec $b = \frac{\text{Ln}(0.90)}{\text{Ln}(2)}$

Il existe deux types d'approches pour la courbe d'apprentissage : la courbe unitaire et la courbe moyenne cumulative. La différence principale entre les deux est : la courbe moyenne cumulative calcule la valeur unitaire moyenne pour la courbe entière à un point donné tandis que la courbe unitaire calcule la valeur d'unité pour un point spécifique de quantité.

Après la production des premières unités, une opération selon la courbe moyenne cumulative connaît une réduction beaucoup plus grande de son coût qu'une opération selon une courbe d'unité suivant la même pente. Cette différence s'atténue au fur et à mesure que la quantité des unités produites augmente.

L'analyse et l'étude des courbes d'amélioration des coûts sont faites principalement dans les situations qui donnent l'opportunité d'améliorer ou de réduire le temps de travail fourni par unité produite. Les exemples ci-dessous illustrent quelques cas où il est approprié d'employer ces courbes [\[NASA02\]](#) :

- proportion élevée de travail manuel
- production non interrompue
- production d'articles complexes
- aucune modification technologique
- pression à l'amélioration continue.

La théorie de la courbe d'amélioration des coûts a connu de nombreuses innovations depuis son origine. L'une d'elles a été l'ajout d'une variable dans l'équation afin de prendre en compte le taux de production de l'organisation. Celui-ci est défini comme le nombre de

produits fabriqués durant une période de temps donnée. L'équation suivante modifie la formule générale précédente (1) pour tenir compte des changements du taux de production (Q, r) et de l'amélioration des coûts organisationnels (X, b) :

$$Y = AX^bQ^r \text{ avec :}$$

Y Heures/unités (ou Euros par unités)

A Heures des premières unités (ou Euros par unités)

X Nombre d'unités

b Pente de la courbe relative à l'apprentissage

Q Taux de production (quantité produite durant la période)

r Pente de la courbe relative au taux de production

La maturité technologique : au fil du temps, l'homme acquiert une maîtrise des technologies qui permet de réduire le coût des produits. Par exemple : en 1970, une calculatrice standard valait 1000 Francs tandis que 25 ans après elle ne vaut plus que 200 Francs [BELL95]. L'évolution du coût d'une technologie donnée suit ainsi une courbe dite en « z » ou ayant « l'effet baignoire » [BREU03] :

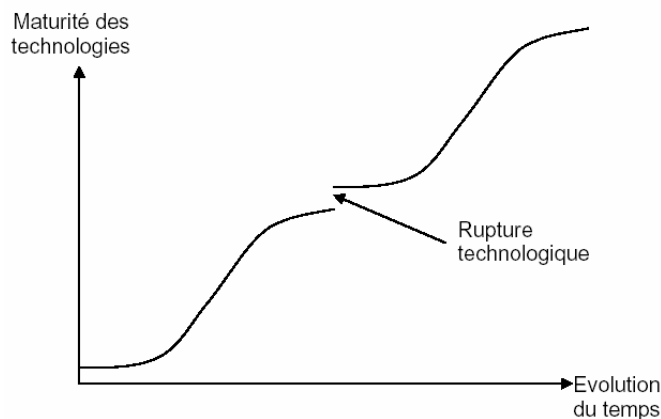


Fig. 14 : L'effet "baignoire"

Comme nous l'avons vu, les modélisations de coût s'appuient sur d'importantes bases de données. La prise en compte de la maturité des technologies s'avère donc être un enjeu majeur dans la précision des prévisions de coûts.

4.1.2.3. Les méthodes d'estimation de coût

Les méthodes d'estimation de coût se répartissent en général suivant la partition "analogique, paramétrique et analytique". On peut commenter succinctement cette tripartition [GAUT97].

La méthode analogique repose sur une comparaison entre les fonctions que doit remplir le produit (définies dans le cahier des charges fonctionnel) et les fonctions de réalisations antérieures dont le coût est connu. Cette comparaison se matérialise par la détermination d'un coefficient d'analogie qui exprime le sentiment de l'estimateur quant à la ressemblance entre le nouveau projet et l'ancien.

Le principal avantage de la méthode analogique est sa rapidité et son faible coût de mise en œuvre. Par contre, elle implique que les comparaisons entre le projet et les réalisations passées soient pertinentes, ce qui suppose que le projet ne soit pas fondamentalement différent des réalisations passées, dans sa conception technique et dans la conception des processus de production et de support logistique.

La méthode paramétrique peut être utilisée dès que les spécifications techniques du projet à réaliser sont définies. Elle consiste à établir une corrélation statistique entre les caractéristiques physiques du système (par exemple le poids, le volume ou la puissance) et son coût estimé.

Par rapport à la méthode analogique, la méthode paramétrique a pour avantage principal de présenter des estimations de coût plus précises, grâce notamment à un niveau de détail plus important et une approche plus rigoureuse sur le plan théorique. L'estimation du coût est obtenue par extrapolation, vers un produit nouveau, de coûts connus d'un échantillon de réalisations passées. Une formule ou un modèle paramétrique sera par conséquent d'autant plus fiable que les solutions techniques retenues sont proches de celles des travaux précédents.

La méthode analytique utilise quant à elle les données issues des systèmes d'information comptable de l'entreprise. Dans la pratique, comme le souligne S. Bellut [\[BELL90\]](#), ce moyen d'estimation est utilisé principalement durant la phase de production en série car il nécessite des informations très détaillées sur le produit et sur les procédés de fabrication (nomenclature du produit, gammes opératoires, etc.) et qui ne sont pas toujours disponibles lors de la conception.

Sur la base de cette analyse des fondements des outils de costing, nous décrirons en détail dans les chapitres suivants les différents types de modèle de coût.

4.2. Les modèles paramétriques

4.2.1. Introduction

Les modèles paramétriques servent à établir le coût d'un système à différents stades de son cycle de vie à l'aide d'un ensemble de descripteurs techniques [\[MOND94\]](#).

On peut les classer selon deux familles principales :

- les modèles avec utilisation de barèmes : on cherche alors à analyser des ratios significatifs de l'activité (par exemple le coût au m², les métriques de développement informatique, etc.)
- les modèles statistiques, pour lesquels un traitement par logiciel spécifique est souvent nécessaire, sont les plus courants.

Les méthodes paramétriques d'estimation impliquent de récupérer des données pertinentes, nommées paramètres ou variables de Relations d'Estimation de Coûts [\[FAIO93\]](#).

Un paramètre représente un facteur de conversion d'un système d'unité à un autre, il peut s'agir d'une mesure physique ou d'une mesure de performance (la masse d'un appareil par exemple).

Une variable caractérise généralement la consommation des ressources dans le temps, il peut s'agir d'un prix ou d'un ratio empirique. Le nombre d'heures de fabrication d'un équipement sous forme de moyenne statistique en est un exemple.

4.2.1.1. *Processus de développement d'un modèle paramétrique*

La construction et la validation d'un modèle paramétrique sont définies par le Département américain de la Défense [\[DOD99\]](#) sur la trame suivante :

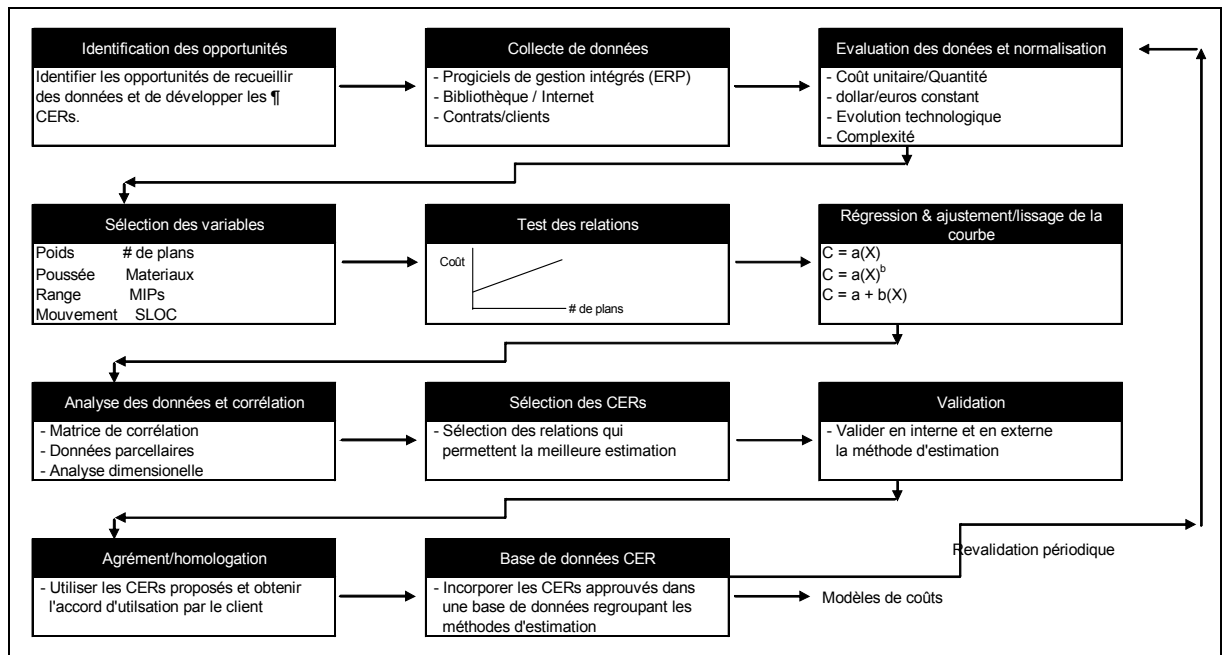


Fig. 15 : Trame de construction d'un modèle paramétrique de coût

Dans ce processus la collecte de données est un point primordial. Issues de données comptables, de bases de données techniques et historiques de l'entreprise, des systèmes d'information (ERP), de rapports spécifiques ou encore d'avis d'experts, les renseignements collectés doivent être ajustés par la prise en compte de facteurs temporels (cf. 4.1.2.2). Cette phase est appelée processus de normalisation des données.

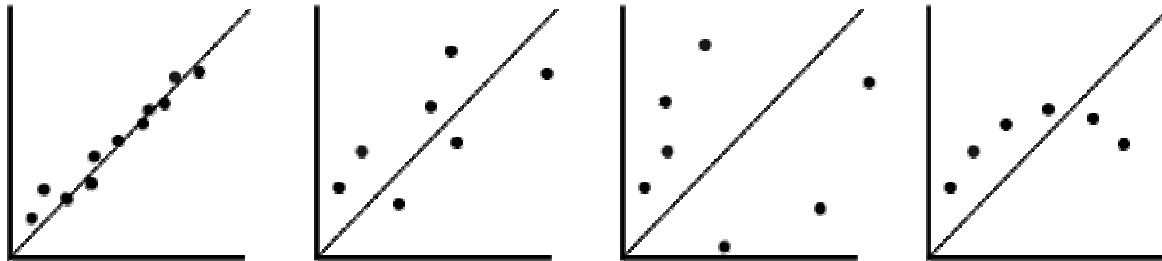
4.2.1.2. Mesure de la performance de l'estimation

Plus il y a d'inducteurs de coûts présents dans un modèle, plus grande est la précision : aussi évidente soit-elle, cette corrélation n'est pas tout à fait juste. C'est la qualité et la quantité d'informations disponibles par "cost driver" qui vont directement impacter la performance d'un outil d'estimation, aussi les auteurs du *Parametric Cost Estimating Handbook* [DOD99] affirment-ils qu'idéalement il faudrait un modèle avec un grand nombre d'observations et utilisant le moins de variables possibles.

Pour obtenir un niveau de performance acceptable des modèles, le premier travail consiste ainsi à tester les différents inducteurs de coût (les variables) qu'une identification qualitative effectuée par expertise, a préalablement choisis. Il s'agit d'optimiser le modèle en gardant uniquement les variables les plus significatives.

La précision et la performance générale des modèles d'estimation de coût sont jugées à travers de nombreux tests statistiques. Voici quelques critères de performance couramment employés pour valider un modèle paramétrique [DOD99]:

- le coefficient de détermination R^2 et le coefficient de corrélation r (avec $r=\sqrt{R^2}$), indicateurs d'ajustement



Forte corrélation $R^2=0.98$ Faible corrélation $R^2=0.7$ Aucune corrélation $R^2=0.1$ Corrélation non linéaire $R^2= 0.2$

Fig. 16 : Coefficient de corrélation

- le *t-stat* qui est une méthode qui évalue le poids d'une variable explicative dans le modèle ou le *F-stat* qui est une statistique très communément utilisée pour juger de la qualité de l'équation dans son ensemble [GUJA78].
- le *SSE* ou *SE* (*Standard Error of the Estimate*), le *CV* (*Coefficient of Variation*) qui permettent de jauger l'ampleur et la proportion de l'erreur dans l'estimation,
- le *SNER* (*somme normalisée des résidus*), le *RMSE* (*erreur quadratique moyenne*),
- le *MAD* (*Mean Absolute Deviation*), le *MAPE* (*Mean Absolute Percentage Error*), le *Tracking Signal* (poursuite du signal).

D'autres critères plus élaborés peuvent être utilisés pour juger de la validité d'un modèle paramétrique de coût. Ce sont par exemple l'*AIC* (*Aikake Information Criterion*) ou le *SBIC* (*Schwarz Information Criterion*) qui ont pour avantage de tenir compte de l'erreur de performance mais aussi de la complexité du système [CAMA03].

Sans entrer plus dans le détail à ce sujet, gardons en mémoire que des méthodes statistiques pertinentes existent et sont usuellement employées pour juger de la pertinence d'un modèle de coût.

La suite de l'étude va s'attacher à présenter, le plus exhaustivement possible, les modèles paramétriques les plus employés pour en montrer les avantages, inconvénients et spécificités.

4.2.2. Les modèles régressifs

Le principe des modèles régressifs est simple : il s'agit, à partir d'une distribution d'observations, de rechercher la relation qui correspond le mieux entre la/les valeur(s) explicative(s) et la valeur expliquée.

4.2.2.1. Régression linéaire simple

Il est impossible de parler des modèles de coût sans évoquer la régression linéaire, technique simple mais sans doute la plus utilisée.

Le modèle a la forme suivante : $Y = \beta_1 X + \beta_0 + \varepsilon$ tel que $\begin{cases} E(Y) = aX + b \\ Var(Y) = Var(\varepsilon) = \sigma^2 \end{cases}$

où : $\begin{cases} X_i \\ Y_i \end{cases}, i = 1, \dots, n$ où X représente le paramètre explicatif
 Y représente le paramètre expliqué

On cherche à minimiser la somme des carrés des distances des points à la droite (critère des moindres carrés) :

$$D_{y/x}(a, b) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i - \beta_1 X_i - \beta_0]^2 \quad \begin{cases} b_1 = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\text{var}(X)} \\ b_0 = \bar{Y} - a\bar{X} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{où } \bar{Y} = \text{Moyenne des } Y_i \\ \bar{X} = \text{Moyenne des } X_i \end{matrix}$$

Connaissant une valeur x_0 , on définit deux intervalles de confiance de prédiction à partir de la valeur prédite $\hat{y}_0 = b_0 + b_1 x_0$. Le premier encadre $E(Y)$ sachant $X = x_0$, le deuxième encadrant \hat{y}_0 est plus grand car il tient compte de la variance totale : $\sigma_u^2 + Var(\hat{y}_0)$

Ainsi, à chaque point (b_0, b_1) de l'ellipse de confiance de (β_0, β_1) correspond une droite d'équation $\hat{y} = b_0 + b_1 x$

Toutes ces droites sont comprises entre les bornes $\hat{y} \pm \sqrt{(2F_{1,(n-2)})} \left(\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2} \right)^{1/2}$

Ceci signifie que cette bande recouvre la "vraie" ligne avec une probabilité $1-\alpha$. Cette prédiction par intervalle n'est justifiée que pour des observations appartenant à la population échantillonnée et à condition que les hypothèses de linéarité et normalité soient valides.

Une description graphique associée aura alors la forme suivante :

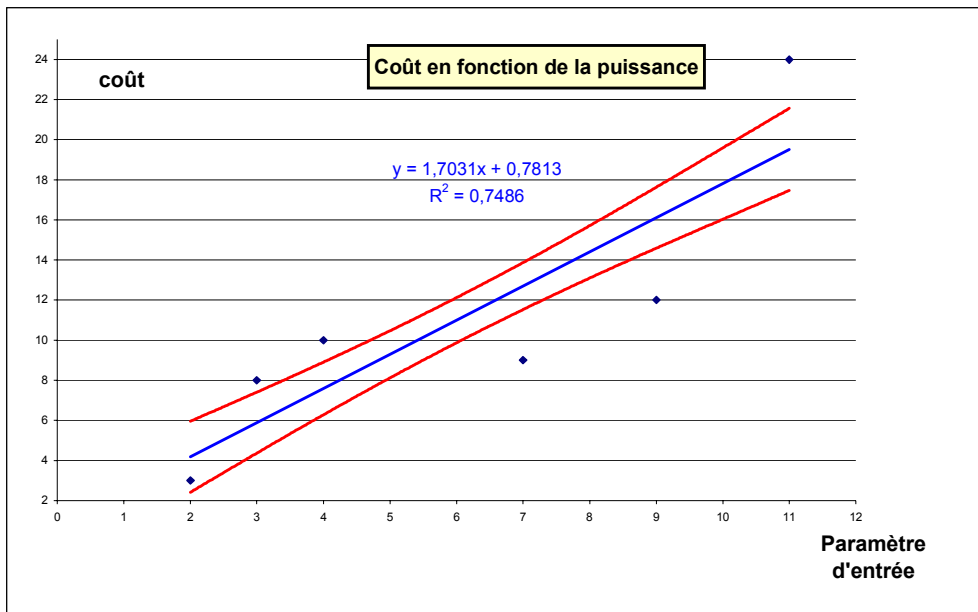


Fig. 17 : Régression et son intervalle de confiance associé

Notons que la régression simple est très sensible à la qualité de la distribution et que les erreurs sont proportionnelles à l'insuffisance et à l'inadéquation des données d'entrée.

4.2.2.2. Régression non linéaire

Des problèmes de linéarité sont régulièrement identifiés, on essaiera donc (grâce à des changements de variables judicieusement choisis) de se ramener à un graphe où l'on s'attend à ce que les points soient à peu près alignés (exemple typique : croissance et décroissance exponentielle → passage au logarithme).

Pour répondre aux dits problèmes, on pourra utiliser les formules suivantes [\[BESS01a\]](#) :

$$\begin{aligned}
 Y &= \beta_0 + \beta_1 \ln X \\
 \ln Y &= \beta_0 + \beta_1 X \quad \text{ou} \quad Y = ab^X \quad \text{avec} \quad \beta_0 = \ln a \quad \text{et} \quad \beta_1 = \ln b \\
 \ln Y &= \beta_0 + \beta_1 \ln X \quad \text{ou} \quad Y = aX^{\beta_1} \quad \text{avec} \quad \beta_0 = \ln a \\
 Y &= \beta_0 + \beta_1(1/X) \\
 Y &= \beta_0 + \beta_1 X^{1/2} \\
 Y &= \beta_0 + \beta_1 X^2 \quad \text{ou, plus généralement,} \\
 Y &= \beta_0 + \beta_1 X^\alpha
 \end{aligned}$$

Proches de l'usage d'une régression simple, ces formules pourront s'adapter aux problématiques de coût dans le cas de "cost drivers" non linéaires.

4.2.2.3. Régression multiple

Pour l'étude de données multidimensionnelles, le modèle de régression linéaire multiple est l'outil statistique le plus habituellement mis en œuvre. Cas particulier de modèle linéaire, il constitue la généralisation naturelle de la régression simple et s'écrit sous la forme suivante :

$Y_i = \beta_0 + \beta_1.X_i^1 + \dots + \beta_p.X_i^p + \varepsilon_i$ où on considère avoir p variables explicatives et où on suppose que les données proviennent d'un échantillon statistique de taille n.

Il existe tout un arsenal statistique pour calculer ces coefficients β avec un certain niveau de confiance. Ceci n'étant pas l'objet de notre étude, voici quelques références à consulter pour mieux appréhender ce processus [\[RUBI94\]](#), [\[BESS01\]](#).

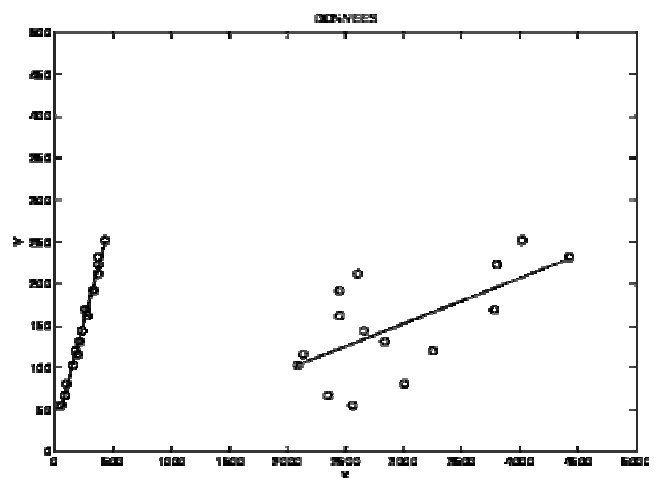
Pour enrichir le propos, illustrons cette méthode par un exemple à deux paramètres qui définit la vente d'un produit (Y_i) en différentes localités en fonction de la population (X_1) et du salaire mensuel (X_2) :

$$Y_c = a + b_1x_1 + b_2x_2$$

Dans ce cas-ci, la valeur de Y est fonction de deux variables indépendantes où :

- Y_c est la valeur calculée ou estimée pour la variable dépendante,
- a est la valeur de Y quand toutes les variables $X=0$,
- X_1 est la première variable (explicative) indépendante,
- b_1 est la pente de la droite liée à la variation de X_1
- X_2 est la deuxième variable indépendante,
- b_2 est la pente de la droite liée à la variation de X_2

district (i)	Vente unité Y_i	Population (1000s) X_{i1}	salaire mensuel (CHF) X_{i2}
1	162	274	2450
2	120	180	3254
3	223	375	3802
4	131	205	2838
5	67	86	2347
6	169	265	3782
7	81	98	3008
8	192	330	2450
9	116	195	2137
10	55	53	2560
11	252	430	4020
12	232	372	4427
13	144	236	2660
14	103	157	2088
15	212	370	2605



On obtient $Y = 3.45 + 0.49X_1 + 0.009X_2$

Ce type de modèle est souvent considéré comme performant et ce pour deux raisons :

- il y a moins de biais (plus nous omettons de variables exogènes dans une étude descriptive, plus nous risquons d'introduire un biais)
- l'introduction de variables supplémentaires peut diminuer la valeur de la variance résiduelle

Or l'application de ce modèle dans le calcul des coûts est fastidieuse car il est difficile d'avoir des échantillons de données suffisants et pertinents pour remplir les critères statistiques. De plus, trouver les bonnes combinaisons entre les variables explicatives n'est pas tâche facile !

La technique de régression pas à pas est ainsi une méthode très largement utilisée par les statisticiens pour se concentrer sur les inducteurs de coût les plus importants (*step-wise régression*).

Le principe de la régression pas à pas consiste soit à introduire les variables de X une par une (régression vers l'avant), soit à inclure toutes les variables possibles de X dans une régression multiple et de les rejeter alors une par une (régression en arrière). Cela permet à l'analyste d'ajouter des variables ou de les enlever, afin d'obtenir le meilleur modèle de prédiction des coûts. Cette méthode exige cependant de l'analyste de bien comprendre les variables qu'il entre dans le modèle, de présumer de leur impact, et de surveiller les effets de multi-colinéarité (la multi-colinéarité se produit quand deux variables ou plus, présumées indépendantes, montrent un degré élevé de corrélation).

4.2.2.4. *Combinaison de relations linéaires et non linéaires*

Les estimateurs de coûts peuvent aussi être issus d'une combinaison de plusieurs relations linéaires et non linéaires en multi-variables.

Par exemple un des descripteurs de coût couramment employé et illustré dans [\[DEAN89\]](#) est :

$$c = e^{a_0} \prod_{i=1}^r e^{a_i x_i} \prod_{j=r+1}^s x_j^{a_j} \quad \text{ou encore} \quad \ln(c) = a_0 + \sum_{i=1}^r a_i x_i + \sum_{j=r+1}^s a_j \ln(x_j)$$

Dans cet exemple, E.B. Dean explique que les facteurs exponentiels retranscrivent bien les effets temporels (tels que l'inflation ou l'évolution technologique) tandis que les autres facteurs retranscrivent mieux les quantités économiques (comme les unités de production, le nombre de prototypes, le nombre de lignes de code pour un logiciel, le poids de chaque unité produite, etc.)

Si on la compare à des emplois dissociés, l'utilisation combinée de ces facteurs permet, a priori, d'améliorer la précision du calcul.

$$\text{Si on pose : } q = a_0 + \sum_{i=1}^r a_i x_i \text{ alors } \ln(c) = q + \sum_{j=r+1}^s a_j \ln(x_j) \quad \text{où} \quad c = e^q \prod_{j=r+1}^s x_j^{a_j}$$

Le coût s'exprime ainsi par une forme où l'évolution technologique, l'inflation et toute autre mesure abstraite ajustent les quantités économiques précisées ci-dessus.

Cette définition de la complexité du système est pratique puisque ses composantes sont linéaires. La composante a_0 représente la complexité engendrée par des inducteurs qui ne sont pas encore déterminés. La figure suivante illustre cette notion de complexité :

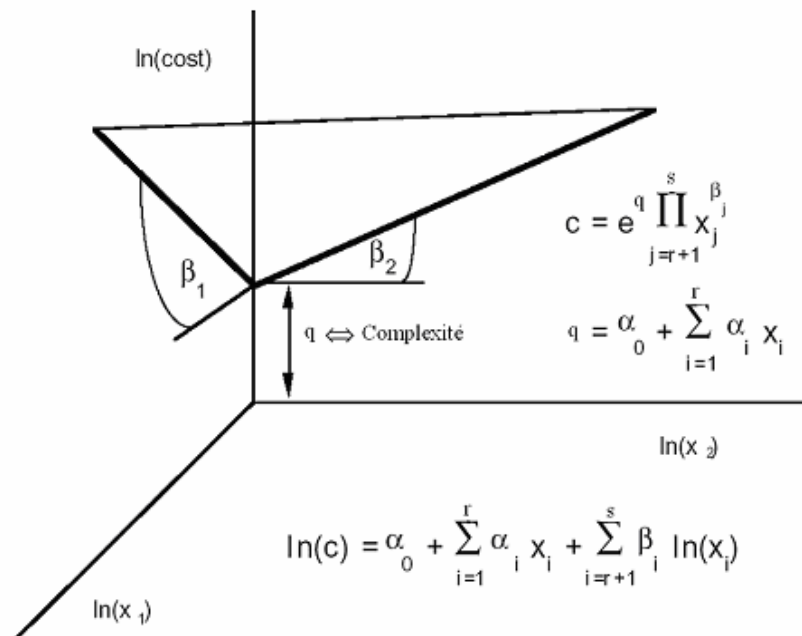


Fig. 18 : Notion de complexité

4.2.2.5. La régression floue

Cette technique représente une alternative aux techniques statistiques conventionnelles, basées sur des théories probabilistes bien connues et dont les observations suivent l'hypothèse "Independent and Identical Distribution" (IID). Avec de telles limitations, les régressions statistiques linéaires conventionnelles sont souvent remises en cause dans leur prédiction lors d'applications réelles. Tanaka et Al [TANA82] furent ainsi les premiers à faire intervenir la structure floue dans les modèles de régression.

Plusieurs techniques existent, citons entre autres :

- Fuzzy Linear Regression Model [\[TANA89\]](#), [\[JUAN92\]](#), [\[GUAN93\]](#), [\[SAKA92\]](#)
- Fuzzy Goal Regression Model [\[CHAN96\]](#)

Afin de faire correspondre les inducteurs de coûts choisis avec le coût lui-même, la forme de ces modèles repose sur l'utilisation d'une fonction d'appartenance floue.

Cette régression présente l'intérêt principal suivant : les algorithmes qui la réalisent s'avèrent très robustes dans la pratique et nécessitent un degré d'ajustement assez faible (grâce à la flexibilité inhérente à la fonction d'appartenance floue).

4.2.3. Les Modèles cognitifs

4.2.3.1. Les réseaux de neurones

Ces dernières années, une nouvelle approche basée sur la théorie des réseaux de neurones (Artificial Neural Networks ou ANNs) s'est développée. Les ANNs se sont inspirés des fonctionnalités et de la structure du cerveau humain et de son réseau de neurones. De façon schématique, ce dernier peut être défini comme un "processeur massivement distribué en parallèle et qui a une propension naturelle pour stocker de la connaissance empirique et la rendre disponible à l'usage". Les connexions entre les neurones s'appellent les synapses et leurs différents niveaux de conductivité traduisent le « poids » de la connexion. On peut citer comme référence sur ce sujet les travaux suivants : [\[ARBI95\]](#) ou [\[HERA94\]](#).

La modélisation par réseau de neurones a conquis plusieurs domaines [\[DREY97\]](#).

Le premier est la modélisation linéaire de données statiques : en chimie, on modélise le comportement de molécules grâce à différents descripteurs tels que la masse, le volume, le nombre d'atomes (ce qui permet de prédire les propriétés de la molécule sans réaliser de synthèse chimique). On simule aussi des processus dynamiques avec l'utilisation de réseaux récurrents : la commande d'un véhicule 4x4 (le frein, le volant et l'accélérateur) est ainsi réalisée par des réseaux de neurones, de sorte que le véhicule garde une trajectoire déterminée. On utilise également les réseaux pour la détection d'anomalies dans les processus : on prédit l'évolution du processus et on compare cette prédiction avec son évolution réelle. Dans la détection d'anomalie, on traite en outre des problèmes de classification : cette technique est issue de la reconnaissance de forme (le réseau surveille le processus et lorsqu'il détecte un écart, il le classe suivant la nature du défaut rencontré).

Enfin, les réseaux de neurones sont utilisés depuis peu en économie pour modéliser des évolutions financières.

Ces outils sont en revanche, pour l'instant, très peu utilisés dans le domaine du costing. Une des rares publications à ce sujet est celle de [\[CAVA02\]](#) où les données prises en compte pour l'élaboration du modèle sont de trois types :

- données technologiques, liées aux procédés de production
- données de conception, liées aux dispositifs morphologiques du produit
- données concernant les coûts, tels que les coûts de matière première, de main-d'oeuvre, etc.

Dans cet article, les auteurs se sont attachés à comparer le réseau de neurones développé avec un modèle paramétrique régressif. Leurs analyses statistiques ont montré la supériorité du modèle neuronal sur celui de la simple régression linéaire. Le graphique suivant présente bien que l'erreur d'estimation sur les coûts de production estimés pour différents lots de pièces est moindre dans le cas du modèle cognitif.

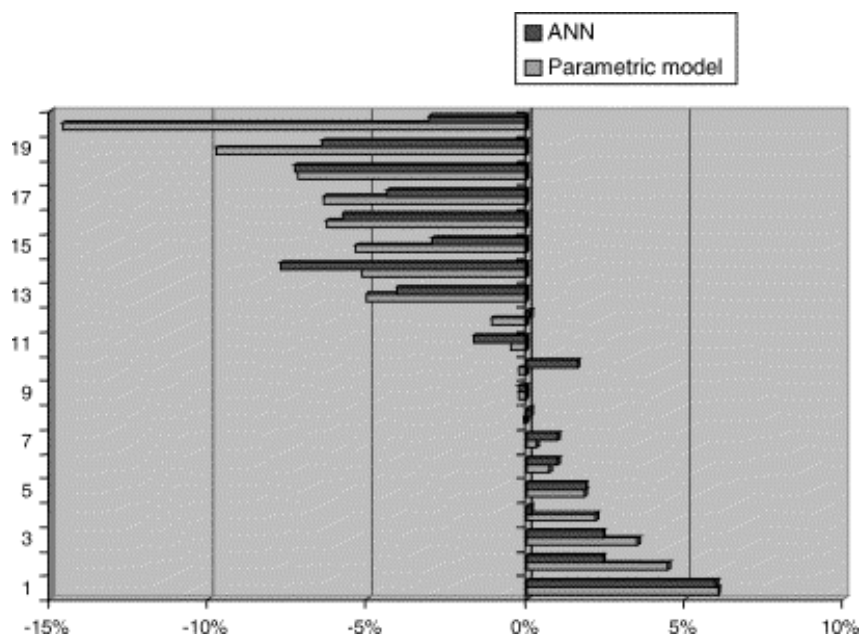


Fig. 19 : Erreur d'estimation par ANN

Sans pour autant généraliser la supériorité de ce modèle, cette publication met en évidence la robustesse des ANN qui mènent à d'excellents résultats sur tous les échantillons proposés.

Il est intéressant de prolonger l'analyse au-delà de données purement quantitatives pour inclure également quelques considérations qualitatives, la logique inhérente à ces deux approches en étant le point le plus important. Alors qu'un modèle paramétrique exige de spécifier une expression analytique définissant les relations entrées/sorties, cette étape n'est

pas nécessaire avec un réseau de neurones. Aussi l'ANN se caractérise-t-il par la possibilité de déterminer de façon autonome les relations (CER) les plus appropriées.

Ceci peut cependant être vu à la fois comme une force et une faiblesse. En effet, l'analyse du problème est beaucoup plus légère et rapide et, dans le cas d'un problème très complexe ou innovant, les résultats ne dépendent pas de la capacité des analystes à trouver des variables indépendantes clés et des expressions analytiques adéquates. Dans le même temps, l'aspect "boîte noire" que revêt cet outil et l'impossibilité de savoir clairement comment les résultats sont obtenus constituent la limite principale du réseau de neurones. En d'autres termes, il est impossible de donner une interprétation théorique aux résultats fournis par l'outil, particulièrement pour des valeurs imprévues (du moins par intuition) ou injustifiables.

D'ailleurs, on peut objecter que si la connaissance de l'expression des différentes relations n'est pas nécessaire pour appliquer une approche par ANN, il faut néanmoins prédéterminer la structure du réseau. Plusieurs applications structurelles, comme le multicouche, l'*Adaptive Resonance Theory* (ART) et la technique d'auto-organisation [\[FREE91\]](#), se sont développées pour faciliter l'identification de la structure la plus adaptée. Les progiciels de conception de réseaux de neurones sont généralement équipés d'outils qui visent à évaluer "la propension à apprendre" du réseau et, en cas de réponse insatisfaisante, à le modifier de manière appropriée.

L'argument que citent souvent les utilisateurs de modèles paramétriques classiques est leur excellent (ou du moins convenable) rapport qualité/prix, or le coût d'exécution d'un réseau de neurones est (en général) tout à fait semblable : en effet, les faibles coûts rencontrés lors des analyses préliminaires sont équilibrés par les coûts plus élevés nécessaires au développement d'un ANN. Aussi la robustesse plus élevée de la méthodologie et sa faculté à traiter des informations superflues ou fausses permettent-elles d'éliminer ou de réduire les phases d'analyse de données, généralement très longues (et donc onéreuses) avec le tout paramétrique.

En conclusion, les ANN, développés récemment, semblent représenter une alternative valide à la modélisation des coûts. Pour stimuler la diffusion de cette méthodologie, il est cependant nécessaire de la rendre davantage "transparente" à l'analyste, en développant par exemple des outils logiciels qui reproduisent d'une manière compréhensible le comportement du réseau.

4.2.3.2. La logique floue

La logique floue (*Fuzzy Logic*) a été introduite par L. Zadeh [\[ZADE65\]](#), [\[ZADE94\]](#) en 1965 et ses premières applications ont vu le jour dès les années 80 avec le contrôle du métro de Sendai au Japon. Elle a été créée pour répondre au besoin de formaliser la représentation et le traitement de connaissances imprécises ou approximatives. Cette méthode intervient donc dans la manipulation de connaissances imparfaites, par exemple les facteurs humains. L'élément de base de la logique floue est l'ensemble flou (ainsi appelé à cause de ses frontières indécises). [\[BOUC98\]](#)

Sans entrer dans le détail de ces méthodes, et bien que les outils et pratiques émanant de la logique floue soient nombreux [\[IDRI99\]](#), nous allons nous limiter à présenter l'outil COCOMO d'évaluation de coûts.

C'est en 1981 que le logiciel COCOMO, acronyme pour *CO*nstructive *CO*st *MO*del, a été développé [\[BOEH81a\]](#) et depuis sa première version, cet outil d'estimation du coût des logiciels n'a cessé de s'améliorer. Il est doté de trois modules : COCOMO simple, intermédiaire et expert.

Assez simpliste, le modèle de base estime l'effort (nombre de mois.homme) en fonction du nombre de lignes de code, de la productivité (nombre de lignes de code par personne par mois) et d'un facteur d'échelle qui dépend du type de projet.

Le modèle intermédiaire introduit 15 facteurs de productivité (appelés "cost drivers") divisés en quatre classes : attributs du produit, attributs de l'environnement matériel et logiciel, attributs du personnel et attributs du projet.

Le modèle expert inclut toutes les caractéristiques du modèle intermédiaire avec en plus une estimation de l'impact de la conduite des coûts sur chaque étape du cycle de développement (définition initiale du produit, définition détaillée, codage, intégration).

Aujourd'hui, le modèle COCOMO 2 (1998) représente une grande évolution de COCOMO par l'utilisation de l'approche statistique bayésienne dans le but de combiner des données empiriques avec des avis experts. Il prend en compte les facteurs suivants : facteurs d'échelle, urgence, flexibilité de développement, résolution d'architecture/risque, cohésion d'équipe et maturité de processus.

Pour illustrer cette approche, évoquons l'application extraite de *Software Engineering Economics* [BOEH81b] où l'équation de coûts de développement présentée dans le modèle COCOMO fournit une estimation en homme.mois telle que :

$$HM = a * taille^b \prod_{i=1}^{15} c_{ij}$$

où :

- taille désigne la taille d'un logiciel mesurée en Kilo Instructions Source Livrées (KISL)
- a, b des constantes qui dépendent du mode du projet (organique, semi-détaché ou intégré)
- C_{ij} le multiplicateur d'effort correspondant à la $j^{\text{ème}}$ catégorie (valeur linguistique) sélectionnée du $i^{\text{ème}}$ facteur de coût
- K_i le nombre de catégories correspondant au $i^{\text{ème}}$ facteur de coût.

Au-delà de la simplicité de ce modèle, Boehm [BOEH81b] montre comment les différentes estimations de coût peuvent être faites par phases du cycle de vie et pourquoi une estimation au niveau du composant, et non pas au niveau du produit, peut donner des résultats plus précis. Ces méthodes fournissent en outre des données quantitatives au processus de décision de la direction, bénéfice précieux même lorsque les estimations sont approximatives. L'utilisation systématique d'un modèle tel que le COCOMO, ou de tout autre modèle de ce type, dans le cadre d'une organisation donnée, est donc susceptible d'améliorer l'exactitude des estimations de coût.

En synthèse, retenons que les principaux avantages des modèles algorithmiques par logique floue résident dans la facilité que l'on a à les développer, à les utiliser et à les programmer. Ils présentent cependant comme défaut de ne pas proposer une bonne explication quant à leur comportement.

Quant aux modèles non algorithmiques, que nous n'avons pas présentés, ils permettent de modéliser des relations complexes entre les différents facteurs affectant le coût. Bien que leur comportement soit facilement compréhensible [IDRI99], ils restent néanmoins difficiles à développer et ne peuvent être utilisés sans une programmation préalable.

Enfin, soulignons que les modèles de coût utilisant la logique floue sont en fait une agrégation de plusieurs techniques et qu'ils mettent en jeu les notions suivantes : l'analyse des inducteurs de coûts, la théorie de la logique floue, la MAUT (*Multi Attribute Utility Theory*), les techniques de régression...

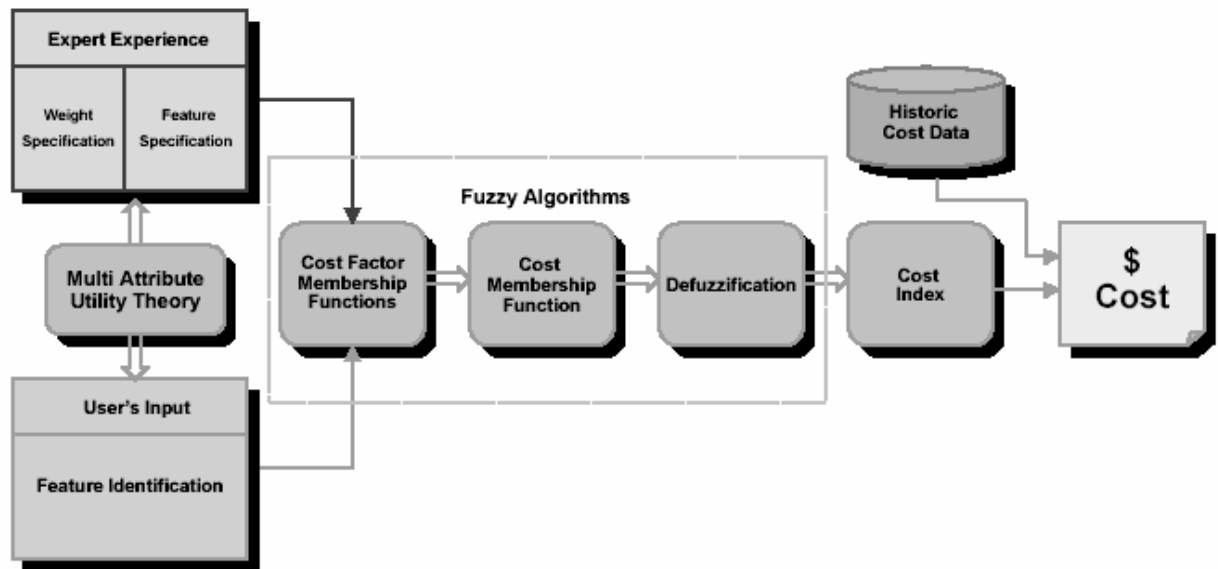


Fig. 20 : Costing et "fuzzy logic"

Cette méthode tend donc à se généraliser en raison des bons résultats qu'elle offre, on peut ainsi prendre en exemple l'évaluation des coûts du capot d'antenne du Longbow pour laquelle les erreurs de prédiction ont été inférieures à 5% (type d'erreur non connue).

4.2.4. Synthèse sur les modèles paramétriques

Ce tour d'horizon a permis de souligner les avantages et les inconvénients des modèles paramétriques.

Ces méthodes sont tout d'abord rapides et faciles à employer ; de plus, elles peuvent être mises en oeuvre avec une information limitée sur le système à étudier. En conséquence, elles sont particulièrement utiles dans la phase de développement d'un programme.

Ensuite, du fait qu'ils sont basés sur des observations (subjectivité faible ou inexistante) et reposent sur une forte rigueur scientifique, les modèles paramétriques sont bien souvent d'excellents outils pour prédire des coûts.

Les techniques paramétriques peuvent cependant présenter des limites. En effet, outre les difficultés de compréhension pour des néophytes, un problème majeur se pose lors de la création de ces outils : la collecte de données de référence, souvent erronées ou incomplètes dans le cas de systèmes complexes. Par exemple, on se doute que la base de données qui sert de référence pour l'évaluation des coûts de matériel informatique est bien plus importante (et donc plus pertinente) que celle disponible pour l'analyse d'un système embarqué sur hélicoptère et produit en très faible quantité.

Le choix du/des paramètre(s) de référence est en outre capital dans la qualité de l'estimateur de coût. En effet, quelle que soit la technique utilisée, on ne peut pas avoir de résultats probants si le paramètre pris en compte ne retranscrit pas fidèlement la loi de comportement en coût du système : c'est donc l'expert en costing qui, par son choix de paramètres, influence la qualité du modèle.

Il apparaît enfin que des phénomènes environnementaux ou organisationnels, influençant de façon significative le résultat de l'estimation, sont difficilement transposables et intégrables, de manière formelle, dans les modèles paramétriques de coût. Citons comme exemple l'impact de la maîtrise des procédés industriels (mode d'organisation, compétences de l'équipe et techniques employées) ou encore celui des réglementations et de la fiscalité d'un pays.

Aussi, dans la pratique, une technique d'évaluation paramétrique, telle que l'entendent les spécialistes du costing, s'avère être un habile mélange des trois grandes méthodologies existantes. Schématiquement il s'agit, par analogie, d'utiliser l'ensemble des données disponibles sur des systèmes existants ou plus anciens, d'apprécier leur corrélation par rapport à des paramètres donnés, et enfin de déterminer le coût désiré à travers une expression analytique ajustée.

La suite de ce chapitre se consacre ainsi à la description des méthodes analytiques et analogiques.

4.3. Modèles Analytiques

4.3.1. Introduction

La méthode analytique est la plus ancienne, la plus classique, et donc la plus répandue, des méthodes d'estimation de coûts. Si l'on se réfère à la seule étymologie, *analytique* signifie "qui procède par voie d'analyse". Or le dictionnaire définit l'analyse comme "une opération consistant à étudier un objet, un tout, en le décomposant en ses éléments constitutifs". Les modèles analytiques reposent donc sur une bonne connaissance des caractéristiques d'un système, ils nécessitent des informations très détaillées sur l'élément à chiffrer, ce qui les discréditent pour des évaluations très en amont dans un projet.

De manière simplifiée, le chiffrage analytique repose sur une décomposition du coût en plusieurs sous-éléments plus faciles à calculer :

$$\text{Coût système} = \Sigma (\text{coûts élémentaires})$$

L'approche analytique peut également être utilisée pour estimer des écarts entre système de référence et système étudié. Cette thèse portant sur des analyses prévisionnelles de coûts, nous limiterons néanmoins nos recherches aux techniques susceptibles d'y parvenir sans rentrer dans les systèmes de comptabilité générale (par coût prévisionnel ou coût préétabli, on entend "coût calculé à partir des charges estimées à l'avance").

L'état de l'art de ces méthodes analytiques consiste à présenter les évaluations dites "à la main", la méthode ABC et l'analyse des UVA.

4.3.2. Méthodes " à la main "

4.3.2.1. Présentation du modèle

Comment ne pas présenter les modèles analytiques sans parler de ces "lois", de ces expressions régies aussi bien par la comptabilité que créées par l'expert en costing ? Celles-ci définissent le coût d'un système à travers ses inducteurs sous la forme d'une décomposition (rigoureuse ou non) en plusieurs sous-ensembles. Ces "modèles" (si l'on peut parler de modèles), très simples car reposant sur un lien direct coût / inducteurs, représentent la grande majorité des calculs effectués pour estimer le coût d'un produit. C'est d'ailleurs par l'intermédiaire de ce système que l'être humain raisonne lorsqu'il s'agit d'effectuer des achats.

On peut prendre l'exemple, certes élémentaire, d'une personne allant faire ses courses au supermarché : la facture totale de ses achats s'écrira sous la forme d'une décomposition par articles choisis et selon le traditionnel schéma quantité \times prix de l'article. Ce cas simple illustre très bien le principe d'une approche qui peut se transposer à l'infini à n'importe quel autre domaine.

4.3.2.2. Exemple d'application

A partir d'un modèle utilisant le schéma de la comptabilité analytique pour calculer le coût d'un produit fabriqué par une entreprise, prenons une organisation selon trois niveaux :

l'approvisionnement, la production et la distribution. Par le biais de la comptabilité analytique, on peut ramener toutes les charges à ces trois centres de coûts.

