



HAL
open science

Proposition d'une méthodologie d'évaluation de l'évolution de la qualité en conception de systèmes complexes

Jean-Philippe Gitto

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Gitto. Proposition d'une méthodologie d'évaluation de l'évolution de la qualité en conception de systèmes complexes. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Compiègne, 2018. Français. NNT : 2018COMP2412 . tel-02002443

HAL Id: tel-02002443

<https://theses.hal.science/tel-02002443v1>

Submitted on 31 Jan 2019

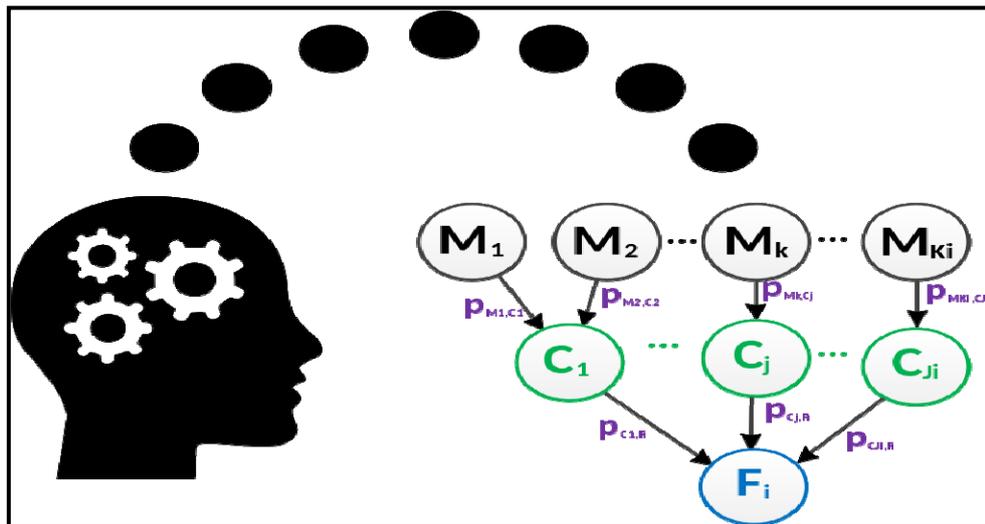
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Par Jean-Philippe GITTO

Proposition d'une méthodologie d'évaluation de l'évolution de la qualité en conception de systèmes complexes

Thèse présentée
pour l'obtention du grade
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 2 février 2018

Spécialité : Ingénierie Industrielle : Unité de recherche en Mécanique - Laboratoire Roberval (UMR-7337)

D2412

UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE

**Proposition d'une méthodologie d'évaluation de l'évolution de la qualité en
conception de systèmes complexes**

Soutenue le 2 février 2018

THESE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Ingénierie Industrielle

par

Jean-Philippe GITTO

Directrices de thèse : Zohra CHERFI-BOULANGER

Magali BOSCH-MAUCHAND

Co-encadrement de la thèse : Amélie PONCHET-DURUPT

Thèse soutenue le 2 février 2018 devant le jury composé de :

Mme. Nadège TROUSSIER - Professeur des Universités - UTT Rapporteur

M. Ali SIADAT – Professeur des Universités - ENSAM, Centre de Metz Rapporteur

M. Samir LAMOURI - Professeur des Universités - ENSAM, Centre de Paris Président

M. Nassim BOUDAUD - Maître de Conférences – UTC

Mme. Zohra CHERFI-BOULANGER - Professeur des Universités – UTC

Mme. BOSCH-MAUCHAND Magali - Maître de Conférences – UTC

Membres invités :

Mme. Amélie PONCHET-DURUPT - ECC – UTC

Mme. Isabelle GUIVARCH - Product Assurance Systems Manager - MBDA

Remerciements

Je souhaite adresser mes remerciements à mes directrices de thèse, Zohra Cherfi et Magali Bosch, ainsi qu'Amélie Ponchet pour avoir accepté d'encadrer ma thèse, pour leur disponibilités, leurs conseils, les multiples relectures et tout ce temps consacré à faire avancer ce travail.

Je remercie également Isabelle et Xavier pour m'avoir accueilli au sein de MBDA et guidé tout au long de ces années de thèse au sein de cette entreprise. Merci de m'avoir accordé votre confiance pour accomplir ce travail ainsi que pour votre patience et votre compréhension.

Merci au membre de mon jury de thèse. Merci à Nadège Troussier et Ali Siadat, rapporteurs de la thèse pour leurs remarques et commentaires sur le mémoire, merci à Samir Lamouri d'avoir présidé et à Nassim Boudaoud d'avoir fait partie de mon jury de thèse.

Merci à toutes les personnes ayant accepté de consacrer de leur temps de travail chez MBDA pour répondre à mes questions et participer à la construction des modèles de prévisions. Merci à Gaëtan, Julien, aux ingénieurs qualité, système, sûreté de fonctionnement pour leur aide.

Je remercie également toutes les personnes qui ont pu m'aider au quotidien que ce soit chez MBDA, à l'UTC, au secrétariat de l'école doctorale, dans mes démarches administratives et problèmes logistiques. Merci pour votre disponibilité en cas de besoin et pour avoir fait en sorte que mon environnement de travail soit le plus agréable possible.

Merci aux personnes avec qui j'ai partagé mon quotidien, que ce soient les collègues et stagiaires du bâtiment A, en particulier Christian, Aurélie, Sarah, ou bien les enseignants, chercheurs, doctorants et personnels du centre Pierre Guillaumat, pour leur amitié, leur soutien et les bons moments partagés.

Enfin, merci à ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé et merci pour les relectures du mémoire.