Pour fabriquer un produit, une entreprise utilise 200 g d'une matière A achetée 10 euros le Kg et 400 g d'une matière B achetée 8 euros le Kg ; les charges d'approvisionnement représentent 10% du prix d'achat ; la fabrication coûte 6 minutes de main d'oeuvre à 50 euros de l'heure et 2 euros de fournitures ; la distribution coûte 8% du prix de vente qui est de 20 euros.

	Quantité	Montant unitaire	Calcul	Montant
Prix achat mat. A	0.2	10	$0.2 * 10$	2
Prix achat mat. B	0.4	8	$0.4 * 8$	3.2
Prix d'achat A + B	.	.	$2 + 3.2$	5.2
Charges d'approvisionnement	10%	5.2	$10\% * 5.2$	0.52
COUT D'ACHAT	.	.	$5.2 + 0.52$	5.72
Main d'oeuvre	0.1	50	$0.1 * 50$	5
Fournitures	.	.	.	2
COUT DE PRODUCTION	.	.	$5.72 + 5 + 2$	12.72
Charges de distribution	8%	20	$8\% * 20$	1.60
COUT DE REVIENT	.	.	$12.72 + 1.60$	14.32
MARGE	.	.	$20 - 14.32$	5.68

Fig. 21 : Modèle analytique simple

D'une simplicité extrême, cette approche est la plus courante des méthodes d'estimation de coût et peut très facilement être mise en place. Dans le cadre d'une estimation prévisionnelle, c'est-à-dire en phase de conception et de développement, la difficulté est de disposer de données suffisantes et d'établir une décomposition pertinente du système. Pour parer à ce besoin, les méthodes ABC et UVA ont formalisé les décompositions potentielles de coût.

4.3.3. La Méthode ABC

4.3.3.1. Introduction à la méthode ABC

L'origine de la méthode ABC remonte au programme de recherche CMS (*Cost Management System*) développé en 1986 par les chercheurs américains Kaplan, Porter, Cooper et Miller, et français Mevellec, Lebas et Lorino. [\[TANN02\]](#).

La méthode d'analyse des coûts fondée sur les activités (*Activity Based Costing - ABC*) considère l'entreprise, ou la structure, sous l'angle des processus mis en œuvre qui concourent à la réalisation et à la distribution des produits et services. Elle repose donc sur

une vision transversale qui fait abstraction des fonctions et des centres de responsabilité, plusieurs centres de responsabilité pouvant contribuer à la réalisation d'un même processus.

La méthode ABC permet de mieux refléter la composition des coûts en proposant notamment une répartition pertinente des coûts indirects : en effet, aux notions de coûts complets et coûts directs, elle substitue celle de coûts traçables. On appelle traçables des coûts qu'on sait affecter directement aux produits, sur la base d'une unité d'œuvre non arbitraire [\[LORI01\]](#).

L'*Activity Based Costing* concerne les contrôleurs de gestion mais aussi les chefs de projet en leur offrant une vision globale des processus qu'ils gèrent. Elle implique également les opérationnels, seuls capables de décrire les activités inductrices de coût.

L'ABC repose sur le principe :



et peut se décomposer en sept étapes [\[BERLO2\]](#) :

- définition des différentes activités dans les centres
- répartition des ressources consommées par les différentes activités
- définition du lien de causalité (inducteur de coût) entre la consommation de la ressource et l'activité déjà définie
- regroupement des inducteurs de coût face aux activités
- détermination du nombre des inducteurs de coût
- analyse du coût associé à l'inducteur de coût
- application du coût unitaire des inducteurs de coût aux produits et détermination des prix de revient selon l'approche ABC.

L'ABC offre une bonne allocation des coûts d'un produit en affectant les charges indirectes de manière fine. Non négligeables, celles-ci englobent les frais généraux, dépenses administratives, coûts de direction, etc. Généralement, on les estime par une multiplication du coût de production par un facteur indexé.

Les coûts indirects ne suivant pas le même modèle pour tous les produits, le principe de leur répartition se fait de la manière suivante [\[ARIE00\]](#) :

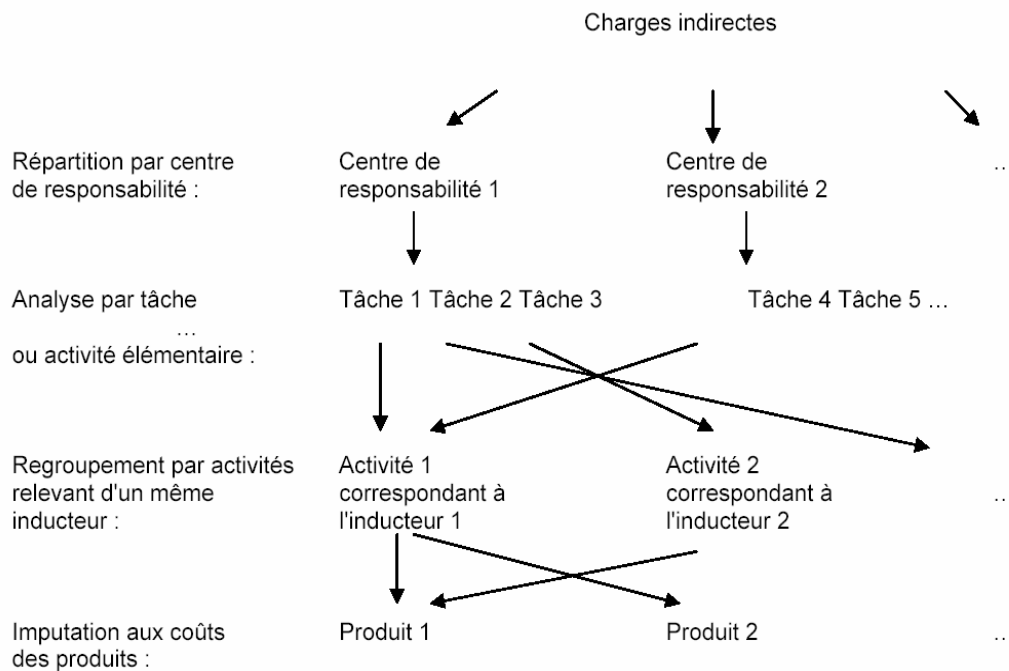


Fig. 22 : Répartition des charges indirectes

Dans le cas de l'ABC, et une fois les spécifications arrêtées, les choix de conception et de développement portent non seulement sur des variables liées au volume, mais aussi sur des variables de complexité et d'efficacité. Les systèmes de calcul de coût basé sur les activités permettent de mettre en évidence le rôle de la variété comme vecteur d'influence des coûts récurrents.

En outre, l'utilisation de la modélisation ABC soulève deux problèmes : la définition des inducteurs de coût et la différence entre le concept d'inducteur et celui de mesure d'activités. La différence entre ces deux concepts est principalement liée à l'horizon temporel considéré : l'inducteur de coût est un facteur dont l'occurrence est à l'origine du coût, alors que la mesure d'activité (ou unité d'œuvre) représente le facteur par lequel le coût d'une activité varie le plus directement. En conséquence, la mise en place de la méthode ABC ne garantit nullement la modélisation des consommations de ressources utiles. On peut formaliser la méthode ABC de la manière suivante [PESO03] :

$$CP_{it} = \sum_p (nBUO_{ipt} \times cUO_{pt}) + \sum_n (QMP_{int} \times cMP_{nt}) \text{ avec :}$$

- t pour la période
- i pour le produit
- n pour les charges

- p pour le poste, la section ou l'activité
- m pour les matières
- CP_{it} coût du produit i pour la période t
- $nBUO_{ipt}$ nombre d'unités d'œuvre du poste p consommé par le produit i
- cUO_{pt} coût de l'unité d'œuvre du poste p en t
- QMP_{imt} quantité de matière m consommée par le produit i en t
- cMP_{nt} coût de la matière m pour la période t .

Enfin, notons que l'activité doit être caractérisée par un véritable inducteur et non pas simplement par une mesure d'activité (laquelle ne traduit qu'une corrélation et non pas une causalité réelle). [\[GAUT00\]](#)

L'inducteur déterminé pour une activité doit correspondre à une variable de décision du processus de conception et développement du produit nouveau. Ces variables s'articulent autour de quelques grands domaines :

- les décisions "produit et marché" basées essentiellement sur la définition des fonctionnalités du produit
- les décisions relatives aux technologies du produit et reposant sur les capacités avec lesquelles une firme cherche à obtenir un avantage concurrentiel
- les décisions relatives à l'architecture du produit, portant sur la définition des sous-systèmes et de leurs interfaces
- les décisions relatives aux technologies et processus de production.

Les choix de conception et de développement impliquent une difficulté dans l'application de la méthodologie ABC. En effet, une décision de conception influence les coûts récurrents indirects, le nombre d'occurrence d'une activité ou son coût de réalisation. Par exemple, les choix faits en phase de développement peuvent impacter le nombre de changements de série sur une ligne de production.

4.3.3.2. *Exemple d'application*

Prenons l'exemple [\[TANN02\]](#) d'une entreprise agro-alimentaire qui fabrique des boîtes contenant un mélange standard d'aliments (pour la grande distribution) et des grands plateaux contenant un mélange spécifique à la demande de certains clients (restaurants, hôtels), le département commercial assurant les ventes, le contrôle des expéditions et les

visites aux clients. On prend comme paramètre la répartition des charges indirectes et les sections suivantes :

- une section auxiliaire (laboratoire et tests)
- trois sections principales : (approvisionnements, fabrication et conditionnement, et service commercial)

La section « laboratoire et tests » doit être répartie en tant que section auxiliaire, à raison de 90%, à la section "fabrication" et les 10% restant à parts égales entre les deux autres sections principales. Les coûts matières correspondent à 132 500 kg de légumes consommés à 65%. Pour le produit standard, la main d'œuvre est de 3 950 heures dans la fabrication (60% du produit standard). 100 tonnes de légumes standards emballés à 18 € le kg et 40 tonnes de produits légumes spécifiques emballés à 22 € le kg sont vendues. A titre de simplification, on considère que la consommation en légumes des produits standards, la main d'œuvre directe payée et le prix de l'emballage s'élève à 1.000.000 €. La consommation en légumes des produits spécifiques est de 750.000 €.

Dans le cadre de l'ABC, on suppose l'existence de deux activités dans la section "laboratoire", deux dans la section "approvisionnement", quatre dans la section "fabrication et conditionnement" et trois dans la section "service commercial". Les consommations en ressources sont de même définies par activité, à partir d'un inducteur de coût correspondant.

Le détail du calcul n'ayant qu'un intérêt limité, il s'agit plus de se focaliser sur les résultats et de mesurer ce qui résulte de l'ABC par rapport à la méthode des coûts complets.

On constate ainsi que le coût du Kg de légumes spécifiques était sous-estimé : 21,602 € selon la méthode du coût complet contre 22,012 € selon l'approche ABC, le 2ème produit se vend donc à perte. Dans les approvisionnements, la charge en coût complet était partagée entre les produits spécifiques et standards à raison de 35% et 65%, alors que selon l'approche ABC la charge l'est selon les pourcentages $15/27=55,5\%$ et $12/27=44,5\%$ (le nombre de légumes étant adopté comme inducteur de coût). Dans la fabrication, la charge en coût complet était distribuée à hauteur de 40% et 60% alors que selon l'approche ABC, le conditionnement est réparti en fonction du nombre des lots, soit $150/325 = 46\%$ spécifiques et $175/325 = 54\%$ standards.

4.3.3.3. *Commentaires*

Nous retiendrons donc de cet exemple que :

- le choix des activités et des inducteurs de coût peut être discutable dans certaines situations
- l'imputation des charges indirectes sur les activités n'échappe pas à la technique classique des clés de répartition
- dans la pratique, l'approche ABC reste parfois complexe à réaliser, ce qui peut entraîner un certain manque de transparence au niveau des utilisateurs.

Force est de constater que ces imprécisions et biais de calcul restent moins importants que ceux rencontrés lorsqu'on applique les techniques de la comptabilité analytique classique, on peut même dire en comparaison que la méthode ABC est précise. [\[MILK96\]](#)

Cependant M. Gautier [\[GAUT00\]](#) évoque les limites de l'estimation ABC. D'une part, son principal défaut est qu'elle requiert un véritable effort lors de sa mise en place, ce qui consomme beaucoup de temps par rapport aux méthodes traditionnelles. D'autre part, en ne conservant que des lois de coûts linéaires et unicausales, les systèmes de comptabilité de gestion procèdent à une simplification difficilement justifiable, constituant ainsi un obstacle à leur utilisation pour évaluer les choix en phase de conception d'un produit nouveau.

4.3.4. **La méthode des Unités de Valeur Ajoutée (UVA)**

4.3.4.1. *Présentation*

Apparue en avril 1995, la méthode des Unités de Valeur Ajoutée (UVA) puise ses origines dans la méthode ABC [\[PESO03\]](#). Elle a été développée progressivement à partir du concept de "l'unification de la mesure de la production" énoncé par Georges Perrin au début des années 1950.

Cette méthode a pour objectif de définir le profit de chaque facture. Le calcul par acte de vente ne pouvant se faire que par une étude précise de l'activité de valeur ajoutée, la méthode préconise donc une analyse fine de tous les processus concourant à une vente. Les coûts sont ensuite répartis sur les produits et clients selon divers critères de classification traduisant leur niveau de consommation de ressources.

Le niveau plus fin d'analyse de la méthode UVA (qui descend jusqu'aux tâches élémentaires) est systématiquement évoqué par ses partisans, mais sa principale caractéristique est la simplification du calcul des coûts permise par l'hypothèse des "rapports constants". C'est la raison pour laquelle on distingue les méthodes des sections homogènes et ABC de la

méthode UVA (méthode indiciaire). L'ensemble des techniques évoquées repose sur le même postulat : l'organisation est découpée en entités et les tâches sont allouées entre ces entités [BOUQ00]. Nous ne discuterons donc pas de la validité de ce postulat, mais uniquement des éléments distinctifs des deux catégories d'approches identifiées.

La formulation de la méthode des UVA est la suivante [PESO03] :

$$CP_{it} = \left(\sum_p nbUO_{ipt} \times iUVA_{pt_0} \right) \times cUVA_t + \sum_m (QMP_{imt} \times cMP_{mt}) \text{ avec :}$$

- $cUVA_t$: le coût de l'unité de valeur ajoutée pour la période t, tel que $cUVA_t = \frac{\sum_j ch_{jt}}{nbUVA_t}$ où

$nbUVA$ est le nombre d'UVA produites pendant la période t et ch_{jt} le montant total des charges j pour la période t ;

- $iUVA_p$: indice représentant la proportion de « valeur ajoutée » consommée par le poste p ;

- $nbUO_{ipt}$: nombre d'unités d'œuvre du poste p consommées par le produit i en t ;

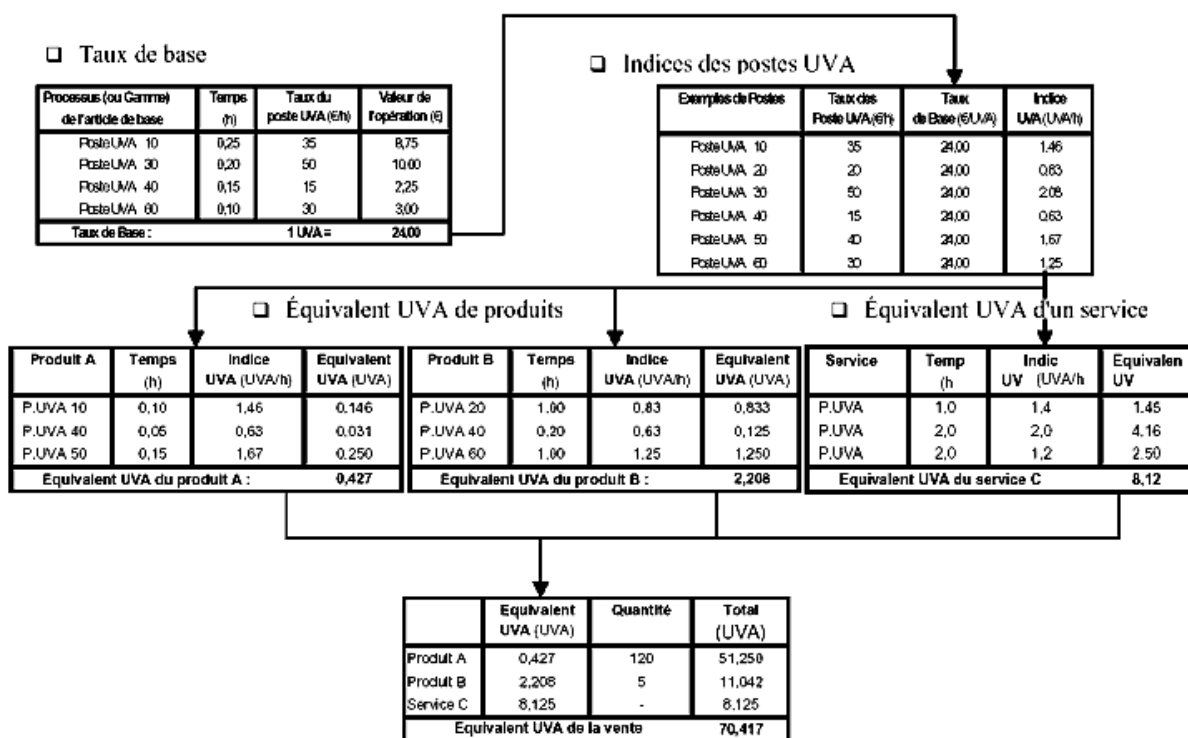
- QMP_{imt} : quantité de matière m consommée par le produit i en t ;

- cMP_{mt} : coût de la matière m pour la période t.

La simplification proposée par cette méthode repose sur ce que l'on appelle les "constantes occultes" (G. Perrin, 1963). Toutefois, ces constantes pouvant varier dans le temps, on leur préfère le terme d'indice UVA. Ils doivent régulièrement être remis à jour (tous les cinq ans au moins) pour tenir compte des évolutions technologiques ou de la structure des charges.

4.3.4.2. Exemple d'application

Reprenons un exemple tiré de [FIEV03] qui récapitule l'utilisation de la méthode des UVA, depuis le taux de base jusqu'à l'obtention de l'équivalent valeur ajoutée d'une vente : il s'agit d'une vente de 120 unités de produit A et de 5 unités de produit B.



On peut calculer ainsi le prix de revient de la vente :

Équivalent UVA vente (UVA)	Coût de l'UVA (€/UVA)	Montant de VA de la vente (€)	Achats incorporables (€)	Dépenses Spécifiques Client (€)	Coût de revient de la vente (€)
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c = a x b</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f = c + d + e</i>
70,417	25,92	1 825,18	450,23	63,78	2 339,19

NB Les montants *d* et *e* sont issus directement de la comptabilité.

Fig. 23 : Costing par Unité de Valeur Ajoutée

4.3.4.3. Conclusion

Cette vision apportée sur la gestion est novatrice, on ne travaille pas en centres de profits mais en processus décomposés en opérations. Certaines charges de la comptabilité vont ainsi être remises en cause, le compte comptable n'étant pas une source d'informations suffisamment pertinente.

La construction de la méthode UVA reste cependant longue et coûteuse en moyens humains, certaines variables étant indispensables à une mise en place réussie (notamment une présentation claire et précise des objectifs et des moyens). Si cette technique est mal perçue et passe pour un moyen de contrôle du rendement, l'information recueillie sera biaisée. L'acceptation de l'UVA mais aussi l'investissement du personnel sont dès lors incontournables. En conclusion, soulignons que cet outil répond dans sa quasi-totalité aux limites des méthodes classiques et ABC : il propose de véritables solutions aux problèmes de

calcul des coûts grâce à son système d'information développé et facilite l'établissement de devis, et par la même la prise de décisions stratégiques.

4.3.5. Conclusion sur l'usage des modèles analytiques

Les modèles analytiques étudiés ici se différencient principalement par le type de décomposition adoptée. D'autre part, il apparaît qu'ils requièrent un niveau d'information trop important pour être utilisés au tout début du cycle de vie d'un produit (pré-design). Le niveau de détail étant élevé, et dès lors que leur utilisation est possible (fin de la phase de développement, début de la phase de production), leur performance est malgré tout exemplaire car basée sur le coût réel du produit.

Au niveau de l'aide à la décision, on peut noter les apports de l'ABC et de son dérivé l'ABM (*Activity Based Management*), qui n'est autre que l'utilisation par le management d'indicateurs construits sur la base d'ABC. La méthode des UVA permet quant à elle d'améliorer sensiblement le système d'information aussi bien au niveau des coûts qu'à celui du fonctionnement général de l'entreprise.

La pertinence de ces modèles en matière d'optimisation de conception est cependant discutable : sous la pression de nouveaux facteurs de compétitivité les structures de l'entreprise se modifient sans cesse, l'évolution du cycle de vie des produits et l'émergence des stratégies à long terme rendent donc ces systèmes issus de la comptabilité classique vite obsolètes.

4.4. Les modèles analogiques

4.4.1. Présentation

Un raisonnement analogique consiste à établir un rapport inhabituel entre deux domaines et à en montrer les ressemblances, de ce rapprochement naît une conception nouvelle. Ce type de raisonnement s'appuie sur des images, ou comparaisons. Plus précisément, on entend par analogie "correction des écarts par action modératrice".

Pour représenter ces principes généraux, l'exemple souvent repris en cybernétique est l'analyse de la régulation de la température d'un appartement [\[LANG76\]](#). La régulation peut être effectuée en corrigeant les écarts enregistrés entre une valeur de consigne et la valeur réelle de la variable considérée. On appelle régulateurs les appareils utilisés dans ce but (niveau 1). Elle peut aussi être réalisée par compensation des perturbations. Pour reprendre

l'exemple précédent, cela signifie que la correction des écarts de température est fonction des modifications de température à l'extérieur. On appelle compensateurs les appareils utilisés à cet effet (niveau 2). On peut enfin réguler en supprimant les perturbations. Dans le cas du maintien de la température, ceci équivaut à éliminer l'influence qu'auraient les changements de température externe sur la température interne (niveau 3).

Le premier niveau évoqué (contrôle par correction des écarts ou action modératrice) est très souvent utilisé en contrôle de gestion, il nécessite une bonne connaissance interne du système afin de boucler la chaîne causale (feed-back). Ce type de régulation est privilégié dans un environnement externe connu qui nécessite peu d'informations. Il est au centre de la méthode d'exception, un des piliers de la méthode des coûts standard (car au cœur de la budgétisation). Les deux autres niveaux étant plus adaptés à l'automatisme, nous ne les développerons pas.

L'analogie entre le contrôle de gestion et le thermostat s'appuie donc essentiellement sur la régulation par correction des écarts : c'est le niveau 1 de la typologie d'Oskar Lange. [\[EKOK03\]](#). Il faut cependant tenir compte des différences importantes entre le fonctionnement d'un thermostat et celui d'un expert en costing : la consigne du thermostat est décidée par le planificateur, lorsqu'il y a un écart son activité de correction est automatiquement enclenchée ; quant au contrôleur de gestion, c'est son jugement qui relie la planification de la consigne à la décision de l'action correctrice [\[ANTH93\]](#).

Les modèles analogiques d'estimation de coût consistent en une/plusieurs comparaisons avec une/plusieurs réalisations similaires terminées. Par comparaison, on entend "jugement sur les caractéristiques de deux réalisations" (ce qui implique une part de subjectivité qu'il s'agit de réduire au maximum), lequel doit être quantifié de façon à être traduit en terme de coût. Pour construire de tels modèles, on procède en cinq étapes.

Tout d'abord, on détermine un niveau d'analyse cohérent avec les bases de données techniques et économiques. Il faut ensuite identifier les points techniques sur lesquels portera l'analogie. Il s'agit de propriétés intrinsèques aux systèmes et bien sûr communes à chacun des éléments de comparaison. Puis on décide des projets sur lesquels portera la comparaison (particulièrement liées, les deux dernières étapes sont souvent simultanées). L'analogie est alors quantifiée entre les deux projets pour chaque fonction élémentaire étudiée. On peut par exemple s'appuyer sur la base d'une analyse critique reflétant le sentiment de l'estimateur quant à l'impact du coût sur la fonction. Pour ce faire, on utilise une échelle à plusieurs dimensions (impact faible/moyen/fort, etc.) ; le classement se faisant par dialogue entre

l'estimateur et le responsable technique, il apparaît illusoire de dilater cette échelle au-delà de cinq crans). Il reste enfin à calculer le coût recherché en faisant une régression sur les points de comparaison, cette approximation peut alors être assortie d'une notion de marges qualificatives, hautes et basses, de la précision du modèle.

Si la méthode comparative fournit avec rapidité des résultats intéressants, elle laisse cependant place à une certaine subjectivité et suppose de travailler, en raison de l'évolution rapide des techniques, avec des données récentes et constamment renouvelées. La complexité de cette évaluation réside donc d'une part dans la qualité des bases de comparaison, et d'autre part dans la corrélation des informations utilisées.

Pour tenir compte des écarts entre les différents projets servant de base de comparaison, il faut enfin signaler l'utilisation potentielle de coefficients d'analogie. Ceux-ci sont fonction de critères de taille, de technologie ou d'environnement, et peuvent varier positivement ou négativement, de façon additive comme multiplicative, afin de ramener la base de comparaison au plus proche du projet étudié.

4.4.2. Conclusions et limites des modèles analogiques

Ces modèles analogiques présentent comme intérêt d'être d'un coût intellectuel très faible et d'explorer très rapidement un phénomène. Néanmoins, le "critère d'évidence" constitue un risque majeur : plus l'analogie s'imposera "d'évidence", plus les risques d'identifier l'objet à son modèle seront grands. La pertinence des comparaisons réside donc essentiellement dans le degré de précision que l'on s'accorde.

Le modèle analogique a souvent une fonction explicative ("ça marche comme") mais peut aussi avoir une fonction prédictive ("ça marche comme ... alors si je fais ceci, je devrais obtenir cela"). Le test de la fonction prédictive va permettre d'explorer les limites de validité du modèle, voire de lui substituer progressivement un modèle paramétrique original plus performant.

Retenons donc, en quelques mots, les avantages des prédictions de coût par comparaison : elles sont

- basées sur des données d'expérience (c'est-à-dire venant de projets déjà créés par l'entreprise)
- rapides d'utilisation et à mettre en place
- facilement interprétables
- précises pour un système très peu différent.

Quant à leurs faiblesses, elles

- dépendent d'un seul échantillon de données
- requièrent une "normalisation" (au travers des coefficients d'analogie) pour assurer une bonne précision
- dépendent d'extrapolations et/ou de jugements d'expert pour les facteurs d'ajustement
- présentent des difficultés pour trouver un système analogue approprié.

La méthode analogique n'est finalement, en quelque sorte, qu'un cas particulier de modèle paramétrique avec moins de points de comparaison. Pour des technologies nouvelles ou des équipements particulièrement dissemblables, l'outil comparatif s'avère donc peu pertinent.

4.5. Bilan sur les méthodes d'évaluation de coûts

Chacune des méthodes présentées dans ce chapitre s'adapte donc à un usage, principalement en fonction de la phase du cycle de vie pendant laquelle la modélisation de coût est réalisée. Les nombreux travaux sur le bon usage des outils de prévision des coûts peuvent se résumer par ces tableaux [\[LONG00\]](#) :

	Paramétrique	Analogique	Analytique
Conception	▲	▲	
Développement	▲	▲	▲
Production	▲		▲
Exploitation	▲		▲
Après-vente	▲	▲	▲

Etapas	Etude préliminaire	Spécification détaillée	Réalisation Exploitation
Définition du projet	Par fonction	Par produit	Par tâche
Approche des coûts	Méthode analogique	Méthode paramétrique	Méthode analytique
Actions	Décision de faire ou non le projet	Estimation des coûts	Optimisation des coûts

[\[JOSE03\]](#) :

	Formulation Phase		Implementation Phase	
	Pre-Phase A & Phase A	Phase B	Phase C	Phase D
Parametric				
Engineering Buildup				
Analogy				
Primary Secondary Applicable Occasionally Used Not Applicable				

[\[NASA02\]](#) :

Aussi, après avoir étudié en détail les outils et méthodes de création de modèles de coûts, nous chercherons à adapter ces travaux à la problématique des coûts de maintenance.



5. Création de modèles de coûts de maintenance

5.1. Principes généraux

Ce chapitre présente la mise en œuvre de méthodes d'analyse permettant de développer et d'améliorer la modélisation des coûts de cycle de vie, et en particulier ceux de maintenance. Nous exposerons tout d'abord les analyses permettant d'établir ces modèles, puis nous évoquerons leur structure générale, avant de terminer sur quelques exemples représentatifs des travaux réalisés sur ce sujet.

5.1.1. Mise en œuvre de modèles de coût de maintenance

5.1.1.1. Recherche de zones de coût critiques

Cette partie de notre étude permet non seulement d'isoler les secteurs à fort potentiel d'amélioration (inducteurs de coûts majeurs du système), mais aussi de limiter l'ouvrage de modélisation aux éléments critiques. Pour représenter l'ensemble des coûts d'exploitation d'un système, nous élaborons ensuite nos modèles autour de ces zones.

De façon ponctuelle, une étude du coût par élément en fonction de la fiabilité permet de dégager les quelques pièces susceptibles d'être inductrices de coûts (éléments à faible fiabilité et fort coût), pour cela des méthodes de représentation par nuage de points peuvent être utilisées.

5.1.1.2. Recherche de paramètres influents

On considère comme paramètre influent un paramètre qualitatif ou quantitatif exerçant une influence sur le coût de maintenance d'un élément ou d'un système technologique.

La recherche de paramètres d'influence se restreint aux zones de coût critiques et s'appuie particulièrement sur l'étude du retour d'expérience, sur des analyses techniques comparatives et sur des avis d'experts.

5.1.1.3. Quantification de l'influence des paramètres

Dans la mise en œuvre d'un modèle, la difficulté majeure est d'évaluer l'influence des paramètres sur la donnée de sortie (en l'occurrence le coût de maintenance).

L'influence de chacun des paramètres peut soit être évaluée séparément (bien souvent par expertise), soit être pris en compte directement dans la construction du modèle de coût.

5.1.1.4. Construction du modèle

Cette dernière étape consiste à choisir un formalisme de modèle, parmi les différentes solutions envisageables, pour représenter un coût de maintenance.

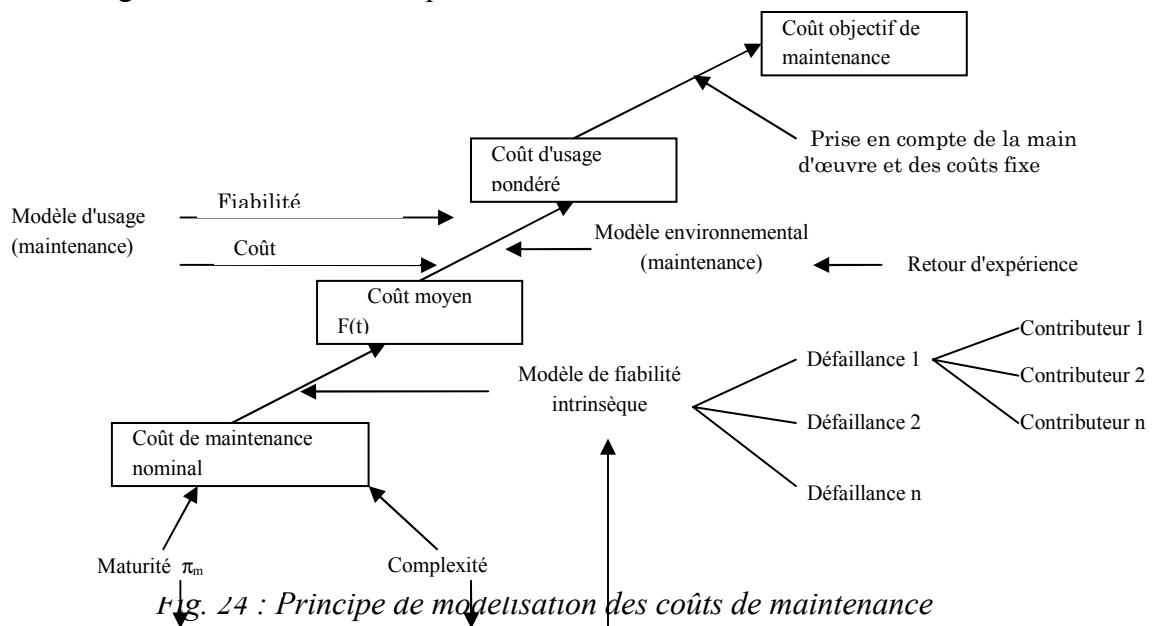
Nous verrons par la suite que ce choix est en fait imposé par les données dont nous disposons (en quantité et qualité), par la précision attendue ou encore par la phase du cycle de vie au cours de laquelle sont évalués les coûts. [\[ARBA98\]](#)

5.1.2. Structure de modélisation des coûts de maintenance

5.1.2.1. Architecture globale des modèles

Les coûts directs de maintenance sont représentatifs de l'ensemble des dépenses engagées pour réparer ou échanger un matériel dans l'objectif d'assurer la continuité de son état opérationnel.

En général, nous les décomposons sous la forme d'un coût de base, pondéré par des paramètres de compensation modélisant les inducteurs de coûts. On peut donc résumer l'architecture globale de nos modèles par le schéma suivant :



Cependant, suivant le type de modèle et la complexité du produit, tous ces paramètres ne sont pas forcément décrits explicitement. Certains d'entre eux peuvent être considérés comme négligeables ou être traduits au travers de facteurs technologiques.

5.1.2.2. *Modèle de coût nominal de maintenance*

Le modèle de coût nominal a pour objectif de fixer une évaluation pertinente basée sur un paramètre caractéristique simple, directement lié aux coûts de maintenance.

Nous développerons notre modèle à partir de la tendance simple selon laquelle plus un système est complexe, plus il a tendance à se détériorer et à tomber en panne, et plus il est financièrement lourd à entretenir. Bien entendu, ce constat n'est pas toujours valide : il arrive que "plus complexe" puisse également signifier que le système est plus facilement maintenable, ou plus fiable ; cependant, en général, ce principe se vérifie.

Notre modèle de coût nominal s'appuie donc sur une caractéristique révélatrice de la complexité générale de notre système : il peut par exemple s'agir de la puissance dans le cas d'un moteur, ou encore de la surface dans le cas d'une pale.

5.1.2.3. *Modèle de maturité*

Le modèle de maturité a pour but d'établir un coefficient correcteur prenant en compte les avancées technologiques réalisées. Cette notion de maturité se traduit alors par une double influence sur les coûts de maintenance des systèmes.

D'une part, la maturité des technologies employées peut être un vecteur de diminution des coûts. En effet, la notion de maintenabilité prenant un essor particulièrement important dans les projets de conception, on note que les systèmes les plus matures coûtent moins cher en exploitation parce qu'ils sont mieux conçus. Une technologie aboutie présente de plus des niveaux de fiabilité bien meilleurs et mieux connus, ce qui influe en réduisant les coûts globaux de maintenance. Enfin, l'apprentissage du produit par son utilisateur est un révélateur majeur de maturité : la connaissance de la technologie par le client est en relation directe avec sa capacité à maintenir. Il faut noter que dans ce domaine intervient également la notion de "parc" ou de "flotte" : plus un utilisateur possède de machines, mieux il sera équipé et formé pour l'entretien.

D'autre part, il apparaît que bien souvent, l'évolution des technologies passe par une complexité croissante (et donc par des coûts croissants) avec l'apparition de systèmes plus sécuritaires ou offrant plus de fonctionnalité. Pour finir, notons que si l'évocation du problème sous forme de courbe continue permet d'évoquer de façon mathématique l'influence de la maturité, ce modèle peut être faux : en effet, on observe parfois des sauts de technologie qui rendent cette courbe discontinue.

5.1.2.4. *Résistance aux contraintes de service*

Les contraintes de services comprennent toutes les sollicitations extérieures pouvant influencer sur la fiabilité d'un composant : il peut s'agir par exemple de phénomènes météorologiques, de stress électromagnétiques ou d'influences chimiques.

Certes il nous est impossible de remettre en cause le dimensionnement des technologies, mais l'expérience nous prouve que la fiabilité et le coût de maintenance sont parfois directement impactés par des problèmes de sous-dimensionnement. Au cours des générations, des technologies ont ainsi vu croître les contraintes qui leur sont appliquées, sans que celles-ci soient pour autant modifiées (pour des raisons de coût de développement).

5.1.2.5. *Typologie d'usage en maintenance*

Selon son usage, un même système peut être maintenu en état de fonctionnement de différentes façons. Voyons donc l'influence des exigences et des moyens mis en œuvre sur les coûts de maintenance.

Le mode de maintenance peut être caractéristique d'exigences de disponibilité du système : si on observe les systèmes aéronautiques (avions, hélicoptères, etc.), on constate des politiques de soutien très distinctes suivant s'il est militaire, parapublic ou civil. L'appareil militaire doit être disponible en permanence sur un moyen terme, le parapublic est soumis à des exigences de service de jour, alors que le civil doit quant à lui être disponible en période d'usage commercial. De plus, les exigences de sécurité de chacun sont diverses : si le militaire peut se permettre un niveau dégradé en temps opérationnel, l'appareil de secours en montagne compte sur une fiabilité totale. Par conséquent, ces différences influent sur les périodicités de changement des éléments technologiques et, selon le cas, on privilégiera une solution préventive ou corrective de maintenance.

Si les systèmes sont parfois soumis à des exigences fortes en terme de maintenance, il arrive aussi que les moyens de soutien varient. En effet, les utilisateurs les plus exigeants sur le plan financier cherchent à effectuer une maintenance bon marché en se basant sur les seuils sécuritaires et en privilégiant des opérations palliatives. La limitation des moyens d'un centre de maintenance peut également concerner les équipements. Posséder des outils spécifiques n'étant pas un impératif, on voit apparaître des modes dégradés de maintenance dus à l'utilisation de moyens non appropriés, cet usage exceptionnel induisant une augmentation des coûts.

5.1.3. Prise en compte de la fiabilité

Comme nous l'avons vu, différents indicateurs sont représentatif des coûts de maintenance : il s'agit en général soit d'un coût de réparation soit d'un DMC. En effet le DMC est directement lié au coût de réparation puisqu'il est le quotient du coût de réparation par la fiabilité du système.

Disposer d'un modèle capable de prendre directement en compte les aspects coût de maintenance et fiabilité du produit est un avantage, cette évidence implique néanmoins une relation directe entre la complexité technique et la fiabilité. Les modèles à construire sont ainsi nettement plus complexes avec la prise en compte de paramètres supplémentaires descriptifs des inducteurs de panne.

Les modèles développés dans ce chapitre chercheront donc à décrire un indicateur de coûts de maintenance en fonction du besoin, que ce soit un DMC ou un coût de réparation.

5.2. Modèle DMC d'éléments mécaniques d'hélicoptère

5.2.1. Introduction et analyse technique

La boîte de transmission principale de l'hélicoptère est le système mécanique permettant de transférer la puissance des turbopropulseurs aux éléments mécaniques tournants que sont le rotor principal, le rotor anti-couple, les alternateurs et les autres accessoires entraînés mécaniquement.

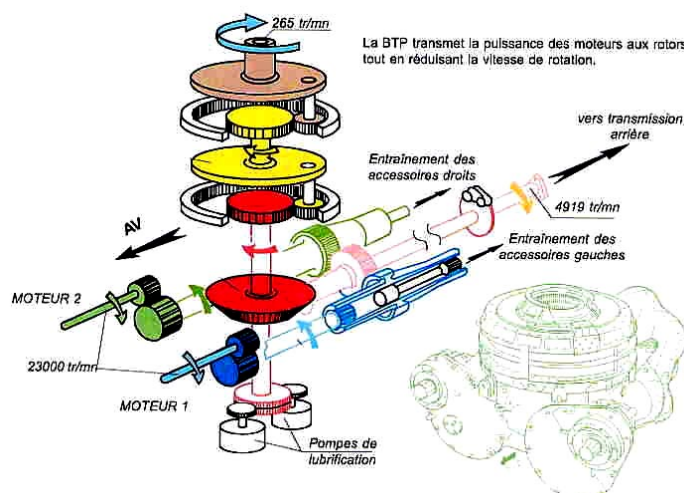


Fig. 25 : Boîte de transmission d'un hélicoptère

Cet élément extrêmement complexe implique une maintenance importante, qu'elle soit préventive ou corrective. Aussi, en tant que *cost driver* d'exploitation des hélicoptères, il nous faut décrire ses coûts de maintenance.

Une démarche d'analyse fonctionnelle a pour principal objectif de comparer le coût d'une fonctionnalité à la valeur de l'usage qu'on en a. L'analyse fonctionnelle de la boîte de transmission principale (BTP) nous permet donc d'élaborer un modèle évolutif de coût de maintenance, basé sur la fonctionnalité et non sur la technologie.

L'étude de la BTP met en évidence la plupart de ses fonctions techniques, cette décomposition s'appuie cependant sur l'étude de technologies existantes et non sur l'étude d'un besoin.

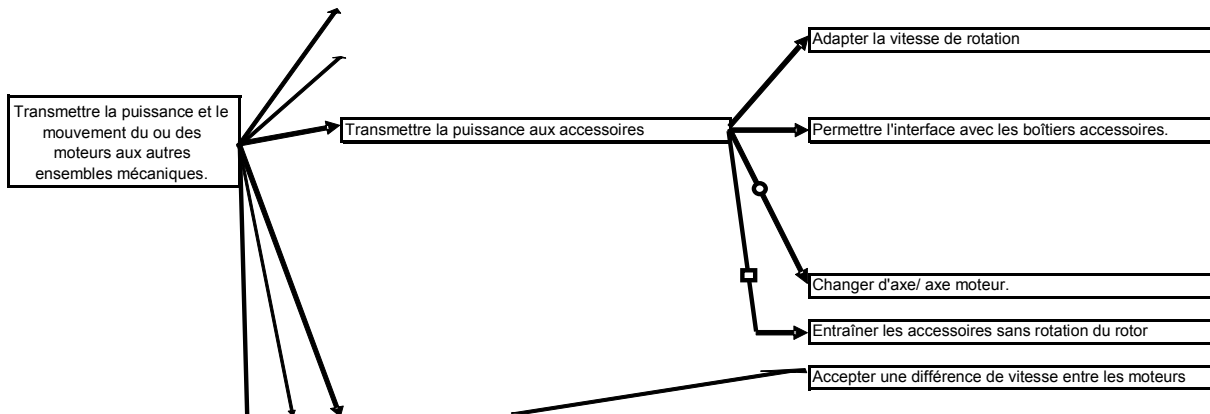


Fig. 26 : Analyse fonctionnelle d'une BTP

Nous avons ainsi décomposé le coût direct de maintenance par fonctions techniques avant de le décomposer suivant une étude fonctionnelle complète. [\[AECM01\]](#) [\[ATA99\]](#)

Ces informations permettent d'établir des moyens de comparaison entre les différentes technologies et de mieux connaître les inducteurs de coût de maintenance de ce système.

5.2.2. Modélisation des coûts de maintenance

5.2.2.1. Recherche de zones de coûts critiques

De façon microscopique, le retour d'expérience montre l'importance de certains éléments dans le coût de maintenance. En effet, on observe que le coût des pièces de la BTP suit une loi de Pareto : 80% des coûts sont induits par 16% des pièces. On constate de plus que certaines catégories de matériel, tels que les roulements, représentent une part importante du coût de maintenance.

On peut ainsi établir le graphique suivant :

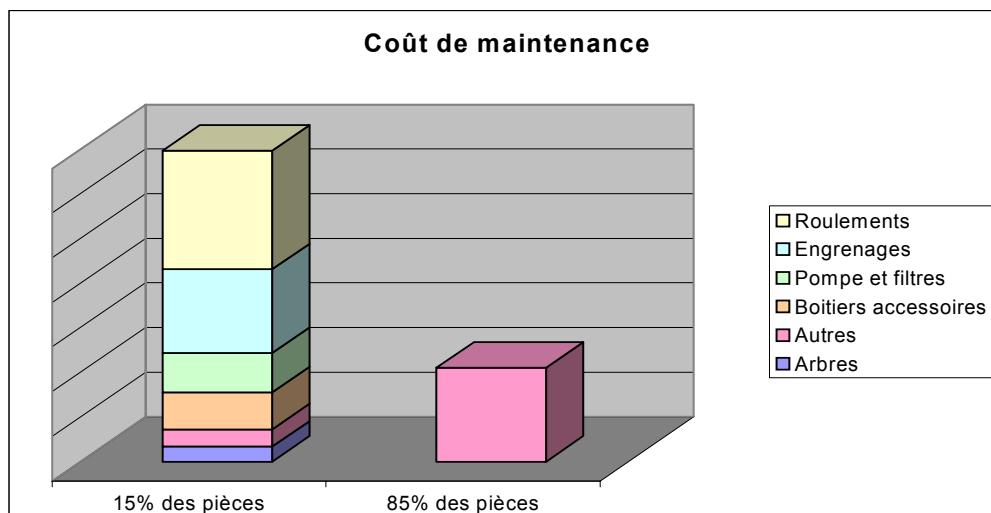


Fig. 27 : Répartition des coûts de maintenance par type de pièce

Il apparaît ainsi clairement que la plus grande part des coûts de maintenance concerne les roulements et engrenages, c'est à dire les fonctions de transfert de puissance et réduction. Une analyse des défaillances confirme ce constat en faisant ressortir comme modes de panne principaux l'usure ou la destruction d'éléments mécaniques (présence de particules métalliques).

En conséquence, le 1^{er} paramètre représentatif du coût de maintenance pour la BTP devant être directement lié à la fiabilité de ces éléments mécaniques, nous avons retenu la puissance moyenne en service pour construire notre modèle.

5.2.2.2. Recherche de paramètres influents

La recherche de paramètres d'influence se restreint aux zones de coût critiques et s'appuie particulièrement sur l'analyse technique des BTP. Ces drivers de coût peuvent être quantitatifs (nombre de pièces) ou qualitatifs (année de conception, présence ou non d'un module). Pour proposer des paramètres d'influence sur les coûts de maintenance des BTP, nous avons procédé par analyse comparative directe.

Associées aux avis d'experts, les données de retour d'expérience nous ont permis tout d'abord de restreindre notre champ d'étude, de connaître ensuite les éléments inducteurs de coût, et de pouvoir enfin leur associer des paramètres d'influence. L'analyse comparative directe a consisté à étudier les différences majeures entre plusieurs types d'appareil et à y associer intuitivement des drivers de coûts.

C'est à partir de ces éléments que nous avons élaboré le tableau de paramètres d'influence envisageables pour décrire les coûts de maintenance de la BTP. Nous leur avons associé une importance présumée (3 : très important, 2 : important, 1 : peu probable) et les avons classés par types (paramètre de maturité, de complexité, de contrainte de service, ou d'usage).

Type de paramètre	Paramètre	Importance présumée
Paramètres révélateurs de la complexité	Nombre de roulements	2
	Nombre de pièces constituant la BTP	2
	Nombre de pompes de lubrification	1
	Nombre de turbines	3
	Nombre d'axes	2
	Nombre de contacts de denture	?
	Nombre de pignons	2
Maturité technologique des éléments	Année de conception	?
	Nombre d'appareils construits	2
	Nombre de versions de l'appareil	1
Paramètres de contrainte de service	Puissance à l'entrée de boîte	3
	Puissance turbines au décollage	2
	Puissance continue	2
	T° nominale fonctionnement	?
	rapport de réduction au MRP	2
	Masse maxi au décollage	?
	Vitesse d'entrée	1
Paramètres d'usage	Militaire ou civil	?
	Taille de la flotte	?
	Conditions d'usages sévères	2
	Nombre de cycles on - off	?

Fig. 28 : Paramètres de modélisation des coûts de maintenance d'une BTP

5.2.2.3. Forme du modèle

En cours de développement, l'idée était de se baser sur le modèle générique de Cox pour créer notre modèle de DMC [COX72].

Le modèle de Cox est particulièrement utilisé en fiabilité pour tenir compte de paramètres environnementaux. Il se présente sous la forme générale suivante :

$$F(x, z) = f(x).e^{b_1.z_1+b_2.z_2+b_x.z_x+b_{12}z_{12}+...}$$

Nous cherchions donc à construire un modèle de la forme suivante :

$$DMC(X, z) = dmc(X).e^{b_1.z_1+b_2.z_2+b_3.z_3+b_{12}z_{12}+b_{13}z_{13}+b_{23}z_{23}+b_{123}z_{123}}$$

Ce qui signifiait que le DMC final serait fonction directe d'un DMC nominal, et serait pondéré par des paramètres Z_1 , Z_2 , Z_3 représentatifs des paramètres de maturité, de complexité et de dimensionnement énoncés précédemment.

Cette évaluation des paramètres z et des constantes b (représentatives de la distorsion du modèle général) nécessitait cependant une analyse statistique basée sur des données importantes et nous ne disposons pas d'informations suffisantes. La modélisation souhaitée a donc été adaptée en utilisant un recalage empirique du coût de maintenance nominal.

5.2.2.4. Recalage empirique du modèle principal

Comme dit précédemment, nous évaluons le coût direct de maintenance DMC en fonction de la puissance de l'appareil. Nous y attribuons d'autre part des intervalles de confiance (loi de Student).

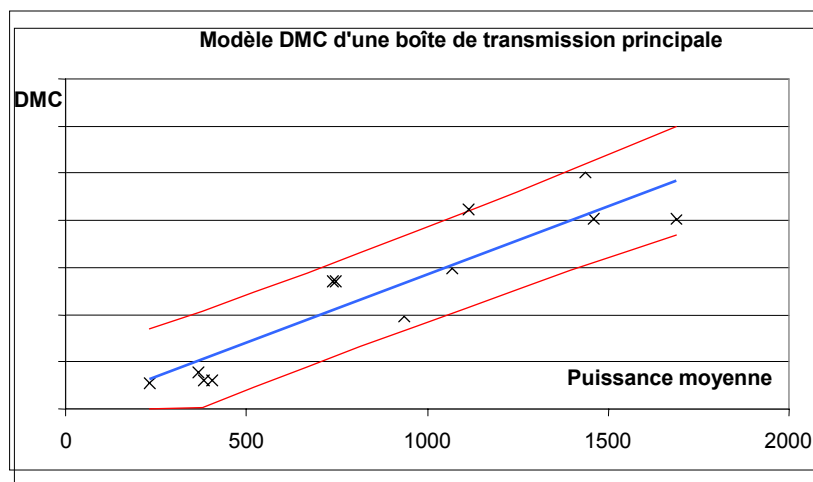


Fig. 29 : Modèle simple de DMC d'une BTP

L'objectif de notre travail consiste alors à effectuer le recentrage de nos données de manière empirique. Certes la précision est faible, mais nous améliorons notre modèle à paramètre unique en évaluant la déformation que peuvent engendrer les autres paramètres : nous pondérons ainsi la sortie en fonction de facteurs d'influence supplémentaires.

L'ensemble des points est alors analysé en fonction de caractéristiques techniques (la difficulté étant de quantifier l'influence de chaque paramètre sur la déformation du modèle). On utilise pour ce faire des paramètres révélateurs de la maturité des technologies employées, de la complexité spécifique du système et de l'adaptation aux contraintes environnementales.

a) Paramètre de complexité dû à la génération technologique

Pour estimer la maturité technologique du système, un paramètre tenant compte de l'année de conception du système nous semble être le mieux approprié. Comme l'évolution technologique ne s'est pas faite linéairement au cours du temps (la conception évoluant par sauts), nous établissons une analyse des générations des boîtes de transmission existantes afin

de disposer d'une classification pertinente. Selon toute vraisemblance, il apparaît que le coût de maintenance des éléments mécaniques augmente singulièrement au cours des générations. Cette observation peut se justifier par l'augmentation générale du prix des rechanges, les pièces étant de plus en plus précises et la qualité générale tendant à augmenter.

b) Paramètre de complexité

L'analyse des solutions technologiques employées permet d'associer au coût de maintenance directe un paramètre représentatif de la complexité "anormale" d'un élément. En effet, une contrainte environnementale peut particulièrement impacter la conception d'un système et engendrer une complexité supplémentaire. L'utilisation d'un moteur disposant d'une interface de sortie arrière va par exemple réduire le coût de fabrication et donc celui de maintenance de la boîte.

c) Paramètre de résistance aux contraintes environnementales

Un paramètre représentant le dimensionnement général des éléments mécaniques doit venir pondérer ce modèle. Il intervient en particulier dans le cas de la n^{ième} version d'un même appareil pour lequel un équipement inchangé est soumis à des contraintes de plus en plus fortes.

Le recentrage des données d'entrée est une étape essentielle de la modélisation. On considère alors que les valeurs de coût que l'on a correspondent à des cas particuliers et non à une valeur de coût normal. La forme du modèle est la suivante :

$$DMC = C_n \times \pi_m \times \pi_s \times \pi_u$$

- C_n est le coût de maintenance nominal
- π_m représente le paramètre de maturité (variation de 1 à 4)
- π_s représente la complexité (variation de 0 à 3)
- π_u est le paramètre de résistance aux contraintes environnementales (de 0 à 3)

C'est ensuite associé à des experts, avec des processus itératifs formalisés, qu'a été évalué l'impact de chacun des paramètres. Ceci aboutit au modèle final :

$$DMC = C_n (-1/12 * (\pi_m * 0,8 \pi_s * 2 \pi_u) + 1/4)$$

On voit alors que l'intervalle de confiance se resserre autour de la valeur moyenne.

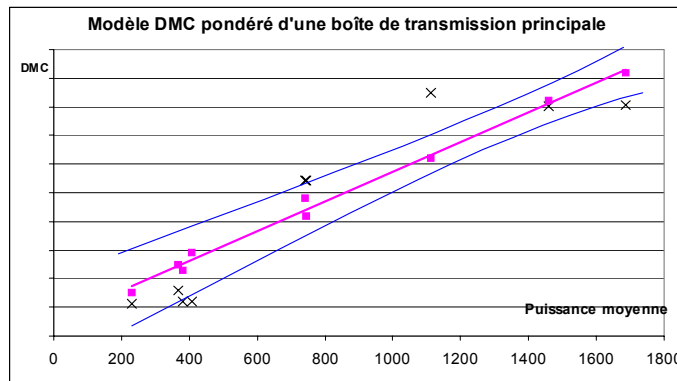


Fig. 30 : Modèle de DMC pondéré

Pour un nouveau projet, il faut d'abord établir le DMC en fonction de la puissance puis prendre en compte l'impact des paramètres correcteurs de complexité, de maturité et d'environnement pour replacer l'estimation de coût dans son contexte.

5.2.3. Conclusions et limites du modèle

La structure de ce modèle, particulièrement efficace, est également utilisée pour l'évaluation des coûts de maintenance des moteurs d'hélicoptère. Les résultats obtenus ont ainsi servi dans l'évaluation de DMC pour plusieurs avant-projets.

Cependant, un paramètre non introduit mais nécessaire reste l'actualisation des données commerciales. Etant donné la complexité des éléments modélisés, leur maintenance implique des relations clients-fournisseurs multiples ; la prise en compte de celles-ci serait donc un complément intéressant.

Enfin, la complexité d'analyse des paramètres requiert une certaine expertise technique qui ne sera malheureusement pas toujours disponible, ce qui implique l'utilisation de modèles plus indépendants des experts.

5.3. Coûts de maintenance d'une servocommande d'hélicoptère

5.3.1. Introduction

5.3.1.1. Servocommande : définition

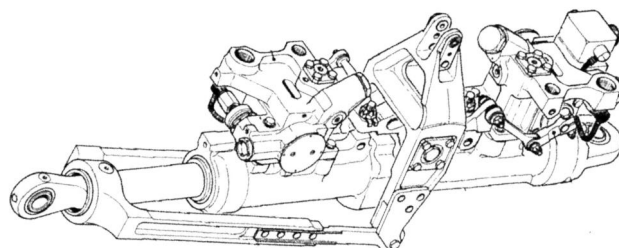


Fig. 31 : Servocommande d'hélicoptère

Les servocommandes sont des vérins hydrauliques placés en extrémité des chaînes de commande. Elles permettent de réduire l'effort que doit fournir le pilote pour faire varier l'incidence des pales du rotor. Ces éléments de haute technologie restent un des pôles majeurs des coûts de maintenance des hélicoptères.

5.3.1.2. Introduction à la modélisation

Comme vu précédemment, dans les modèles de coûts sont classiquement retenus les paramètres suivants :

- complexité,
- maturité (ou d'obsolescence) de la technologie,
- dimensionnement aux contraintes de service,
- influences commerciales.

Rappelons en outre la tendance simple selon laquelle plus un système est important et complexe, plus il a tendance à se détériorer et à tomber en panne, et plus il est financièrement lourd à entretenir. Ce constat est néanmoins loin d'être un postulat intangible : des phénomènes commerciaux, des impacts techniques insoupçonnés ou des contraintes non prises en compte peuvent influencer tout autrement notre modèle.

En effet, la limite principale des modèles paramétriques présentés reste l'évaluation de l'influence des paramètres sur la donnée de sortie (en l'occurrence, les coûts de maintenance). S'il nous a semblé simple d'évaluer un seul paramètre, les méthodes d'analyse multicritères se sont révélées plus ardues à appliquer. De plus, pour les servocommandes, nous ne disposons pas de données suffisantes en nombre, et une modélisation empirique de l'influence de facteurs technologiques sur les coûts de maintenance se révèle impossible par manque d'expertise sur ces technologies.

C'est pourquoi, nous mettons en œuvre un modèle de coûts de maintenance basé sur une modélisation par réseaux neuronaux.

5.3.2. Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont des modèles "boîtes noires". Ils sont issus des études neurobiologiques dont le but est de comprendre le fonctionnement du cerveau (qui en contiendrait plusieurs dizaines de milliards). Ils se composent [\[RUMES6\]](#) :

- d'un ensemble d'unités de traitement appelées cellules ou neurones,
- d'une fonction d'activation par neurone,

- d'une structure de connexions entre les neurones, où les connexions sont pondérées par des valeurs appelées poids synaptiques,
- d'un environnement extérieur au réseau de neurones dans lequel évolue le système

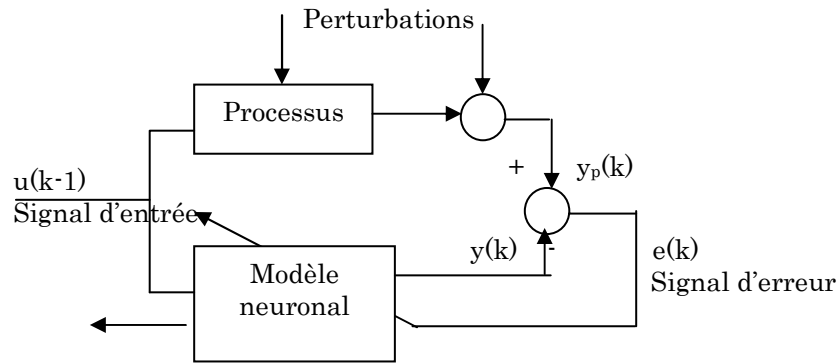


Fig. 32 : Principe du modèle "boite noire"

Haykin [HAYK94] définit quant à lui le réseau de neurones comme un processus massivement distribué en parallèle et ayant une propension naturelle à stocker de la connaissance empirique et à la rendre disponible à l'usage. Il ressemble au cerveau sur deux aspects :

- la connaissance est acquise par le réseau au travers d'un processus d'apprentissage
- les connexions entre les neurones, connues sous le nom de poids synaptiques, servent à stocker la connaissance.

En 1943, le neuropsychiatre McCulloch et le logicien Pitts modélisent le neurone formel :

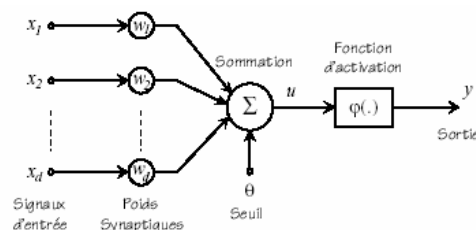


Fig. 33 : Schéma d'un neurone formel

Le neurone formel effectue une somme pondérée des signaux qui lui parviennent, la valeur de celle-ci est ensuite comparée à un seuil, donnant ainsi la sortie sous la forme d'une fonction non linéaire du résultat :

$$u = \sum_{j=1}^d w_j x_j - \theta \quad \text{et} \quad y = \varphi(u) \quad [1]$$

On note $X=[-1 \ x_1 \ \dots \ x_d]^T$ le vecteur d'entrées et $W=[\theta \ w_1 \ \dots \ w_d]^T$ le vecteur des poids synaptiques, on obtient donc :

$$y = \varphi(W^T X) \quad [2]$$

La fonction seuil est une fonction non linéaire appelée "fonction de Heaviside" ou fonction signe définie par :

$$H(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{sgn}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u > 0 \\ -1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Chaque neurone comporte un nombre d'entrées (dépendant de la structure du réseau) et une sortie. Dans la littérature [\[LAI98\]](#), on trouve :

- les réseaux à connexions complètes où chaque neurone est connecté à tous les autres et à lui-même : réseaux récurrents
- les réseaux à connexions aléatoires où chaque neurone a une probabilité donnée d'être connecté à un autre neurone
- les réseaux à connexions en couches où les neurones sont organisés en couches : lorsqu'une couche est connectée à une autre, cela signifie que tous les neurones de la première couche sont connectés aux neurones de la seconde
- les réseaux organisés en couches unidirectionnelles dans lesquels l'information se propage d'un neurone d'entrée vers un neurone de sortie sans revenir vers un neurone déjà traversé : le perceptron multicouches

La sortie est donnée par une fonction d'activation pouvant prendre plusieurs formes : les fonctions binaires ou fonctions de Heaviside (fonctions signes utilisées dans le perceptron initial), les fonctions linéaires, les fonctions sigmoïdes et enfin les fonctions stochastiques [\[DREY98\]](#).

Enfin, le réseau ne peut fonctionner sans une règle d'apprentissage. Il en existe plusieurs types mais la plus connue (celle qu'on utilise ici) est du type rétro-propagation de l'erreur. Cette méthode consiste à adapter les poids des neurones de manière à minimiser une erreur, celle-ci étant définie comme la somme des carrés des écarts entre la sortie désirée et la sortie calculée par le réseau, et ce pour tous les objets d'apprentissage et pour toutes les sorties du réseau :

$$E = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^C (\phi_i(X_k) - t_i^{(k)})^2 \quad [3] \text{ où :}$$

$X \in C_1$ représente la sortie du neurone lorsque le vecteur de caractéristique X_k est présenté à l'entrée,

$t_i^{(k)}$ est la valeur de sortie désirée pour le neurone i associé à ce même vecteur de caractéristiques.

Lors de la détermination du modèle, les différents points explicités ci-dessus sont les caractéristiques à déterminer. Dans le paragraphe suivant, nous expliquerons cette méthode ainsi que certains théorèmes s'appliquant au problème traité.

5.3.3. La modélisation par réseau de neurones

La réalisation du modèle est définie selon quatre étapes déterminantes pour sa validité, celles-ci sont présentées dans les approches d'identification des systèmes linéaires que l'on trouve dans [\[LJUN87\]](#).

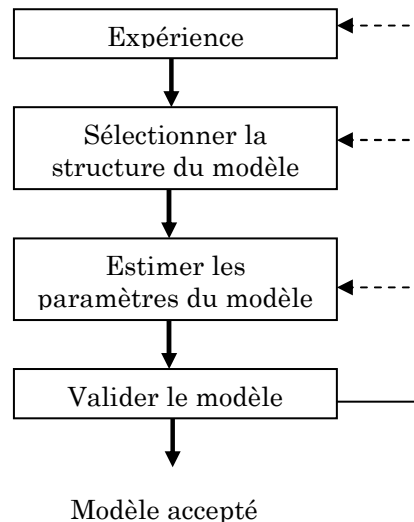


Fig. 34 : La démarche d'identification

Le synopsis décrit ci-dessus montre une première étape (l'expérience) qui consiste à rassembler les connaissances dont on dispose sur le comportement dynamique des coûts de maintenance, et en particulier à collecter un jeu de données représentatif de l'évolution des coûts de maintenance.

Pour décrire les coûts de maintenance des servocommandes d'hélicoptère, nous retenons les paramètres suivants : masse de la servocommande, type de technologie (servocommande principale ou de queue), nombre et type de distributeurs hydrauliques (rotatifs ou linéaires), et nombre de corps de vérin de la servocommande. Ces paramètres sont considérés par les experts du domaine comme étant représentatifs des coûts ou de la fiabilité de ces équipements. Notons que sont pris en compte ici des paramètres quantitatifs mais aussi qualitatifs : par exemple, pour le type de technologie représentés par 1 pour une servocommande principale et par 2 pour une servocommande de rotor de queue.

La troisième étape consiste à définir les valeurs numériques des coefficients et paramètres du modèle, ceux-ci sont déterminés grâce au type et aux données du problème posé. Nous évaluons ainsi le type de réseau utilisé, le nombre de couches, le nombre de neurones dans chaque couche, ou encore les valeurs des poids synaptiques.

Nous avons grâce à Cybenko une partie des paramètres définie : toute fonction continue peut être approximée par un réseau de neurones à trois couches utilisant une fonction d'activation sigmoïde pour les neurones de la couche cachée et une fonction d'activation linéaire pour les neurones de la couche de sortie [CYBE99]. Nous retenons donc un perceptron à trois couches avec les fonctions d'activation indiquées ci-dessous :

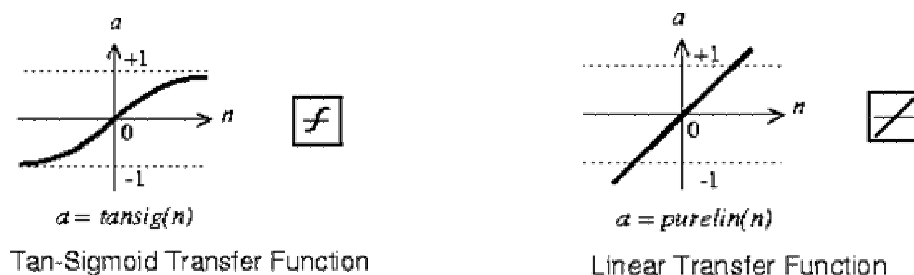


Fig. 35 : Fonction sigmoïde et fonction linéaire

Nous connaissons de plus le nombre d'entrées du réseau puisque nous avons déterminé, dans la première étape, les paramètres importants pouvant représenter le DMC (au nombre de cinq). Nous avons ainsi une seule sortie au modèle, celui-ci est de la forme du perceptron représenté ci-après.

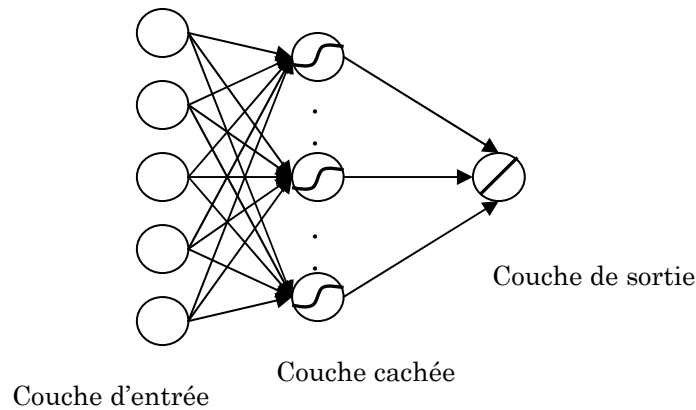


Fig. 36 : Perceptron utilisé pour le modèle de calcul d'un DMC

Il nous reste à déterminer le nombre de neurones dans la couche cachée : pour ce faire, nous établissons la meilleure configuration possible grâce aux données expérimentales. Celle-ci est établie en cherchant à minimiser l'erreur commise par le réseau, à savoir la différence entre la valeur obtenue par le modèle et la valeur désirée (celle que l'on connaît).

Suite à l'estimation des paramètres, nous validons le modèle puisqu'il n'est valable que pour les données traitées. Il faut donc vérifier sa compatibilité avec d'autres formes d'entrées : les données de test.

Il est possible d'utiliser le critère le plus simple et le plus répandu dans le domaine de la validation des modèles qui est la somme des carrés des erreurs, appelé également critère résiduel.

$$[4] \quad V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\varepsilon(k, \theta))^2$$

Ce critère ne retient que les résultats bruts de la modélisation, sans tenir compte d'autres considérations tel que le nombre de paramètres du modèle. Pour cette raison, nous choisissons d'utiliser le critère d'erreur de prédiction finale (FPE) développé dans [\[LJUN87\]](#) :

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{N+p}{N-p} \sum_{k=1}^N (\varepsilon(k, \theta))^2 \quad [5]$$

p représente le nombre de paramètres du modèle et N le nombre de données du jeu d'apprentissage.

5.3.4. Résultats et analyse

Le jeu d'apprentissage se base sur les caractéristiques techniques de 40 servocommandes, ces données étant représentatives de l'ensemble de la gamme technique des actionneurs de pas. Sur le même principe, une base de test de 12 exemples est utilisée pour valider le réseau.

Le réseau retenu est donc un réseau composé de cinq entrées, d'une couche cachée dont le nombre de neurones reste à déterminer, et d'un neurone dans la couche de sortie. Suivant Cybenko [CYB99], nous retenons une fonction d'activation tangente sigmoïde pour les neurones de la couche cachée et une fonction d'activation linéaire pour le neurone de sortie.

L'apprentissage est réalisé d'après la méthode de Levenberg-Marquadt [LEVE44] [MARQ63] et de [BLOC96].

En fonction du critère de validation développé à l'équation 5, nous établissons expérimentalement le nombre optimal de neurones pour la modélisation de notre problème.

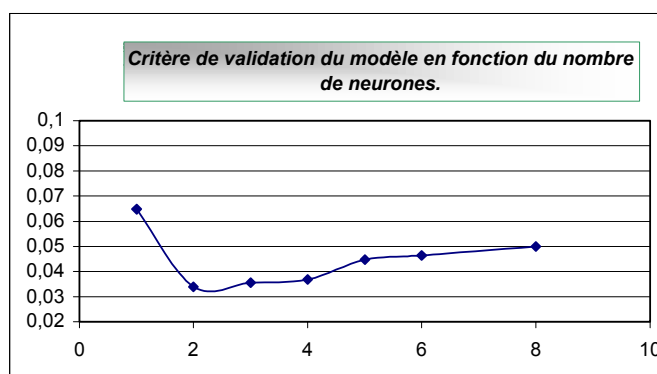


Fig. 37 : Critère de validation du modèle en fonction du nombre de neurones

De ce fait, nous réalisons des graphes qui montrent la dispersion entre valeur réelle et valeur modélisée, et nous permettent de visualiser l'erreur relative de notre modèle.

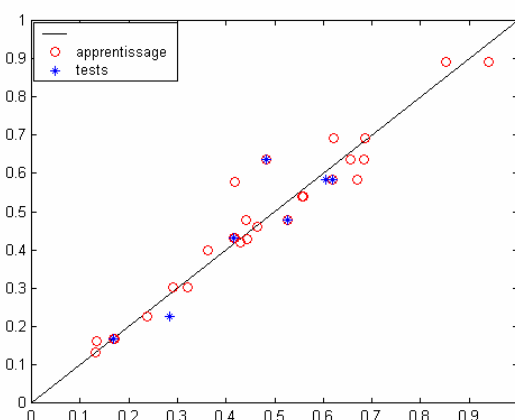


Fig. 38 : Dispersion entre le modèle et les valeurs réelles, modèle à 8 neurones cachés

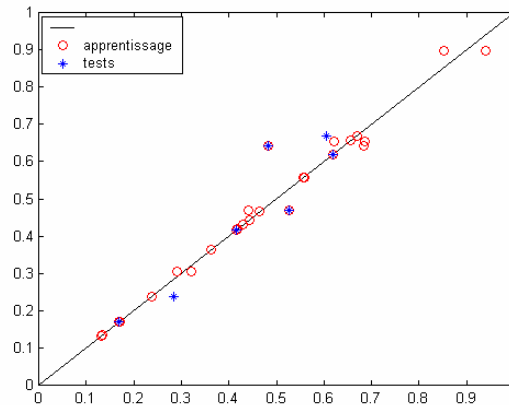


Fig. 39 : Dispersion entre le modèle et les valeurs réelles, modèle à 2 neurones cachés

Les deux graphes présentés correspondent au meilleur et au moins bon des réseaux proposés. On observe clairement que le modèle à deux neurones en couche cachée permet d'obtenir un résultat de grande qualité, l'erreur entre la valeur modélisée et la valeur réelle étant alors quasiment négligeable.

Si on compare ce modèle aux résultats obtenus par un modèle paramétrique de DMC, il apparaît que la précision est largement supérieure dans le cas des réseaux de neurones. Celui-ci permet donc aujourd'hui de proposer une analyse prévisionnelle précise des coûts de maintenance des servocommandes d'hélicoptère.

5.3.5. Bilan

Mis en œuvre depuis peu, ce modèle d'un type nouveau devrait être applicable et appliqué à de nombreuses technologies autres que les servocommandes. En effet, outre sa précision, cette méthode d'évaluation des coûts de maintenance semble particulièrement simple à réaliser. Programmée sous une interface de mathématiques formels (SCILAB [\[YCAR03\]](#) ou logiciels équivalents), sa création ne nécessite alors plus qu'une expertise technique pour le choix des paramètres d'entrée.

Les modèles par réseaux de neurones, de type boîte noire, restent cependant difficiles à faire apprécier par leurs utilisateurs potentiels. En effet, tant pour être rassuré que pour une meilleure analyse des facteurs influents, il ressort un besoin de connaissances sur les interactions physiques des paramètres d'influence d'un modèle de coût. Pour cette raison, bien que ces modèles soient particulièrement performants, on limite souvent (pour le moment) leur usage à l'évaluation rapide de coûts en partant d'une simple base de données, perspective qui demeure malgré tout intéressante.

5.4. Coûts de maintenance de systèmes avioniques

5.4.1. Préambule

Par avionique, on entend "ensemble des systèmes électroniques embarqués, qu'il s'agisse d'équipement standard ou de mission". Ces équipements peuvent être des calculateurs de navigation, des systèmes de communication, des radars, etc.

L'intérêt de l'estimation de leurs coûts est aujourd'hui évident : en effet l'aéronautique, comme l'ensemble des systèmes de transport, contient de plus en plus d'électronique embarquée, la maintenance de ces éléments (souvent inducteurs de défaillance) pouvant ainsi induire jusqu'à 30% des coûts de soutien.

Dans le cadre de ces travaux, nous avons donc développé et validé un modèle de coûts de réparation pour l'avionique et pour les systèmes électroniques de façon générale. Basé sur les activités de maintenance, celui-ci est paramétré en fonction du type d'équipement et du contexte de réparation, il est calibré par retour d'expérience. En cela il s'agit d'un modèle analytique, comparatif et paramétrique.

5.4.2. Analyse des coûts

Les coûts de maintenance de l'avionique sont constitués comme suit :

- coût logistique
- coût du test de détection
- coût du test de validation
- coût du stockage
- coût de réparation
- coûts des pièces de rechange.

Décrivons plus en détail chacune de ces phases.

5.4.2.1. *Les coûts logistiques*

Ils correspondent d'une part au transport aller/retour du calculateur entre le client et le site de réparation, d'autre part au temps de main-d'œuvre nécessaire pour la gestion de l'équipement défaillant. Ils sont évalués par retour d'expérience et, dans notre modèle, selon un forfait quel que soit l'équipement. Ce principe de calcul peut paraître péremptoire, cependant nos estimations montrent que les coûts logistiques ne représentent pas plus de 5% du total des coûts de maintenance. C'est pourquoi nous nous limiterons à cette évaluation sommaire.

5.4.2.2. Coût des tests de détection et de validation

Ce coût est associé à l'utilisation d'un banc d'essais et de détection des pannes. Tant par son amortissement que par son usage, ce système particulièrement onéreux implique une part importante des coûts finaux de maintenance.

Pour estimer le coût des bancs de test, un modèle est développé à partir de l'expérience Eurocopter, celui-ci reste cependant généralisable à la maintenance d'équipement électronique embarquée.

Dans le principe, un banc d'essai de calculateur est composé d'une base commune à tous les équipements et de modules spécifiques à certains types d'équipement (le module qui permet d'analyser le fonctionnement d'un écran de visualisation est différent de celui utilisé pour un système de navigation). De plus, à chaque équipement sont associés des programmes informatiques de maintenance, leur coût de développement doit donc être pris en compte dans l'amortissement des bancs de test. A ces coûts s'ajoutent ceux de l'évolution des programmes due aux corrections de bugs, aux améliorations (notamment celles concernant la couverture de test) et aux évolutions de l'équipement (passage à une version supérieure).

Le coût de test est alors calculé comme suit :

a) Détermination du temps de test par famille d'équipement

Le temps de test est évalué en valeur moyenne, en test de bon fonctionnement et en intervention de maintenance pour 5 types de matériel (boîte de commande, calculateur, systèmes de visualisation, calculateur analogique, coupleur analogique-numérique). Dans le cas où l'équipement étudié n'entre pas dans une de ces catégories, le temps de test est à renseigner par ailleurs.

b) Calcul de l'amortissement de la base du banc de test

Amortissement de la base du banc de test	
Utilisation ATEC	
Nombre d'heures par jour	20,0 h
Nombre de jours par semaines	5 j
Durée d'amortissement	5 ans
Prix d'achat	€uro
Coût amortissement par heure d'utilisation	€uro/h

Fig. 40 : Amortissement du banc de test

On estime le coût de l'amortissement en fonction de l'usage en maintenance (par exemple 20 heures par jour d'usage) et de la durée d'amortissement. De plus, ce coût est calculé avec une actualisation en fonction de l'inflation (environ 3% par an) et suivant une formule d'amortissement classique.

c) Calcul de l'amortissement de la part spécifique équipement (modules + software)

Entretien et usage spécifique du banc de test		
Programme de test et équipement spécifique de test		
Prix		€uro
Durée de vie		30 ans
Utilisation de la routine = nombre de défaillances de l'équipement		
Coût du banc spécifique		
MTBF		2500 h
Cadence de vol en h par an		400 h
Flotte en nb		200
Nombre de défaillances par an		32
Coût de la routine par intervention		€uro

Fig. 41 : Coût par intervention

L'amortissement de la part spécifique est compté par routine d'utilisation et en fonction du nombre de pannes attendues sur le total des équipements d'un certain type en circulation. Dans notre modèle, cet amortissement est donc plus pénalisant dans le cas d'une flotte de petite taille que dans celui d'une flotte importante à équipement similaire.

d) Main-d'œuvre associée au test

Le temps de main-d'œuvre associée au test est défini par type d'équipement sur la base d'une valeur moyenne.

e) Calcul du coût total du test

Le calcul est alors réalisé de manière simple :

$$\text{Coût de test} = \text{Temps d'utilisation du bancs} \times \text{coût d'amortissement horaire} \\ + \text{coût d'une routine de test} + \text{main-d'œuvre de test}$$

Le coût des bancs de test représente entre 5 et 20% du coût total de maintenance de l'avionique.

5.4.2.3. Coût de stock

Ce coût correspond au stockage des pièces de rechange nécessaires à la réparation, dans les délais permettant d'assurer une disponibilité suffisante, et pour une flotte de machines donnée. On peut par exemple avoir une disponibilité désirée de 90% à 3 jours pour 100 équipements en service.

On utilise la relation selon laquelle le coût du stock revient chaque année à 10% de sa valeur (coût de l'immobilisation : environ 6%, coût de la gestion du stock : environ 4%). De manière générale, cette relation classique se vérifie par expérience.

5.4.2.4. *Coût de l'échange standard*

Le coût de l'échange standard représente la main d'œuvre de réparation, il reste relativement faible au vu du coût global de la maintenance. En effet, le temps de main-d'œuvre varie en général entre 3h et 10h (20h pour les anciennes technologies). Cette part est donc évaluée par une valeur mini et une valeur maxi en fonction du type de système.

5.4.2.5. *Eléments de rechange*

Les pièces de rechange des systèmes sont considérées comme étant des cartes (ou sous-ensembles) et non comme des composants, ceci pour deux raisons : d'une part le modèle développé correspond à un contexte d'industriel intégrateur de système ; d'autre part, les technologies actuelles permettant de moins en moins de réparer une carte, celle-ci est vue comme un consommable. Nous estimons de plus que la réparation sur un système ne concerne qu'un seul des sous-ensembles (boîtier ou carte) qui le constitue.

Pour évaluer ce coût nous disposons de deux modèles : modèle simple et modèle complexe.

a) *Modèle simple*

En moyenne, le coût de réparation d'un sous-ensemble représente une proportion de son prix (paramétré en fonction de sa réparabilité), celui-ci correspondant à la division du prix du système par le nombre de sous-ensembles. Par exemple, le prix moyen d'une carte pour un calculateur qui coûte 50.000 euros et comporte sept cartes et un boîtier est de $50.000/8 = 6250$ euros.

Pour un calculateur non réparable, le coût des pièces par réparation est le prix moyen d'un sous-ensemble (6250 euros dans notre exemple). Dans l'hypothèse où le calculateur est réparable, le coût est évalué en fonction d'une proportion de sous-ensembles réparables et de la présence de composants complexes dans le système.

Ce modèle montre ainsi ses limites : comme il ne retient que le prix moyen des cartes, il oublie que ce sont les éléments les plus complexes (et donc les plus chers) qui bien souvent sont les moins fiables. Aussi proposons-nous un modèle plus précis.

b) *Modèle complexe*

Le principe de calcul est le même que celui du modèle simple, cependant nous tenons ici compte du prix relatif de différents types de sous-ensembles et considérons ainsi quatre catégories : les petites, moyennes ou grandes cartes, et les autres éléments (boîtiers, alimentation ...). Nous paramétrons le prix relatif des éléments en disant qu'une carte moyenne coûte, par exemple, quatre fois plus cher qu'une petite et qu'une grande coûte huit

fois plus qu'une petite. Le coût de réparation du sous-ensemble est calculé de la même façon que pour le modèle simple.

Nous évaluons enfin le nombre de cartes par catégorie et leur fiabilité relative (par exemple, une carte moyenne est deux fois plus fiable qu'une grande), ces données nous permettent alors de connaître la proportion des différents types de carte dans l'occurrence des pannes. Le prix de réparation du calculateur est estimé par la moyenne du prix de réparation des différents types de sous-ensemble, pondérée de l'occurrence de leur défaillance.

Par exemple pour un calculateur de 50.000 euros comportant huit sous-ensembles, nous avons :

	Nombre de cartes ou éléments de chaque type	Fiabilité relative des cartes ou éléments	Prix relatif des sous-ensembles	Prix des cartes	Prix des rechanges	Probabilité d'occurrence
Grandes cartes	3	1	10	13158 Euro	10526 Euro	0,65217
Cartes moyennes	2	2	2	2632 Euro	2105 Euro	0,21739
Petites cartes	2	4	1	1316 Euro	1316 Euro	0,10870
Autres (boîtier, alim)	1	10	2	2632 Euro	2632 Euro	0,02174
					7523 Euro	Prix moyen des rechanges

Fig. 42 : Exemple de calcul de coût de maintenance de l'avionique

Avec notre premier modèle, l'évaluation des coûts de réparation de ce calculateur aboutit à un coût compris entre 6615 et 9610 euros. Notre deuxième modèle, plus précis, évalue le prix de réparation à 9350 Euros avec [7610, 11150] comme intervalle de confiance à 80 %.

Pour améliorer la pertinence de l'estimation de la part réparée des sous-ensembles, nous avons ajouté un biais basé sur l'expérience et qui a pour objectif de prendre en compte la présence de composants spéciaux. En tenant compte de trois niveaux (aucun, un peu, beaucoup de composants exotiques), on pondère alors le prix des réparations. Les niveaux correspondent aux prix des éléments de réparation des cartes, respectivement à 5, 10 et 60 % du prix de la carte.

5.4.2.6. *Présentation du modèle complet*

Le modèle complet du coût de réparation de l'avionique consiste à faire la somme des coûts présentés précédemment. Voici un exemple de résultat :

	Coût total de Main-d'oeuvre	Coût du banc de maintenance	Transport et logistique	Coût total des pièces de rechange	Coût total du stock	Total	Total non pondéré
min	394 €	196 €	48 €	10600 €	250 €	11666 €	11489 €
moy	665 €	220 €	60 €	13251 €	500 €	14695 €	14695 €
max	999 €	243 €	72 €	15901 €	750 €	17732 €	17964 €

Fig. 43 : Résultat du modèle d'estimation des coûts de maintenance de l'avionique

Chacun des coûts est encadré par une valeur mini et une valeur maxi. Si le total le plus vraisemblable est la somme des valeurs centrées, il paraît évident que la valeur mini n'est pas la somme des min. (et de même pour la valeur maxi).

L'intervalle de confiance est alors calculé par la somme des intervalles (distributions considérées comme normales) avec les bornes minimum et maximum aux 10^{ème} et 90^{ème} centiles pour chacun des résultats. Cette approximation permet ainsi de réduire l'intervalle de façon significative et pertinente.

5.4.3. Bilan sur les coûts de maintenance de l'avionique

Le modèle décrit précédemment, et validé par des comparaisons avec le retour d'expérience, est principalement analytique ; cependant il reste basé sur un ensemble de techniques paramétriques. Il démontre donc le besoin d'utiliser simultanément différentes techniques de costing dans le but d'obtenir la meilleure évaluation de coût.

Notons enfin que si ce modèle est relativement simple à comprendre, sa complexité réside dans une réalisation qui nécessite la description chiffrée d'activités techniques pointues.

Aujourd'hui, grâce à sa pertinence, ce modèle est utilisé pour engager des fournisseurs sur des valeurs de coût de maintenance. Référence solide (basée sur des activités et donc difficilement discutable), il permet d'ouvrir les discussions commerciales pour l'achat d'une maintenance, sans toutefois prétendre à une justesse absolue.

Rappelons que cet outil fournit comme indication un coût de réparation, il reste donc à évaluer une fiabilité avant de disposer d'un indicateur de DMC.

5.5. Choix d'une modélisation adaptée

Après avoir décrit les principaux types de modèle de coût de maintenance mis en œuvre dans ce travail de thèse, procédons à leur analyse afin de déterminer leur pertinence dans l'évaluation des coûts de maintenance.

Pour cela, nous nous appuyerons sur les paramètres d'analyse suivants :

- Phase du cycle de vie durant laquelle les modèles sont utilisés (suivant la décomposition : faisabilité, pré-design, design, production, exploitation, après-vente)
- Données d'entrée (à savoir les types de données utilisées, leur quantification) : il convient de préciser si une méthode est plus exigeante qu'une autre en termes de ressources
- Degré de précision attendu : d'une part, chaque méthode réalise une performance attendue et à juger en relation avec les données disponibles, d'autre part il s'agit d'évaluer leur comportement pour une base de données variables (défaillante ou optimale). Deux critères sont donc à prendre en compte :
 - la précision absolue qui rentre en jeu pour des conditions optimales d'évaluation prévisionnelle
 - la précision moyenne ou pondérée qui tient compte de la qualité éventuelle des données d'entrées (ce critère est déterminant car davantage en accord avec la réalité du costing)
- Complexité dans la mise en place de la méthode : il est important de savoir si une méthode est facile à mettre en place dans l'entreprise, si son utilisation est transparente ou si au contraire elle demande au spécialiste du costing de changer ses habitudes
- Ergonomie de la méthode : on détermine si un néophyte peut exploiter la méthode, si l'utilisateur a besoin d'un apprentissage ou de compétences spécifiques pour l'interprétation des résultats
- Intérêt / apport stratégique : il est intéressant d'évaluer la valeur ajoutée apportée par la méthode de coût, c'est-à-dire de savoir si elle donne des éléments au management dans la prise de décision (axes d'amélioration, points critiques, gisements, etc.)
- Situation type : on donne enfin le cadre optimal pour utiliser ces méthodes.

Pour l'ensemble des outils envisagés pour évaluer le coût de maintenance, nous avons donc mis en place une grille de notation dont le barème va de 1 à 4 pour chacun des critères.

- Données d'entrées

4 : données nécessaires en faible quantité ou incomplètes / 1: besoin de données exhaustives

- Degré de précision attendu

4 : résultat très proche de la réalité et avec une forte confiance pour chaque cas de figure

1 : le résultat obtenu n'indique qu'une tendance ou la méthode présente de sérieuses lacunes

- Complexité dans la mise en place de la méthode

4 : la méthode ne requiert aucune disposition particulière

1 : la méthode demande des changements structurels ou une remise en cause profonde des mentalités

- Ergonomie de la méthode

4 : la méthode ne requiert pas de connaissances spécifiques dans le domaine du costing

1 : L'expertise d'un spécialiste en costing est indispensable

Modèles	Phase du cycle de vie concerné	Données d'entrées	Degré de précision attendu	Complexité dans la mise en place de la méthode	Ergonomie de la méthode
Paramétrique					
Les modèles régressifs					
Régression linéaire simple	Pré design Faisabilité Design	3	2	4	4
Régression non linéaire	Pré design Faisabilité Design	3	2	3-4	4
Régression par paliers correctifs	Pré design Faisabilité Design	3-4	2	2-3	2
Régression linéaire multiple	Pré design Faisabilité Design	1-2	3	3	3
Combinaison de relations linéaires et non linéaires	Pré design Faisabilité Design	1	3	2	2
Les modèles avancés					
Les réseaux de neurone	Pré design Faisabilité Design	3	3	3	2
Analytique					
Méthode analytique	Production Exploitation	1	3	3	3
Analogique					
Comparaison de plusieurs points +régression	Design Production Exploitation	2	2-3	3	1

Fig. 44 : Adaptation d'un modèle à un usage

Ce tableau résume ainsi les conditions dans lesquelles les modèles développés dans ce travail peuvent être utilisés. L'objectif ayant été de construire des modèles prévisionnels de coût de maintenance, la plupart d'entre eux sont bien entendu adaptés à la phase de conception.

Ces catégories donnent une idée générale des principes d'application de ces outils, retenons cependant que ces critères sont informatifs et peuvent être remis en cause dans de nombreux cas : parfois, une régression simple peut être beaucoup plus précise qu'un modèle complexe.

6. Conclusion sur la modélisation des coûts de maintenance

Modéliser c'est remplacer du visible compliqué par de l'invisible simple.

Jean Perrin

Dans ce premier chapitre, nous avons tout d'abord décrit le processus de conception et son impact (maîtrisé ou non) sur les coûts d'exploitation. Nous avons notamment montré l'influence des coûts de maintenance sur le *Life Cycle Cost* dans des domaines aussi variés que le nucléaire, les systèmes de défense ou encore les transports.

Partant du constat que la plupart des méthodes de maîtrise des coûts en phase de conception ne prenaient pas suffisamment en compte le facteur "coûts de maintenance", nous avons ensuite cherché à décrire l'activité de soutien au travers des politiques de maintenance et des indicateurs de coût associés à cette phase. Notre analyse des outils de modélisation des coûts de maintenance, existant dans la littérature, a alors dévoilé les importantes lacunes du domaine (peu de modèles, trop souvent spécifiques et rarement adaptés à un usage en phase de design).

Aussi, en partant d'un état de l'art des outils existants de prévision de coûts (coûts de production la plupart du temps), nous avons développé ou adapté un panel de modèles de coût permettant d'estimer de manière prévisionnelle le coût des activités de maintenance.

Le comparatif objectif de ces différentes méthodes (au moyen de critères essentiels) et l'analyse des phases du processus de design et d'exploitation (durant lequel le modèle peut être utilisé) délivrent un message fort en mettant à jour les spécificités de chacun de ces outils, leurs principales qualités ainsi que leurs lacunes.

Plusieurs remarques restent cependant à faire.

Aucun outil "miracle" ne ressort de cette analyse et le calcul des coûts de maintenance devra toujours se faire par l'emploi conjoint de plusieurs types de méthode. De façon classique, on utilisera un modèle paramétrique de type régressif dès l'étape de faisabilité, alors qu'une décomposition analytique basée sur les activités sera employée lors de la vérification comptable et du retour d'expérience.

Certes le nombre de modèles étudiés aurait pu être plus important et plus diversifié (empruntant ainsi d'autres théories mathématiques originales), mais le parti pris était avant tout de mettre en œuvre des modèles utilisables dans un contexte industriel.

En outre, et c'est sûrement le point le plus sensible, l'expérience montre que la simplicité est la clef de la réussite des modèles de coût. Il apparaît en effet que le fait de créer des modèles, sinon inédits du moins inhabituels, pose des difficultés dans leur application industrielle et dans la confiance accordée par les décideurs sur leur validité.

Enfin, si cette prévision de coûts s'intègre directement dans le *Design to Life Cycle Cost*, pour les systèmes électroniques seule une part de notre équation simple de DMC est résolue :

$$\text{DMC} = \text{Coût de la maintenance} / \text{Périodicité de la maintenance}$$

Cette périodicité de maintenance étant représentée par le temps avant défaillance ou avant maintenance préventive, il reste donc à montrer dans le cadre de ces travaux de recherche comment se fait la prévision de fiabilité. Le chapitre suivant y est consacré.

Chapitre II. La prévision de fiabilité

1. Introduction

1.1. Préambule

Fiabilité : nom féminin, de l'adjectif *fiable* lui-même issu du verbe *se fier*, évolution du latin populaire *fidare* "confier" de *fidus* "fidèle". [\[ROBE95\]](#)

Le mot fiabilité est aujourd'hui à la mode. De la notion technique d' "aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée" [\[AFN98\]](#), le publicitaire est revenu à la définition originelle à savoir "*vertu cachée des bonnes machines : Les machines fiables, dignes de confiance*" [\[LITT97\]](#). Devenue un argument commercial important, la fiabilité n'en reste pas moins une préoccupation majeure des ingénieurs d'étude.

En effet, outre son implication directe dans la sûreté de fonctionnement (notamment dans le cadre d'analyses de risque en cas de défaillance), il apparaît que la fiabilité est aujourd'hui une donnée importante dans l'impact économique du cycle de vie des produits. Justifiée depuis toujours par le bon sens populaire "plus l'équipement durera longtemps, moins il me coûtera cher à amortir", cette notion se traduit dans l'industrie par des besoins d'évaluation de fiabilité de plus en plus importants, tant en quantité qu'en précision exigée.

C'est donc à tous les niveaux de la chaîne logistique que la prévision de fiabilité est nécessaire. Aussi bien pour la maintenance que pour les prévisions de disponibilité, cette information est recherchée par les secteurs d'étude, elle est alors modélisée pour des composants mécaniques, électroniques ou autres sous-ensembles.

Pour cette raison, cette thèse traitant de la modélisation prévisionnelle des coûts de maintenance se devait de traiter la prévision de fiabilité : les coûts de maintenance ramenés à la vie d'un équipement sont en effet directement dépendants du nombre de fois où celui-ci va être remis en état ou modifié.

1.2. Historique

L'intérêt industriel porté à la fiabilité, pour de nombreux motifs, n'est pas nouveau. Dès 1906 apparaissent des objectifs d'accroissement des durées de vie des tubes à vide puis, durant la première Guerre Mondiale, c'est dans le domaine des locomotives à vapeur que se poursuivent ces travaux avec l'évaluation des durées de vie de roulements à bille. A cette époque seule la notion de durée de vie est associée à la fiabilité.

Pendant la deuxième Guerre Mondiale, avec l'intégration de l'électronique dans les équipements, la fiabilité est ressentie comme un besoin urgent : sujet à de nombreuses défaillances, ces systèmes représentent un investissement important en coût de maintenance. Le *Department Of Defense* américain lance alors des études de fiabilité sur les équipements militaires, et en particulier l'électronique. De ces travaux sont tirés les premiers rapports de spécification de fiabilité en 1957 puis la norme-recueil de fiabilité MIL STD 441.

Par la suite, les radars aéroportés H2S de fonctionnement très aléatoire, les liberty-ships (où l'innovation qui consistait à remplacer les rivets par des soudures provoqua des ruptures précoces), ou encore les locomotives à vapeur livrées au lendemain de la Libération (mais remplacées assez rapidement car elles supportaient mal leur service) sont des exemples concrets de ce besoin de prévoir la fiabilité.

Pendant de nombreuses années, la fiabilité est alors vue comme un savoir-faire, basé sur l'expérience et l'intuition de l'ingénieur, et auquel on associe un concept de qualité des équipements. Par la suite, le théorème de Bellman (qui démontre que la réunion de sous-systèmes optimaux ne constitue pas forcément un système optimal) remet en cause ce principe. Les études de fiabilité se tournent alors vers une approche systémique qui consiste à étudier le système dans son ensemble tout en tenant compte des interactions entre les divers éléments qui le composent.

Dans cette progression constante, l'évaluation de la fiabilité est naturellement aiguillée vers de nouvelles notions que sont la disponibilité et la maintenabilité, et c'est de l'usage de ces méthodes dans des systèmes à risque élevé (nucléaire, aéronautique) que naît la sûreté de fonctionnement. [\[AGAR79\]](#)

Dans les années 70 et 80, la sûreté des systèmes devient une activité reconnue puis obligatoire. C'est ainsi que la norme MIL STD882 [\[MILI02\]](#) *system and associated subsystems and equipment : requirements for system safety* est adoptée comme décret (elle sera mise à jour en 2000). Dès lors, les techniques de la sûreté atteignent un haut niveau de sophistication et la théorie de la fiabilité ne cesse de connaître des progrès. [\[ZIAN86\]](#)

De nos jours, nous assistons à la consolidation des théories mises en œuvre dans les années 80 et 90, avec notamment l'adjonction de nouveaux thèmes de recherche tels que l'optimisation de maintenance ou la prise en compte du risque économique. Les travaux actuels portent également sur la prévision de la fiabilité dans des objectifs de design sûr. [\[TEIX02\]](#)

1.3. Présentation du plan

La fiabilité d'un équipement se traduit à travers deux notions : la fiabilité de mission et la fiabilité intrinsèque de l'équipement. Dans le premier cas, c'est la description de l'architecture système qui détermine la fiabilité, chaque redondance étant considérée comme "fusible". Cette première notion est principalement utilisée en sûreté de fonctionnement. Dans le second cas, toute défaillance d'un composant du système est prise en compte et considérée comme une panne, c'est-à-dire nécessitant une maintenance [\[GUES98\]](#). La fiabilité du système est alors directement dépendante du maillon le plus faible. Nos travaux portant sur la maintenance et ses coûts, c'est bien entendu sur cette seconde vision que nous nous attarderons.

Après avoir présenté (au travers d'un rapport bibliographique) les principales notions mathématiques permettant de déterminer la fiabilité, nous évoquerons les méthodes prévisionnelles de fiabilité, leur construction, leurs résultats et leurs limites. Nous rappellerons en particulier le retour d'expérience, l'expertise ainsi que les modèles paramétriques. Pour ces derniers, nous décrirons l'impact des stress physiques et l'actuelle prise en compte des facteurs de qualité.

Nous nous limiterons à l'étude de la prévision de fiabilité des composants et sous-ensembles électroniques. De ces méthodes et de leurs limites, nous justifierons alors pourquoi et comment le modèle prévisionnel de fiabilité des composants et sous-ensembles électroniques FIDES a été construit. Nous développerons plus particulièrement comment est pris en compte l'impact des processus rencontrés lors du cycle de vie des produits (depuis leur conception jusqu'à leur fin de vie) sur la fiabilité opérationnelle.

2. Fiabilité : principes et définitions

2.1. Avant propos

Si l'ingénieur définit la fiabilité comme "l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour une période de temps donné", le mathématicien transforme cette définition en parlant de "probabilité d'accomplir une fonction requise".

Nous introduirons dans ce paragraphe les principaux fondements mathématiques des théories de la fiabilité, nous en verrons les principes généraux et les notations avant de nous pencher sur les lois statistiques les plus couramment utilisées pour modéliser la "durée de vie".

Le but n'est pas de développer l'ensemble des méthodes statistiques utilisées dans le domaine de la fiabilité, son évaluation et le traitement des retours d'expérience, mais plutôt de renseigner sur les concepts fondamentaux (statistiques et mathématiques) qui peuvent être utilisés dans les travaux de modélisation prévisionnelle de fiabilité. Cette présentation s'appuie sur de nombreuses publications, entre autres ouvrages on peut citer les travaux de Coccozza-Thivent [\[COCO02\]](#), Patrick Lyonnet [\[LYON93\]](#), Jean-Claude Ligeron [\[LIGE92\]](#) ou encore le livre référence de Villemeur [\[VILL88\]](#).

2.2. Définition et notations

Ce paragraphe expose des travaux bibliographiques permettant une bonne compréhension des notions de sûreté de fonctionnement utilisées dans nos travaux.

2.2.1. Fiabilité

La fiabilité d'un groupe d'éléments à un instant t est la probabilité de fonctionnement sans défaillance pendant la période $[0, t]$, c'est donc la probabilité que l'instant de première défaillance T soit supérieur à t . Bien entendu, cette définition posée sur une échelle en temps de fonctionnement est tout aussi valable avec une autre unité, par exemple en Km ou en nombre de cycles d'usage.

$$R(t) = P(T > t)$$

Cette fonction fiabilité, ou fonction de survie, se calcule aisément :

$$R(t) = \text{Nbre d'éléments en vie à l'instant } t / \text{Nbre d'éléments au total}$$

On peut également présenter la fonction cumulative de panne $F(t)$ comme la probabilité qu'il survienne une panne avant la date t . Il s'agit du complément de $R(t)$: $F(t) = 1 - R(t)$
[\[CHAP03\]](#)

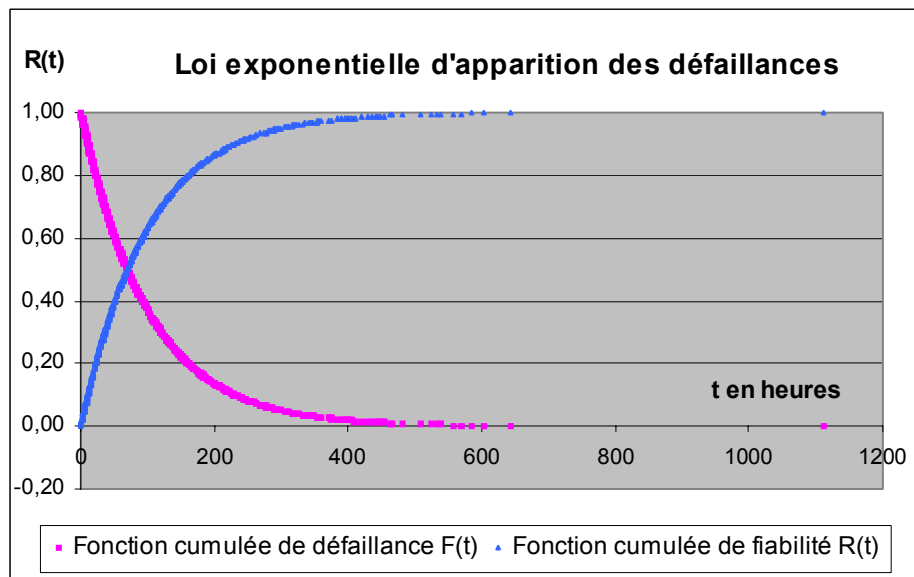


Fig. 45 : Loi exponentielle d'apparition des défaillances

On définit ensuite la fonction $f(t)$, à savoir la densité de probabilité de la variable T . Cette fonction multipliée par dt peut être interprétée comme la probabilité de défaillance entre t et $t + dt$. On la définit comme suit :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \text{prob} \{t < T < t + dt\}$$

2.2.2. Défaillance et taux de défaillance

La défaillance est la cessation d'une aptitude à accomplir une fonction requise, c'est le passage de l'état de fonctionnement à l'état de panne. On distingue sa cause (circonstance ayant entraîné la défaillance) de son mécanisme (processus ayant entraîné la défaillance) et du mode de panne associé (un des états possibles d'une entité en panne pour une fonction requise).

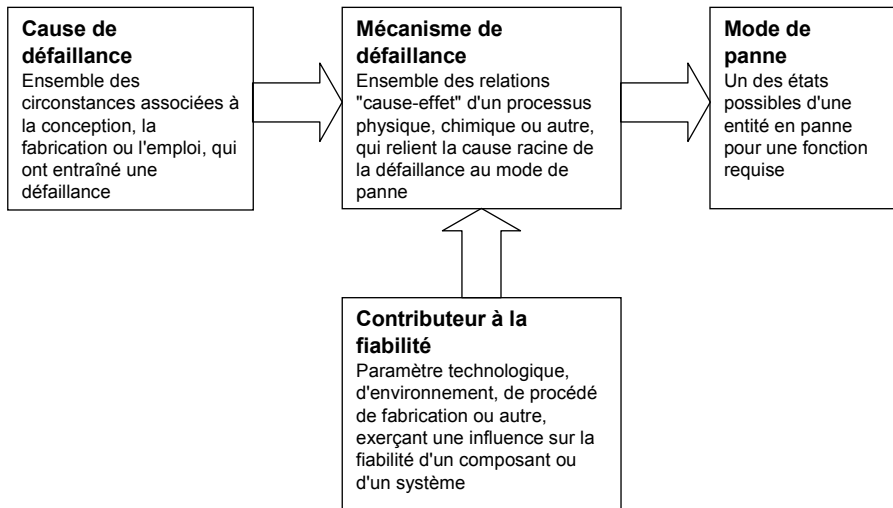


Fig. 46 : Définition des concepts de fiabilité

Le taux de défaillance représente la proportion de dispositifs qui, ayant vécu un temps t , ne sont plus en vie à $t + dt$. Il s'agit de la probabilité conditionnelle suivante :

$$h(t).dt = \lambda(t) = \frac{\text{Prob}(t \leq T < t + dt)}{\text{Prob}(T \geq t)} = \frac{\text{Nombre de défaillants au cours de } dt}{\text{Nombre d'éléments total}} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

Particulièrement importante, cette notion représente statistiquement le nombre de pannes se produisant au cours d'une unité de temps rapporté au nombre d'éléments fonctionnant encore sans défaillance.

L'observation expérimentale montre que l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps est en général représentée par la courbe suivante dite "courbe en baignoire".

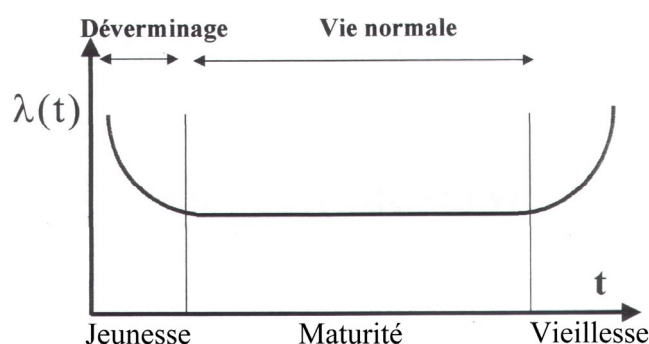


Fig. 47 Courbe en baignoire

La vie d'un composant peut donc être divisée en trois périodes :

- période de jeunesse, défaillances précoces
- période de vie utile, taux de défaillance sensiblement constant
- période de vieillesse, défaillances d'usure.

Lors de la période de jeunesse, le taux de défaillance diminue : la probabilité de panne d'un composant décroît avec le temps, les défaillances sont dues à des problèmes de qualité (mise en place des procédés et déverminage).

La période de vie utile est représentée par un taux de défaillance constant : la probabilité d'une panne est indépendante du nombre d'heures de fonctionnement de l'équipement (pannes aléatoires). Cette période, souvent inexistante pour la mécanique, est celle de référence pour l'électronique.

Lors de la période de vieillesse, la probabilité de panne augmente avec le nombre d'heures de fonctionnement : plus l'équipement est vieux, plus il est probable d'avoir une défaillance. Ce type de comportement est caractéristique des systèmes soumis à usure ou autres détériorations progressives qui correspondent à des taux de défaillance croissants. [IEC99]

La fiabilité se limite généralement à l'étude des phases 2 et 3, on exclut les problèmes de qualité en ne tenant pas compte du déverminage qui a lieu lors de la première phase.

2.2.3. Temps de fonctionnement

Ce paragraphe décrit les notions de temps entre chaque transition majeure de la vie d'un système : il passe de l'état de fonctionnement à l'état de panne, puis est en réparation, avant d'être à nouveau en service.

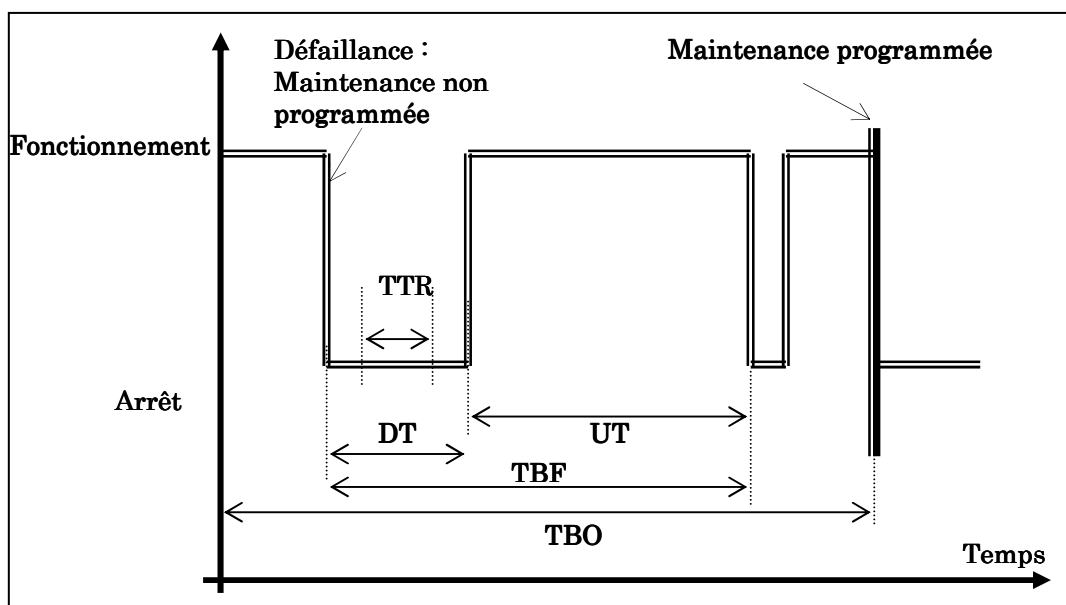


Fig. 48 : Temps de fonctionnement

- | | | | |
|---------|-------------------------|-----|-------------------------|
| Avec DT | : Down Time | UT | : Up Time |
| TTR | : Time to repair | TBF | : Time Between Failures |
| TBO | : Time Between Overhaul | | |

La plupart du temps, ces notions se traduisent par des valeurs moyennes, représentatives d'une donnée d'ensemble : on parle alors de MDT, MUT, MTTR et MTBF (M pour Mean). Le TBO n'a pas de valeur moyenne étant donné qu'il s'agit d'une durée recommandée avant entretien. [\[AUGE98\]](#).

2.2.3.1. Le MTBF

Cette notion de temps moyen entre défaillances étant une valeur de base pour les calculs prévisionnels des coûts de maintenance, nous nous attarderons dessus. Interprétée de différentes manières dans la littérature [\[VILL99\]](#), nous chercherons à définir celle-ci de façon rigoureuse sans toutefois remettre en cause les travaux évoqués.

Le temps moyen entre panne ou moyenne des temps de bon fonctionnement MTBF (Mean Time Between Failure) est un paramètre important de la fiabilité. Il représente le temps au bout duquel se produit la défaillance, c'est l'espérance mathématique $E(t)$ des temps où interviennent les pannes.

$$MTBF = \frac{\sum \text{Heures de défaillance}}{\text{Nombre d'équipements en essai}}$$

soit à partir de la densité de probabilité

$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

Bien entendu, il ne faut pas perdre de vue que le MTBF est un paramètre statistique qu'il ne faut en aucun cas dissocier de la loi de fiabilité $R(t)$ à laquelle il se rapporte.

2.2.3.2. Fiabilité et maintenance préventive.

La fiabilité cherche à définir le temps avant défaillance mais, pour des raisons sécuritaires comme économiques (disponibilité, coûts de remise en état...), la maintenance des systèmes complexes ne peut se limiter à des interventions de réparation (maintenance corrective). Nous définirons ainsi dans ce paragraphe les concepts majeurs de la maintenance préventive d'un point de vue de fiabiliste. [\[LYO93\]](#)

Temps avant maintenance préventive

Lorsqu'une défaillance a des conséquences graves sur la sécurité du système, il est impératif que la probabilité que cette défaillance survienne soit très faible et pour cela, il faut entretenir les équipements de manière préventive. Avant cette maintenance préventive, un potentiel est affecté aux systèmes soumis à entretien systématique. Deux définitions sont alors à énoncer :

dans la pratique, ce potentiel se traduit soit par une durée de vie (SLL : *Service Life Limit*), soit par un temps avant maintenance (TBO : *Time Between Overhaul*). La différence entre ces deux notions est que le SLL est une échéance de remplacement obligatoire alors que le TBO est une échéance de remise en état de l'équipement. [\[AFN82\]](#)

Si on affecte un potentiel à un équipement, cela signifie que celui-ci sera maintenu au plus tard à cette échéance. Une part de hasard peut cependant engendrer des défaillances et par conséquent des actions de maintenance non programmées. Pour évaluer la répartition des actions de maintenance, il nous faut donc introduire des notions de temps avant dépose.

Le MTBUR

Le MTBUR (*Mean Time Between Unscheduled Removals*) est le temps moyen entre deux défaillances, il tient compte des défaillances et de la remise en état que représentent les TBO. On obtient alors une fonction de fiabilité ayant l'allure définie ci-dessous :

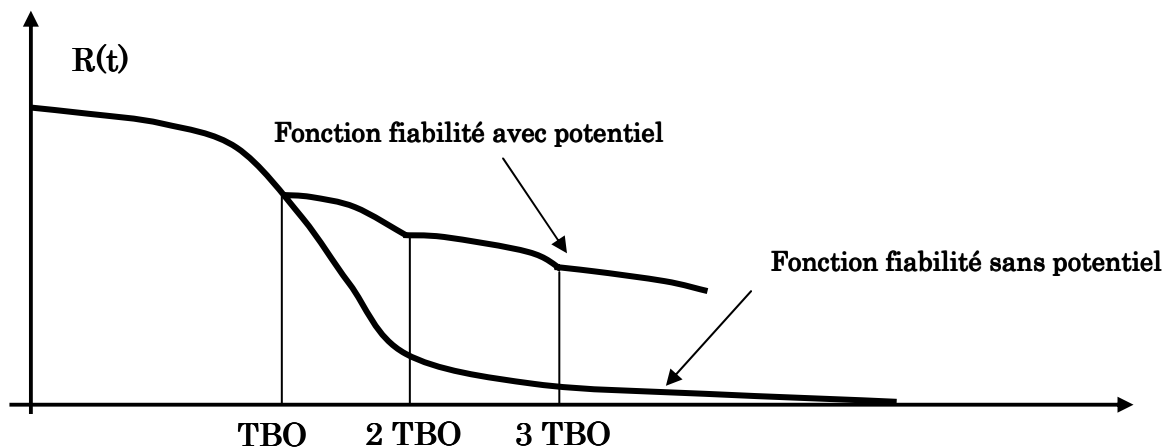


Figure 49 : le MTBUR [\[CORA75\]](#)

Le temps moyen entre deux défaillances a pour expression :

$$MTBUR = E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

$$MTBUR = \frac{1}{1 - R(TBO)} \cdot \int_0^{TBO} R(t) \cdot dt$$

Le MTBR

Le MTBR (*Mean Time Between Removal*) est le temps moyen entre deux déposes, que celles-ci soient dues à une défaillance ou à une fin de potentiel. Au bout d'une durée d'essais

égale au potentiel, tous les équipements ont été déposés au moins une fois. On peut alors estimer le MTBR par le rapport suivant :

$$MTBR = \frac{\sum \text{Heures pour défaillance et fin de potentiel}}{\text{Nombre d'équipements}}$$

ou encore

$$MTBR = \int_0^{TBO} t.f(t).dt + TBO.R(TBO)$$

Ces notions de MTBR et MTBUR, ne caractérisent pas la fiabilité mais plutôt le mode opératoire de la maintenance des équipements. On peut les associer dans la relation suivante :

$$MTBUR = \frac{MTBR}{1 - R(TBO)}$$

avec $R(TBO)$ représentant le taux d'atteinte à TBO, c'est-à-dire la proportion d'équipements ayant atteint la maintenance préventive sans tomber en panne. [\[LYON93\]](#)

2.3. Les méthodes prévisionnelles de fiabilité

2.3.1. Introduction

Bien que nous ayons répertorié trois méthodes (le retour d'expérience, l'expertise et les modèles paramétriques prévisionnels), ce paragraphe ne présente que les deux premières. Les modèles paramétriques prévisionnels de fiabilité faisant partie intégrante de la proposition scientifique de ce travail, nous les aborderons dans le paragraphe 3 de ce chapitre II.

Nous présenterons en première approche le retour d'expérience, ses limites et ses intérêts industriels ; puis nous évoquerons l'expertise comme mode de prévision de la fiabilité en montrant ses limites ; avant de décrire comment et pourquoi il est intéressant d'évaluer la fiabilité par des méthodes paramétriques basées sur ces analyses.

2.3.2. Le retour d'expérience et ses traitements

2.3.2.1. Préambule

Pour connaître la fiabilité d'un matériel, existe-t-il de meilleur moyen qu'une évaluation durant son exploitation ? Mais allez-vous dire, quel est le rapport avec la fiabilité prévisionnelle ?

En fait, il apparaît que la prise en compte de l'expérience et des leçons du passé (à partir des pannes et anomalies) est particulièrement importante pour estimer et améliorer la fiabilité des systèmes et des produits nouveaux.

Les données relatives aux comportements des matériels en exploitation présentent donc un intérêt à plusieurs niveaux [\[DEGR00\]](#) :

- le fabricant suit son produit pour en connaître les imperfections et l'améliorer en conséquence
- l'assembleur système veut séparer les bons des mauvais sous-ensembles
- à un niveau plus général, on souhaite fiabiliser les produits sur étagère.

2.3.2.2. Analyse de fiabilité en exploitation

L'analyse de fiabilité en exploitation consiste à recueillir des données de défaillance et à les exploiter de manière statistique afin de connaître la fiabilité moyenne représentée souvent par le MTBF. S'il est possible (pour certains cas) de suivre l'intégralité d'une flotte, c'est le plus souvent un échantillon qui est analysé, le choix de celui-ci pouvant déterminer la qualité de l'évaluation finale. L'analyse de fiabilité pourra se résumer par le synopsis suivant :

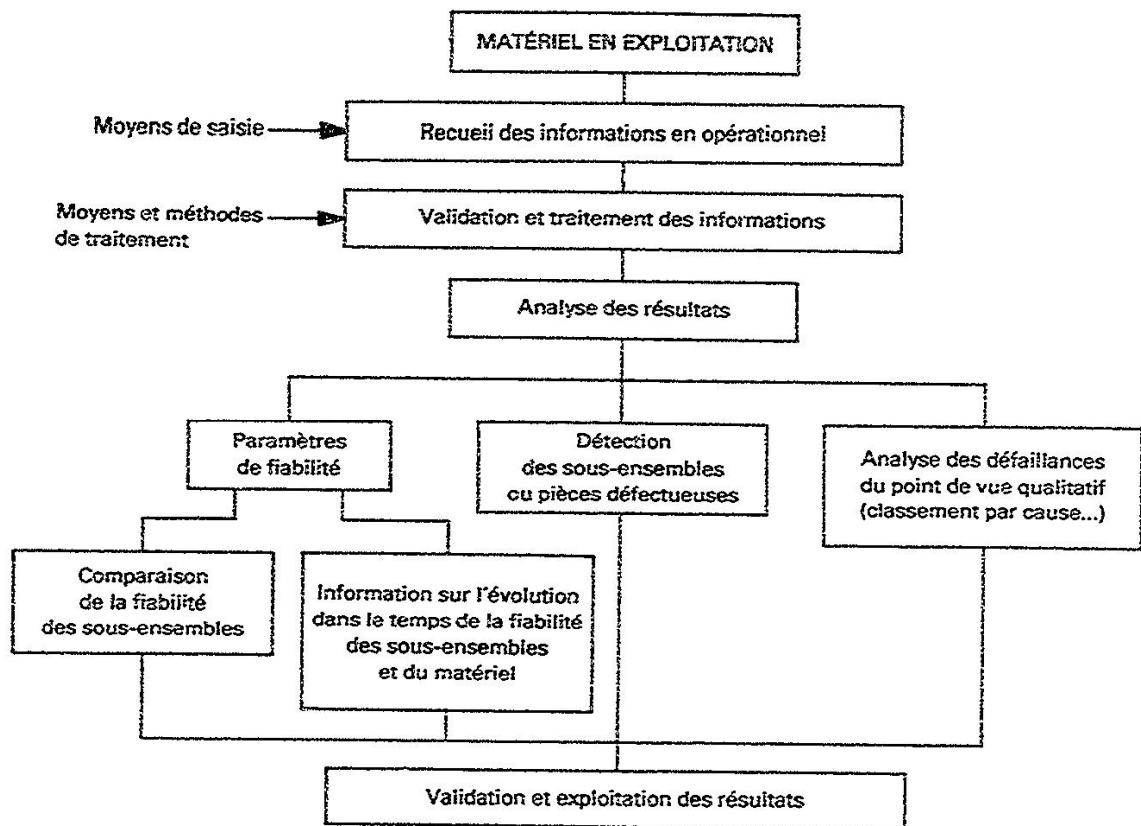


Figure 50 : Synopsis d'analyse de fiabilité en exploitation

Notons que la saisie des informations est une étape cruciale dans ce processus, ces données doivent permettre au minimum de caractériser la nature technique et la fréquence des incidents afin de pouvoir apprécier la fiabilité. [\[KRET98\]](#)

2.3.2.3. Traitement des données

Une analyse préliminaire (manuelle ou informatisée) élimine les incohérences. On cherche ainsi à écarter [\[RENA93\]](#) :

- les hétérogénéités (conditions d'emploi différentes ou systèmes non identiques)
- les incohérences (contradictions entre l'ordre d'arrivée des pannes et les durées d'utilisation)
- les erreurs d'inscription ou de transcription des données.

Des tests d'aberrance tels que ceux de Dixon permettent de révéler ces phénomènes.

Une procédure de traitement des données est alors mise en œuvre, elle peut être soit graphique soit numérique. Si l'analyse numérique a l'avantage de la simplicité par l'utilisation de logiciels appropriés, les graphiques présentent des images synthétiques faciles à saisir et permettent de mettre en évidence les différents modes de défaillance. [\[SELL97\]](#)

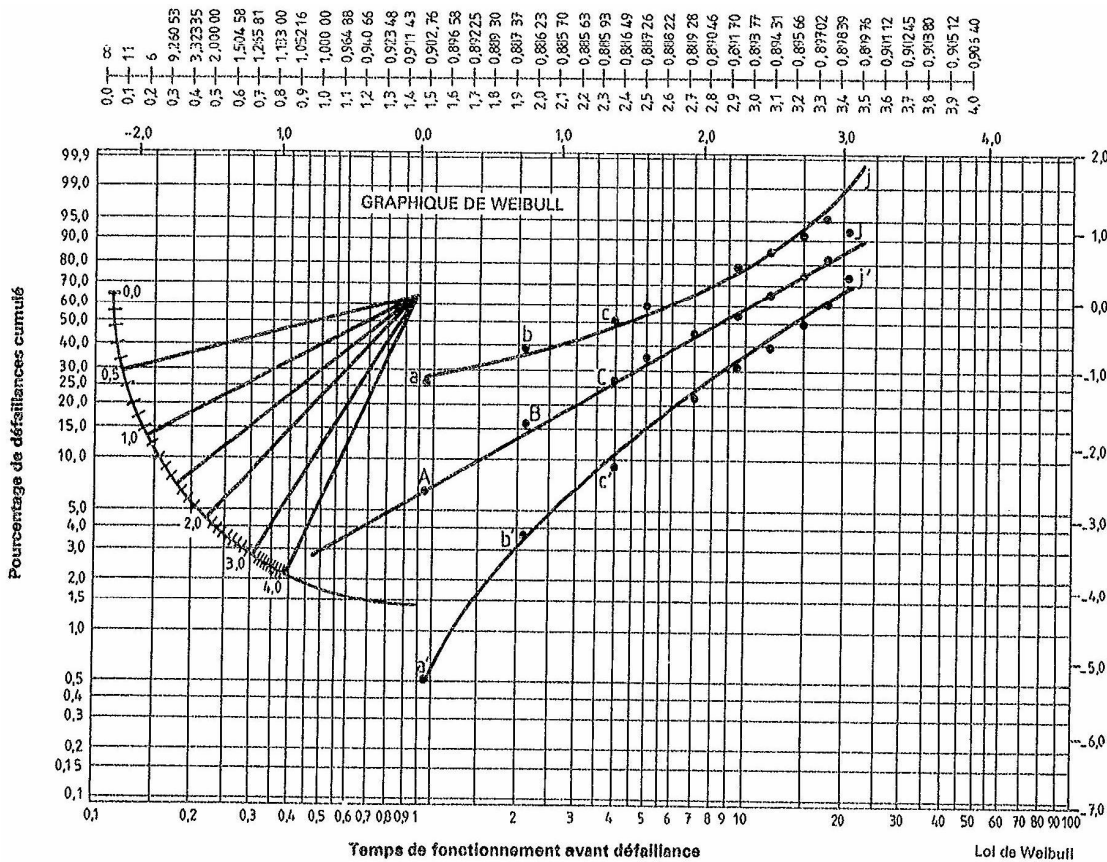


Fig. 51 : Méthode graphique d'analyse du retour d'expérience

Sans toutefois entrer dans la description des méthodes, montrons brièvement comment connaître une fiabilité à partir de ces graphiques.

Le principe est simple, il consiste à aligner une droite par les points (t, F) avec :

- t : temps de fonctionnement avant défaillance
- F : pourcentage cumulé de défaillance

En général on utilise un papier de HENRY avec $\log(t)$ en abscisse pour s'adapter à la distribution log normale de défaillance. Pour une distribution de Weibull, on utilise un papier Log-Log pour représenter la distribution $H(t) = (t/T)^B$ avec

- T vie caractéristique
- B pente de la droite

On a alors $\text{Log } H(t) = B \text{ Log}(t) - B \log(T)$

Pour évaluer une fiabilité à partir de données d'expérience, d'autres méthodes existent sur les mêmes principes mais comme elles ne font pas l'objet principal de ce travail, nous ne les développerons pas plus.

2.3.2.4. Les limites du retour d'expérience

Retenons que le retour d'expérience est le moyen d'analyse qui donne les meilleures estimations de fiabilité : il tient compte de toutes les défaillances (intrinsèques au produit ou accidentelles) et permet une description de l'impact des différents modes de panne.

Ces méthodes restent cependant coûteuses car pour le recueil des données de défaillances, elles impliquent la mise en œuvre d'importants moyens de soutien des équipements en service.

De plus, la pertinence du retour d'expérience dépend directement de l'échantillon étudié : il faut donc disposer d'une flotte témoin révélatrice des environnements moyens d'usage. Les durées de service doivent en outre être suffisantes afin de disposer d'un nombre de pannes qui permette une exploitation statistique.

Enfin, et en ce qui nous concerne c'est la principale limitation de cette méthode, le retour d'expérience (comme son nom l'indique) s'appuie sur des données d'exploitation et par conséquent ne peut être utilisé en phase amont de conception que par comparaison entre deux matériels proches dans un environnement proche. Cela implique alors que des experts interviennent pour analyser les écarts entre la prévision (en phase de design) d'usage du système et la réalité de l'exploitation d'un matériel en service.

2.3.3. L'avis d'expert

En sûreté de fonctionnement, pour évaluer un paramètre de performance il n'est pas rare de disposer de retours d'expérience insuffisants, car très censurés ou approximatifs. Afin de pallier la pauvreté voire l'inexistence des informations, faire appel à des experts s'avère alors nécessaire : ces derniers sont sollicités pour estimer des durées de vie, des temps entre défaillances, des vitesses de dégradation physique de composants, etc. Mais l'expert est également réclamé pour adapter des temps entre défaillances, de réparation obtenus dans des conditions d'environnement, d'exploitation et de maintenance déterminées, à des conditions d'environnement, d'exploitation et de maintenance différentes.

Les expertises portent rarement sur des questions sur lesquelles on n'a aucune donnée. Cependant, que les informations existantes soient en nombre insuffisant ou qu'elles soient difficiles à interpréter correctement, l'appel à un expert provient d'une volonté de cohérence. Ses rôles sont donc multiples : entre autres, il consiste à donner une opinion (la plus objective possible), prévoir, interpréter, ou encore à expliciter des données difficilement compréhensibles. Très subjective, l'expertise sert bien souvent à valider ou à infirmer des estimations proposées par d'autres méthodes. [\[ISDF97\]](#)

2.3.3.1. Les données d'expertise

L'expert pouvant autant traiter des valeurs techniques que des informations d'appréciation personnelle, ce paragraphe cherche à classer les données fournies.

Les données sont tout d'abord dites subjectives lorsqu'elles font entrer en ligne de compte des sentiments personnels, des attitudes et des perceptions, et objectives lorsqu'elles ont trait à des faits observables qui (en théorie du moins) ne portent pas sur des opinions personnelles.

On qualifie en outre les données de quantitatives lorsqu'elles comportent des observations numériques (une durée de vie, le nombre d'unités d'un bien...). Les données qualitatives ne sont pas numériques et portent, elles, sur des catégories (par exemple : la localisation géographique, etc.).

Subjectives ou objectives, les informations peuvent être mesurées de façon soit qualitative soit quantitative. La collecte de données qualitatives sur un programme (l'opinion d'experts, des bénéficiaires ou des administrateurs du programme...) n'est nullement incompatible avec la recherche de rigueur analytique : les données qualitatives sont en effet indispensables pour une interprétation correcte des informations numériques. De plus, des données quantitatives

qui sont censées être objectives peuvent se révéler très peu fiables, notamment si des erreurs de mesure ont été commises pour des variables importantes.

2.3.3.2. Recensement des données

Domaine d'évaluation prévisionnelle connexe à la sûreté de fonctionnement, l'évaluation des coûts de maintenance fait ainsi particulièrement appel aux avis d'expert pour estimer ici une fiabilité, là un coût. Cependant, les réponses fournies par les experts sont souvent sous des formats différents et peuvent également parfois se contredire. C'est pourquoi fixer un formalisme du recensement des données est un préalable à toute étude de données.

L'exactitude doit être la priorité de ceux qui procèdent à une évaluation comme de ceux qui la commanditent : il faut toujours être conscient de l'éventualité d'erreurs de mesure.

La plupart des évaluations utilisent donc une combinaison de techniques : enquêtes, collecte et traitement de données brutes (retours d'expériences), essais et recueils, autant de techniques qui permettent à la fois de traiter un large éventail de questions et de faire en sorte que les carences liées à une technique puissent être compensées par les points forts d'une autre.

2.3.3.3. L'usage des expertises

Les avis d'experts peuvent être utilisés à différentes fins et suivant le but recherché, la manière de les recueillir peut varier grandement. On distingue ainsi différents types de démarches.

Tout d'abord, les démarches "prévisionnelles" visent à estimer un paramètre inconnu au moment de l'enquête, celui-ci peut être de nature déterministe ou aléatoire. On peut citer comme exemple l'estimation du coût d'un nouveau composant en fonction de ses caractéristiques (paramètre déterministe) par opposition à l'estimation du MTBF d'un composant (paramètre aléatoire).

Ensuite, les démarches de type "aide à la décision" permettent, comme leur nom l'indique, de moduler des décisions en fonction d'avis d'experts dans le domaine. Cependant ces avis portent rarement sur le choix final mais plus couramment sur des informations nécessaires à la prise de décision. [\[CELE02\]](#)

Enfin, les démarches "informatives" permettent de rassembler ou de compléter les données existantes en demandant des informations aux experts. Démarche incluse dans les deux

précédentes, il est cependant utile de la distinguer car elle peut simplement servir à se faire une idée sur un thème donné (mentalité de certains sondages).

2.3.3.4. Le traitement de l'expertise

Après avoir identifié les informations nécessitant des avis d'experts, on les collecte à l'aide d'enquêtes. Pour une exploitation optimale, des méthodes multisources permettent de gérer ces données parfois imparfaites, souvent complexes et hétérogènes, et donc difficiles à formaliser.

De façon schématique, le traitement de l'expertise nécessite à la fois un modèle de représentation de la connaissance qui soit adapté aux spécificités des informations, et un outil mathématique qui permette de "fusionner" ces données en gérant les conflits entre elles.

Parmi les théories les plus répandues, on peut citer la théorie probabiliste [\[LIEU79\]](#), [\[BOVY02\]](#), celle de l'évidence [\[BERR01\]](#), ou les méthodes floues [\[BOUC98\]](#), [\[TOSCO2\]](#). Elles ont toutes pour principe de modéliser la connaissance d'une source d'informations sur un référentiel de base composé de l'ensemble des hypothèses d'intérêt [\[JANE96\]](#).

3. Les modèles paramétriques de fiabilité

3.1. Introduction

Bien souvent, une évaluation de fiabilité doit se faire avant qu'un équipement ne soit en service, voire avant qu'un prototype existe. Aussi, dès la fin des années 50, des modèles prévisionnels de fiabilité, basés sur la technologie, furent-ils établis pour les composants courants de l'industrie.

Historiquement, la théorie de la fiabilité est née et s'est développée dans le domaine des composants électroniques où son utilité est aujourd'hui largement démontrée. En raison du caractère simpliste des modèles (taux de défaillance constant), de la forte validité statistique des données observables (effectifs suffisants et essais destructifs peu coûteux) et de la standardisation des composants, les modèles prévisionnels de fiabilité ont été principalement mis en œuvre sur des systèmes électroniques. L'extension à d'autres domaines s'est en revanche heurtée à des difficultés qui ne sont pas encore totalement surmontées (standardisation des éléments, phénomènes de vieillissement encore difficilement modélisés, etc.).

Les méthodes de prévision se sont longtemps limitées à de simples bases de données. Citons ainsi la base de donnée OREDA [\[OREDO2\]](#), le modèle NPRD (*Non Electronic Reliability Data*) [\[RAC95\]](#), la banque européenne de données de fiabilité EIREDA [\[EIRE98\]](#) ou encore l'IEC 1709 [\[IEC96\]](#), outils aujourd'hui utilisés pour de nombreux sous-ensembles mécaniques et électroniques.

La prise en compte de stress, environnementaux ou autres, dans le calcul de fiabilité apporte de plus la précision indispensable à toute étude de sûreté de fonctionnement. Au travers d'une analyse bibliographique, ce chapitre montrera comment est représenté l'impact des paramètres influents sur la fiabilité des systèmes : il évoquera ainsi les principaux modèles de prise en compte des stress, avant d'exposer les modèles industriels de prévision de la fiabilité et leurs limites.

3.2. Prise en compte de l'impact des stress sur la fiabilité

3.2.1. Présentation

Les progrès technologiques quant à la fiabilité des composants électroniques font que les défaillances en environnement d'usage non stressant ne surviennent plus que très rarement.

En usage nominal, on observe pourtant des pannes pouvant avoir des conséquences économiques importantes. Dans ce cas de figure, il est raisonnable de penser que ces défaillances sont imputables à l'environnement que l'équipement rencontre, lequel est caractérisé par des stress (ensemble de conditions ou de facteurs extérieurs variables, susceptibles d'affecter le bon fonctionnement d'un composant).

Ce paragraphe décrit d'abord la nature des différents stress rencontrés par un composant, puis évoque la prise en compte de ces stress dans les modèles de fiabilité, enfin il montre les limites de ces modèles. Il s'appuie sur les travaux présentés par C.A. ZAHALCA [\[ZAHA99\]](#) dans sa thèse.

3.2.2. Nature et classification des stress

L'observation expérimentale des défaillances a conduit à une classification des stress en fonction de critères de nature, de durée de leur manifestation et d'origine.

En les classant selon leur nature, Fachler [\[FACH96\]](#) distingue quatre types de stress.

- Les stress climatiques sont représentatifs des modifications de l'environnement dans lequel se trouve un composant : il s'agit de la température et de ses variations, des phénomènes d'humidité et des phénomènes chimiques (atmosphères corrosives...).
- Les stress mécaniques comprennent les vibrations (habituellement dues à des mouvements mécaniques et pouvant produire des fissures ou des déformations), les chocs (qui se manifestent de façon ponctuelle), et les pressions et leurs variations.
- Les stress électriques sont les décharges électrostatiques ESD (relativement fréquentes et particulièrement contraignantes pour les équipements électroniques), les décharges foudre (de forte intensité mais de très courte durée) et les champs électriques forts.
- Les stress radiatifs sont peu fréquents dans l'industrie aéronautique et peuvent être évoqués dans les milieux médical, spatial ou agroalimentaire.

Gaudoin Soler [\[GAUD97\]](#) classe quant à lui les stress dans deux catégories en fonction de leur durée de manifestation : les stress ponctuels se manifestent sur une durée extrêmement courte, tandis que les stress continus le font sur de longues périodes de temps. Ces derniers peuvent être constants, variables, progressifs ou encore cycliques.

La méthodologie Prism© [\[PRIS02\]](#) distingue enfin les stress en fonction de leur origine : les stress ayant une origine environnementale (environnement climatique par exemple) et ceux liés au processus rencontrés par le produit stressé (stress représentatifs de problèmes de qualité par exemple).

Nous verrons donc comment ces différents stress sont pris en compte dans les modèles prévisionnels de fiabilité connus dans la littérature.

3.2.3. Modèle d'influence des stress environnementaux sur la fiabilité

A travers une analyse bibliographique simplifiée et permettant de comparer les principaux modèles existants, ce paragraphe présente une synthèse des travaux de modélisation de l'impact des stress sur la fiabilité. Nous y exposerons les modèles les plus classiques à savoir les modèles résistance / contrainte, de choc, multiplicatifs et les modèles de durée de vie accélérée.

3.2.3.1. Modèles résistance / contrainte

L'approche résistance / contrainte consiste à traduire un phénomène physique en un modèle mathématique. Souvent utilisée en fiabilité des systèmes mécaniques, elle se fonde sur la physique de défaillance. Le modèle le plus connu et le plus simple de cette approche consiste à considérer qu'un composant devient défectueux dès que l'intensité de la contrainte auquel il est soumis est supérieure à sa capacité à y résister (la notion de variance sur la contrainte, d'après Shooman [\[SHOO68\]](#) étant représentative d'un niveau d'impureté, d'une tension de claquage).

3.2.3.2. Modèles de choc

Les modèles de choc supposent des stress ponctuels, on comptabilise alors le nombre de stress ponctuels apparaissant dans un intervalle de temps. Le modèle d'endommagement cumulatif, proposé en 1945 par Miner [\[MINE45\]](#) puis repris par Cox [\[COX62\]](#) en 1962, est un exemple de modèle de choc : il évalue la fiabilité en fonction de l'occurrence du stress et de la probabilité $P(k)$ que le composant survive aux k premiers chocs.

3.2.3.3. Modèles multiplicatifs

Ces modèles d'impact des stress sur la fiabilité se fondent sur l'équation suivante :

$$\lambda(t) = \eta \cdot \lambda_p(t)$$

où $\lambda(t)$ est le taux de défaillance et où le facteur η représente l'impact du stress sur la fiabilité. On peut ainsi distinguer les stress à impact positif et ceux à impact négatif (pour $\eta > 1$ on a un stress défiabilisant, et pour $\eta < 1$ on a un stress utile).

Ce modèle peut considérer le facteur de stress comme une constante dans le temps, auquel cas on retrouve le modèle classique à hasard proportionnel de Cox [\[COX72\]](#), [\[SSB99\]](#) où η est fonction d'un stress $\eta(s)$.

L'approche multiplicative peut également définir l'impact des stress comme variable au cours du temps. Connue dans la littérature, cette méthode est alors basée sur des processus stochastiques, des processus ponctuels (Poisson) ou des processus Gamma. Relativement simple, elle suppose que conditionnellement au stress, les durées de vie de chacun des composants sont indépendantes.

3.2.3.4. Modèles de durée de vie accélérée

Développés dans le cadre de test en fiabilité de composant, ces modèles d'impact des stress se fondent sur des facteurs d'accélération de la détérioration : les résultats obtenus par des sur-stress doivent en effet permettre d'apprécier le comportement en fiabilité sous un stress nominal. Leur intérêt réside dans le fait qu'on est mieux à même de prendre en compte des stress variables.

À ce jour, de nombreux travaux ont été publiés sur le sujet mais nous ne retiendrons que les plus connus :

- le modèle log linéaire, principalement utilisé pour représenter la fatigue des composants électroniques
- le modèle d'Arrhenius, ayant pour origine les travaux d'Arrhenius (Prix Nobel de chimie en 1889) sur la vitesse des réactions chimiques en fonction de la température [\[LEFI94\]](#) ; il est aujourd'hui utilisé pour des représentations de durée de vie accélérée par un stress thermique
- le modèle de puissance, utilisé dans le cas de stress électriques ou mécaniques pour des matériaux électriques (modèle de Levenbach).

3.2.4. Bilan sur l'influence des stress

La littérature concernant l'impact des stress environnementaux sur la fiabilité des équipements est pléthorique. La prise en compte des variations de température, l'impact des vibrations sur la fiabilité ou la modélisation de stress électriques destructeurs d'équipement... l'impact de tous ces stress physiques appliqués à des sous-ensembles électroniques semble par conséquent modélisable.

Cependant, la création d'un modèle prévisionnel de fiabilité passe par le calibrage de chacun des paramètres présentés ci-dessus.

De plus, de nombreux travaux montrent que la seule analyse de l'impact des stress physiques, nominaux ou accidentels, ne peut justifier les prévisions de fiabilité. Il s'avère alors indispensable de prendre en compte, dans la prévision de fiabilité, les dimensions de qualité des processus et d'impact de l'usage tout au long du cycle de vie.

Après avoir exposé les différents modèles prévisionnels de fiabilité des composants électroniques et leurs limites, le paragraphe suivant montrera le besoin de création du modèle FIDES.

3.3. Les modèles prévisionnels de fiabilité des composants électroniques et leurs limites

3.3.1. Prédiction de la fiabilité des systèmes électroniques

La période actuelle est sans conteste celle de l'informatique et de l'électronique, qu'on rencontre dans des domaines aussi variés que l'électroménager, la domotique, le multimédia, les systèmes de transport, l'automobile, le militaire, etc.

Historiquement, l'électronique était contestée en raison de sa durée de vie limitée, c'est pourquoi de nombreuses méthodes de prévision de la fiabilité ont vu le jour au début des années 80, méthodes facilement réalisées en raison du taux de défaillance assimilable au modèle en baignoire (étant considéré comme une constante une fois la période de déverminage passée, le "Lambda" des composants électroniques est donc indépendant du temps).

La majorité de ces méthodes sont issues du domaine militaire ou des technologies de pointe, la fiabilité est en effet rarement considérée comme importante dans des secteurs d'activité industrielle plus classiques. Ce dernier constat est principalement lié au fait que l'électronique

y devient de plus en plus robuste et ne pose donc plus de problème sur sa durée de vie, les dates de garantie étant dépassées lorsqu'apparaissent la plupart des défaillances.

Ce chapitre présentera un état de l'art des méthodes prévisionnelles d'évaluation de fiabilité : il se focalise sur les avantages et inconvénients constatés pour chacune d'elles, afin de proposer des axes d'amélioration.

3.3.2. Le MIL HDBK 217 F

Dans le domaine de la prévision de fiabilité des systèmes électroniques, le Military Hand Book 217 [\[RAC97\]](#) fait office de référent quasi normatif. On expose ici ce document, ses modèles et leurs limites : on analyse en effet sa construction et son évolution, afin de montrer pourquoi il est aujourd'hui considéré comme obsolète.

3.3.2.1. Contexte de cette méthode

Edité par le Reliability Analysis Center RAC (organisme traitant de la fiabilité sous l'égide du Ministère de la Défense des Etats-Unis) et le Laboratoire de Rome à Griffiss, commercialisé et utilisé dans la plus grande part des industries, le MIL HDBK 217 est devenu quasiment normatif dans l'aéronautique.

En 1960, le but originel du MIL-HDBK-217 était de garantir le fonctionnement de composants électroniques (tels que les transistors, les diodes, les résistances, les condensateurs et les commutateurs) pendant les périodes de temps définies par des exigences spécifiées. Ayant évolué, il permet depuis le calcul de prévisions de fiabilité pour la plupart des composants usités ; il est de plus employé dans la majorité des études de sûreté de fonctionnement.

3.3.2.2. Présentation générale de la méthode et des modèles

On peut utiliser le MIL HDBK 217 lorsqu'on dispose de suffisamment d'éléments descriptifs du design de l'équipement tels que les listes de composants et les environnements rencontrés. Les modèles couvrent les principales familles technologiques, le principe de calcul du taux de panne d'une carte étant la somme des taux de défaillance de chacun des composants qui la constitue.

Les facteurs d'accélération représentant l'impact des contributeurs de défaillances sont décrits par les paramètres de spécification de qualité, d'environnement d'usage et de complexité technologique.

Associée à des niveaux formels de qualité des composants militaires, la *Quality Part* représente l'impact du niveau de qualité des fournisseurs de composants sur la fiabilité, mais également l'impact des processus de conception et de production des sous-ensembles de manière implicite. Ce paramètre étant difficile à renseigner, le modèle montre de ce fait des limites.

Les environnements d'usage et les profils d'emploi sont quant à eux décrits au travers de tableaux de stress standards : on rencontre par exemple un environnement "avion d'arme" ou un environnement "naval". Particulièrement opaque, l'impact de ces conditions ne peut être ajusté dans le cas d'environnement nouveau, ce qui une fois encore montre les limites de cette méthode.

Enfin, chacun des composants est caractérisé par des notions de complexité technique au moyen de paramètres tel que le nombre de broches d'un circuit imprimé.

3.3.2.3. Avantages et limites d'une telle méthode

Une reconnaissance internationale et un statut quasiment normatif sont les avantages indiscutables du MIL HDBK 217, néanmoins cette méthodologie existe depuis de nombreuses années et montre aujourd'hui d'importantes limites.

En premier lieu, ce recueil se fonde sur un retour d'expérience qui date (au mieux) des années 1980, or les technologies ont considérablement progressé depuis. La vitesse de cette évolution est décrite de façon claire par la loi de Moore, selon laquelle la capacité des circuits intégrés double tous les 18 mois. Il en découle que les caractéristiques des composants récents ne sont pas prises en compte par le MIL HDBK 217. De plus, de nouvelles technologies étant apparues depuis la dernière édition de ce recueil, elles ne peuvent pas être traitées de façon satisfaisante.

En ce qui concerne la modélisation de fiabilité, on peut ensuite relever des insatisfactions pour certains composants (c'est typiquement le cas des dispositifs électromécaniques) ou pour certains cycles de vie (le MIL-HDBK-217 ne traitant pas la modélisation des situations de non fonctionnement).

En outre, créée pour un usage militaire, la 217 prend mal en compte les composants de gamme non militaire (composant avec boîtier plastique par exemple).

Enfin, l'impact des processus n'est pris en considération dans ces modèles que de façon implicite : cette méthode est ainsi incapable de tenir compte des changements concernant les règles d'approvisionnement des composants ou les règles de conception des cartes.

3.3.3. Modèles RDF

Edité par l'Union Technique de l'Electricité et de la Communication, le recueil RDF 2000 (ou UTEC 80-810) est la mise à jour récente du RDF93 [UTECCOO]. Il est décrit comme étant un modèle universel pour la prévision de fiabilité des composants, cartes et équipements électroniques. Nous présenterons dans ce paragraphe ce modèle français et ses limites.

3.3.3.1. Contexte de cette méthode

Ce guide de calcul de la fiabilité des cartes électroniques et optiques traite directement de la prise en compte des contraintes thermiques subies par les cartes en fonction des profils de mission rencontrés. Ces modèles s'appliquent au fonctionnement permanent, aux cyclages marche/arrêt et au stockage.

Le recueil donne les éléments nécessaires au calcul des taux de défaillance des composants électroniques reportés sur une carte. Les données de fiabilité évoquées proviennent de bases de données de retour d'expérience, elles-mêmes issues d'exploitation dans quatre types d'environnement :

- l'environnement "sol fixe protégé" correspond à l'utilisation au sol d'un matériel protégé des intempéries avec un fonctionnement permanent ou non.
- l'environnement "sol fixe non protégé"
- l'environnement "avion favorable" (en cabine pour un équipement électronique)
- l'environnement "sol mobile favorable" (en voiture ou en train en habitacle).

Les matériels correspondants proviennent en grande partie de l'automobile ou des systèmes de radio. Des traitements statistiques ont alors permis de modéliser les autres environnements existants, comme par exemple les systèmes avioniques.

3.3.3.2. Modèle d'évaluation de fiabilité

Le RDF2000 considère que le taux de défaillance des composants et sous-ensembles électroniques est constant au cours du temps (il apparaît en effet que cette hypothèse simplificatrice est en réalité tout à fait réaliste). Les calculs prévisionnels de fiabilité présentés excluent donc les périodes de jeunesse et de vieillesse.

Par contre, ce modèle se limite à l'aspect intrinsèque des défaillances, il exclue donc les surcharges résiduelles, les stress non nominaux, et surtout il ne tient pas compte des défaillances extrinsèques dues à des erreurs de conception, de choix ou d'utilisation.

Les modèles paramétriques de ce recueil se fondant sur de nombreux facteurs, on en retiendra les principaux :

- l'influence de la température, adaptée en fonction de la technologie de chacun des composants
- l'influence de contraintes particulières en utilisation (contraintes électriques)
- l'influence de la tension appliquée aux bornes du composant
- l'influence de l'environnement mécanique et climatique dans lequel se trouve le composant (ici représenté par des standards)
- le profil de mission, décrit à travers ses phases d'usage (phase de fonctionnement, phase de stockage...)
- la complexité technologique du composant ou sous-ensemble.

A partir de ces paramètres, des modèles spécifiques de fiabilité sont développés pour chacune des familles de composants couverts par la méthodologie.

3.3.3.3. Limites du RDF 2000

A l'opposée du MIL HDBK 217, l'UTE C 80-810 souffre d'une reconnaissance insuffisante de la part de la communauté scientifique et industrielle internationale, en particulier parce que les conditions de validation et de test du recueil ne sont pas bien connues. En effet, la pertinence des modélisations proposées n'est pas acquise pour certains environnements pouvant être prédominants, tels que le stockage ou les environnements aéroportés sévères.

De plus, les mécanismes de défaillance liés aux chocs, aux vibrations, aux contaminations chimiques et à l'humidité, n'ont pas été retenus et la fiabilité prédite se limite à la partie intrinsèque (les risques liés à une mauvaise conception ou à l'utilisation de lots de composants incorrects sont de ce fait exclus).

La tendance actuelle est donc à une meilleure analyse de l'impact des processus sur la fiabilité, comme le montre le paragraphe suivant.

3.3.4. Modèles PRISM

Produit logiciel développé par le RAC (Reliability Analysis Center) aux Etats-Unis, PRISM présente une approche novatrice de la prévision de fiabilité avec une vision système, centrée sur l'électronique. [\[PRIS02\]](#)

Développé dans le but de remplacer le modèle Mil HDBK 217, le concept PRISM est basé sur une multitude de facteurs d'influence. Son originalité réside dans la prise en compte, pour évaluer la fiabilité, de la qualité du cycle de développement du produit. Cette nouvelle approche se traduit par un questionnaire concernant le processus de conception. [\[DYLI97\]](#)

Cependant PRISM reste un produit commercial et même si cette méthode s'avère bonne, sa reconnaissance, son déploiement et son évolution découleront de son succès commercial : à ce jour, PRISM n'a pas de reconnaissance internationale, son déploiement n'est que très mineur, et l'expérimentation faite montre d'importantes lacunes.

Tout d'abord, de nombreuses familles de composant ne sont pas modélisées. C'est en particulier le cas pour les familles suivantes (qu'on trouve dans le MIL-HDBK-217 ou dans l'UTE C 80-810) :

- cartes imprimées, MCM, hybrides
- inductances, transformateurs
- optoélectronique (optocoupleurs...)
- composants piézoélectriques (quartz...)
- relais
- switchs
- connecteurs
- afficheurs et voyants.

Censés mesurer la qualité de la conception et du cycle de développement global du système étudié, les questionnaires ne peuvent en outre être utilisés en l'état. En effet, il est impensable de s'en servir en France car ils sont trop révélateurs d'un esprit anglo-américain : pour s'en persuader, citons la question "Quel est le pourcentage des membres d'une équipe de développement ayant un diplôme correspondant à quatre années d'études supérieures ?"

Enfin, en raison de certains aspects novateurs (comme la prévision de fiabilité concernant le logiciel), PRISM demande des validations particulièrement importantes.

Bien que conçu sur des démarches intéressantes, ce produit reste particulièrement opaque pour son utilisateur ce qui, outre les limites énoncées précédemment, est un argument en défaveur de son utilisation et de sa généralisation.

3.3.5. Autres méthodologies

3.3.5.1. IEC 1709

La norme IEC 1709 donne des recommandations quant à l'emploi des taux de défaillance destinés aux prévisions de fiabilité de composants d'équipement électronique. Elle définit le calcul des facteurs d'accélération pour comparer, dans des conditions uniformes, des taux de défaillances d'origines diverses. [\[IEC96\]](#)

En 1997, cette note a fait l'objet de commentaires de THOMSON-CSF Technologies & Méthodes visant à argumenter la position française de l'UTE dont la volonté était de faire de ce document un guide et non une norme.

Peu usitée, l'IEC 1709 souffre de lacunes conceptuelles, de faiblesses et de complications inutiles : ce document se limite en effet à la présentation de modèles d'accélération. La normalisation de tels modèles physiques n'est, par essence, que le reflet d'un état donné de connaissances : la validité des modèles présentés n'a pas été démontrée.

3.3.5.2. Autres méthodes prévisionnelles de fiabilité

Des recueils de données d'équipementiers électroniques existent également, à savoir

- British Telecom Handbook Reliability Data
- recueil de Ericsson
- recueil de BellCore (Canada).

Ils sont cependant (au choix) obsolètes, dédiés à des emplois spécifiques (en particulier pour les télécommunications), ou encore inaccessibles.

Pour estimer les fiabilités en stockage, plusieurs industriels ont construit leur propre modèle soit au niveau famille de composants (cas de Thalès), soit au niveau système (cas de MBDA). Il existe également des méthodologies de recalage des prévisions effectuées avec le MIL-HDBK-217.

Or aucune de ces méthodes n'apporte une réponse globale aux questions posées par les besoins d'évaluation et de construction de la fiabilité des systèmes électroniques.

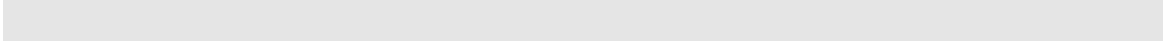
3.3.6. Bilan sur les méthodes actuelles

Pour évaluer la fiabilité des systèmes électroniques, de nombreuses méthodes existent à ce jour ; chacune montre cependant des limites.

Méthodologie la plus employée, le MIL HDBK 217 n'est pas (ou plus) un outil discriminant d'estimation de la fiabilité. Il s'avère très pessimiste dans certains cas et son approche ne permet pas un usage efficace comme outil de construction de la fiabilité.

À l'heure actuelle, aucun successeur reconnu du MIL HDBK 217 n'existe. Dans chacune des méthodologies présentées apparaissent en effet des lacunes majeures : que les limites concernent les environnements traités, l'évaluation des facteurs de processus ou l'estimation de la fiabilité prévisionnelle des sous-ensembles, il apparaît que les méthodes existantes ne fournissent pas un support efficace à l'évaluation de fiabilité.

De ce bilan se dégage donc l'ambition du projet FIDES : proposer une méthodologie, reconnue et utilisable par tous, qui couvre l'ensemble des besoins industriels en matière de fiabilité prévisionnelle des composants et sous-ensembles.



4. FIDES : un nouveau modèle prévisionnel de fiabilité

4.1. Introduction

4.1.1. Contexte d'étude

Le projet FIDES est un contrat DGA (Direction Générale de l'Armement) : il porte sur le développement d'une nouvelle méthodologie qui a pour but la prévision et la construction de la fiabilité des équipements électroniques. Son besoin est né de l'obsolescence du standard MIL HDBK 217 du *Department Of Defense* des USA et de l'absence d'autre solution émergente. L'ambition de FIDES est donc de devenir une nouvelle référence internationale. Le consortium FIDES qui développe ce projet comprend Airbus France, Eurocopter, GIAT Industries, Thales Research & Technology, Thales avionics, Thales Airbone Systems, Thales Underwater Systems et MBDA Missile Systems.

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de cette thèse (contrat CIFRE entre le laboratoire LTDS et Eurocopter) dans la mesure où les prévisions de coûts de maintenance nécessitent une évaluation prévisionnelle de fiabilité. En tant que responsable de FIDES pour Eurocopter, mes recherches ont principalement porté sur l'étude de l'impact des processus dans la fiabilité des systèmes.

4.1.2. Performances liées à la fiabilité et à sa spécification

En fiabilité, l'expression de besoin est bien souvent inadaptée au besoin réel de l'utilisateur. En effet, la spécification de la fiabilité se limite encore fréquemment à un simple MTBF, le plus souvent sans que le détail des conditions de calcul de cette valeur soit précisé. Cette situation s'explique facilement : le MTBF est une donnée apparemment facile à manipuler parce qu'il s'exprime en heure, de plus il semble simple à mesurer par retour d'expérience.

En réalité, le MTBF n'est pas en soi une performance qui intéresse l'utilisateur, mais une donnée intermédiaire qui permet différents calculs. Il est souvent interprété, de façon erronée, comme une durée de vie ou une durée de garantie, ce qui prouve qu'il ne s'agit pas d'un concept si simple.

Le temps n'est pas nécessairement la bonne unité pour exprimer la fiabilité, la distance parcourue ou le nombre de cycles le sont tout autant. En outre, des lois d'apparition de défaillances, donnant un résultat plus complexe qu'un MTBF constant, peuvent être nécessaires (dans certains cas, l'UTE C 80-810 propose la prédiction d'une durée de vie).

La comparaison d'un MTBF, mesuré dans des conditions opérationnelles, avec une estimation prévisionnelle reste très difficile dès lors que les conditions d'emploi ne sont pas absolument contrôlées.

Enfin, pour que la fiabilité devienne un élément directeur du développement d'un produit, il faut que sa spécification exprime un besoin laissant des latitudes pour l'obtenir.

Liées à la fiabilité, les performances attendues sont de plusieurs natures :

- nombre de pannes attendues sur une période (prévision des quantités de rechange pour assurer les réparations)
- disponibilité du matériel (par exemple, proportion du temps où le matériel est réputé bon)
- probabilité de bon fonctionnement du matériel (réussite de la mission ou niveau de sécurité).

D'autres performances sont des conséquences indirectes de la fiabilité. Plus nombreuses, elles sont difficiles à lister de façon exhaustive. Les principales sont :

- la politique de maintenance
- le coût global de possession
- les moyens de soutiens
- la durée de vie.

FIDES devra donc permettre d'évaluer ces performances ou de fournir les entrées nécessaires à leur évaluation.

Le chapitre suivant montre comment nous avons réalisé cette nouvelle méthodologie d'évaluation de la fiabilité. Nous commencerons par décrire la genèse de ce modèle, puis nous présenterons le modèle FIDES dans son ensemble avant de détailler la quantification de l'impact des processus sur la fiabilité. Nous évoquerons également l'utilisation de ces modèles et leur devenir.

4.2. Genèse du modèle FIDES

4.2.1. Domaine d'application

FIDES est une méthodologie de prévision de fiabilité pour les sous-ensembles électroniques, cependant nous pouvons limiter son domaine d'application aux définitions suivantes.

Tout d'abord, en matière de périmètre de technologies couvertes par ces modèles, FIDES se limite à l'étude des COTS (*Commercial Off The Shelf*). Il s'agit d'articles achetés sur catalogue, disponibles sur le marché domestique ou étranger (selon une référence

fournisseur), et pour lesquels le client n'a aucune maîtrise de la définition ni de la production. Ces articles peuvent être modifiés, arrêtés de fabrication, arrêtés de maintenance sans qu'on puisse s'y opposer. Un seul fournisseur ou plusieurs fournisseurs peuvent exister pour un même article, ce peut être un composant (non réparable : aucun soutien logistique autre que le réapprovisionnement n'est envisageable) ou un sous-ensemble composé (article réparable par échange de composants le constituant).

Pour les besoins de l'étude FIDES, il a été convenu que cette dénomination couvre le domaine des produits à usage commercial allant du composant électronique élémentaire (COTS composant) au module ou sous-ensemble électronique à fonction bien définie (COTS sous-ensemble). Le périmètre inclut les cartes électroniques et les disques durs, et exclut tous les équipements non explicitement inclus, en particulier les équipements constitués à fonctionnement autonome (PC par exemple) et tous les logiciels.

FIDES se devait ensuite de traiter l'ensemble des contributeurs de défaillance, qu'ils soient relatifs aux qualificatifs "intrinsèque" ou "extrinsèque". Cependant les définitions d'intrinsèque et d'extrinsèque varient selon que le point de vue choisi est celui du fabricant de composant, de l'équipementier électronique ou de l'utilisateur. La position adoptée par FIDES correspond à celle de l'équipementier électronique.

Ainsi les définitions retenues sont les suivantes :

- Est intrinsèque ce qui est propre au composant lui-même, ou à l'emploi auquel il est destiné et pour lequel l'industriel qui utilise le composant n'a pas de responsabilité. On ne peut agir sur ce qui est intrinsèque qu'indirectement par l'intermédiaire de son client ou de ses fournisseurs.
- Est extrinsèque ce qui est lié à la conception, à la fabrication voire à l'usage final du produit dans lequel entre le composant, et sur lequel l'industriel qui utilise ce composant peut et doit agir.

Ces notions de "intrinsèque" et "extrinsèque" ne sont pas favorablement associées aux concepts de "mécanisme de défaillance" ou de "contributeur à la fiabilité". En effet, il apparaît que l'essentiel des mécanismes de défaillance, sinon tous, est intrinsèques alors que l'essentiel des contributeurs à la fiabilité, sinon tous, est extrinsèque. Cette situation crée de fortes ambiguïtés sur l'interprétation de ces notions. Les qualificatifs "intrinsèque" et "extrinsèque" (au composant lui-même ou à sa destination finale) sont donc par la suite associés de préférence à la fiabilité elle-même ou à la cause de défaillance.

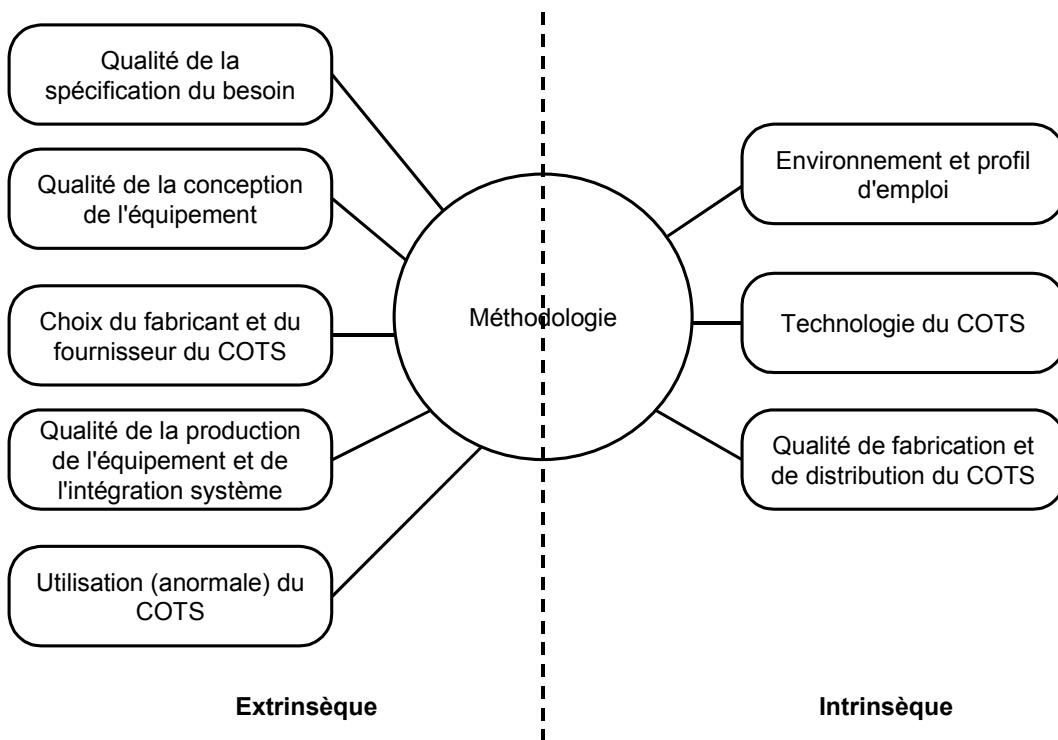


Fig. 52 : Fiabilité intrinsèque et extrinsèque

4.2.2. Les contributeurs à la fiabilité

L'objectif est ici d'identifier les mécanismes de défaillance propres aux composants et sous-ensembles, ainsi que les contributeurs à la fiabilité associés à ces mécanismes. Les contributeurs (activateurs ou réducteurs de stress) sont identifiés pour chaque étape du cycle de vie et chaque famille technologique. Ce travail d'identification et de description des mécanismes et contributeurs associés permet de construire des modèles afin de bâtir la méthode d'évaluation de la fiabilité.

L'identification des mécanismes de défaillance est effectuée à partir de la connaissance de la physique des défaillances et du retour d'expérience des industriels.

L'idée de départ du projet FIDES consistait à classer les contributeurs en intrinsèques et extrinsèques dans le but de construire les modèles respectifs. Il est apparu rapidement que cette notion prêtait à confusion et n'était pas indispensable au déroulement des tâches.

N'ayant pas défini "à quoi le contributeur était intrinsèque", la frontière entre les deux n'était pas claire et donc différente suivant la perception des intervenants de l'étude. D'autre part, pour certains mécanismes, un même contributeur était tantôt intrinsèque tantôt extrinsèque :

ainsi, la température peut agir nominalement sur un mécanisme dans la phase d'utilisation (intrinsèque) et de façon anormale dans des dérives de process (extrinsèque).

La démarche retenue consiste donc à lister et à classer les contributeurs génériques en quatre grandes familles :

- les attributs technologiques (sensibilité de la technologie)
- les contributeurs - stress nominaux
- les contributeurs - stress accidentels
- les contributeurs - processus.

4.2.2.1. Les attributs technologiques

Les descriptifs technologiques des composants ne sont pas réellement une contribution à la fiabilité puisque la technologie n'agit pas sur le mécanisme de défaillance mais existe de fait. Néanmoins, une technologie est plus ou moins sensible à l'apparition d'un mécanisme de défaillance, tout comme certaines caractéristiques (complexité, dimensions, valeur nominale, packaging ...) peuvent contribuer au résultat de fiabilité.

Les attributs technologiques génériques ne pouvant être définis, ils ont donc été analysés famille par famille par des experts composant du groupe FIDES.

4.2.2.2. Les contributeurs - stress nominaux

Il s'agit des contributeurs à la fiabilité dont les effets sont attendus vis-à-vis de la mission (conditions nominales spécifiées et pour lesquelles est conçu le matériel).

On peut citer les contributeurs d'environnement climatique (température haute et basse d'utilisation, nombre de cycles thermiques, humidité et pluie, brouillard salin et pollution atmosphérique, sable, poussière, moisissure, pression ou variation de pression, givre, etc.), les contributeurs d'environnement mécanique (chocs, vibrations...) et les contributeurs d'environnement électrique (tension et courant d'utilisation, fréquence...).

4.2.2.3. Les contributeurs – stress accidentels

Les stress accidentels correspondent aux évènements inattendus, dits "induits", qui défilabilisent : au cours de son cycle de vie, un équipement électronique rencontre en effet plus ou moins de stress extérieurs pour lesquels il n'a pas été spécifié (il peut s'agir de fausses

manipulations ou d'évènements extérieurs). Ce sont les décharges électrostatiques (ESD), les chocs électriques (EOS), les surcharges thermiques, les chocs, les torsions et flexions, les décharges foudre, etc. On peut les regrouper dans trois grandes familles :

- overstress thermiques
- overstress mécaniques
- overstress électriques

4.2.2.4. *Les contributeurs – processus*

Ces contributeurs de fiabilité représentent l'impact sur la fiabilité de chacun des processus intervenant dans les différentes étapes du cycle de vie des produits qu'ils contribuent positivement ou négativement à la fiabilité. Ils peuvent être sous la maîtrise de différents intervenants : le fabricant de composant ou de sous-ensemble, l'industriel produisant l'équipement ou le système, et le client final. On peut les classer en sept grandes familles :

- "Process fabricant", comme par exemple la maîtrise des procédés de fabrication des composants
- "Fournisseur", par exemple les conditions de stockage
- "Spécification d'emploi" qui représente la bonne prise en compte des besoins lors de la spécification du produit
- "Conception" : le produit est-il bien conçu ?
- "Production équipement" : les procédés sont-ils maîtrisés ?
- "Intégration système": lors de l'intégration de l'équipement dans son système final, les précautions d'usage ont-elle été prises ?
- "Utilisation" qui décrit l'impact de l'utilisation sur la fiabilité du système.

L'impact particulièrement fort de ces contributeurs sur la fiabilité fera l'objet d'un chapitre à part entière.

4.3. **Le modèle FIDES**

L'objectif de FIDES est de permettre une évaluation réaliste de la fiabilité des équipements électroniques, y compris dans les systèmes qui rencontrent des environnements sévères (aéronautique, électronique industrielle, transport...).

Ses atouts principaux résident dans l'existence de modélisations tant pour les composants Electriques, Electroniques, Electromécaniques, que pour les autres types de COTS (*Commercial Off The Shelf*) tels que les cartes électroniques ou certains sous-ensembles.

La méthodologie FIDES est fondée sur la physique des défaillances et étayée par des analyses de données d'essai, de retours d'expérience et de modélisations existantes. Elle se distingue ainsi des méthodes classiques, développées principalement à partir d'exploitations statistiques de retours d'expérience. Menée avec une vocation de prise en compte exhaustive des facteurs influant sur la fiabilité, cette démarche doit éviter que les résultats de fiabilité prédits ne soient influencés par les domaines industriels des concepteurs de la méthodologie.

Les prévisions de fiabilité données par la méthodologie FIDES sont des taux de défaillance notés λ . Il est certain qu'au niveau microscopique, très peu de mécanismes de défaillance répondent strictement à une loi d'apparition de type "taux constant". Cependant, beaucoup de mécanismes de défaillance, bien que cumulatifs donc croissant dans le temps, présentent une telle dispersion qu'ils sont assimilables à une constante sur les périodes considérées. La multiplicité et la diversité des composants, même sur une seule carte, conduisent à un cumul proche d'une constante, et la différence de vieillissement entre les équipements d'un même système ou d'un parc conduit à l'obtention d'un taux constant pour l'observateur de niveau système. Pour ces raisons, l'utilisation d'un taux de défaillance constant reste l'approche la plus pertinente pour estimer la fiabilité d'un système.

4.3.1. Structure générale

Le modèle général FIDES se base sur l'équation ci-dessous :

$$\lambda = \left(\sum_{Contribution_physiques} \right) \cdot \left(\prod_{Contributions_processus} \right)$$

où $\sum_{Contribution_physiques}$ est un terme de construction principalement additive qui représente les contributions physiques et technologiques à la fiabilité,

et $\prod_{Contributions_processus}$ est un terme multiplicatif qui représente l'impact du processus de développement, de production et d'exploitation sur la fiabilité.

En pratique, cette équation devient :

$$\lambda = \lambda_{Physique} \cdot \pi_{Part_manufacturing} \cdot \pi_{Process}$$

où $\lambda_{Physique}$ représente la contribution physique,

$\pi_{Part_manufacturing}$ traduit la qualité et la maîtrise technique de fabrication du COTS et

$\pi_{Process}$ la qualité et la maîtrise technique du processus de développement, de fabrication et d'utilisation du produit contenant le COTS.

FIDES prédit des taux de défaillance horaire mais basés sur la prise en compte d'un profil d'emploi annuel. Ceux-ci ne sont pas exprimés par heure de fonctionnement mais par heure calendaire et pour cette raison, les lambda ne peuvent pas être comparés directement à des résultats issus du MIL HDBK 217.

Le modèle général FIDES permet le calcul des taux de défaillance des COTS et équipements avant toute considération de redondance ou d'architecture : le taux de défaillance global de l'équipement électronique s'obtient en faisant la somme de l'ensemble des taux de défaillance de chacun des éléments le constituant.

$$\lambda_{\text{équipement}} = \left(\sum_{COTS} \lambda_{COTS} \right)$$

ou sous une autre forme :

$$\lambda_{\text{équipement}} = \left(\begin{array}{l} \sum_{Composants} \lambda_{Composants} \\ + \sum_{PCB} \lambda_{PCB} \\ + \sum_{Cartes} \lambda_{Cartes} \\ + \sum_{S-E_autres} \lambda_{Sous-ensembles_autres} \end{array} \right)$$

4.3.2. Analyse de la répartition des pannes

Une fois sa structure définie, la construction du modèle de fiabilité FIDES passe par l'analyse des données généralisées des retours d'expérience (composants et sous-ensembles électroniques, ceci dans le but de connaître l'influence relative de chacun des paramètres évoqués précédemment.

On peut donc présenter de cette analyse les résultats suivants.

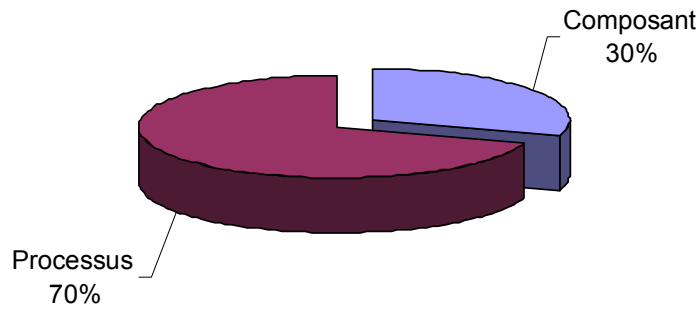


Fig. 53 : Analyse de la répartition des défaillances entre causes composant et causes processus

La figure 53 montre que dans le cas d'application industrielle de hautes technologies (telles que l'aéronautique), près de 70% des défaillances sont dues à des contributeurs de processus. L'étude démontre de plus que l'impact total des facteurs de processus est variable en fonction du secteur d'activité. L'analyse de la variation de ce facteur de processus n'a cependant pu être réalisée que chez des industriels de défense, de l'aéronautique et de l'automobile. Elle permet d'estimer l'impact des processus entre 30 et 80% de la fiabilité totale d'un équipement.

4.3.3. Les modèles de physique des défaillances

La modélisation de la contribution physique aux défaillances se décompose elle-même en différentes sous-contributions selon le modèle ci-dessous :

$$\lambda_{Physique} = \left[\sum_{Contributions_Physiques} (\lambda_0 \cdot \Pi_{accélération}) \right] \cdot \Pi_{induit}$$

où

- le terme entre crochets représente les contraintes nominales (cet élément du modèle général englobe le taux de défaillance de base attribué à chacun des composants, la contribution liée aux caractéristiques de la technologie employée, ainsi que les facteurs d'accélération permettant d'affecter à l'équipement électronique les contraintes physiques subies par ce dernier lors de son utilisation opérationnelle)
- π_{induit} représente la contribution des facteurs induits (appelés aussi surcharges accidentelles ou overstress) inhérents à un domaine d'application
- λ_0 est le taux de défaillance de base, également représentatif des caractéristiques de la technologie
- $\Pi_{Accélération}$ est un facteur d'accélération traduisant la sensibilité aux conditions d'utilisation.

Ces facteurs, en particulier le $\Pi_{\text{accélération}}$, sont déclinés pour chaque contrainte physique. Est appelée contrainte physique toute contrainte nominale appliquée à l'équipement lors de son utilisation opérationnelle, y compris pour les aspects relevant de la conception. Les contraintes physiques sont regroupées en différentes familles :

- | | |
|--|--|
| - Thermique : $\Pi_{\text{Thermique}}$ | - Mécanique : $\Pi_{\text{Mécanique}}$ |
| - Electrique : $\Pi_{\text{Electrique}}$ | - Humidité : Π_{RH} |
| - Cyclage thermique : Π_{TCy} | - Chimique : Π_{Chimique} |

Leurs contributions sont additives.

4.3.3.1. Surcharges accidentelles : π_{induit}

Les facteurs induits considérés sont d'origine mécanique (MOS), électrique (EOS) et thermique (TOS). Le facteur π_{induit} représente la contribution des surcharges accidentelles non répertoriées comme telles. Il se calcule pour chacune des phases du profil de mission et se présente sous la forme :

$$\Pi_{\text{induit}-i} = e^{\delta_3 \left(\frac{C_{\text{OverStress}}^m}{30} \right)_i}$$

où :

- i est l'indice relatif à chacune des phases du profil de mission
- δ_3 est un facteur de corrélation qui détermine la plage de variation du facteur π_{induit}
- $C_{\text{Overstress}}$ représente le facteur d'overstress
- l'exposant m étant spécifique à la famille de COTS traitée.

La plage de variation du facteur π_{induit} est de 1 (pour le meilleur cas) à 75 (pour la pire exposition aux overstress).

4.3.3.2. Le facteur $\pi_{\text{part manufacturing}}$

Le facteur $\pi_{\text{part manufacturing}}$ est un facteur représentatif de la qualité du composant. La méthode d'évaluation se décline selon la nature du COTS considéré (composant électronique actif ou passif, COTS cartes, autres COTS sous-ensembles).

Il est de la forme
$$\Pi_{\text{Part_Manufacturing}} = e^{\delta_1 \cdot \left[\frac{(AQ_{\text{fabricant}} + AQ_{\text{composant}} + AF_{\text{composant}}) \times \epsilon}{36} \right]}$$

La méthode d'évaluation prend en compte des critères d'assurance qualité du fabricant ($AQ_{\text{fabricant}}$), d'assurance qualité du composant ($AQ_{\text{composant}}$), et également l'expérience que l'industriel a de son fournisseur de composants (ε).

δ_1 est un facteur de corrélation qui détermine l'amplitude de l'impact du $\Pi_{\text{Part_Manufacturing}}$ sur la fiabilité du COTS. La plage de variation du facteur $\pi_{\text{Part manufacturing}}$ est de 1 (pour le meilleur composant) à 2 (pour le pire).

4.3.3.3. Le facteur π_{Process}

Bien que détaillé par la suite, nous pouvons présenter le facteur π_{Process} comme un facteur représentatif de la qualité et de la maîtrise technique de la fiabilité dans le cycle de vie du produit.

Il est de la forme : $\pi_{\text{Process}} = e^{\delta_2(1-\text{Process_Grade})}$

où le Process_grade est la note reflétant cette maîtrise processus, et δ_2 un facteur de corrélation déterminant la plage de variation du facteur π_{Process} . Par expertise, la plage de variation du facteur π_{Process} est définie de 1 (pour le meilleur processus) à 8 (pour le pire).

5.1. L'impact des processus sur la fiabilité

5.1.1. Présentation

Dubitanto ad veritatem pervenimus.

Cicéron

Les facteurs de processus (désignés par π_{Process}) ont un impact majeur sur la fiabilité des équipements électroniques, on leur doit en moyenne près de 70% des pannes. Pour cette raison, nous nous sommes attachés à décrire un modèle permettant d'évaluer de manière prévisionnelle l'impact des processus rencontrés par l'équipement électronique.

Par un jeu de questions-réponses sur le développement, la fabrication et l'exploitation du produit, l'idée est donc de quantifier le "niveau de qualité des processus" par rapport à un état de l'art sur la mise en œuvre des produits électroniques. La démarche de réponse à ces questionnaires est formalisée dans un guide d'audit.

Nous présenterons dans ce chapitre les méthodes et démarches d'étude aboutissant à l'évaluation de l'impact des processus sur la fiabilité des équipements électroniques. Nous montrerons comment la définition du cycle de vie des produits et l'analyse des contributeurs de panne permettent alors la réalisation d'un audit fiabilité.

5.1.1.1. Cycle de vie des équipements électroniques

L'analyse de l'impact sur la fiabilité des processus pour un équipement électronique ne peut se faire sans une description précise de son cycle de vie, aussi avons-nous décomposé ce dernier en cinq grandes phases allant de la spécification du produit à son usage et sa maintenance.

Pour affiner la description de chacune, on liste les activités principales menées dans ces phases. Cette démarche est étendue à des niveaux inférieurs jusqu'à la sous-tâche indivisible. Il faut noter que les activités qui composent une phase d'un niveau supérieur ne sont pas complètement assimilables à des sous-phases car leur localisation temporelle peut être complexe.

Pour plus de compréhension, le cycle de vie est présenté des points de vue de l'industriel systémier ou de l'équipementier électronique, par opposition avec les points de vue de l'utilisateur et du fabricant de composant.

On arrive ainsi à résumer le cycle de vie FIDES des produits électroniques en cinq grandes phases : la spécification, la conception, la production, l'intégration système, et la maintenance et exploitation. En détail voici leurs caractéristiques.

Spécifications

La phase de spécification couvre la définition des objectifs par le donneur d'ordre, à savoir ses besoins et exigences tant en termes techniques qu'en termes de fiabilité. Elle comprend également l'identification et la formalisation de ces exigences par l'industriel, l'étude et le choix de l'architecture système, et l'allocation des spécifications aux sous-ensembles.

Les activités de cette première phase sont :

- l'expression des besoins du donneur d'ordres : de la responsabilité du donneur d'ordre (ou maître d'ouvrage), elle permet de fixer les grands choix organisationnels et techniques du système ou du produit à réaliser

- la formalisation des exigences système : elle consiste à définir la mission du système vue par le client, à la faire valider, et à traduire le besoin en un ensemble (le plus exhaustif possible) d'exigences
- la définition de l'architecture : elle consiste à établir le fonctionnement général du système d'un point de vue technique, et à choisir une architecture optimale répondant au besoin du client
- l'allocation des exigences système faite en termes de performances
- la formalisation des exigences sous-ensembles donne le détail du fonctionnement du système en définissant les spécifications de besoin des sous-ensembles, leurs interfaces et les exigences qui leurs sont attribuées.

Conception

La phase de conception vise une définition aussi précise et complète que possible du produit envisagé sur tous les plans, notamment le soutien logistique et la sécurité. Elle inclut les étapes d'industrialisation (adaptation de la définition aux modes opératoires de la production) et de mise en série (conception et réalisation de l'outil de production). La définition du système doit être validée sous l'angle de la fiabilité.

Les activités de cette seconde phase sont :

- les études préliminaires de faisabilité, en général engagées dès la phase de spécification (en particulier afin de soutenir la définition de l'architecture du système)
- la conception détaillée, qui consiste à acquérir la définition complète et détaillée du système
- les essais et mises au point : le système est assemblé et mis au point (démarche de simulations, d'essais fonctionnels et d'essais en environnement réel)
- la qualification, qui démontre que le système est conforme à ses exigences d'origine (besoin client)
- la préparation à la production / industrialisation : elle intègre les moyens de production dans les critères de choix de conception, conçoit et réalise l'outil de production série du système
- la préparation du Soutien Logistique, qui correspond à l'optimisation (à partir des concepts opérationnels envisagés) de la conception du système, et à la définition des produits et services nécessaires à sa mise en œuvre, à son utilisation et au maintien de sa disponibilité.

Production équipement

La phase de production équipement a pour objectif la production en série et la livraison des produits conformes à la définition acquise à l'issue du développement. Durant toute la production, les tâches de fiabilité veillent au maintien des performances de fiabilité obtenues lors des phases précédentes.

Les activités de cette troisième phase sont :

- les contrôles d'entrée à la réception des composants
- leur stockage
- l'assemblage des sous-ensembles qui consiste à préparer et à assembler un ensemble d'articles élémentaires pour produire un sous-ensemble composé
- les tests des sous-ensembles, ils se déclinent tout au long du processus de production, chaque type cherchant à valider la conformité des opérations de fabrication précédentes
- l'intégration équipement consiste à produire un équipement par la préparation et l'assemblage de sous-ensembles et d'articles élémentaires
- le déverminage (sous-ensembles et équipements) fait subir des épreuves au produit afin de mettre en évidence certaines catégories de défauts et de les éliminer
- l'acceptation (encore souvent appelée recette) est la décision propre à l'industriel ou décision prononcée par le client, elle reconnaît que le produit ou la prestation est conforme à ce qui est demandé dans le contrat
- la livraison de l'équipement (conditionnement, stockage, expédition).

Intégration système

Phase finale de production, c'est au cours de l'intégration système que les sous-ensembles et équipements sont intégrés dans un système complet qui est ensuite livré au client (par exemple, l'intégration d'un calculateur de navigation dans un avion).

Les activités de cette phase sont :

- les contrôles d'entrée à la réception des équipements
- leur stockage
- l'assemblage système, qui consiste à préparer et à assembler un ensemble d'équipements, de sous-ensembles et d'articles élémentaires pour produire un système complet

- les tests système cherchent à valider la conformité des opérations précédentes d'intégration
- le déverminage fait subir des épreuves au produit pour mettre en évidence certaines catégories de défauts et les éliminer
- décision prononcée par le client, l'acceptation système reconnaît que le produit est conforme à ce qui est demandé dans le contrat
- la livraison (conditionnement, stockage, expédition).

Exploitation et maintenance

Dans la phase d'exploitation opérationnelle, le produit est mis en service, utilisé et soutenu. Les tâches de fiabilité permettent de mesurer la fiabilité opérationnelle et d'identifier les éventuels besoins d'amélioration.

Les activités de cette dernière phase sont :

- le transfert vers l'utilisateur (installation, mise en service et formation)
- l'installation du système dans ses conditions opérationnelles, ce qui inclut la transition éventuelle d'un ancien système vers un nouveau, la mise en service et la formation des utilisateurs
- l'utilisation opérationnelle : elle englobe toutes les activités de stockage, de transport, de déploiement et de mise en œuvre du système par l'utilisateur
- le Maintien en Conditions Opérationnelles (MCO) comprend toutes les opérations de maintenance préventive et corrective.

La description du cycle de vie peut donc se résumer dans le tableau de la page suivante :

PHASE	ACTIVITE	Client / Donneur d'ordre	Fournisseur / Industriel	Specification	Conception	Production équipement	Integration systeme	Exploitation Maintenance
Specification								
	Expression du besoin par le donneur d'ordre	X						
	Formalisation des exigences système	X						
	Définition de l'architecture		X					
	Allocation des exigences système		X					
	Formalisation des exigences sous-ensembles.		X					
Conception								
	Faisabilité / Etudes préliminaires		X					
	Conception détaillée		X					
	Essais et mise au point		X					
	Qualification		X					
	Préparation de la production / Industrialisation		X					
	Préparation du soutien logistique		X					
Production équipement								
	Reception / Contrôle d'entrée		X					
	Stockage		X					
	Assemblage sous-ensembles et tests (sous-ensembles)		X					
	Intégration équipement		X					
	Devérinage (sous-ensembles / équipements)		X					
	Acceptation		X					
	Livraison équipement (emballage / stockage / expédition)		X					
Intégration système								
	Reception / Contrôle d'entrée		X					
	Stockage		X					
	Assemblage système		X					
	Tests système		X					
	Devérinage système		X					
	Acceptation système	X	X					
	Livraison système (emballage / stockage / expédition)	X	X					
Exploitation et maintenance								
	Transfert à l'utilisateur (installation / mise en service / formation)	X	X					
	Utilisation opérationnelle	X						
	Maintien en condition opérationnelle	X	X					
	Suivi et optimisation du soutien logistique intégré	X	X					

Suite à quoi, nous pouvons formuler quelques remarques importantes.

Tout d'abord, la décomposition du cycle de vie se limite ici à un niveau de détail intermédiaire. Pour évaluer l'impact des processus sur la fiabilité, le projet FIDES a réalisé une décomposition plus fine des étapes du cycle de vie, néanmoins (pour ne pas alourdir ce document) ce travail n'est détaillé que partiellement. Notons de plus que toutes les activités décrites à l'intérieur des grandes phases ne sont pas réalisées systématiquement.

Ensuite, la description sous la forme d'un cycle de vie ne peut pas traduire la totalité du développement et de la vie d'un produit. Néanmoins, bien que certaines activités soient transverses (les ressources humaines par exemple), elles ont un impact sur la fiabilité, c'est pourquoi nous les avons regroupées en une phase nommée "activités support".

Enfin, l'approvisionnement des composants correspond à une phase de leur vie située entre la sortie de leur usine de fabrication et leur report sur une carte chez l'équipementier. L'incidence sur la fiabilité est prépondérante et voisine de celle traduite par le $\pi_{\text{Partmanufacturing}}$. Elle est reconnue comme dépendante de la politique d'achat de l'équipementier, de la politique de sélection du composant (études technologiques réalisées en amont), et de la politique de stockage, de déverminage, de manipulation et contrôle du composant. Ces points sont concrétisés dans des recommandations fonction des phases du cycle de vie : support, conception, et production équipement. L'approvisionnement n'intervient donc ni comme un facteur spécifique ni comme un complément au calcul du $\pi_{\text{Part manufacturing}}$, il est considéré dans l'évaluation du π_{Process} .

5.1.1.2. Impact sur la fiabilité

Le cycle de vie d'un produit électronique est donc décrit à travers six phases ayant un impact spécifique sur la fiabilité :

- Spécification
- Conception
- Production
- Intégration dans le système
- Exploitation et maintenance
- Activités Support.

Pour la quantification, chaque phase est affectée d'un facteur d'échelle afin d'établir son poids relatif. La répartition par défaut est la suivante :

PHASE	Contribution phase %
Spécification	8
Conception	16
Production	24
Intégration dans le système	12
Exploitation et maintenance	20
Activités Support	20
Total :	100

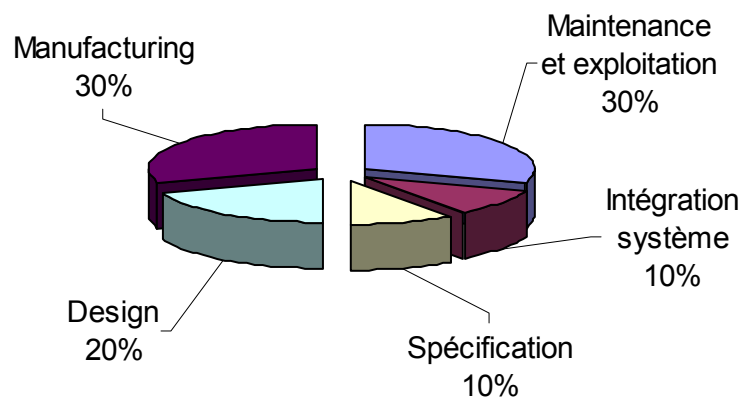


Fig. 54 : Répartition des contributions processus par phase

Cet impact est quantifié grâce au retour d'expérience des plus grands industriels de l'aéronautique et de la défense française. Néanmoins une répartition propre à l'industrie évaluée, dans le cas où elle serait déjà connue, peut être prise en compte dans le modèle prévisionnel de fiabilité.

Dans les paragraphes suivants, nous verrons comment à partir de ces analyses, l'évaluation FIDES des processus est construite et utilisée comme outil de construction de la fiabilité.

5.1.2. Une méthodologie d'évaluation de la fiabilité

5.1.2.1. Introduction

Pour quantifier l'impact de la qualité des processus sur la fiabilité, on réalise une analyse sur toutes les phases du cycle de vie afin d'établir un guide de recommandations de fiabilité révélatrices de l'état de l'art. Cette analyse se fonde à la fois sur l'expertise et l'expérience des

entreprises participant à ce projet, et sur une analyse bibliographique (par exemple [\[ALLA94\]](#)).

Soit ces recommandations sont globales et touchent l'ensemble des phases (elles sont alors associées à la phase Support), soit elles sont précises et reconnues comme impactant la fiabilité durant des activités spécifiques dans une ou plusieurs phases du cycle de vie.

Nos recommandations Processus Fiabilité portent principalement sur les procédures et l'organisation tout au long du cycle de vie. Le guide du Processus Fiabilité ne donne en effet pas de recommandations technologiques sur la mise en œuvre des COTS car celles-ci varient trop selon la technologie et ne sont pas nécessaires pour décrire la "qualité" d'un processus.

Le π_{process} , basé sur une note traduisant la qualité du processus, est alors établi à la suite d'un audit sur les différentes phases du cycle de vie.

5.1.2.2. Niveau de satisfaction aux recommandations

Réalisé par phase, l'audit évalue par des questions relatives aux recommandations la façon dont est menée chacune des activités du cycle de vie. Les réponses et les preuves apportées par la personne audité permettent de fixer un niveau de satisfaction aux recommandations (niveaux N1 à N4) :

- N1 = la recommandation n'est pas appliquée → risques certains vis-à-vis de la fiabilité
- N2 = la recommandation n'est que partiellement appliquée → risques potentiels vis-à-vis de la fiabilité
- N3 = la recommandation est pratiquement appliquée → peu de risques vis-à-vis de la fiabilité
- N4 = la recommandation est pleinement appliquée → pas de risque notable vis-à-vis de la fiabilité.

Chacune des recommandations est alors pondérée par un poids spécifique allant de 1 à 10 :

- 1 → l'application de la recommandation associée à la question a peu d'impact sur la fiabilité
- 10 ou plus → l'application de la recommandation associée à la question a un fort impact sur la fiabilité.

Le stockage (phase rencontrée plusieurs fois au cours du cycle de vie d'un produit) peut par

exemple avoir un impact majeur sur la fiabilité. Plusieurs recommandations sur ce thème permettent d'évaluer l'influence de cette phase et des questions d'audit y sont associées.

Des aires ou des locaux de stockage désignés sont-ils utilisés afin d'empêcher l'endommagement ou la détérioration du produit ? Des mesures appropriées sont-elles prises pour autoriser la réception dans ces aires et l'expédition à partir de celles-ci ? L'état du produit en stock est-il évalué à intervalles appropriés afin de détecter toute détérioration ? Les atmosphères en stockage sont-elles gérées et contrôlées ? Les positionnements en stockage sont-ils individualisés ? Les interventions périodiques permettant de conserver les caractéristiques du produit en stockage (mise sous tension...) sont-elles gérées ?

Considérée comme ayant un impact assez fort sur la fiabilité des équipements, cette recommandation a un poids de 7,2 sur 10. Pour évaluer le niveau de satisfaction atteint, les critères suivants sont établis :

- *Critère niveau 1 : Les aires de stockages des équipements ne sont pas spécifiques, l'environnement du stockage n'est pas pris en compte.*
- *Critère niveau 2 : Les aires de stockages des équipements ne sont pas spécifiques, l'environnement du stockage est maîtrisé et adapté aux produits stockés.*
- *Critère niveau 3 : Les aires de stockages des équipements sont spécifiques. L'environnement du stockage est maîtrisé et adapté aux produits stockés. Les positions de stockages sont individualisées. Les interventions périodiques permettant de conserver les caractéristiques du produit sont effectuées.*
- *Critère niveau 4 : Les aires de stockages des équipements sont spécifiques. L'environnement du stockage est maîtrisé et adapté aux produits stockés. Les positions de stockages sont individualisées. Les interventions périodiques permettant de conserver les caractéristiques du produit sont effectuées. L'état des produits en stock est régulièrement contrôlé, le stock est vérifié et les conditions de stockages sont régulièrement optimisées.*

5.1.2.3. Calcul du facteur de processus

Cette étape consiste à effectuer l'audit FIDES proprement dit auprès d'intervenants sur les différentes phases du processus, et à définir le niveau de satisfaction en fonction des preuves apportées. La démarche à appliquer est proposée dans le *Guide d'Audit*.

On procède par phase en répondant à chaque question, le niveau de satisfaction à la question (noté de 0 à 3) multiplié par le poids de la recommandation nous donne les **Points_Bruts** acquis pour la question :

$$Poids_Recommandation_i \times Note\ Satisfaction\ (0, 1, 2, 3)_i = Points_Bruts_i$$

Ces points sont alors pondérés par le facteur d'échelle de la phase j :

$$Points_Pondérés_i = Points_Bruts_i \times Scale_Factor_j$$

La **note d'audit** de la phase j correspond à la somme de l'ensemble des **Points_Pondérés** des recommandations retenues sur la phase en question :

$$Note_Audit_j = \sum_{i=1}^n Points_Pondérés_i$$

La formule du facteur processus est la suivante :

$$\pi_{Process} = e^{\delta_2(1-Process_Grade)}$$

Le **Process_grade** se calcule à partir des notes d'audit par phase calculée tel que :

$$Process_Grade = \frac{\sum_{j=1}^6 Note_Audit_j}{Note_Max_Process}$$

Le **Process_grade** prend une valeur comprise entre 0 et 1 :

- 0 représentant un processus qui répond défavorablement aux questions d'audit
- 1 signifiant un processus "parfait" répondant favorablement à toutes les questions d'audit.

Il est également possible d'évaluer un **Process_Grade_j** propre à chaque phase j afin de situer le niveau de qualité de celle-ci :

$$Process_Grade_j = \frac{Note_Audit_j}{Note_Max_Pondérée_j}$$

La première étape du calcul consiste donc à établir la **Note_Max_Pondérée** par phase. La **Note_Max** de la phase correspond à un audit "parfait" où le niveau de satisfaction est de 4 à toutes les questions retenues :

$$Poids\ Recommendation_i \times 3 = Points\ Max_i$$

En sommant les **Points_Max** sur l'ensemble des recommandations (i=1 à n) de la phase j complète :

$$\mathbf{Note_Max}_j = \mathbf{Points_Max_Phase}_j = \sum_{i=1}^n \mathbf{Points_Max}_i$$

et en procédant de même pour les six phases, on obtient le nombre maximal de points admissible pour le processus retenu : $\mathbf{Points_Max_Process} = \sum_{j=1}^6 \mathbf{Points_Max_Phase}_j$

Le facteur d'échelle **Scale_factor** de chaque phase permet de tenir compte de l'influence relative sur la fiabilité de chaque phase considérée par rapport à l'ensemble des phases du processus et en partant d'une répartition connue.

Pour chaque phase j (j = spécification, conception...) le **Scale_factor** se calcule ainsi :

$$\mathbf{Scale_factor}_j = \mathbf{Contribution_phase}_j \times \frac{\mathbf{Points_Max_Process}}{\mathbf{Points_Max_Phase}_j}$$

Le calcul de la **Note_Max_Pondérée** pour une phase j est alors :

$$\mathbf{Note_Max_Pondérée}_j = \mathbf{Note_Max}_j \times \mathbf{Scale_Factor}_j$$

On calcule également la **Note_Max_Processus** en sommant les six **Notes_Max_Pondérées** :

$$\mathbf{Note_Max_Process} = \sum_{j=1}^6 \mathbf{Note_Max_Pondérée}_j$$

5.1.2.4. Etalonnage

Si les méthodologies décrites précédemment nous permettent de construire un modèle d'impact des processus sur la fiabilité, il reste à les étalonner afin qu'elles soient applicables dans des cas d'étude industriels. Ce calibrage des modèles passe d'une part par l'évaluation de l'importance de chacune des recommandations, et d'autre part par les descriptions de l'impact total des processus sur la fiabilité et de la variation qu'il rencontre en fonction des secteurs industriels.

Etalonnage des notes de recommandations

La base de ce calcul était d'évaluer l'impact relatif de chacune des recommandations sur la fiabilité. Pour ce faire, et sur la connaissance d'analyses de faits techniques (AMDEC procédés [\[CNOM94\]](#)) sur des équipements électroniques divers, dix experts de huit sociétés d'aéronautique et de défense ont attribué une note allant de 1 à 10 à chacune des

recommandations. L'impact de chacune des recommandations est alors considéré comme la moyenne des notes fournies par chacun des experts :

$$\text{Note_recommandation}_i = \text{Note_recommandation}_{i,\text{expert}_j} / \text{Nombre d'experts}$$

Le plus souvent, les pondérations ont été suffisamment convergentes pour être retenues comme une bonne base d'évaluation pour l'audit fiabilité. Dans certains cas, des divergences importantes ont cependant été relevées quant à l'évaluation d'une recommandation. Une réévaluation par ces mêmes experts a alors été proposée, parfois même la recommandation a été redéfinie.

Etalonnage de la plage de variation du facteur de processus

Si la quantification relative à chaque recommandation du processus peut paraître simple, il n'en est pas de même pour l'évaluation de la plage totale de variation du facteur de processus. Le modèle FIDES décrit comme suit le calcul du taux de défaillance d'un équipement :

$$\lambda = \lambda_{\text{Physique}} \cdot \pi_{\text{Part_manufacturing}} \cdot \pi_{\text{Process}}$$

Comme nous l'avons vu, on considère que l'impact des processus représente entre 30 et 80% de la fiabilité totale d'un équipement.

Pour un processus "parfait" où toutes les recommandations sont réalisées ($\pi_{\text{Process}} = 1$), il est possible d'évaluer à l'aide d'avis d'experts ce que devient la répartition des pannes composants et des pannes processus.

Sachant que la limite extrême que l'on peut atteindre correspond au mieux à l'élimination de la totalité des pannes processus, il est possible de déterminer la valeur maximale du π_{Process} correspondante au processus standard par simple rapport des taux de défaillance :

$$\pi_{\text{Process}} \text{ max} = \frac{\lambda_{(\pi_p = \pi_{\text{ProcessStandard}})}}{\lambda_{(\pi_p = 1)}}$$

L'élimination de la totalité des pannes processus étant illusoire, il est plus rationnel de penser que l'on arrive dans le meilleur des cas à inverser la tendance ; le rapport des taux de défaillance donne alors une valeur plus réaliste du π_{Process} correspondant au processus standard.

Pour le plus mauvais processus possible où aucune des recommandations n'est effectivement réalisée, la valeur de l'étendue du facteur π_{Process} est directement déductible à partir de

l'application du modèle FIDES (avec les différentes pondérations des éléments contributeurs processus et de l'évaluation du $\pi_{Process}$, correspondant au processus standard et déterminé au chapitre précédent).

Le modèle étant multiplicatif, le coefficient $\pi_{process}$ doit donc être compris au moins entre 1 et 4. Pour que la plage de variation soit représentative de la plus grande part des industries de l'aéronautique, le facteur de processus doit être compris dans un intervalle de 1 à 8.

Pour conserver une importante dynamique du modèle en fonction des différents niveaux de processus, le modèle FIDES est de la forme exponentielle :

$$\pi_{Process} = e^{\delta_2(1-Process_Grade)}$$

Le facteur δ_2 permet de déterminer la plage de variation du facteur processus, il est fixé à la valeur 2,079 afin de conduire à une dynamique de 1 à 8 du facteur processus.

5.1.2.5. La démarche d'audit fiabilité

La méthodologie FIDES établit une liste de recommandations dont le suivi est de nature à favoriser la construction de la fiabilité d'un système, chacune étant déclinée sous forme de questions.

Les réponses d'une entreprise aux dites questions donnent la mesure de son aptitude à construire des systèmes fiables et la quantification des facteurs de processus, utilisés dans les modèles de calcul.

Comme pour tous les audits, la réalisation consiste à présenter l'audit fiabilité (on rappelle ses objectifs, sa portée et ses règles), à poser les questions (le cas échéant, poser les questions complémentaires nécessaires à la détermination du niveau du critère atteint) et à noter les réponses des cibles auditées en regard de chaque question. Bien entendu, l'auditeur doit immédiatement recueillir les preuves disponibles en vue de les joindre au rapport.

Le traitement des informations consiste à évaluer (pour chaque recommandation) le positionnement de l'entité auditée par rapport aux critères en utilisant les réponses fournies aux questions, les preuves apportées en appui de ces réponses et les pondérations associées à chacune des recommandations. Le résultat de ce traitement détermine le niveau de fiabilité à associer à l'entité auditée, de quantifier le facteur processus $\pi_{Process}$ à prendre en compte et d'identifier, le cas échéant, des axes d'amélioration. L'auditeur calcule alors le score maximum possible dans le cadre de l'audit considéré et en déduit le score obtenu par l'organisation auditée.

Basée sur les règles bibliographiques des audits de qualité, cette démarche les applique à la fiabilité [KREB03], [LAVI92]. Ce nouvel aspect de l'évaluation de fiabilité nécessite un changement radical du métier d'ingénieur sûreté de fonctionnement, qui devra donc également maîtriser les techniques de la qualité et de l'audit.

5.1.3. Une méthodologie de construction de la fiabilité

Outre l'évaluation du niveau d'assurance fiabilité pour chaque phase du cycle de vie, la prise en considération des recommandations de processus permet la mise en place d'actions de maîtrise de la fiabilité (Ingénierie Fiabilité).

5.1.3.1. Définitions

Le processus de construction de la fiabilité d'un système est l'ensemble des activités menées pour obtenir la fiabilité d'un système à partir d'une exigence source quantifiée. Il est initié par une exigence de fiabilité et se termine quand cette exigence est atteinte. Les activités sont quant à elles caractérisées par des entrées et sorties qui peuvent être mesurées, maîtrisées et améliorées.

5.1.3.2. Synopsis du processus de construction de la fiabilité d'un système

Elaboré à partir du recensement et de l'analyse exhaustive des activités qui concourent à la fiabilité du système tout au long de son cycle de vie, ce processus prend en compte des considérations de qualité et d'ingénierie fiabilité.

La construction de la fiabilité d'un système passe par l'application de ce processus jusqu'à la réalisation d'une exigence de fiabilité. L'atteinte de cette exigence se traduit par un coût, ce qui nécessite d'optimiser le couple coût - fiabilité.

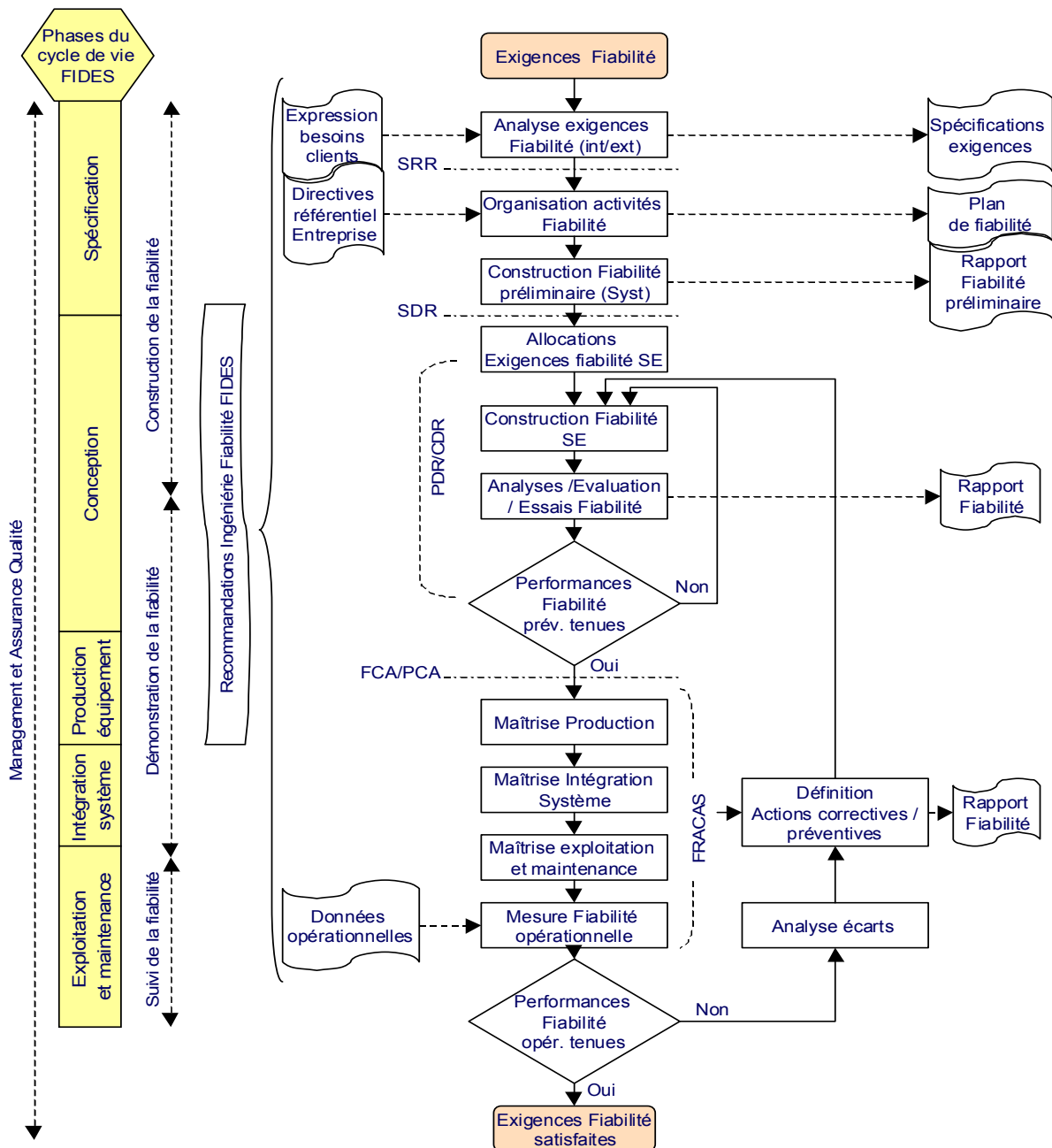


Fig. 55 : Synopsis du processus de construction de la fiabilité d'un système

5.2. Usages de la méthodologie

FIDES a vu sa première version libre diffusée au début de l'année 2004. Depuis, la méthodologie est en continuelle évolution dans le but d'améliorer les prédictions de fiabilité, d'en simplifier la méthode d'évaluation et de l'adapter à de nouveaux domaines d'application.

5.2.1. Expérimentation industrielle

La phase de validation de la méthodologie FIDES a consisté à évaluer la fiabilité de sous-ensembles électroniques et à comparer ces résultats à leur retour d'expérience. Ces expérimentations ont permis de tirer les premiers enseignements sur les évolutions à apporter à la méthodologie, elles ont ainsi entraîné un nombre important d'actions de calibrage.

On identifie deux tâches dans l'application de cette nouvelle méthode : d'une part la part fiabilité intrinsèque, et d'autre part l'audit du processus fiabilité (opération lourde, nouvelle dans le domaine).

5.2.1.1. Fiabilité intrinsèque

Effectuée sur de multiples cas d'étude industriels, l'expérimentation met en évidence de façon réaliste la qualité de la couverture par FIDES des familles de composants électroniques : en effet, la plupart des manques sont ponctuels et n'empêchent pas la mise en œuvre de la méthodologie. Cependant, les résultats pour certaines familles ou sous-familles de composants présentaient des écarts par rapport à l'attendu et ce de façon manifeste. Ces cas ont fait l'objet d'analyses et des modifications spécifiques ont été réalisées sur ces modèles.

5.2.1.2. Processus fiabilité

Les travaux d'expérimentation sur les recommandations de maîtrise et d'audit du processus fiabilité ont permis de rendre l'audit le plus réaliste possible. Nous avons soumis l'audit à des personnes représentatives et leur avons demandé une critique des critères choisis, ainsi qu'éventuellement une révision des recommandations. Les analyses ont alors conduit à une amélioration de l'audit processus fiabilité qui semble aujourd'hui adapté à l'ensemble des processus industriels mettant en œuvre des systèmes électroniques.

Nous ne nous attarderons toutefois pas plus sur l'expérimentation des modèles FIDES, ceux-ci étant sujets d'un exemple d'application dans le chapitre III.

5.2.2. Déploiement

Construite sous l'égide de la DGA, la méthodologie FIDES est néanmoins libre d'accès et a pour objectif de devenir une référence dans le domaine des prévisions de fiabilité des sous-ensembles électroniques. Elle est aujourd'hui Norme Française UTEC 80 811 et nous souhaitons la promouvoir Norme Européenne, pour cela un comité de soutien de la méthodologie a déjà été mis en œuvre.

5.2.3. Conclusion sur FIDES

La prise en compte de l'impact des processus dans les calculs de fiabilité est une approche nouvelle. Bien que ce principe implique des difficultés d'application, il semble aujourd'hui indéniable que pour des composants électroniques, ce soit la voie la plus performante pour effectuer des prévisions de fiabilité. Non seulement ces méthodes offrent une précision plus importante, mais de plus elles sont adaptées à une évolution rapide des technologies.

Les lourdeurs d'application de FIDES impliquent cependant des coûts supplémentaires. Un premier constat montre en effet qu'une évaluation de fiabilité avec ce modèle coûte environ 25 % de plus qu'avec le MIL HDBK217. Cette différence de coût due à l'audit fiabilité semble réhabilitaire. Néanmoins, l'audit restant valable pour les produits d'une même gamme, il peut être utilisé dans le cadre de plusieurs affaires.

De ces remarques, il paraît important de simplifier l'audit FIDES afin d'en réduire les coûts, même si par ailleurs ceux-ci sont justifiés par une meilleure précision sur les résultats d'étude et même si l'objectif avoué est de dégager des gains opérationnels avec FIDES "outils d'évaluation et de construction de la fiabilité des produits".

6. Conclusion sur l'évaluation de fiabilité

Prévoir la fiabilité, c'est anticiper le temps pendant lequel un équipement va survivre dans son environnement. Or comme nous l'avons vu, cette prévision présente un impact stratégique d'un point de vue tant sécuritaire que financier.

Aussi, dans un contexte industriel, la prévision de la fiabilité peut et doit se faire à différents niveaux d'avancement d'un projet. Sur la base des travaux présentés dans le chapitre I, nous décomposons les phases d'un projet comme suit :

- Spécification
- Pré design
- Design
- Prototype
- Exploitation

Les trois méthodes présentées pour analyser la fiabilité d'un équipement sont le retour d'expérience, l'expertise et les modèles prévisionnels. Chacune est adaptée à une phase du processus d'un équipement. En phase d'exploitation, il semble opportun d'utiliser le retour d'expérience pour prévoir la fiabilité des matériels alors que lors du design, les modèles paramétriques sont mieux adaptés.

Sans toutefois classifier de manière catégorique l'usage à faire de chacune, le schéma suivant nous permet de comprendre les besoins auxquels elles répondent :

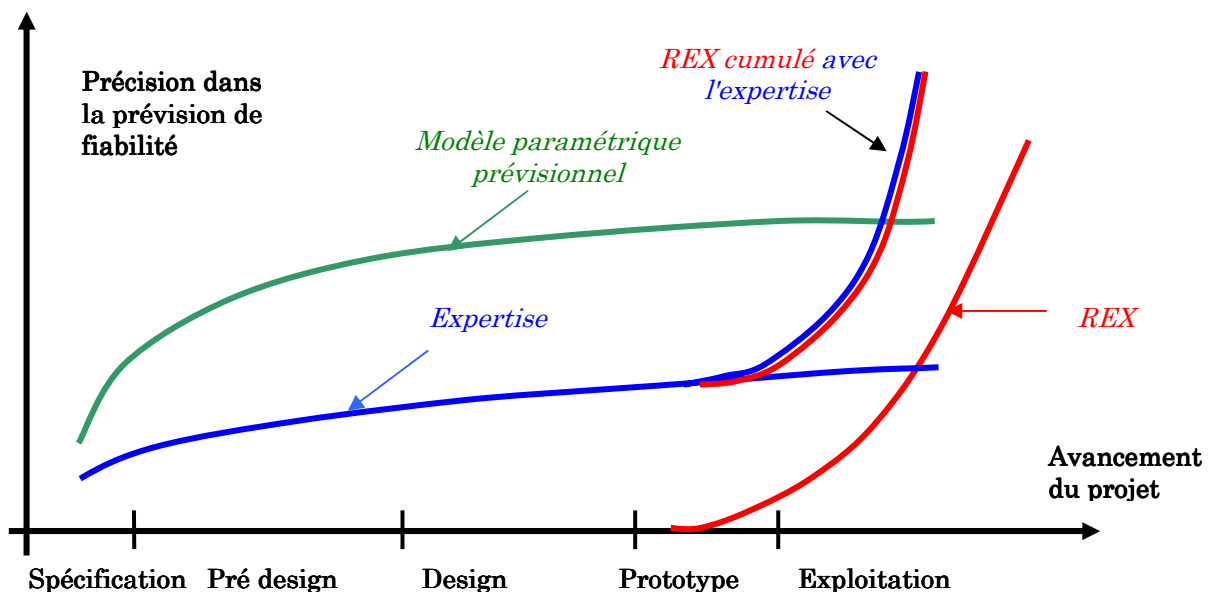


Fig. 56 : Usage des méthodes prévisionnelles de fiabilité

Chapitre III. Application à la modélisation des coûts de maintenance d'un système avionique

1. Contexte d'étude

1.1. Domaine étudié

Pour notre application, le choix du domaine d'étude s'est bien entendu tourné vers des équipements d'hélicoptère : ce travail de thèse a en effet été effectué, sous forme de contrat CIFRE, avec EUROCOPTER, premier hélicoptériste mondial.

L'hélicoptère est un système extrêmement complexe qui met en œuvre des technologies allant de la mécanique à l'électronique. Or, si nos modèles de coûts de maintenance portent autant sur la part "véhicule" (mécanique) que sur la part "système" (électronique), le modèle FIDES se limite quant à lui à l'évaluation de fiabilité électronique. Aussi, pour être plus complet, notre cas d'étude portera-t-il sur un système avionique.

1.2. Confidentialité des résultats

Dans l'aéronautique comme dans de nombreux domaines, les données de coût et de fiabilité sont jugées confidentielles: non seulement c'est un point sur lequel le risque concurrentiel existe, mais de plus ces données impliquent des sous-traitants et équipementiers à qui nous devons un respect de discrétion. C'est pourquoi l'équipement étudié et les résultats présentés dans ce document sont fictifs. Toutefois, pour garder un aspect pertinent, nous nous sommes attachés à élaborer un cas d'étude vraisemblable, dans la définition comme dans l'exécution.

1.3. Plan d'étude

Après avoir décrit en détail l'équipement étudié, nous montrerons comment l'utilisation du modèle FIDES permet d'estimer de manière prévisionnelle la fiabilité en exploitation. L'emploi d'un modèle de coût de maintenance adapté nous permettra ensuite d'estimer son DMC.

Nous analyserons alors l'impact des outils proposés dans cette thèse sur la maîtrise des coûts d'exploitation, nous verrons notamment que la construction de la fiabilité par l'application de recommandations permet de réaliser des actions correctrices et donc de limiter les périodicités de réparation.

1.4. Equipement étudié

Cette proposition expérimentale de nos modèles est réalisée sur un calculateur simple, choisi pour les deux raisons suivantes : sa simplicité globale (afin de limiter l'exemple) et son rôle de potentiel inducteur de coûts de maintenance.

Notons qu'à ce jour EUROCOPTER utilise les méthodes proposées sur des systèmes avioniques embarqués sur des hélicoptères légers (EC120, Ecureuil...) à moyens-lourds (Super Puma, NH90...). L'entreprise dispose d'un retour d'expérience sur des équipements représentatifs des différents environnements opérationnels, ce qui a donc permis de valider nos modèles sur des cas réels.

1.4.1. Description technique de l'équipement étudié

L'équipement est constitué de trois cartes identiques qui participent au pilotage de résonateurs actifs dans le but de réduire les vibrations engendrées par les pales.

Ces cartes font l'acquisition de signaux provenant d'accéléromètres, et un logiciel calcule et génère des signaux de réponse appropriés. Les cartes reçoivent également des ordres de commande TOR (tout ou rien) provenant d'un panneau de maintenance ou du panneau de contrôle plafond du cockpit. Elles permettent d'allumer des voyants de défaut.

Une liaison série est dédiée au téléchargement de paramètres de maintenance.

1.4.2. Découpage fonctionnel

L'équipement peut être décomposé en 27 blocs fonctionnels suivant le schéma suivant :

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 1. Protections | 7. Analog to digital conversion |
| 2. Input signal adaptation | 8. Data processing |
| 3. Output signal adaptation | 9. Digital to analog conversion |
| 4. Time base unit | 10. Storage Memory |
| 5. Band-Pass Filter | 11. Work Memory |
| 6. Voltage reference | 12. Warning lights commands |

13. Chip Select Interface
14. Asynchronous Receiver
15. Low Pass Filter
16. Dowload Control
17. Commands
18. PC Link interface
19. Download interface
20. Commands 2
21. Voltage Supervisory
22. Power supply
23. Analog to TTL Adaption
24. Feedback Adaption
25. Function Status
26. Discrete Signals Adaption
27. Discrete Output Interface

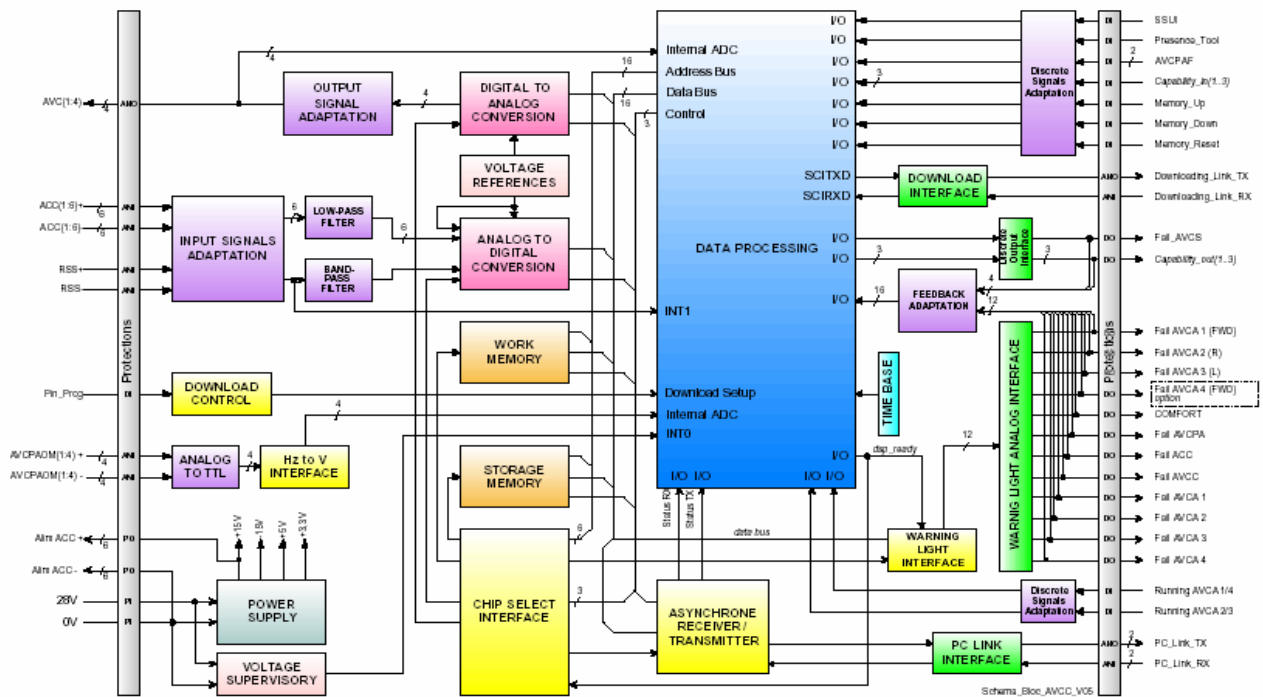


Fig. 57 : Description fonctionnelle de l'équipement étudié

2. Evaluation de fiabilité

2.1. Introduction

Le modèle d'évaluation prévisionnelle de fiabilité FIDES a été testé pour la première fois sur un équipement Eurocopter en 2003. Cette expérimentation se base sur une version intermédiaire du modèle FIDES, entre celle de 2003 incomplète et celle de 2004, dernière version largement diffusée. Les quelques corrections mineures non prises en compte dans cette étude n'empêchent pas la compréhension globale, et l'impact sur les résultats reste anecdotique.

Nous montrerons à travers cette étude l'applicabilité de ces modèles sur des équipements en phase de développement, en particulier par l'analyse des écarts de faisabilité entre une évaluation de fiabilité avec un outil "classique" type MIL HDBK217 et la méthode FIDES.

La pertinence des modèles est démontrée à travers la présentation de publications, qui n'ont cependant aucun lien avec l'exemple développé.

Dans le cadre de ce travail, le calcul de fiabilité FIDES a été effectué avec les deux types de modèles que sont le modèle "carte" (modèle de calcul d'un taux de défaillance par fonctionnalité de la carte) et le modèle composant (analyse composant par composant).

2.2. Analyse de fiabilité effectuée avec le MIL HDBK217 F

Pour disposer d'une base de référence, nous avons avant tout réalisé une étude de fiabilité du système avec le recueil de référence MIL HDBK217 F. Sans toutefois entrer dans les détails, nous en montrerons les résultats.

Si aujourd'hui de nombreuses sociétés utilisent des recalages de la MIL HDBK217 F, signalons que nous n'en ferons rien car d'une part, il est difficile d'estimer la pertinence de ces travaux et d'autre part, aucune référence formelle n'existe à ce sujet.

2.2.1. Recueil des taux de défaillance

Les taux de défaillance des composants de l'équipement sont issus des données Part Stress de la norme MIL HDBK217 F, estimées dans les environnements "GF 55°C" et "ARW 55°C".

Les valeurs en stockage proviennent du recueil édité par le RAC qui donne les facteurs de conversion entre "Ground Floor" et "Ground Floor dormant" pour chaque type de composant, l'environnement "GF dormant" étant assimilé à l'environnement stockage.

Ces calculs ont été effectués pour les conditions suivantes :

- Sol (GF) : 800 heures/an
- Vol (ARW) : 100 heures/an
- Stockage : 7860 heures/an

soit au total 8760 heures (1 an) entre le fonctionnement et le stockage.

2.2.2. Hypothèses de calcul

Voici les hypothèses majeures retenues :

- les calculs retiennent un facteur qualité correspondant à une qualité de composant militaire ou assimilé
- la température boîtier (dans certains modèles de calcul) est obtenue en considérant une élévation de température égale à 10°C pour les inductances, 10°C pour les transformateurs et 5°C pour les connecteurs
- la résistance thermique (jonction/ambiante) est un paramètre issu des données constructeur ou de celles de la MIL
- la puissance dissipée est évaluée par rapport à la consommation moyenne des composants (provenant des données constructeur) : en général 50% de la puissance maxi
- la technologie des composants est issue des données constructeur
- la complexité des circuits intégrés est issue des données constructeur ou évaluée par analogie avec des composants identiques
- calculé principalement à l'aide du schéma de principe des cartes électroniques et des données constructeur, le stress des composants est caractérisé par le paramètre π_s . En règle générale, on utilise les valeurs suivantes :
 - le stress en puissance pour les résistances est égal à 10% pour les résistances de faible puissance (0,5W) et à 30% pour les résistances de forte puissance (> 0,5W)
 - le stress en tension pour les condensateurs est égal au rapport de la tension DC appliquée sur la tension DC max applicable
 - le stress en tension pour les diodes est égal au rapport de la tension inverse appliquée sur la tension inverse max applicable. Pour les diodes Zener, il est de 100%
 - le stress en tension pour les transistors bipolaires est égal au rapport de la tension V_{ce} appliquée sur la tension max V_{ceo} applicable
 - pour tous les types de connecteurs, le nombre de cycles de connexion/déconnexion est considéré égal à 1/10 000 heures.

2.2.3. Résultats

A partir des données initiales, on obtient dans les différents environnements les MTBF suivants :

- MTBF (ARW) : 15 779 heures
- MTBF (GF) : 69 522 heures
- MTBF (stockage) : 1 026 443 heures

Ces calculs permettent d'évaluer le MTBF calendaire (MTBF₃) de notre carte à partir de la formule suivante :

$$MTBF_3 = \frac{800}{\frac{800}{MTBF_{VOL}} + \frac{100}{MTBF_{SOL}} + \frac{7860}{MTBF_{STOCK}}}$$

Le MTBF₃ est de 13 379 heures de bon fonctionnement.

2.3. Application du modèle FIDES d'évaluation de la fiabilité

La mise en œuvre de FIDES sur cet équipement est effectuée avec le modèle carte (modèle de calcul d'un taux de défaillance par fonctionnalité de la carte) et le modèle composant.

Pour chacun d'eux, cette présentation montre l'application de FIDES, sa démarche, ses difficultés et ses intérêts, les résultats prévisionnels de fiabilité obtenus, leurs limites, et la comparaison aux autres méthodes prévisionnelles de fiabilité.

2.3.1. Evaluation de l'impact du processus sur la fiabilité

2.3.1.1. Audit pour le calcul du $n_{Process}$: périmètre d'étude

L'application d'évaluation du $\Pi_{process}$ pour cet équipement est réalisée sur les processus maîtrisés par EUROCOPTER, les phases du cycle de vie du produit sont alors auditées.

- Les produits sont spécifiés par Eurocopter pour le fournisseur. La tâche est dirigée par un chargé d'affaires qui regroupe les informations spécifiées par les différents métiers du bureau d'étude (techniques, sûreté de fonctionnement, maintenance, coûts d'exploitation, etc.)
- Dans le cas de cet équipement, le processus de conception n'est pas un processus interne Eurocopter, une évaluation qualité (basée sur un audit de la capacité de conception des fournisseurs) est cependant réalisée. Elle contient d'importantes informations qui permettent de renseigner partiellement le modèle FIDES et est complétée par expertise sur le fournisseur de l'ingénierie qualité.

- L'équipement est intégré sur les hélicoptères en chaîne de production, la maîtrise de ce processus nous permettant d'appliquer l'audit FIDES (Intégration système).
- Bien que les phases d'exploitation et de maintenance des équipements ne soient pas sous la maîtrise directe de l'avionneur mais en partie chez le client, le support à la clientèle et les services de réparation sont à même de répondre à l'audit fiabilité (Exploitation et Maintenance).
- Activité support : les activités transverses sont connues par les programmes, qui maîtrisent le cycle de vie machine.

Pour cet équipement, Eurocopter ne maîtrise cependant pas l'activité de production. De plus, il est particulièrement difficile d'exiger les réponses à un audit pour un cas d'étude, l'impact en fiabilité de la phase de production est de ce fait estimé par analogie avec des équipements dont le cycle de production est connu.

La suite de ce document décrit l'application du guide d'audit sur l'ensemble des phases du cycle de vie : il expose la perception du guide par les audités et l'application de la méthodologie, et les phases sont décrites dans l'ordre du guide (la spécification, la conception, la production, l'intégration système, l'exploitation et maintenance, et le processus support).

2.3.1.2. Phase de spécification

La phase de spécification est évaluée en deux temps : on rencontre d'abord des spécificateurs puis des responsables qualité définissant les procédures de spécification. Les résultats des deux expérimentations sur cette phase, concordants ou complémentaires, autorisent certaines remarques et descriptions.

La démarche d'audit est bien perçue par la qualité, qui considère ces recommandations pour la maîtrise de fiabilité comme nécessaires. Le spécificateur estime cependant que celles-ci ont un impact trop important dans notre prévision, certaines d'entre elles ont de plus été jugées inapplicables.

Bien que très utile, le guide apparaît (de manière générale) trop complet, et une possibilité de simplification avec des notes d'audit par défaut a été demandée. Le chargé d'affaire n'étant pas la meilleure cible (le responsable du service fiabilité le serait davantage), c'est à l'ingénieur Sûreté de Fonctionnement (plus à même de répondre, parfois approximativement), qu'on adresse l'intégralité des questions.

2.3.1.3. Phase de conception

En général, la phase de conception n'est pas réalisée chez l'industriel aéronautique mais chez ses équipementiers, ce qui rend difficile l'évaluation de l'impact du processus conception sur la fiabilité. Nous avons donc rencontré la personne en charge des audits qualité conception des fournisseurs de systèmes électroniques. Bilan sur l'application : la démarche d'audit concernant la fiabilité est perçue comme très réaliste et tout à fait applicable. En effet, ayant démontré que la non-tenu des objectifs de qualité a des conséquences directes sur la fiabilité des produits, notre exposé a rencontré un fort enthousiasme chez l'interviewée.

Pour une meilleure explication des résultats et de l'application de l'audit FIDES en conception, présentons cette phase en détail :

Recommandation	Poids Recom	Niveau d'application				Points Pondérés	Remarques	
		Phase	N1	N2	N3			N4
Cohérence entre la méthode dans laquelle a été faite l'allocation de la fiabilité (recueil, profil) et la méthode que l'on va utiliser	5,3					x	18,9	des difficultés de compréhension : redéfinir la lisibilité
Complétude des renseignements sur le sous ensemble pour établir (compléter) le Manuel de Test Sous-Ensemble	7,8	x					0,0	Problème de compréhension, parle-t-on de test système ou de test équipement
Couverture des tests : tenir compte de l'équilibre (fiabilité/complexité de l'autotest) : justification ?	0,0						-	pas de réponse fournie, la cible n'est pas la bonne
Décrire le processus de construction de la fiabilité des systèmes mis en place dans l'entreprise	7,5					x	26,8	La compréhension se fait grâce au niveau, sinon incompréhension
Dispositions pour que le personnel ait la connaissance des moyens d'essai, des normes et interprétation des mesures	5,8		x				6,9	difficile de répondre pour EC sans demander au fournisseur
Existence de documentation d'analyse pour l'évaluation de la fiabilité	7,5					x	26,8	
Existence de procédures de vérification de conception	27,1		x				32,3	il manque dans cette recommandation l'aspect suivi sur l'application
Existence de règles en conception pour adapter le choix d'un composant pour une fiabilité donnée	12,7		x				15,1	
Existence d'un concept de maintenance en soutien logistique	5,4				x		12,9	
Existence d'un document justifiant d'une complétude des éléments justificatifs	8,0					x	28,8	des commentaires sur les critères qui semble mal appropriés
Existence d'un plan de management . Identification des compétences clés (spécialistes)	17,7			x			42,1	des modifications à prévoir sur le fond, et sur les critères
Existence d'un recueil de recommandations métiers sur les opérations de manipulation et de stockage chez le client	7,7			x			18,2	
Existence d'une base de données capitalisant le retour d'expérience	23,6	x					0,0	L'importance de cette phase était ignorée de la qualité qui souhaite l'intégrer dans ses exigences suite à FIDES
Existence d'une base de données capitalisant les études d'évaluation de fiabilité	10,6		x				12,6	
Existence d'une base de données sur l'historique des définitions et les justificatifs de définition.	7,8		x				9,3	
Existence d'une gestion des procédures métier	13,8			x			32,8	le terme de procedure n'est pas clair (iso 9001 ?)
Existence d'une grille de compétence et d'une gestion de suivi	24,5			x			58,3	
Existence d'une liste préférentielle de COTS	8,0	x					0,0	
Existence d'une procédure de qualification produit/fournisseur	7,6			x			18,1	
Existence d'une procédure de qualification produit/process	7,2					x	25,7	
Existence d'une qualification de fabrication du nouveau composant	7,2	x					0,0	
Existence formalisée d'un outil et choix du recueil de fiabilité (MIL, MIL recalé, RDF, REX perso.)	7,7		x				9,2	
Identifier et mettre en oeuvre des moyens de protection des sous ensembles durant certaines activités de production équipement	7,3			x			17,4	Cette recommandation n'a pas été comprise au niveau de ses critères d'application
Identifier les risques techniques impactant la fiabilité	21,0	x					0,0	
Intervention à chaque étape d'un responsable soutien, industrialisation, achat, développeur et FMDS (RS, RI,RA, RD, FMDS) (ingénierie simultanée)	16,7					x	59,6	Détail à modifier sur la forme (enlever les abréviations)
Organiser une revue de conception système où les aspects Fiabilité sont traités	12,1			x			28,8	
Test production : existence d'une spécification de recette	7,8					x	27,8	
Test production : existence d'une définition des points de test et application des recommandations de test	0,0						-	difficile de répondre pour EC sans demander au fournisseur la justification
Test prototype : maximiser la couverture de test sur la base de la spécification et justification	6,0		x				7,1	critère 3 à revoir
Utilisation de moyens de modélisation validés et reconnus	13,5	x					0,0	
	314,8	###		###			535,4	16,0%
							1124,4	
							0,48	

Fig. 58 : Résultat de l'audit fiabilité

Une analyse rapide permet de dire que la conception de cet équipement n'est pas toujours réalisée dans les règles de l'art et que de nombreuses améliorations du processus pourraient être proposées.

2.3.1.4. Autres phases

Les autres phases du processus ont été traitées de la même manière. Sans présenter l'intégralité des travaux d'évaluation, retenons que lors de ces premières expérimentations, l'audit a dévoilé quelques limites et défauts de jeunesse (en grande part corrigés à ce jour).

Ce paragraphe expose ceux rencontrés lors de l'évaluation du π_{process} de FIDES, au cours de la construction du guide d'audit comme pendant sa mise en œuvre. Il montre d'autre part les modifications réalisées depuis pour pallier à ces limites.

Les cibles

L'application du guide d'audit passe par la recherche des cibles capables de répondre aux questions. Bien que la décomposition par phase et l'identification des cibles soient proposées dans le guide FIDES, on peut constater certaines limites.

Pour une évaluation de fiabilité dont l'importance est faible (c'est-à-dire pour un équipement peu critique représentant un coût de cycle de vie mineur), il est difficile d'effectuer un audit fiabilité en contactant toutes les cibles concernées. On le réalise alors avec des personnes sachant répondre au moins partiellement aux questions car d'un point de vue "coût de l'évaluation" comme d'un point de vue "délais", il est important de limiter le nombre d'acteurs intervenant.

Notons que si ces remarques s'appliquent à de nombreux équipements, ce n'est pas le cas pour les équipements critiques en matière de sécurité ou de coûts : pour ces derniers, l'évaluation intégrale du π_{process} est nécessaire (en général, les moyens alloués suffisent largement à l'application complète des modèles).

Les recommandations

La plupart des limites que nous pouvons énoncer sur les recommandations sont associées à la jeunesse du guide FIDES : ce sont essentiellement les erreurs de rédaction, d'orthographe ou de mise en page, les problèmes de compréhension, etc. qui ont entraîné les modifications des recommandations.

Malgré cela, la majorité des questions et recommandations étaient compréhensibles mais elles se sont parfois révélées inapplicables : certaines ne correspondaient pas à des actions envisageables pour améliorer la fiabilité, elles ont été supprimées.

Des recommandations importantes (et donc les questions d'audit associées) sont en outre apparues comme manquantes dans FIDES, elles ont alors été rajoutées. Leurs pondérations ont été effectuées par l'estimation d'experts du domaine.

Enfin, soit l'impact de certaines recommandations a été jugé inapproprié, soit leurs niveaux de satisfaction ont été considérés comme mal calibrés. On a ainsi redéfini les notes ou amélioré les critères d'appréciation.

2.3.1.5. Résultats

Les résultats de l'audit fiabilité servant à évaluer l'impact du processus se traduit au moyen du tableau suivant :

Origine Défauts	Saisie de la répartition "Processus"		Process Grade i
Spécification	10%	8,0%	0,67
Conception	20%	16,0%	0,48
Production	30%	24,0%	0,10
Intégration	15%	12,0%	0,67
Exploitation	25%	20,0%	0,35
Activités Support		20,0%	0,44
	Total %	100%	100%
			0,24

$\pi_{Process} = 4,86$
--

Fig. 59 : Calcul du $\pi_{process}$

La méthode de calcul aboutit dans ce cas à une valeur de $\pi_{process}$ de 4,86.

La non-réponse à une part des recommandations et son estimation par expertise pouvant cependant entraîner une erreur sur le résultat, nous pouvons donner un intervalle de confiance sur la valeur du $\pi_{process}$: la valeur maximale est élaborée en considérant que toutes les recommandations non renseignées sont au critère minimal (critère 1), et inversement pour la valeur minimale (critère 4). Le $\pi_{process}$ se situe donc entre un minimum de 4,2 et un maximum de 5,3.

Ces valeurs fortes du $\pi_{process}$ correspondent à celles d'un équipement réalisé par un constructeur de petite envergure qui ne possède pas l'ensemble des qualifications aéronautiques permettant un bon déroulement du cycle de vie.

2.3.2. Analyse effectuée avec le modèle "carte "

2.3.2.1. Mise en œuvre du modèle

L'application du modèle "carte" a été décidée pour tester son applicabilité. Bien qu'en principe moins pertinente qu'avec le modèle composant, cette évaluation est une référence supplémentaire de comparaison de la valeur prédictive élaborée.

Effectué en considérant les fonctionnalités de nos cartes, ce travail a été réalisé comme suit.

1^{ère} étape, recueil des informations sur les fonctions des cartes : cette étape simple consiste à récupérer les informations techniques nécessaires (nombre et fonction des cartes).

2^{ème} étape, analyse des fonctions : cette étape primordiale consiste à établir une correspondance entre les fonctionnalités décrites dans le modèle FIDES et celles décrites dans la documentation technique. Les difficultés rencontrées sont dues au fait que les dénominations des fonctions ne correspondent pas toujours, deux fonctions techniques pouvant être associées à une seule fonction FIDES. Cette analyse nécessite donc un certain niveau d'expertise : dans notre cas, nous avons fait appel à un spécialiste en maintenance des équipements.

3^{ème} étape, analyse de l'environnement et du profil d'emploi de l'équipement : un environnement type "avionique embarquée hélicoptère" a donc été créé dans le cadre de cette étude.

PROFIL DE MISSION :							
PHASE	On / Off	t _{annuel-phase}	THERMIQUE	CYCLAGE THERMIQUE			
			T _{ambiente}	$\Delta T_{\text{cyclage}}$	θ_{cy}	N _{cy-annuel}	T _{max-cyclage}
Sol operating	On	100	60	15	0,14	724	65
vol operating	On	800	45	31	1,60	500	50
sol dormant	Off	7 860	14	10	21,53	365	19
Somme (1an = 8760 h) ==>		8 760					

HUMIDITE		MECANIQUE	CHIMIQUE			
RH _{stockage-carte}	T _{stockage-carte}	G _{RMS-phase}	Polution saline	Polution artificielle	Zone d'application	Niveau de protection
-	-	4,0	Faible	Zone urbaine	Habitée	Non Hermétique
-	-	6,0	Faible	Zone inhabitée	Habitée	Non Hermétique
60	14	-	Faible	Zone urbaine	Habitée	Non Hermétique

Fig. 60 : Exemple de profil de mission hélicoptère

4^{ème} étape, évaluation du $\Pi_{process}$: décrite précédemment, elle est généralisée au modèle "cartes" et au modèle "composant".

5^{ème} étape, mise en œuvre de FIDES sur les fonctions analysées : c'est l'étape la plus longue d'un processus d'évaluation de fiabilité avec ce modèle, puisqu'elle nécessite de renseigner les paramètres Π_{induit} , $\Pi_{part_manufacturing}$ et $\lambda_{physique}$.

Pi INDUIT			
	Pi induit imposé	<input type="checkbox"/> imposé Pi induit	
PHASE	Π_{induit}	C _{application}	C _{recommandation}
Sol operating	2,5	3,0	7,125
Vol operating	2,8	4,0	7,125
Sol dormant	2,1	1,9	7,125

Fig. 61 : Calcul du Π_{induit}

Pi Part Manufacturing		Pi part imposé	<input type="checkbox"/> imposé l'influence de Pi Part
		1	
Π_{PM}	1,339		
Description du niveau d'Assurance Qualité fabricant		Position par rapport à l'état de l'art	
Pas d'informations ou non certifié ISO 9001 version 1994		Inférieur	
Description du niveau d'Assurance Qualité sous-ensemble		Position par rapport à l'état de l'art	
Procédure connue de qualification / déverminage interne au fabricant		Equivalent	
Description du risque lié à l'utilisation de ce fabricant			
Fabricant reconnu - Procédés non analysés ou non matures pour le produit considéré			

Fig. 62 : Calcul du $\Pi_{part_manufacturing}$

2.3.2.2. Résultats

L'évaluation de fiabilité avec le modèle carte se révèle donc être simple et très rapide à mettre en œuvre. Les résultats obtenus peuvent alors être présentés soit par type de stress soit par phase du profil.

Résultats par type de stress						
		Thermique	Cycle thermique	Mécanique	Humidité	Chimique
MTBF FIDES	$\lambda_{FIDES (FIT)}$	= (21,5% . λ_{Th} + 11,7% . λ_{Tcy} + 55,7% . λ_m + 0,1% . λ_{RH} + 11,1% . λ_{CH}) . Π_{PM} . Π_P				
Carte	59698	16750,956	= (549	+ 298	+ 1423	+ 1 + 282) . 1 . 5

Résultats par phase du profil				
		Sol operating	Vol operating	Sol dormant
$\lambda_{FIDES (FIT)}$	=	Π_{PM} . Π_P . (7,4% . $\lambda_{Ph.1}$ + 82,6% . $\lambda_{Ph.2}$ + 10,0% . $\lambda_{Ph.3}$)		
Carte	16751	= 1,34 . 4,90 . (190	+ 2109	+ 255)

Fig. 63 : Résultat de l'évaluation de fiabilité avec le modèle carte

Ceci permet alors une analyse fine de l'impact des différents facteurs sur la fiabilité. Nous comparerons ces résultats avec les évaluations réalisées avec d'autres modèles.

2.3.3. Analyse de fiabilité avec le modèle "composant"

2.3.3.1. Mise en œuvre du modèle

De la même façon qu'a été utilisé le modèle "carte", nous appliquons le modèle "composant" en calculant les facteurs de processus (même estimation), de manufacturing (estimé cette fois composant par composant) et d'induit.

Le taux de défaillance physique est estimé par composant, il faut donc utiliser une nomenclature détaillée des cartes étudiées pour estimer la fiabilité. Les résultats pour le modèle "composant" sont les suivants.

2.3.3.2. Résultats

$\lambda_{\text{Ensemble}} = \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{Composant}_i}$			
17355,10 FIT			
	$\lambda_{\text{composant (FIT)}}$	Quantité	$\lambda_{\text{FIDES (FIT)}}$
Condensateur tantale	867,65	34	25,519
condensateur céramique	503,62	221	2,279
Diodes zener	39,11	11	3,555
Diodes de signal	50,59	16	3,162
Diodes de redressement	60,44	17	3,555
diodes de signal	15,24	7	2,177
Diodes de redressement	72,46	18	4,026
condensateurs céramiques	0,89	1	0,894
CI numériques	3,02	1	3,023
CI analogique	20,03	1	20,034
CI analogique	40,07	2	20,034
CI analogique	140,24	7	20,034
mémoire flash	2,09	1	2,094
CI numériques 14/20	12,87	4	3,218
CI 14/20	628,62	33	19,049
moins de 8 pates	320,54	16	20,034
Ram	3,77	1	3,772

Fig. 64 : Résultat de l'évaluation de fiabilité avec le modèle "composant"

Les résultats présentés ci-dessus ne montrent pas l'intégralité des composants présents sur les cartes, le calcul de Lambda ($\lambda = 17355.10^{-9}$ défaillances / heure de fonctionnement) est cependant le résultat global de l'évaluation avec FIDES.

2.3.4. Conclusions

2.3.4.1. Comparaison des résultats

Avec notre cas d'étude fictif, nous constatons que les résultats donnés par la méthode carte et la méthode composant sont très proches.

	MTBF calendaire
MIL HDBK 217	13379
FIDES composants	57620
FIDES carte	59698

Il apparaît de plus que la référence MIL HDBK217 F donne un résultat très pessimiste, cet avis étant confirmé par l'ensemble des publications sur le sujet.

Nonobstant la cohérence des résultats, nous ne pouvons valider ceux-ci sans retour d'expérience. Aussi, pour valider notre approche, appuyons-nous sur la publication du groupe FIDES [FIDE04] qui présente les résultats suivants :

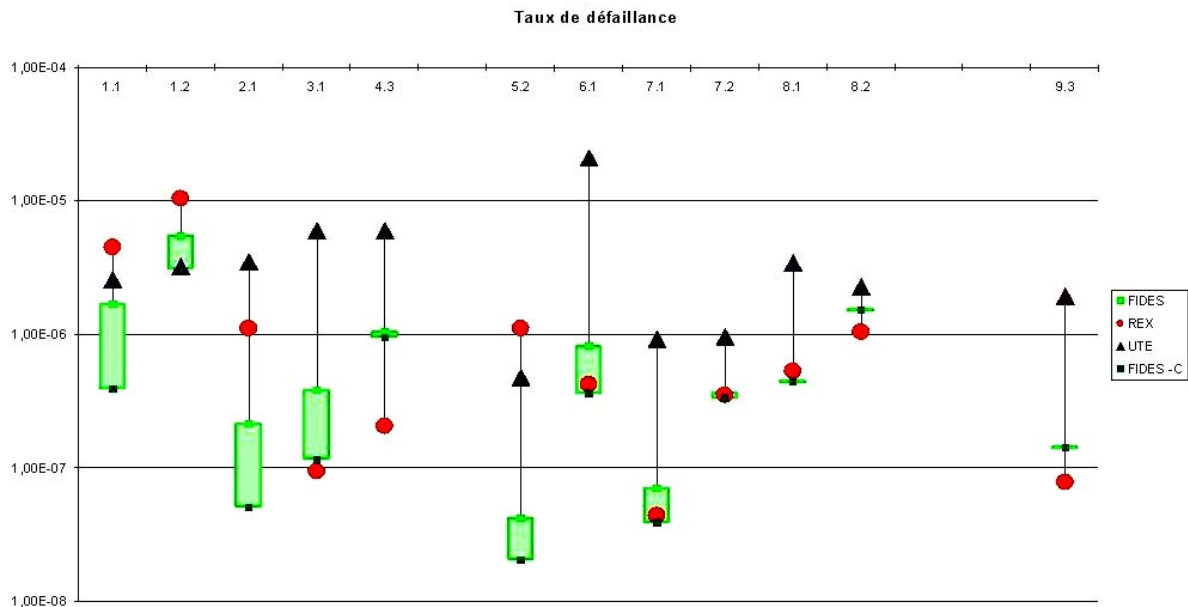


Fig. 65 : Prédiction de fiabilité avec le modèle FIDES

Sur ce graphique, on s'aperçoit que lors d'une expérimentation sur 12 cartes, la modélisation de fiabilité avec FIDES donne de très bons résultats pour neuf d'entre elles et des valeurs acceptables pour deux autres. Il semble en outre que la dynamique du modèle soit adaptée pour la prise en compte des environnements et des processus.

2.3.4.2. Conclusion générale

Pour conclure, retenons que le modèle FIDES est pertinent pour les prévisions de fiabilité et qu'il continue à évoluer en vue d'améliorer la qualité de ses prédictions.

Non seulement les familles de composants électroniques sont en très grande part couvertes par la méthodologie, mais de plus la méthode "carte" a montré une simplicité d'usage et des résultats cohérents.

En ce qui concerne plus directement ces recherches, nous avons montré l'intérêt de l'estimation de l'impact des processus sur la fiabilité. Il apparaît cependant que le $\pi_{process}$ entraîne d'importants changements dans les habitudes des services de Sûreté de Fonctionnement, ce qui implique certaines limites à l'usage de FIDES.

2.3.4.3. Limites à l'usage de la méthodologie FIDES

Le besoin d'une nouvelle méthode d'estimation de fiabilité étant évident pour tous les experts du domaine, FIDES vient combler cette attente : aujourd'hui la pertinence de ces travaux est reconnue. Des limites d'usage sont toutefois associées à ce modèle et il nous faut y prendre garde pour qu'il demeure une référence.

Comme nous allons nous attacher à le montrer, les difficultés d'usage et le coût de mise en œuvre de FIDES constituent la plus importante d'entre elles.

Dans le cadre de l'évaluation de sûreté de fonctionnement, on réalise les tâches suivantes : FMECA, FMES, Analyse de fiabilité. Cette dernière se décompose ainsi : évaluation du profil de mission, évaluation des environnements, calcul des taux de défaillance composant, sommation et analyse, étude de sécurité, calcul des taux de défaillance élémentaires par fonctionnalité.

Pour les tâches présentées précédemment, on peut évaluer le travail entre 250 et 300 heures, soit un coût compris (arbitrairement) entre 25000 et 30000 Euros. Le choix de la méthode d'évaluation de fiabilité entre le RDF2000 et le MIL HDBK217 n'a pas d'impact particulier sur celui-ci.

À l'exception de l'évaluation du processus par audit, la part Evaluation de fiabilité avec FIDES se fait dans un cadre équivalent à celui des autres méthodes. On peut considérer qu'à terme FIDES sera une méthodologie implémentée sous forme logiciel, et que par conséquent son coût (hors évaluation de processus) sera le même que celui des autres méthodologies (de 25000 à 30000 Euros).

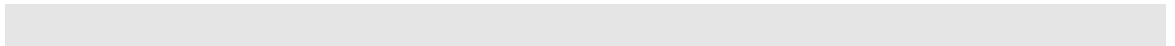
L'audit FIDES s'applique aux six phases du cycle de vie d'un produit, pour lesquelles 202 questions d'audit permettent d'évaluer l'impact des processus sur la fiabilité des composants. Ce travail représente environ 80 heures, soit un coût de 8000 Euros.

Le coût total des activités Sûreté de Fonctionnement concernant l'équipement étudié passerait alors de 28000 Euros (en moyenne) à 35000 Euros, ce qui représente environ 26 % de supplément. Même si un industriel possède des processus qui restent toujours les mêmes et si l'audit demeure valable pour les produits d'une même gamme, cette différence de coût semble rédhibitoire.

De ces remarques, il s'avère important en conséquence de simplifier l'audit FIDES d'évaluation de la fiabilité. A ce jour, plusieurs solutions sont envisagées et pourraient faire

l'objet de travaux ultérieurs : simplifier l'usage de la part Process du guide d'évaluation, autoriser les notes par défaut dans le cadre d'agréments qualités appropriés, ou encore évaluer les recommandations majeures et simplifier l'audit par des Pareto d'influence des recommandations.

Finalement, le coût d'évaluation de la fiabilité avec FIDES est certes plus élevé que celui des autres méthodes, mais il se justifie par de meilleurs résultats et un potentiel non seulement de prévision mais aussi de construction de la fiabilité.



3. Evaluation des coûts de maintenance

3.1. Introduction

Comme nous l'avons vu, on peut schématiser la prévision d'un DMC par l'estimation d'une fiabilité et par celle d'un coût de réparation. Aussi, après avoir estimé le premier membre de notre quotient, l'objectif de ce paragraphe sera-t-il de calculer un coût de réparation du calculateur.

3.2. Analyse des coûts

3.2.1. Analyse des paramètres du modèle

Notre modèle de coûts de réparation des systèmes électroniques se fonde sur une analyse technologique du produit le modèle est dépendant des paramètres suivants.

Nombre de cartes :	Petites	0
	Moyennes	3
	Grandes	0
	Autres divers (boîtiers, alimentation...)	1
Pourcentage de cartes réparables		20%
Présence de composants exotiques		2 (un peu)
Prix de vente du calculateur		25000 €uros
Fiabilité totale du calculateur (MTBF)		16650 heures

3.2.2. Coûts des tests de détection et de validation

La maintenance des systèmes électroniques passe aujourd'hui par l'analyse des pannes et la validation à l'aide de bancs de test spécifiques. S'il est vrai que les équipements possèdent de plus en plus souvent des systèmes d'autotest pour limiter l'utilisation de ces bancs d'essai, ce n'est pas le cas de notre calculateur de contrôle vibratoire.

Aussi le calcul du coût du banc de test se base-t-il sur les informations suivantes :

Prix du banc de test :	1 200 000 €uros
Nombre d'heures d'utilisation du banc par jour :	20 heures
Nombre de jour d'utilisation du banc par semaine	5 jours

Durée d'amortissement : 5 ans
Actualisation : 2% par an

Le coût d'amortissement de la base est alors le suivant :

$$\text{Coût base banc test} = 1\,200\,000 * 1,02^5 / (20 * 5 * 5 * 52) = 51 \text{ €uros par heure}$$

Quant au coût de l'usage spécifique du modèle, il est calculé comme suit :

Prix de la part spécifique au calculateur 30 000 €uros
Durée de service du module 30 ans

Utilisation de la routine :

Flotte de calculateurs de ce type 500 exemplaires
MTBF 16500 heures
Cadence de vol moyenne par an 400 heures

Soit en moyenne 4,8 défaillances par an.

Ce qui ramène le coût d'usage spécifique du banc de test (avec la même actualisation que précédemment) à :

Coût usage spécifique banc = 30 000 * 1,0230 / (4,8*30) = 377 €uros par routine de test.

De plus, un tableau d'usage moyen des banc de test nous donne une estimation des temps de test qui sont pour un système analogique / numérique : 8 heures de test de bon fonctionnement et 20 heures de détection.

Ceci nous permet donc d'établir le coût d'amortissement total hors main d'œuvre pour ce calculateur :

$$\mathbf{51 \text{ €uros} * 28 \text{ heures} + 377 \text{ €uros} = 1805 \text{ €uros de test}}$$

Le temps de main d'œuvre associé au test est défini par type d'équipement sur la base d'une valeur moyenne. Pour notre calculateur, elle sera estimée entre 1,5 heure en valeur mini et 3 heures en valeur maxi, avec une valeur probable de 2.25 heures.

3.2.3. Eléments de rechange

3.2.3.1. Coût de main d'oeuvre

Le coût de l'échange standard représente la main d'œuvre de réparation. Son coût reste relativement faible aux vues du coût global de la réparation.

Dans notre cas, vu le nombre limité de cartes dans l'équipement; il sera compris entre 0,8 et 1,2 heures.

3.2.3.2. Coût de l'échange standard :

Les éléments de rechange lors des réparations des systèmes complexes sont considéré comme étant les trois cartes identiques ou le boîtier.

De plus nous avons considéré que 20% du temps, l'élément en panne est réparé.

Le résultat avec nos deux modèles est le suivant :

a) Modèle simple.

En moyenne le coût de réparation des sous-ensembles représente une proportion (paramétré pour réparable, non réparable ou en % de réparable) du prix du sous-ensemble. Le prix d'un sous-ensemble correspond alors à la division du prix du système par le nombre de sous-ensemble.

Le prix moyen d'un sous-ensemble pour le calculateur est de $25000/4 = 6250$ Euros.

L'équipement est réparable à 20 %, nous estimons les coûts moyens d'une réparation à 5750 Euros.

Ce modèle montre cependant ses limites du fait qu'il moyenne le prix des cartes et du boîtier et ne prend pas en compte la complexité. C'est pourquoi le modèle complexe nous semblait préférable.

b) modèle complexe

Le principe général de calcul est le même que pour le modèle simple, cependant nous tenons ici compte du prix relatif de différents types de sous-ensembles : nous considérons ici 3 cartes identiques (grandes) et un boîtier.

Le prix relatif entre carte et boîtier est de 10 pour les cartes et 3 pour le boîtier. La fiabilité relative est respectivement de 1 pour les cartes et 2 pour les boîtiers.

Nous évaluons alors le nombre de carte par catégorie et leur fiabilité relative, ces données nous permettent de connaître la proportion des différents types de cartes dans l'occurrence des pannes. Le prix de réparation du calculateur est évalué par une moyenne du prix de réparation des différents types de sous-ensembles, pondérée de l'occurrence de leur défaillance.

On considère de plus que 20% des cartes sont réparables et comme nous l'avons vu, la présence de composants spéciaux pondère le prix des réparations de 10%, ce qui nous mène à

un prix de rechange de 7576 € pour les cartes et de 2273 € pour les boîtiers (non réparables).

Une fois pondéré par la probabilité d'occurrence des pannes de chacun des sous ensembles, on a alors une valeur moyenne de pièces de rechanges par défaillance compris entre 5667 et 8500 €. Avec 7083 € comme valeur probable.

3.2.4. Autres coûts

3.2.4.1. Coûts logistiques

Ils correspondent au transport aller/retour du ordinateur entre le client et le site de réparation et au temps de main d'œuvre nécessaire pour la gestion de l'équipement défaillant.

Les valeurs arbitraires de notre modèle sont les suivantes :

- Prix du transport compris entre 48 et 72 €
- Main d'œuvre : entre 1,5 et 3 heures de gestion

3.2.4.2. Coût de stock

Ce coût correspond au stockage des pièces de rechanges nécessaires à la réparation dans un délai permettant d'assurer la disponibilité exigée pour une flotte de machine donnée.

Pour une disponibilité totale de 90% à 3 jours pour les 500 équipements en service on considère alors un coût de stockage compris entre 0,8 et 1,2% de la valeur des équipements.

3.2.5. Résultat

3.2.5.1. Coût de réparation

Le coût de réparation de notre équipement peut alors se résumer par le tableau suivant :

	Coût total de la main d'oeuvre	Coût de l'atec	Transport	coût total des Pièces de rechange	Coût total du sotck	Total
Min	244 Euro	947 Euro	48 Euro	5667 Euro	200 Euro	7299 Euro
Moy	403 Euro	1131 Euro	60 Euro	7083 Euro	250 Euro	8927 Euro
Max	573 Euro	1316 Euro	72 Euro	8500 Euro	300 Euro	10557 Euro

Fig. 66 : Estimation des coûts de réparation

Notre évaluation de coût de réparation paramétré par activité nous donne alors un coût de réparation compris entre 7300 et 10560 € avec une confiance de 80% sur le résultat.

Sur cette base nous pouvons évaluer le DMC de notre ordinateur :

3.2.5.2. Calcul du DMC

L'indicateur de DMC représente un quotient du coût de réparation par une fiabilité plus le quotient d'un coût de révision par un temps entre maintenance préventive.

Or bien souvent dans le cas des systèmes électronique, et dans notre cas en particulier, il n'y a pas de maintenance préventive.

L'estimation du numérateur (le coût de réparation) donne un résultat compris entre 7300 et 10560 Euros, avec une valeur probable de 8947 Euros en moyenne par réparation.

Notre estimation de fiabilité correspond à un temps moyen entre défaillance MTBF de 58 000 heures calendaires. Si on se rapporte à des heures de fonctionnement (avec 100 heures de vol par an), cela correspond à un MTBF par carte de :

$$\mathbf{MTBF_{carte} = 58\ 000 / 8760 * 100 = 662 \text{ heures de vol}}$$

De plus, notre équipement est constitué de trois cartes identiques et d'un boîtier dont nous estimerons la fiabilité à 100 000 heures de fonctionnement de l'appareil

Notre valeur de fiabilité prévisionnelle est alors de :

$$\mathbf{MTBF_{équipement} = 1 / (3/662 + 1/ 100\ 000) = 220 \text{ heures de vol.}}$$

La fiabilité globale de ce calculateur est particulièrement faible, ceci pour deux raisons principales : d'une part nous avons montré que le processus fiabilité de cet équipement est assez médiocre et d'autre part l'usage très faible (100 heures par an) de l'hélicoptère en question implique de nombreuses pannes (l'influence des phases de stockage sur la fiabilité se ressent).

Le calcul du DMC est alors très simple : $DMC = \text{Repair cost} / MTBF$

$$\mathbf{33,1 \text{ Euros par heure de vol} < DMC < 47,9 \text{ Euros par heure de vol}}$$

Nous retiendrons comme valeur probable la valeur centrée de DMC de 40,5 Euros par heure de fonctionnement. Ce montant de DMC pourra être utilisé soit pour engager un réparateur agréé sur ses tarifs, soit pour s'engager sur un contrat de coût par heure de vol auprès d'un client.

3.2.6. Conclusion

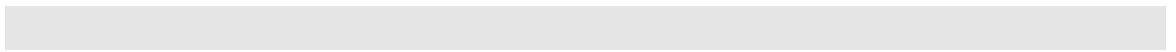
La mise en œuvre complète d'une modélisation de DMC nous a montré comment à partir d'informations techniques très sommaires nous pouvons faire une estimation pertinente de coûts de maintenance et donc de coût d'exploitation d'un équipement.

Si dans le cas de notre exemple nous nous sommes limité à l'étude d'un système avionique, il va de soi que le même calcul peut être réalisé sur d'autres éléments à condition de disposer d'un minimum de données techniques ou d'expertise pour réaliser une évaluation de coût pertinente.

Notons pour finir que les outils présentés dans ce chapitre peuvent être utilisés dans le cadre de la maîtrise des coûts d'exploitation. Dans ce cas, soit on maîtrise la fiabilité soit on maîtrise les coûts.

Pour ce qui est de la maîtrise des coûts il s'agit principalement de procédure d'ingénierie, et éventuellement dans le cas des équipements électroniques, d'actions commerciales d'engagement fournisseur.

En nous limitant à l'utilisation directe des travaux présentés dans cette thèse, nous montrerons comment une bonne construction de la fiabilité permet de réduire les coûts d'exploitation d'un système.



4. Maîtrise des coûts d'exploitation

4.1. Introduction

Nous verrons dans ce paragraphe comment l'utilisation des modèles décrits précédemment, et en particulier celle de FIDES, offre des gains possibles sur les coûts de cycle de vie des produits.

Outil de prévision de fiabilité, FIDES se fonde sur la prise en compte de facteurs de technologie, de processus et d'utilisation, trois composantes considérées sur l'ensemble du cycle de vie du produit. La part "construction de la fiabilité" de FIDES a quant à elle vocation de proposer des recommandations afin d'améliorer les processus, depuis la spécification du COTS jusqu'à son remplacement en exploitation lors de sa maintenance.

Nous montrerons, à travers un exemple d'étude, l'impact de la variation du facteur de processus sur le LCC (*Life Cycle Cost*) d'un équipement.

4.2. Rappels sur le modèle

4.2.1. Rappel général

Le modèle général FIDES applicable aux COTS se base sur l'équation ci-dessous :

$$\lambda = \left(\sum Contribution_physiques \right) \cdot \left(\prod Contributions_processus \right)$$

où $\sum Contribution_physiques$ est un terme de construction principalement additif qui correspond aux contributions physiques et technologiques à la fiabilité, et $\prod Contributions_processus$ est un terme multiplicatif qui représente l'impact du processus de développement, de production et d'exploitation sur la fiabilité. Le taux de défaillance global de l'équipement électronique s'obtient en faisant la somme de l'ensemble des taux de défaillance de chacun des éléments le constituant.

$$\lambda_{\text{équipement}} = \left(\sum_{COTS} \lambda_{COTS} \right)$$

4.2.2. Contributeurs processus

4.2.2.1. Le facteur $\pi_{Part\ manufacturing}$

Le facteur $\pi_{Part\ manufacturing}$ est un facteur représentatif de la qualité du composant. La méthode d'évaluation se décline selon la nature du COTS considéré (composant électronique actif ou passif, COTS cartes, autres COTS sous-ensembles).

Il est de la forme :

$$\Pi_{Part_Manufacturing} = e^{\delta_1 \cdot \left[\frac{(AQ_{fabricant} + AQ_{composant} + AF_{composant}) \times \epsilon}{36} \right]}$$

4.2.2.2. Le facteur $\pi_{Process}$

Le facteur $\pi_{Process}$ est représentatif de la qualité et de la maîtrise technique de la fiabilité dans le cycle de vie du produit.

Il est de la forme : $\pi_{Process} = e^{\delta_2(1-Process_Grade)}$

où le *Process_grade* est la note reflétant cette maîtrise processus, et δ_2 un facteur de corrélation qui détermine la plage de variation du facteur $\pi_{Process}$. Celle-ci est de 1 (pour le meilleur processus) à 8 (pour le pire processus).

4.3. Analyse des coûts de cycle de vie

La fiabilité d'un équipement intervient sur les différents postes du calcul du *Life Cycle Cost* que sont les stocks de pièces de rechanges, les coûts de main-d'œuvre en exploitation (MMH *Main Man Hours*) et les coûts directs de maintenance (DMC).

Prenons comme exemple d'étude les valeurs suivantes :

- fiabilité observée : 9100 heures
- coût de remise en état de l'équipement : 9000 €
- prix neuf de l'équipement : 25000 €
- taux de rebut : 10 %
- main-d'œuvre en maintenance pour cet équipement : 3 heures

4.3.1. Calcul de coût de stock

Le calcul de stock se fait par utilisation de la loi de Poisson, il donne une probabilité de non-rupture de stock (fixée dans notre exemple à 99,5% au moins). Il y a 2 équipements par appareil, le stock est dimensionné pour une flotte de 20 machines volant en moyenne 1000

heures par an et le temps de réapprovisionnement des pièces est de 60 jours. Dans ce cas d'étude le stock calculé est de trois pièces, soit 75000 € de valeur. Le coût du stock s'élève à 10 % de sa valeur par an, soit 7500 €/an. Rapporté par machine et par heure de vol, on a donc un coût de 0.375 €/appareil/heure.

4.3.2. Calcul de coût de main d'œuvre

La main-d'œuvre directe de maintenance pour cet équipement est de deux heures pour la dépose-pose. L'opération est effectuée à chaque panne, soit en moyenne deux fois toutes les 9100 heures par machine (2 équipements par machine). Le coût de la main-d'œuvre technique allouée à cette tâche est de 70€ de l'heure, ce qui équivaut à un coût de 0,03 € par heure de vol et par appareil.

4.3.3. Calcul de coût direct de maintenance

L'équipement est uniquement soumis à de la maintenance corrective. Son DMC est de : $9000/9100 \times 0,9 + 25000/9100 \times 0,1 = 1,165$ € par heure de vol, soit 2,33 € par heure de vol et par machine (deux équipements par machine).

La somme des trois pôles inducteurs de coût de cycle de vie pour cet équipement est alors de 2.735 € par heure de vol et par machine.

4.4. Impact du processus sur le cycle de vie

Dans l'absolu, les contributeurs de processus que sont le $\pi_{\text{part-manufacturing}}$ et le π_{process} représentent une influence sur la fiabilité d'un équipement comprise entre un facteur 1 et un facteur 16. Dans le cas d'une application aéronautique, il paraît cependant acquis qu'il est impossible d'être confronté aux bornes supérieures et inférieures de cet intervalle.

Le cas d'étude développé est celui d'un équipement hypothétique provenant d'un équipementier aéronautique mineur.

4.4.1. Hypothèses d'étude

Valeurs observées :

- $\pi_{\text{part manufacturing}} = 1.5$
- $\pi_{\text{process}} = 5.2$
- la fiabilité observée de l'équipement est de 9100 heures de MTBF

Le tableau ci-dessous décompose l'impact du $\pi_{process}$ sur l'ensemble des phases du cycle de vie

Origine Défauts	Saisie de la répartition "Processus"		Pts_P	Pts_P Max	Process Grade i
Spécification	10%	8,0%	152	222	0,68
Conception	20%	16,0%	304	1172	0,26
Production	30%	24,0%	456	4792	0,10
Intégration	15%	12,0%	228	342	0,67
Exploitation	25%	20,0%	380	2042	0,19
Activités Support		20,0%	380	877	0,43
Total %	100%	100%	1899	9447,7	0,20

$\pi_{Process} = 5,26$
--

Fig. 67 : Impact du $\pi_{process}$ sur l'ensemble des phases du cycle de vie

On voit ainsi que les phases dégradant majoritairement la fiabilité sont, dans l'ordre, la production, l'exploitation et la conception.

4.4.2. Analyse de sensibilité

Les acteurs représentés par chacune des phases de cycle de vie d'un équipement sont différents. Dans le cas de l'équipement étudié, nous pouvons regrouper les phases du projet de la sorte :

- | | |
|---|--------------------------|
| Spécification, intégration, maintenance (en partie) | → Intégrateur |
| Conception, production | → Equipementier |
| Exploitation | → Client en exploitation |
| Activités support | → Tous |

Pour le calcul, on suppose que l'amélioration d'une phase passe par l'amélioration globale d'un des acteurs du processus. On considère de plus que l'amélioration du processus se fait en fonction de la marge de manœuvre d'amélioration de chacun.

4.4.2.1. Amélioration du processus équipementier

Nous faisons ici l'hypothèse que le processus équipementier s'améliore en passant du niveau de l'équipementier actuel à celui estimé pour un équipementier majeur. Le calcul du $\pi_{process}$ est alors le suivant :

Origine Défauts	Saisie de la répartition "Processus"		Poids	Points Bruts	% Pts_B	Scale Fact	Pts_P	Pts_P Max	Process Grade i
Spécification	10%	8,0%	170	348	12,4%	x 0,65	225	330	0,68
Conception	20%	16,0%	321	642	22,8%	x 0,70	450	675	0,67
Production	30%	24,0%	326	611	21,7%	x 1,11	675	1082	0,62
Intégration	15%	12,0%	371	743	26,4%	x 0,45	338	506	0,67
Exploitation	25%	20,0%	292	163	5,8%	x 3,45	563	3025	0,19
Activités Support		20,0%	237	308	10,9%	x 1,83	563	1299	0,43
Total %	100%	100%	1717	2814		100,0%	2814	6917,3	0,41

$\pi_{Process} = 3,43$

Fig. 68 : Amélioration du processus équipementier

Le calcul du $\pi_{part-manufacturing}$ donne une valeur de 1,2. Or le modèle est directement multiplicatif sur les taux de défaillance, ce qui nous donne :

$$\lambda = \lambda_{Physique} \cdot \pi_{Part_manufacturing} \cdot \pi_{Process}$$

$$\lambda_1 = \lambda_{Physique} \cdot 5,26 \cdot 1,5 \qquad \lambda_2 = \lambda_{Physique} \cdot 3,43 \cdot 1,2$$

et
$$MTBF_1 = \frac{1}{\lambda_1}$$

Dans le cas du choix d'un équipementier majeur, on a donc notre MTBF estimé égal à 17494 heures. Cette fiabilisation du produit entraîne en LCC les gains suivants :

- pas de gain en stock : l'augmentation de fiabilité n'est pas suffisante pour justifier de la diminution du nombre de pièces en stock
- le gain en main-d'œuvre est de près de la moitié du coût : 0,015€ par heure de vol
- le gain en DMC est quant à lui conséquent : DMC = 1,212 € par heure de vol et par machine.

Ce qui fait un gain potentiel de 45% sur les coûts de possession de cet équipement.

4.4.2.2. Amélioration du processus intégrateur

A l'instar du paragraphe précédent, une amélioration du processus pour l'intégrateur peut entraîner des gains potentiels en coûts opérationnels.

Le $\pi_{process}$ passe dans ce cas à une valeur de 4,94 (la marge d'amélioration étant nettement moins importante que pour le fournisseur) et le $\pi_{part-manufacturing}$ n'est pas impacté. Le MTBF augmente de 9100 heures à 9689 heures. Les conclusions sont les suivantes :

- pas de gain en stock : l'augmentation de fiabilité n'est pas suffisante pour justifier de la diminution du nombre de pièces en stock

- le gain en main-d'œuvre est négligeable
- le gain en DMC est de 6% soit 0,14 € de moins par heure de vol et par machine.

4.4.2.3. Amélioration du processus client

L'amélioration du processus client se traduit par un $\pi_{\text{process}} = 4,71$

Le gain potentiel (exclusivement en maintenance) représente 7% du DMC de notre équipement, soit 2,17 €/heure de vol

4.4.2.4. Amélioration simultanée des processus

Cette fois, on considère une amélioration conjointe des processus de l'équipementier, de l'industriel aéronautique et du client.

Le calcul du $\pi_{\text{part-manufacturing}}$ donne une valeur de 1,2.

Le calcul du π_{process} donne une valeur de 2.37 répartie comme suit :

Origine Défauts	Saisie de la répartition "Processus"		Scale Fact	Pts_P	Pts_P Max	Process Grade i
Spécification	10%	8,0%	x 0,85	254	433	0,59
Conception	20%	16,0%	x 1,11	508	1052	0,48
Production	30%	24,0%	x 0,97	762	950	0,80
Intégration	15%	12,0%	x 0,51	381	571	0,67
Exploitation	25%	20,0%	x 1,09	635	952	0,67
Activités Support		20,0%	x 2,06	635	1465	0,43
Total %	100%	100%	100,0%	3174	5423,9	0,59

$$\pi_{\text{Process}} = 2,37$$

Fig. 69 : Amélioration simultanée des processus

Ces améliorations de la fiabilité par l'application (fictive) du guide FIDES entraînent les gains suivants :

- la fiabilité augmente de 9100 heures à 25245 heures
- le coût des stocks passe de 0,375 € à 0.25 € par heure de vol et par machine
- le coût de main-d'œuvre réduit de 0.03 € à 0.01 € par heure de vol et par machine
- le DMC passe de 2,33 € à 0,84 € par heure de vol et par machine

Ceci représente donc une diminution du coût de possession de 60% pour notre équipement. Un tel gain est équivalent à iso fiabilité à un coût supplémentaire pour l'équipement de 8800 Euros (35 % d'augmentation sur le prix de l'équipement).

4.4.3. Bilan

Le bilan de ce que pourrait rapporter l'application du guide FIDES sur notre équipement exemple se traduit par le tableau ci-dessous :

		Actuellement	Amélioration des process équipementiers		Amélioration des process Eurocopter		Amélioration des process client		Amélioration globale des process	
MTBF en heures de vol		9100	17494		9690		10050		25245	
Pi process		5,2	3,43		4,94		4,71		2,37	
Pi part manufacturing		1,5	1,2		1,5		1,5		1,2	
Coûts de cycle de vie en euros	Coût de stocks	0,375	0,375	-0%	0,375	-0%	0,375	-0%	0,25	-33%
	Coûts de maintenance directs	2,335	1,212	-48%	2,59	11%	2,17	-7%	0,84	-64%
	Coût de main d'œuvre directe	0,03	0,015	-50%	0	-0%	0	-0%	0,01	-67%

On constate que pour un intégrateur, la maîtrise de la fiabilité et donc des coûts d'exploitation passe par la maîtrise de ses fournisseurs d'équipements.

Pour évaluer dans quelle mesure le gain potentiel en fiabilité compense le coût induit par l'application des recommandations, le paragraphe suivant compare le prix de l'équipement réalisé par un équipementier mineur à un chiffrage de ce qu'aurait coûté le même équipement s'il avait été réalisé par un équipementier appliquant ces recommandations.

4.5. Coût de la construction de la fiabilité

4.5.1. Méthode de calcul employée

Plusieurs méthodes ont été envisagées pour évaluer le coût de l'application des recommandations du guide FIDES :

- a) Chiffrage du coût de chacune des recommandations à chacun des niveaux d'application

Cette solution consiste à évaluer pour chacune des recommandations le coût de son application dans chacune des phases du processus. La charge de travail étant trop lourde, cette méthode de calcul a été abandonnée.

- b) Chiffrage du coût du passage d'un niveau de recommandation à un autre

Si on admet, en étant pessimiste, qu'il faut dix minutes pour chiffrer le coût de passage de chaque niveau pour chaque recommandation, il faudrait un total d'environ cent heures de travail pour réaliser cette tâche !

- c) Evaluation comparative du coût de l'application des recommandations

De même qu'on a évalué l'impact de chacune des recommandations par une note de 1 à 10, on a envisagé de chiffrer le coût de leur application. Cette méthode a été rejetée car pour avoir une évaluation homogène des coûts, elle nécessitait de réunir trop d'intervenants.

d) Méthode retenue

La méthode retenue pour évaluer les coûts de l'application est de comparer, pour deux équipementiers différents, le coût et la fiabilité chiffrés par chacun (l'un, société majeure de l'électronique et l'autre, mineure).

4.5.2. Evaluation de coût

On considère que l'équipement faisant l'objet de cette étude coûte 25.000 Euros, que le facteur de processus calculé est de 5,26 et la fiabilité observée de l'équipement de 9100 heures. On suppose par ailleurs que 80% de la différence du prix d'achat de l'équipement sont justifiés par les différences de niveau de qualité et donc de processus, ce qui permet (en comparant les $P_{i_{process}}$ atteints par chacun de ces équipementiers) de connaître le coût de l'application de certaines recommandations rapportées à un équipement.

Comme vu précédemment, l'amélioration du processus équipementier nous amène à un $P_{i_{process}}$ de 3,43. Le MTBF attendu, modélisé par la méthodologie FIDES dans le cas du choix d'un équipementier majeur, est alors égal à 17494 heures. Une expertise sur le chiffrage du coût de cet équipement permet d'estimer son prix d'achat entre 35000 et 38000 Euros.

Ramenée à l'équipement étudié, on peut donc évaluer le coût de la mise en œuvre des recommandations de construction de la fiabilité à :

$$(38000-25000) \times 0,8 = 10400 \text{ euros par équipement.}$$

4.6. Impact total sur le *Life Cycle Cost*

Dans notre exemple, l'application des recommandations de construction de la méthodologie FIDES implique un surcoût d'environ 10400 euros.

La construction de la fiabilité a quant à elle permis de passer d'un MTBF de 9100 heures à 17494 heures. En modifiant les hypothèses de coût, on a ainsi montré que l'augmentation de 41% du coût de l'équipement, due à l'application des recommandations FIDES, est largement compensée par le gain en fiabilité :

Coût de cycle de vie sans application des recommandations FIDES	2,74	
Coût de cycle de vie après application des recommandations FIDES	2,24	-18,25%

Certes ce constat ne s'applique qu'à un exemple mais on peut penser que, de manière générale, le gain potentiel réalisé en coût d'exploitation compense le surcoût entraîné par l'application des recommandations de construction de la fiabilité.

Conclusion et perspectives d'étude

Avant toute conclusion, rappelons que ce travail de thèse a été réalisé dans un cadre industriel et en réponse à des besoins précis, à savoir la prévision des coûts d'exploitation de systèmes aéronautiques sur hélicoptère. Malgré tout, loin de restreindre le champ d'action de nos travaux à ce domaine, nous avons cherché à les généraliser en dissociant autant que possible le contexte des moyens mis en œuvre. Nos modèles sont ainsi utilisables dans des secteurs industriels variés, pas de façon directe évidemment mais en adaptant le formalisme proposé à de nouvelles problématiques.

Cette thèse avait pour objectif d'établir des moyens permettant, dès la phase de conception, d'estimer les coûts de possession d'un système complexe.

Dans le premier chapitre, après avoir évoqué le contexte et les besoins au travers d'une analyse des processus de design, nous avons montré l'influence générale des coûts de maintenance sur le *Life Cycle Cost* (présentation de l'activité de maintenance et des coûts qui y sont associés).

De cette étude, nous avons décidé de limiter nos travaux sur le LCC à l'analyse des coûts de maintenance (part la plus importante et la plus difficile à quantifier) et avons donc proposé un état de l'art des outils existant dans ce domaine. Les indiscutables lacunes de ce dernier nous ont conduits à élargir le champ des recherches bibliographiques aux méthodes de prévision de coûts au sens large, c'est-à-dire les outils généralement utilisés dans le but de prévoir les coûts de production. C'est sur cette base que nous avons mis en œuvre plusieurs formalismes de prévision des coûts de maintenance.

Pour synthétiser ce premier temps de ma thèse, retenons les remarques suivantes. Tout d'abord, aucun outil "miracle" n'existe : l'emploi conjoint de plusieurs méthodes de prévision s'avère donc inévitable pour un système complexe. Ensuite, et cela peut paraître décevant, il est indiscutable que la simplicité est la clef de la réussite des modèles de coûts : en effet, l'utilisation de modèles complexes entraîne chez les décideurs une perte de confiance en la prévision, et l'outil n'en est alors que moins utilisé. Enfin, nous avons montré par le biais de cas d'étude que notre travail est utilisable dans un contexte industriel.

La seconde partie de cette thèse a consisté à analyser les périodicités de maintenance et à les associer aux coûts en raison de leur impact stratégique. D'un état de l'art évoquant trois moyens pour analyser la fiabilité d'un équipement (le retour d'expérience, l'expertise et les modèles prévisionnels), nous avons restreint nos recherches à la modélisation, méthode la plus adaptée en phase de design.

Nous avons donc participé au développement de FIDES, un modèle prévisionnel de fiabilité pour les systèmes électroniques qui innove par (entre autres) la prise en compte de paramètres extrinsèques de fiabilité : les facteurs de processus. De ces travaux devrait naître une nouvelle vision du métier de sûreté de fonctionnement avec l'application d'audit fiabilité : outil de prévision et de construction de la fiabilité, ainsi que de maîtrise des coûts.

Ces travaux s'articulent de ce fait autour de deux problématiques qui se rejoignent sur le même thème de description et d'optimisation du *Life Cycle Cost* : l'analyse des coûts et celle de la fiabilité. Dans le troisième chapitre, nous avons alors montré la force conjointe de ces outils, parfois simples, au travers d'un cas d'étude : la modélisation des coûts de maintenance de calculateurs avioniques.

Les perspectives d'étude sur le thème des coûts d'exploitation sont dès lors très diverses.

On peut en premier lieu évoquer les poursuites directes de ces travaux : l'amélioration des modèles proposés soit en terme de prévision de coûts, soit en terme de fiabilité (par exemple, en développant les moyens de prise en compte des processus).

Une seconde piste de recherche serait de progresser dans l'intégration, dès les phases amont de la conception, des problématiques de maîtrise du LCC avec notamment la mise en œuvre industrielle du *Design To Life Cycle Cost*.

Nous pouvons également proposer comme perspective l'étude de l'impact des nouveaux concepts de maintenance sur le LCC, en particulier la maintenance proactive et les solutions de diagnostic (intégrer des modèles de fiabilité prévisionnelle afin d'améliorer les diagnostics).

Enfin, la prise en compte de la disponibilité et de son impact sur les coûts présenterait un réel intérêt dans le cadre de la satisfaction de clients de systèmes non fiables.

Bibliographie

- [ACAD35] Académie française. Dictionnaire de l'Académie Française. Sixième édition. Paris 1835.
- [AECM01] AECMA, AECMA Specification 1000D. International Specification for technical Data Publications, Utilising a Common Source DataBase, Recommandation, version 1.9, du 01-04-2001.
- [AFN01] X 60-319 norme européenne ICS : Terminologie de la maintenance. AFNOR, Juin 2001
- [AFN86] Norme AFNOR X 60-502. Fiabilité en exploitation et après vente. AFNOR 1986.
- [AFN90] 50-150. N X. Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle. AFNOR. 1990.
- [AFN95] X 60-020 Indicateurs de maintenance. AFNOR, août 1995
- [AFN98] AFNOR. Recueil des normes françaises X06, X50, X60. AFNOR 1998.
- [AFN02] : NF X60-000, Maintenance industrielle - Fonction maintenance, AFNOR, 3ème Tirage, Mai 2002.
- [AFN82] : NF X 60-010 associée à la NF X60-012, Termes et définitions des éléments constitutifs et de leurs approvisionnements pour les biens durable, AFNOR, Décembre 1982.
- [AFN97] : NF X50-155, Management par la valeur - Coût Global, AFNOR, Décembre 1997.
- [AFSA02] C. Afsa. Satisfaction et expression des préférences. INSEE, Crest, 2002.
- [AGAR79] AGARD Advisory Group for Aerospace Research & Development Avionics reliability, its techniques and related disciplines. NATO 1979.
- [ALLA94] ALLAIN. Allocation d'objectifs de sûreté de fonctionnement en phase de spécification et de conception. ISDF. Brest 1994. Page 43-47
- [ANTH93]: N.R. ANTHONY, La fonction contrôle de gestion, Publi Union, Paris, 1993.
- [ARBA98] E. ARBARETIER. Une méthodologie pour la conception de modèles de coût de maintenance. Lyon : ISDF 1998. Pages 425-437. 1210 Pages.

[ARBI95]: M.A. ARBIT, The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, MIT Press, June 1995.

[ARIE00]: D. BEN-ARIEH, Parametric Cost Estimation of Design Activities, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Kansas State, University Manhattan, KS, 66506, 2000.

[ARTT94] K. ARTTO. Life cycle cost concepts and methodologies. Cost Management, fall, 1994, pp 28-32.

[ATA99] Air Transport Association, ATA Spec 100 : Manufacturers' Technical Data, ATA Publications, revision 37, 1999.

[AUBU97] M. AUBUCHON. Maintenance centrée sur la fiabilité. Society of Reliability Engineers. <http://www.securennet.net/members/sre-montreal/index.htm> Mars 1997.

[AUGE98] JC. AUGÉ. Utilisation d'un modèle à hasard proportionnel pour estimer la fiabilité des composants mécaniques. Thèse de l'école centrale de Lyon : 1998. 163 pages.

[AVEN97] M.J. AVENIER. La stratégie chemin faisant. Economica, Paris, 1997

[BACC] A. BACCINI, Statistiques descriptives, Cours en ligne de l'université Paul Sabatier. Laboratoire de statistique et probabilité.

[BAITA00] C. BATAILLE, R. GALLEY, Rapport sur l'aval du cycle nucléaire, Députés 2000.

[BECK99] A. BECKER, P. NAÏM. Les réseaux Bayésiens, modèles graphiques de connaissances. Eyrolles. Paris. 1999 ; 204 pages

[BECK03] H. BECKER. Calculation Waiting Times and Waiting time Distribution. 2003

[BELL90] S. BELLUT La compétitivité par la maîtrise des coûts, conception à coût objectif et analyse de la valeur. AFNOR gestion. Paris 1990. 268 pages.

[BELL95]: S. BELLUT, Estimer le coût d'un projet, AFNOR, Paris 1995.

[BENC93] G. BENCHIMOL. L'entreprise étendue. Hermes, Paris 1993

[BERE02] C. BERENGUER, L. DIEULLE, A. GRALL, M. ROUSSIGNOL. A maintenance policy for continuously monitored system. Colloque européen de Sécurité de Fonctionnement de mars 2002. pp 380-385.

[BERI92] D. BERIOT. Du microscope au macroscopie, l'approche systémique du changement dans l'entreprise, ESF, 1992

[BERL02]: N. BERLAND, L'Activity Based Costing (ABC) en France, quinze ans après, mythe ou réalité ? DEA Mesure et Pilotage de la Performance, Université de Marne la Vallée/ ENPC Année 2001-2002.

[BERL88]: C. BERLINER, J.A. BRIMSON, Cost Management for Today's Advanced Manufacturing : The CAM-I Conceptual Design, Harvard Business School Press, 1988.

[BERR01] A. BERRO. Optimisation multiobjectifs & stratégies d'évolution en environnement dynamique. Thèse doctorat à l'Université des Sciences Sociales de Toulouse I, 170 pages, 2001.

[BERR02] L. BERRAH L'indicateur de performance : concepts et applications. Toulouse : Cépadues-Editions, 171 pages, 2002.

[BESS01a] : P. BESSE, Pratique de la modélisation Statistique, Publications du laboratoire de Statistique et Probabilités, septembre 2001.

[BESS01b] P. BESSE. Statistique et data mining, www.lsp.ups-tlse.fr/Besse. Publication du laboratoire de statistique et probabilité, UMR C5583. Université Paul Sabatier Toulouse.

[BLES94] BLESSING, A process-based approach to Computer-Supported Engineering design. ISBN : 0952350408, 1994.

[BLOC96] G. BLOCH, P. THONAS. On several outlier-robust training rules of neural networks for identification of non linear systems Preprints of the 8th international conference on neural networks and their applications NEURAP'96 Marseille 1996.

[BLOC00] S. BLOCH-MERCIER. Modèles et optimisation des politiques de maintenance de systèmes. Thèse de doctorat en mathématiques appliquées. Université de Marne-la-Vallée 2000.

[BOEH81a]: B.W. BOEHM, Cocomo dans toute sa profondeur, par l'auteur de Cocomo lui-même, Software Engineering Economics, 1981.

[BOEH81b]: B.W. BOEHM, Software Engineering Economics, Prentice-Hall Inc, 1981.

[BOUC98] B. BOUCHON-MEUNIER, L. FOULLOY, M. RAMDANI Logique floue : exercices corrigés et exemples d'applications. CEPADUES édition 1998.

[BOUQ00]: H. BOUQUIN, Comptabilité de gestion, Economica, Paris, 2000.

[BOUR01] : M. BOURREAU, M. GENSOLLEN, J. PERANI, Les économies d'échelle dans l'industrie des médias, Octobre 2001.

[BOUR94] P. BOURDICHON. L'ingénierie simultanée et la gestion d'informations. Hermes, Paris 1994.

[BOUT] M. BOUTRY. Les coûts de la qualité. Université Nancy II

[BOVY02] M. BOVY, E. LAES, Comment le centre d'étude de l'énergie nucléaire gère la culture de l'expert ? Colloque européen de Sécurité de Fonctionnement. Mars 2002 pp406-413.

[BREU03]: G. BREUILLAUD, R. CATHERIN, M. CHOPELIN, S. DEBORD, M. DE GOUSSENCOURT, A. KIBARER, S. SCHAEFFER, Le Coût global : une étude des pratiques, Recherche Collective, Ecole Supérieure des Affaires, Juin 2003.

[BROU92] J.BROUSTAIL et F.FRERY. Le management stratégique de l'innovation. Précis Dalloz, 1992.

[BROW97] D.C. BROWN et D.L. GRECU. An 'AI in Design'View of Design, Technical Report, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA, jun 1997.

[CAMA03]: M. CARMARGO, B. RABENASOLO, A. M. JOLLY-DESODT, J. M. CASTELAIN, Application of the parametric cost estimation in the textile supply chain, Journal of Textile and Apparel, Technology and management, 2003.

[CARL80] F.T. CARLSON. Design to life cycle cost Research in Design to cost and life cycle cost. Anorth Atlantic treaty Organisaion advisory group for aerospace research conference proceeding n°289, Springfield, Virginia USA. mai 1980. 3 pages

[CAVA02]: S. CAVALIERI, P. MACCARRONE, R. PINTO, Parametric vs. neural network models for the estimation of production costs: A case study in the automotive industry, Published by Elsevier Science B.V., 2002.

[CELE02] G. CELEUX, F. CORSET, A. LANNNOY., B. RICARD. Designing a Graphical Model for Preventive Maintenance from Expert Opinions in a Rapid and Reliable way. Colloque européen de Sécurité de Fonctionnement. Mars 2002 pp400-405.

[CHEN02]: H.W. CHEN, N.B. CHANG, A comparative analysis of methods to represent uncertainty in estimating the cost of constructing wastewater treatment plants, Journal of Environmental Management 65, 383±409, 2002.

[CHAN96]: N.B. CHANG, Y. L. CHEN, H.H. YANG, A fuzzy goal regression model for the construction cost estimation of municipal waste incinerators, International Journal of Systems Science 27, 433±445, 1996.

- [CHAN97] V. CHANAL, H. LESCA et A.C. MARTINET. Vers une ingénierie de la recherche en sciences de gestion. Revue Française de Gestion, Novembre-Décembre, 1997, pp 41-51.
- [CHAP03] P. CHAPOUILLE Fiabilité et maintenabilité. Les Techniques de l'ingénieur, traité de l'entreprise industrielle. Edition 2003.
- [CHAR99]: E. CHARPENTIER, Aerospatiale, DMC-Aircraft Direct Maintenance Cost projection Method, Manuel Technique MTG 011 Ind.B, 1999.
- [CHEV01] C. CHEVENIER et B. YANNOU. Maîtrise des performances et des risques de projet. RFGI : Revue Française de Gestion Industrielle, Numéro spécial sur le Management par la Valeur, vol. 20, avril 2001.
- [CLEV91]: W.S. CLEVELAND, E. GROSSE, Computational methods for local regression: Statistics and Computing, 1991.
- [COCO02] C. COCOZZA-THIVENT. Processus stochastiques et fiabilité des systèmes. Springer. 2002.
- [CORA75] M. CORAZZA. Techniques mathématiques de la fiabilité prévisionnelle des systèmes. Ecole Nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace. Cepadues Edition 1975
- [COSS86] C. COSSU, Écart et contrôle budgétaire, éditions Vuibert, Paris, 1986.
- [COX62] D.R. COX. Renewal theory. Methuen Londres. 1962
- [COX72] D.R. COX. Regression models and life tables. Royal Statistical Society. 1972
- [CNOM94] CNOMO E41.50.530.N Moyen de production. Méthode AMDEC. Juin 1994
- [CUKR98] J. CUKROWSKI. Optimisation des coûts d'exploitation par la prise en compte des exigences de sûreté de fonctionnement. Lyon : ISDF 1998. Pages 131-138. 1210 Pages.
- [CYBE89] G. CYBENKO, Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function, Mathematics of Control, Signals, and Systems, 1989, 2, pp 303-314
- [DASC01] D. DASCAU. Méthodes probabilistes pour la modélisation de la maintenance préventive. UT de Compiègne. <http://www.dma.utc.fr/PgePerso/Dascalu.htm>. 2001
- [DAVI97] E. DAVIS, A. SCHOR, J. HACUNDA, R. PILEGGI et M. ROSS Cost / Benefits analysis for integrated mechanical diagnostics. Drapper Laboratory distribute statment. Cambridge Massachusetts 1997.

[DEAN89]: B. EDWIN DEAN, NASA Langley Research Center, Parametric Cost Analysis : a design function, Transaction of the American Association of Cost Engineers 33rd Annual Meeting San Diego CA 25-28 June 1989.

[DECR] C. DECREUSE et D. FESCHOTTE, Ingénierie simultanée, Éd. Techniques de l'Ingénieur.

[DEGR00] C. DEGRAVE et G. G.M. COJAZZI Operation feedback data & knowledge management for new design. Proceeding of the 19th ESREDA seminar. Lyon 2000.

[DESH00] P. DESHAYES ; S. MIRA ; B YANNOU. Conception, stratégie décision. Cours de DEA Génie des Systèmes industriels, Ecole Centrale Paris 2000.

[DHIL89] B.S. DHILLON. Life cycle costing, techniques, models and applications. University of Ottawa, Gordon and Breach science publishers. New York 1989. 287 pages

[DOD99]: Department of Defense, United State of America, Parametric Cost Estimating Handbook, DOD Acquisition Deskbook Web Site, Second Edition, 1999.

[DREY98]: G. DREYFUS, Les réseaux de neurones, Mécanique Industrielle et Matériaux, n°51, septembre 1998.

[DREY97] G. DREYFUS, Les réseaux de neurones une technique opérationnelle pour les traitements des données industrielles, économiques et financières, Novembre 1997, Mesures n°699

[DYLI97] D. DAVID DYLLIS, M. GOSSIN-PRIORE. PRISM : Electronic system reliability prediction tool. Colloque européen de Sûreté de Fonctionnement. Mars 2002 pp120-124.

[EARL78]: D.R. EARLES, Factors, Formulas, and Structures for Life Cycle Costing, Published by Eddins-Earles, 89 Lee Drive, Concord, Mass. 91742, 1978.

[EIRE98] EIREDA The European Industry Reliability Data bank. Economica Paris 1998.

[EKOK03]: B. EKOKA, Structuration du modèle financier du contrôle de gestion à travers les disciplines à source, Cahier de recherche no. 2003 – 160, Octobre 2003.

[EVBU96] N.F.O. EVBUOMWAN, S. SIVALOGANATHAN et A. JEBB, A suvey of design philosophies, models and systems, in Journal of Engineering Manufacture, 1996.

- [FABR91]: W. FABRYCKY, B. BLANCHARD, Life Cycle Cost and Economic Analysis, Prentice Hall, 1991.
- [FABR93]: W. FABRYCKY, G.J THUESEN, Engineering Economy, Prentice Hall, 1993.
- [FACH96] G. FACHER. Modélisation et caractérisation de la mortalité aléatoire des circuits intégrés. Thales 1996.
- [FAIO93]: Federal Acquisition Institute Office of Acquisition Policy, Cost Analysis, décembre 1993, (FAC 90-19).
- [FFAC02]: Fédération française automobile club, Budget annuel de l'automobiliste, 2002.
- [FIEV03]: J. FIEVEZ, Présentation de la Méthode UVA (Méthode des Unités de Valeur Ajoutée), Journée Pédagogique "L'actualité comptable en débat », Jeudi 18 septembre 2003.
- [FIDE04] : P. CHARPENEL, R. DIGOUT, M. GIRAUDEAU, M. GLADE, JP. GUERVENO, N. GUILLET, S. MALE, R. MEISTER, E. MOREAU, D. PERIE. FIDES, la nouvelle méthodologie pour la prévision de fiabilité des systèmes électroniques λμ2004, Bourges, 12 au 14 octobre 2004.
- [FLEM94] U. FLEMMING, R. COYNE et J. SNYDER. Case-based Design in the SEED System, 1st Congress on Computing in Civil Engineering, pages 446–453, 1994.
- [FORS01] G.F. FORSYTH. Workshop on helicopter health and usage monitoring systems. Melbourne, Australia; Fev 2001.
- [FREE91] : J.A. FREEMAN, D.M. SKAPURA, "Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques", Addison-Wesley, 1991, ISBN 0-201-51376-5.
- [GAUD97] O. GAUDOIN, J.L. SOLER. Failure rate behavior of components subjected to random stress. Reliability Engeneering and System Safety. 1997
- [GAUT00]: F. GAUTIER, V. GIARD, Vers une meilleure maîtrise des coûts engagés sur le cycle de vie, lors de la conception de produits nouveaux, Cahier de recherche du GREGOR 2000.01, IAE de Paris, 2000.
- [GAUT97]: F. GAUTIER, Évaluation économique des activités de conception et de développement des produits nouveaux, Cahier de recherche du GREGOR 1997.12, IAE de Paris, 1997.

[GIFA97] : GIFAS (Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales), Coût global (LCC/DOC), 1997.

[GIRA] P. GIRARD, Analyse des décisions en conception, Techniques de l'ingénieur

[GORM95]: C. GORMAND, Le coût global, pratique et études de cas, AFNOR, Paris, 1995.

[GOSS98] : S. GOSSELIN, AEROSPATIALE, DOC: Calcul du Direct Operating Cost, Manuel Technique MTG 012 Ind. B, 1998.

[GOSS99]: S. GOSSELIN, AEROSPATIALE, Analyser les coûts d'exploitation, Consigne d'Organisation C BE 162 Ind. B, Toulouse : Février 1999.

[GOVA03]: B. GOVAERTS, Codage des variables explicatives dans un modèle de régression, Cours de consultation statistique. Institut de statistique UCL. 2003.

[GUAN93]: F. Lu, X.X. Guang, A forecasting model of fuzzy self-regression, Fuzzy Sets and Systems 58, 239±242, 1993.

[GUES98] P GUESDON ; G RENIE. Méthodes d'allocation d'objectifs de disponibilité et de fiabilité. Paris : ISDF 1998. Pages 61-70. 1210 Pages.

[GUJA78]: GUJARATI, DOMODAR, Basic Econometrics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1978, p. 191.

[HADJ95] A. HADJ-ALI Un moteur d'inférence adapté au traitement des connaissances imprécises et incertaines. Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications 1995, pp 95-102.

[HARV76] G. HARVEY. Life-cycle costing : a review of the technique, Management Accounting, october. 1976. Pp 343-347.

[HAYK94] S.HAYKIN, Neural networks : a comprehensive foundation, Macmillian, New York 1994, p.2.

[HAZE98] G.A. HAZELRIGG. A Framework for Decision-based Engineering Design. Journal of Mechanical Design, 120:653–658, Transaction of the ASME, décembre 1998.

[HERA94]: J. HERAUL, C. JUTTEN, Réseaux Neuronaux et Traitement du Signal, Hermès, 1994.

[IDRI99]: A. IDRI, A. ABRAN, La Logique Floue appliqué aux modèles d'estimation du coût, Laboratoire de recherche en Gestion des logiciels, Université du Québec à Montréal 17 décembre 1999.

- [IEC94] IEC 721-3-3 Classification of environmental conditions. 1994
- [IEC96] IEC 1709 Composants électroniques – Fiabilité – Conditions de référence pour les taux de défaillances et modèles d'influence des contraintes pour la conversion. 1996
- [IEC99] IEC 60050 (191) Norme Européenne : Vocabulaire électrotechnique – Chapitre 191 : sûreté de fonctionnement et qualité de service. Mars 1999.
- [ISDF91] Institut de Sûreté de Fonctionnement : R. BLANQUART et A. LANNOY. Définition et méthodes du retour d'expérience. Rapport d'activité du groupe de travail "retour d'expérience" ISDF Paris 1991.
- [ISDF97] Institut de Sûreté de Fonctionnement : C. HUMBERT, A. LANNOY et al. Synergie du retour d'expérience et de l'expertise : approche Bayésienne. Rapport d'activité : journée technique de l'ISDF. Juin 1997.
- [JABO03]: M. JABOYEDOFF, Considérations sur les droites de régression appliquées aux données XRD et lien avec les fonctions utilisées pour les profils de diffraction, QUANTERRA SHORT COURSE – 01F, Janvier 2003.
- [JANE96] JANEZ F. Fusion de sources d'informations définies sur des référentiels non exhaustifs différents. Thèse de doctorat de l'université d'Angers ISTIA. 1996.
- [JANS90] P.JANSSEN, Aide à la conception : une approche basée sur la satisfaction de contraintes. Thèse de l'Université de Montpellier II, 1990.
- [JOSE03]: P. JOSET, Maîtriser les coûts d'un projet, Congrès annuel de la Société suisse de Management de Projet, ABISSA Informatique SA, 23 avril 2003.
- [JUAN92] C.H. JUANG, X.H. HUANG, RD. HOLTZ, Determination of fuzzy relationship by fuzzy regression, Civil Engineering Systems 5, 299±318, 1992.
- [KATO93] Y.KATO. Target Costing Support System : Lessons from Leading Japanese Companies, Management Accounting Research. 1993. 4, pp 33-47.
- [KAUF69] R. KAUFMANN. Life cycle costing. Journal of Purchasing. 1969
- [KAUF80] A. KAUFMANN. Introduction à la logique floue. Techniques de l'ingénieur, 1980.
- [KELM95] A. KELMAN, R.R. YAGER. Compatibilité et agrégation partielle ; méthode de fusion modulaire, Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications 1995, pp 73-79.

[KORS97] S. KORS. Méthode de Nelson simulée, DESS de mathématiques appliquées pour l'ingénieur. Université de provence. Septembre 1997.

[KØRT97] J. KØRTE, T. AVEN, R. ROSNES. On the use of risk analysis in different decision settings. Colloque européen de Sûreté de Fonctionnement. Mars 2002 pp175-180.

[KREB03] G. KREBS, Y. MOUGIN, Les nouvelles pratiques de l'audit qualité interne, AFNOR, 2003. 270 pages.

[KRET98] C. KRETZSCHMAR, M. ROLIN, A. TEXIER, A. NECHET. Failure rate prediction method using operational experience and design practices. Conférence ESREL 1998.

[KUBO99] Y.KUBOKA. Interorganizational cost management : a value constellation perspective, congrès de l'European Accounting Association 1999.

[KUSI92] A. KUSIAK et E. SZCZERBICKI A Formal Approach to Specifications in Conceptual Design, Journal of Mechanical Design,114:659–666, décembre 1992.

[KUSI95] A.KUSIAK et N.LARSON. Decomposition and Representation Methods. in Mechanical Design. Journal of Mechanical Design, juin 1995.

[LAI98]: E. LAI, D. YU, P. PRENTICE, D. QUI, A neural-network model for single screw extruders, Proc. Mechanics in Design '98, The Nottingham Trent University, UK, 6-9 July, 761-76, 1998.

[LANG76]: LANGE O., Fondements de l'économie moderne –introduction à l'économie cybernétique, Editions Sirey, Paris, 1976.

[LARD99] B LARDER, S HUGHES. Helicopter HUM/FDR Benefit and developments. American Helicopter Society 55th Annual Forum, Montreal, Quebec, Canada, 25-27 May 1999.

[LAVI92] Y. LAVINA Audit de la maintenance. Editions d'Organisation, Paris (1992).

[LECL01]: D. LECLERE, L'essentiel de la comptabilité analytique, éditions d'Organisation, 2001.

[LEFI94] Y. LE FICHANT, J. MARCEAU, M. UHART. Méthodes d'étude du vieillissement avec prise en compte simultanée des effets du temps et d'une contrainte mécanique. Colloque européen de Sûreté de Fonctionnement. Lambda-Mu. 1994 pp189-204.

[LEMO99] J-L. LE MOIGNE. La modélisation des systèmes complexes. 4e éd. DUNOD, 1999.

[LEVE44] LEVENBERG K, A method for the solution of certain nonlinear problem in least squares Quart. Appl Math, 1944, Vol 2 pp.164-168.

[LIEU79] G. LIEUTAUD. Méthodes mathématiques en fiabilité et estimation non paramétrique sur données censurées. Thèse de l'université de provence. Centre de Marseille St Charles. 1979.

[LIGE92] J.C. LIGERON, P. LYONNET. La fiabilité en exploitation ; organisation et traitement des données. Edition Lavoisier. Paris 1992.

[LIGE03] J.C. LIGERON. Les limites de la sûreté de fonctionnement. Colloque francophone sur les performance et nouvelles technologies en maintenance. PENTOM2003. Presses Universitaires de Valenciennes. Valenciennes 2003.

[LIMA02] F. LIMAYEM et B. YANNOU. Pairwise comparison methods for weighting in group, article soumis à RAIRO: Operations Research, Paris, 2002.

[LIMA96] F. LIMAYEM. Représentation fonctionnelle de systèmes complexes. DEA de l'Ecole Centrale Paris : 1996. 65 pages

[LIMA97] F. LIMAYEM et B. YANNOU. Comment apprécier la satisfaction du besoin. La Valeur, vol. 73: p. 16-2. Paris. 1997.

[LITT97] E LITTRE. Dictionnaire de la langue française. Encyclopaedia Britanica France. Versailles : 1997

[LJUN87]: L. LJUNG, System identification : theory for the user, prentice-hall, englewood cliffs, 1987.

[LONG01] J.Y. LONGERE, S. DOMENGE, J.LEROY. Méthodologie pour la maîtrise des coûts opérationnels. Phoebus 2001.40 pages

[LONG00]: J. LONG, Parametric Cost Estimating in The New Millennium, Price Systems, pp 1-7, 2000

[LORI01]: P. LORINO, Méthode et pratiques de la performance, éditions d'Organisation, 2001.

[LORI94a] P. LORINO. Target costing ou gestion par coût cible : boîte à outils ou mode d'apprentissage organisationnel : qu'est-ce que le target costing ?, Revue Française de Comptabilité, avril 1994, pp 35-45.

[LORI94b] P. LORINO. Target costing ou gestion par coût cible : pratique et mise en oeuvre du target costing. Revue Française de Comptabilité, mai 1994, pp 48-59.

[LYON00]: P. LYONNET, La Maintenance: mathématiques et méthodes, 4ème édition, Editions TEC et DOC, 2000. 390 pages.

[LYON93] P LYONNET. La qualité, outils et méthodes. Lavoisier, tech et doc. Paris : 1993. 293 pages.

[MART94] Y. MARTIN, N.GUIRAGOSSIAN, J.FAUCHON, P.LYONNET. Détermination par simulation d'une politique optimale de maintenance. Paris : ISDF 1994. Pages 313-321. 1210 Pages.

[MARK78] K.E. MARKS, B-D. BRADLEY, H. GARRISSON-MASSEY. An appraisal of models used in Life Cycle Cost Estimation. Aircraft systems report. Santa Monica Californie 1978

[MARQ63] Marquardt D.W, 1963, An algorithm for least-squares estimation of non linear parameters, J.Soc, Appl. Math., Vol 11, 2, 431-441

[MEAR99]: T. MEARIG, N. COFFEE, M. MORGAN, Life Cycle Cost Analysis Handbook, State of Alaska - Department of Education & Early Development, 1999, 1st Edition.

[MEYS02]: F. MEYSSONIER. Le Target Costing : Un état de l'art. ESM/IAE de Metz. 2002.

[MILI02] MILITARY Standard 882. Standard practice for system safety Février 2002.

[MILH98]: MIL-HDBK-338-IA, Electronic Reliability Design Handbook, 1998.

[MILK96]: R. MILKOFF, Le concept de comptabilité de gestion à base d'activités, GREGOR, 1996.06.

[MINE45] M.A. MINER. Cumulative damage in fatigue J. Appl. Mech. 1945.

[MITT90] S. MITTAL et B. FAALKENHAINER. Dynamic Constraint Satisfaction Problems, in 8th National Conference of Artificial Intelligence, pages 25–32, Boston, 1990.

[MONC01]: F. MONCHY, Maintenance, méthodes et organisation, DUNOD, Paris 2000.

[MOND94]: Y. MONDEN, M. SAKURAI, Le contrôle des coûts dans la phase de conception d'un nouveau produit, Extrait de Comptabilité et contrôle de gestion dans les grandes entreprises japonaises. Université de Tokyo 1994.

[MULY00] T. MULYANTO. Conception, configuration et incertitude dans le cadre de la programmation par contraintes. unité de recherches Conduite et

décision, département commande des systèmes et dynamique du vol, Toulouse, septembre 2000.

[MULY99] T. MULYANTO. Utilisation de techniques de propagation de contraintes pour la conception préliminaire d'avions dans un contexte distribué. Thèse de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 1999.

[NASA02]: NASA, Cost estimating Hand book, 2002.

[NFX97] NF ISO. Management par la valeur : coût global. 1997

[NFX98] NF ISO. Application de la statistique. Exactitude (justesse et fidelite) des resultats en methodes de mesure. Methodes alternatives pour la determination de la fidelite d'une methode de mesure normalisee, 1998

[ORED02] OREDA. Offshore Reliability DATas. Ed Technica, 4ème édition. 2002.

[PERE96] F. PEREZ. Outil d'analyse de performance pour stratégie de maintenance dans les systèmes de productions. Thèse de l'université Bordeaux 1 : 1996. 168 pages

[PERI02] F. PERISSE, P. VENET, G. ROJAT. Etude comparative de la fiabilité des condensateurs électrolytiques de différents fabricants. Colloque européen de Sûreté de Fonctionnement. Mars 2002 pp632-636.

[PERR99] J. PERRIN. Pilotage et évaluation des processus de conception. Ouvrage collectif du groupe ECOSIP, Collection Economiques, Ed. L'Harmattan, Paris, 1999.

[PERR02] S. PERRON. Contribution au Soutien Logistique Intégré des Systèmes industriels : Application à la Ligne d'Intégration Laser. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Paris. 2002.

[PESO03]: Y. L. PESOR, Origine et développement d'une méthode de calcul des coûts : la méthode des Unités de Valeur Ajoutée (UVA), Université des Sciences et Technologies de Lille, 2003.

[PETI90] C. PETITDEMANGE. La maîtrise de la valeur, la gestion de projet et l'ingénierie simultanée, AFNOR Gestion, 1990.

[PIER02] S. PIERRON et R. MARIE. Algorithme d'allocation d'indicateurs de sûreté de fonctionnement. pages 244-250, Paris, mars 2002.

[POUR00] J-M POURADIER. HUMS for Eurocopter light and medium helicopters. 26th European rotorcraft forum. La Hague. Netherlands. Sept 2000

[POUR01] J-M POURADIER. Trouve M. An assessment of Eurocopter experience in HUMS development and support. Acte de colloque. 2001. 7 pages

[PRIS02] PRISM®, W.K. DENSON et S.K. KEENE. PRISM® software tool - RAC Project A06839, "New System Reliability Assessment Methods" Reliability Analysis Center RAC March 1997

[PROS99]: Systèmes PROSPER, Extraction et Gestion de Connaissances, Contribution du projet « METACOG », Partenaires RENAULT Automobiles, LRSGUN, LAMIH, Décembre 1999.

[RAC95] RELIABILITY ANALYSIS CENTER. NPRD : Non Electronic Parts Reliability Datas. 1995.

[RAC97] RELIABILITY ANALYSIS CENTER. Norme MILHDBK217F. RAC Department of defense. Washington : 1997.

[REBI03] G. REBITZER, D.HUNKELER Life Cycle Costing in LCM : Ambitions, Opportunities, and limitations. Economed publisher. 2003.

[RENA02] D. RENAUX Université de valencienne. Vers un coût de production optimal. Acte du colloque Lambda Mu 13. Mars 2002. 9 pages

[RENA93]. Régie RENAULT ADEPT : Analyse des Défaillances et Estimation Prévisionnelle des Taux. Régie Nationale des Usines Renault 1993.

[ROBB99] J.L.ROBBIN, J.C.DANEMAN Parametric Estimating & Stepwise Statistical Technique. National Estimator. 1999

[ROBE95] Dictionnaire de la langue française, nouveau petit robert. Mars 1995

[ROUA02] D. ROUANET. L'apport du coût de cycle de vie dans la gestion des innovations.. 21ème congrès de l'association française de comptabilité. Mai 2000. 8 pages

[RUBI94]: D. L. RUBINFELD, Reference Guide on Multiple Regression, Professor of Law and Professor of Economics, University of California, Berkeley, in Federal Judicial Center, REFERENCE MANUAL ON SCIENTIFIC EVIDENCE, 1994, pp. 415-470, Second Edition, 2000, pp.179-227.

[RUME86] RUMELHART, McLELLAND and the PDP research group (eds), Parallel distributed processing, vol. 1. D.E., MIT Press, 1986.

[SAAD98]: T. SAADA, A. BURLAUD et C.SIMON, Comptabilité analytique et contrôle de gestion, éditions Vuibert, Paris, 1998.

[SAEI92]: SAE ARP4294, Data Formats and practices for life cycle cost information, SAE International, Copyright 1992, Society of Automotive Engineers, Inc.

[SAHR98] A. SAHRAOUI. Vers une intégration de méthodes fonctionnelle et de défaillance. ISDF Arcachon 1998. Pages 737-750. 1210 Pages.

[SAKA92] M. SAKAWA, M. YANO, Fuzzy linear regression and its applications. In J. Kacprzyk and M. Fedrizzi, editors, Fuzzy regression analysis, pages 61-80, Omnitech Press, Warsaw and Physica-Verlag, Heidelberg, 1992.

[SAPO94] G. SAPORTA. L'analyse des données. Que sais-je ? Presses universitaires de France. Paris 1994. 124 pages.

[SCHE98] A. SCHEFFLER, D.LARCHER, B.PIPPONIAU. Optimisation de la périodicité des visites de maintenance.

[SCHA02] C.G. SCHAEFER, D.J. HASS. A simulation model to investigate the impact of Health and Usage Monitoring Systems (HUMS) on helicopter operations and maintenance. American helicopter society International 58th forum. Montréal, Canada. Juin 2002

[SCHW00] V. SCHWACH. Conception de produits, aspect psychologiques. Techniques de l'ingénieur, Paris 2004

[SELL97] B. SELLALI. Intégration du retour d'expérience d'exploitation dans une approche "MBF" pour optimiser la fiabilité des matériels. Université Henri Poincaré. Nancy 1997.

[SHIE91] M.D SHIELDS, S.M. YOUNG. Managing product life cycle costs : an organizational model, Cost Management, 1991. pages 39-52, 1991

[SHOO97] M.L. SHOOMAN. Reliability physics models. IEEE Transaction on reliability. 17. 1968.

[SIMP]: J SIMPSON, Rapid Cost Estimation for Early Composite Design Evaluation, Industrial and Manufacturing Engineering,

[SKI00] M. SKITMORE, V. MARSTON. Cost modelling. E&FN SPON. Fondation of bulding economics. New York 2000. 504 pages

[SSB99] SSB-1.003. EIA Engineering Bulletin - Acceleration Factors - November 1999 and September 2002

[STUM98] M. STUMPTNER et F. WOTAWA, Model-based Re-configuration in Artificial Intelligence in Design, Lisbon, Portugal, 1998.

[SUH90] N.P. SUH. The Principles of Design, Oxford University Press, 1990.

[SUH95] N.P. SUH. Axiomatic Design of Mechanical Systems. Journal of Mechanical Design, juin 1995.

[SUSM89] G.I. SUSMAN. Product life cycle management. Cost Management, 1989, pp 8-22.

[TANA82]: H. TANAKA, S. UEJIMA, K. ASIA, Linear regression analysis with fuzzy model, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 12, 275±280, 1982.

[TANA89]: H. TANAKA, I. HAYASHI, J. WATADA, Possibilistic linear regression analysis for fuzzy data, European Journal of Operational Research 40, 389±396, 1989.

[TANN02]: J. TANNOUS, La méthode ABC (Activity Based Costing) :Principes-Applications-Limites et Avantages, Enseignant à la FGM, 2002.

[TASS81] R. TASSINARI. La conception pour un coût objectif (CCO). La maîtrise des coûts industriels. Chapitre III , éditions d'organisation, 1981.

[TECH04]: Techniques de l'Ingénieur, traité Génie industriel, A 8 300-16.

[TEIX02] P. TEIXEIRA, E. BLANC. Management des risques projet un outil d'aide à la décision. Colloque européen de Sûreté de Fonctionnement. Mars 2002 pp589-596.

[TICH96] S. TICHKIEWITCH. Specifications on integrated design methotology using a multi-view product model, Proceedings of Engineering Systems Design and Analysis Conference ESDA 96, 1996.

[TOSC02] R. TOSCANO, P. LYONNET. Assesment of weibull's laws shape parameter by fuzzy inference, application to optimisation in preventive maintenance. Colloque européen de Sûreté de Fonctionnement de mars 2002. pp149-151

[TOUZ92] C. TOUZET. Les réseaux de neurones artificiels. Introduction au connexionnisme.. Cours, exercices et travaux pratiques. Juillet 1992.

[USUR01] E. USUREAU. Application des méthodes bayésiennes pour l'optimisation des coûts de développement des produits nouveaux. Th7Se de doctorat en science de l'ingénieur de l'université d'Anger. 2001

[UNIV97] ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS. Encyclopaedia Britanica France. Versailles : 1997

[UTE00a] : Union technique de l'électricité, Gestion de la sûreté de fonctionnement, section 3 : évaluation du coût de cycle de vie, Union technique de l'électricité, février 2000.

[UTE00b] UTE C 80-810. Recueil de données de fiabilité. Modèle universel pour le calcul de la fiabilité prévisionnelle des composants, cartes et

équipements électroniques: RDF 2000. Union des techniques de l'électricité et de la communication. Fontenay 2000.

[VILE02] F. VILETTE, Y. CASTELLANI, P. DECHAMBE. Guide de l'ingénierie de maintenance et son application pratique à la SNCF. Colloque européen de Sûreté de Fonctionnement de mars 2002. pp 372-379.

[VILL88] A. VILLEMEUR Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Eyrolles. Paris 1988.

[VILL99] A. DE LA VILLEGUERIN. Etude comparative des différentes définitions du MTBF et du MTTF. Publication du centre de recherche EADS. Août 1999.

[WATS82] I.A. WATSON. Cost basis for availability target setting. UKAEA Safety and reliability Directorate. Warrington 82.

[WHIT76] G.E WHITE. P.F. OSWALD. Life cycle costing. Management Accounting, , pp 39-42, janvier 1976.

[YAN97] L. YAN, J.R. ENGLISH. Economic cost modeling of environmental stress screening. IEEE Transactions on reliability, Vol 46 n° 2, June 1997. Page 275-281

[YANO01] B. YANNOU, S.HAJSALEM, F.LIMAYEM. Comparaison des apports de l'analyse de la valeur et de la méthode SPEC sur un cas industriel. Ecole Centrale Paris, Mécanique et Industrie, Paris 2001. 11 pages

[YCAR03]: B. YCART, Démarrer en Scilab, Cahier de Mathématiques Appliquées. UFR Mathématiques et informatique. Université René Descartes. Paris 03.

[ZADE65]: L. ZADEH, Fuzzy sets, Information and Control, vol. 8, pp. 338 - 353, 1965.

[ZADE94]: L. ZADEH, (1994): Preface, in (Marks-II R.J.) Fuzzy logic technology and applications. IEEE Technical Activities Board 1994.

[ZAHA99] C.A. ZAHALCA. Fiabilité de système en environnement aléatoire stressant. Thèse de l'institut national polytechnique de Grenoble. 1999.

[ZIAN86] R. ZIANI Vérification des objectifs de disponibilité et de maintenabilité des systèmes complexes modélisés par leur ensembles minimaux. Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne : 1986.

[ZWIN96] G ZWINGELSTEIN. La maintenance basée sur la fiabilité. Hermes. Paris 1996. 666 pages.

Publications réalisées

- La prévision des coûts de maintenance des hélicoptères, choix d'une modélisation adaptée. **λμ2004**, Bourges, 12 au 14 octobre 2004. **M. GLADE** : LTDS : ENI St Etienne, Eurocopter, Ecole centrale Lyon; J. JEANBLANC : ENI St Etienne; J-Y. LONGERE : Eurocopter; P. LYONNET : ENI St Etienne
- "FIDES, la nouvelle méthodologie pour la prévision de fiabilité des systèmes électroniques" **λμ2004**, Bourges, 12 au 14 octobre 2004. P. Charpenel, AIRBUS France, R. Digout : THALES Underwater Systems, M. Giraudeau : THALES Airborne Systems, **M. Glade** : EUROCOPTER, JP. Guerveno : MBDA, N. Guillet : MBDA, S. Male : GIAT Industries, R. Meister : THALES Avionics, E. Moreau : GIAT Industries, D. Perie THALES Research and Technology
(**λμ d'or de la meilleure publication**)
- "Modélisation des coûts de maintenance direct de sous ensembles d'hélicoptères par réseaux de neurones" **Integrated Design and Production Conception et Production Intégrées CPI'2003** 22, 23 & 24 Octobre 2003 Meknes, Maroc. **M GLADE** : LTDS : Ecole Centrale Lyon, ENI St Etienne ; G GROSSET LSIS, Domaine Universitaire de Saint-Jérôme MARSEILLE
- " FIDES a new reliability prediction method : Eurocopter experimentation and process analysis" EU-INDIA CIVIL AVIATION PROJECT "Procedural aspects of life extension" Juin **2003** à Bangalore, Inde : JY. LONGERE , **M. GLADE** : EUROCOPTER
- "Modélisation des coûts de maintenance et d'exploitation : application aux hélicoptères" **Les conventions CIFRE dans le domaine de l'aéronautique et du spatial**. ANRT Salon du bourget 2003. **M. GLADE** : LTDS : ENI St Etienne, Eurocopter, Ecole centrale Lyon
- "FIDES Reliability prediction methodology : Demonstration and Experimentation." **2003 INTERNATIONAL MILITARY & AEROSPACE / AVIONICS COTS CONFERENCE** août 2003 à Boston, USA. E. Moreau, P. Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerveno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska.
- "Prédiction de fiabilité avec la méthodologie FIDES : résultats d'expérimentation" **2003 ESREF European Symposium on Reliability of Electron Devices**. <http://www.esref.org/> 6 au 10 Octobre 2003 à Arcachon, cession poster. E. Moreau, P. Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerveno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska.

- "Data fusion using statistical methods and fuzzy logic within the scope of maintenance cost assessment" **Qualita2003** (mars 2003) Nancy . **M. GLADE** : LTDS : ENI St Etienne, Eurocopter, Ecole centrale Lyon; B. FORNET : INSA Rouen; J-Y. LONGERE : Eurocopter; P. LYONNET : ENI St Etienne
- Impact de l'utilisation d'un système de surveillance des défaillances sur les coûts d'exploitation des hélicoptères. **revue française de gestion industrielle. RFGI** suite au PENTOM 2003. **M GLADE** LTDS : Ecole Centrale Lyon, ENI St Etienne, Eurocopter, JY LONGERE : Eurocopter, P LYONNET.: ENI St Etienne.
- Impact de l'utilisation d'un système de surveillance des défaillances sur les coûts d'exploitation des hélicoptères. **PENTOM2003** (mars 2003) Valenciennes. **M GLADE** LTDS : Ecole Centrale Lyon, ENI St Etienne, Eurocopter, JY LONGERE : Eurocopter, P LYONNET.: ENI St Etienne. **Publication dans la revue française de gestion industrielle. RFGI**
- "Une approche globale pour l'évaluation de la fiabilité : FIDES" **2002 (ESREL 2002)** www-assoc.frec.bull.fr/isdf/lm13/index-a.htm. Borowski, E. Moreau, P. Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerverno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska.
- "Impact of the use of a fault monitoring system on helicopter operating costs" **23 th ESREDA 2002** Delf, Hollande novembre 2002. **M GLADE** LTDS : Ecole Centrale Lyon, ENI St Etienne, Eurocopter, JY LONGERE : Eurocopter, G MONTI : Eurocopter, P LYONNET.: ENI St Etienne.
- "A new global electronic system reliability assessment approach" **Workshop EUCLID CEPA2** MoD britannique 1 et 2 octobre 2002, Bristol. Borowski, E. Moreau, P. Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerverno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska.
- "Design of parametric maintenance cost models" **IEEE SMC02 System, man and cybernetics society**. Octobre 2002 Hammamet, Tunisie. . **M. GLADE** LTDS : ENI St Etienne, Eurocopter, Ecole Centrale Lyon; J-Y. LONGERE : Eurocopter; P. LYONNET : ENI St Etienne
- "A new Reliability assessment approach". **ESREF** www.ixl.u-bordeaux.fr/esref. Présentation du projet FIDES au workshop SUCCESS lors de la conférence ESREF à Dresde. E. Moreau, P. Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerverno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska..
- Conception de modèles de coûts de maintenance en bureau d'étude". **Colloque pluridisciplinaire des doctorants Lyonnais**. Lyon, avril 2002. **M. GLADE**.
- "A global reliability assessment approach : FIDES" **λμ2002 (ESREL 2002)**, conférence organisée à Lyon du 19 au 21 mars 2002. P. E. Moreau, P.

Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerveno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska.

- "FIDES, recherche en fiabilité des composants et sous-ensembles électroniques" **Atelier ANADEF 2002 juin 2002** E. Moreau, P. Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerveno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska.
- "A methodology which allows reliability monitoring during all the development and life cycle." **2002 MILITARY & AEROSPACE / AVIONICS COTS CONFERENCE** août 2002 à San Diego, Californie. E. Moreau, P. Charpenel, JM. Chopin, R. Digout, M. Giraudeau, **M. GLADE**, JP. Guerveno, N. Guillet, S. Male, R. Meister, D. Perie, F. Relmy-Madinska.

Séminaires

- Modélisation et optimisation des coûts de maintenance et d'exploitation. *Séminaire LTDS/ENISE*, 7 novembre, 2002. **M. GLADE**.
- Recalage d'estimations de durée de vie de composants d'hélicoptère par Méthodes bayésiennes. Choix d'un algorithme de minimisant la vitesse de convergence vers la fiabilité réelle. *Séminaire IMdR SdF (Ex ISDF) GTR Méthodes Bayésiennes*, Institut LSA. 27 janvier 2003. **M. GLADE**.

Résumé

Dans sa définition officielle, le terme "sûreté de fonctionnement" couvre les quatre notions que sont la fiabilité, la sécurité, la maintenabilité et la disponibilité. Aujourd'hui cependant, on tend vers une acceptation élargie de cette définition en étendant le sens de sûreté de fonctionnement à une notion plus générale de maîtrise du risque, que celui-ci soit économique, sécuritaire ou opérationnel. Dans le domaine initial des défaillances techniques, on s'intéresse de ce fait au pilotage des coûts d'exploitation.

Ainsi redéfinie, la sûreté devient un enjeu majeur dans la compétitivité et conduit les constructeurs à développer des approches qui permettent sa maîtrise par une prise en compte de ce paramètre dès les phases d'avant-projet.

Aussi ce travail consiste-t-il d'une part à proposer des solutions de modélisation des coûts de maintenance, et d'autre part à établir des méthodes d'analyse pour estimer la fiabilité à venir d'un produit lors du design.

Nous verrons alors comment la conception à coût de maintenance objectif s'intègre parfaitement dans une nouvelle vision du métier de sûreté de fonctionnement.

Mots Clefs

- Maintenance
- Coût
- Fiabilité
- DMC
- Life Cycle Cost
- Modélisation

Abstract

In its official definition, the term of functioning security represents four notions which are reliability, security, maintainability and availability. However, today this definition of functioning security involves a more general notion of economy, security or operational risk master.

So in the initial domain of the technical failure, we will be interested in the piloting of the exploitation costs. This notion, have become the major stake of competitiveness, lead the manufacturers to develop approaches allowing a mastery of these parameters by their consideration from the pre-project phases.

So this work consists first in proposing a model of maintenance costs and also in establishing analysis methods witch allows estimating product reliability.

We will see how a design to maintenance cost perfectly corresponds with this new definition of the functioning security.

Key words

- Maintenance
- Cost
- Reliability
- DMC
- Life cycle cost
- Model