Résumé :

La maîtrise de la qualité est aujourd'hui indispensable pour satisfaire les exigences des clients. Bien qu'il existe différentes méthodes et outils spécialement développés pour manager la qualité des systèmes ou des processus au sein des entreprises, il est difficile d'établir le lien entre la maîtrise des nombreux processus d'une entreprise et la qualité produit pour un système en service.

Dans ce contexte, une thèse CIFRE a été menée au sein de MBDA, entreprise qui conçoit, développe et produit des systèmes d'armes. La problématique de cette thèse est de développer une méthodologie permettant de produire une définition de la qualité produit d'un système complexe qui soit valable tout au long de son cycle de vie, et permettant la construction de modèles de prévision de la qualité produit en utilisation lors du développement et de la production. Notre contribution consiste en une méthodologie en deux phases.

La première phase permet d'établir une définition de la qualité produit des systèmes complexes du point de vue du client adaptée au contexte industriel en définissant plusieurs facteurs qualité produit qui soit valable pour toutes les phases du cycle de vie des systèmes.

La deuxième phase permet de construire des modèles de prévision de la qualité produit qui permettent d'obtenir une évaluation de la qualité tout au long du cycle de vie des systèmes et d'établir une prévision de ce que sera la qualité en utilisation.

Les deux phases de la méthodologie reposent sur l'exploitation d'avis d'experts afin de permettre son utilisation sans disposer d'une quantité importante de données. Les modèles construits ont été testés pour des systèmes développés par MBDA.

Mots clés : Qualité produit ; Modèle de prévision ; Aide à la décision ; Systèmes complexes ; Evaluation de la qualité ; Conception.

Abstract:

Today, quality control is essential to satisfy customer requirements. Although there are different methods and tools specially developed to manage the quality of systems or processes within companies, it is difficult to establish the link between management of a company's many processes and product quality for a system in service.

In this context, a CIFRE thesis was conducted within MBDA, a company that designs, develops and produces weapons systems. The problem of this thesis is to develop a methodology allowing to produce a definition of the product quality of a complex system which is valid throughout its life cycle, and allowing the construction of models to predict the product quality in use during development and production. Our contribution consists of a two-phase methodology.

The first phase makes it possible to establish a definition of the product quality of complex systems from the customer's point of view adapted to the industrial context by defining several product quality factors that are relevant for all phases of the systems life cycle.

The second phase builds product quality prediction models that provide a life-cycle quality assessment of the systems and a forecast of what the quality will be in use.

Both phases of the methodology rely on the use of experts' judgement to enable its use without a significant amount of data. The models built have been tested for systems developed by MBDA.

Keywords: Product Quality; Forecasting Model; Decision-making support; Complex system; Quality assessment; Design.

Table des matières

Table des Figures.....	13
Table des Tableaux.....	15
Abréviations et Sigles.....	17
Introduction Générale.....	19
Chapitre I : Contexte Industriel et Problématique de Recherche	25
I.1. Développement de systèmes complexes	27
I.2. L'assurance qualité	28
I.3. Contexte et problématique industrielle	29
I.4. Problématique de recherche : la prévision de la Qualité produit à terminaison.....	32
I.5. Conclusion	34
Chapitre II : État de l'Art	35
II.1. Définition de la Qualité	37
II.1.1. Définition courante de la Qualité.....	37
II.1.2. Définition normée de la Qualité.....	37
II.1.3. Evolution de la qualité : du contrôle du résultat au management de la qualité.....	39
II.2. La Qualité en tant que processus	42
II.2.1. Les différents niveaux du processus qualité en entreprise.....	42
II.2.2. Moyens de déploiement du processus Qualité.....	43
II.2.3. Les limites du management de la qualité.....	44
II.3. Approches prédictives de la Qualité	46
II.3.1. Les outils statistiques de la Qualité.....	47
II.3.2. L'élicitation d'avis d'experts pour la prévision de la Qualité.....	53
II.3.3. Le cas particulier de la Qualité du logiciel	63
II.3.4. Les limites des approches prédictives.....	67
II.4. Adéquation au contexte de notre problématique	69
Chapitre III Méthodologie de Construction du Modèle de Prévision de la Qualité Produit à Terminaison - Phase 1 -.....	71
III.1. Méthodologie Phase 1 : Caractérisation des Facteurs Qualité propre à l'entreprise	75
III.1.1. 1 ^{ère} étape : Identification et Définition des Facteurs Qualité Produit envisageables	77
III.1.2. 2 ^{ème} étape : Evaluation des Facteurs Qualité Produit envisageables.....	78
III.1.3. 3 ^{ème} étape : Classification des Facteurs Qualité Produit	80
III.1.4. 4 ^{ème} étape : Choix des Facteurs à modéliser	81
III.2. Application Phase 1 : Caractérisation des Facteurs Qualité Produit pour MBDA	82
III.2.1. 1 ^{ère} étape : Identification et Définition des Facteurs Qualité Produit envisageables	83
III.2.2. 2 ^{ème} étape : Evaluation des Facteurs Qualité Produit envisageables.....	85
III.2.3. 3 ^{ème} étape : Classification des Facteurs Qualité Produit	88

III.2.4. 4 ^{ème} étape : Choix des Facteurs à modéliser	89
III.3. Conclusion.....	90
Chapitre IV Méthodologie de Construction du Modèle de Prédiction de la Qualité Produit à Terminaison - Phase 2	91
IV.1. Partie 1 - Structuration d'un modèle de prévision.....	95
IV.1.1. 1 ^{ère} étape : Définition de l'objectif à terminaison du facteur.....	96
IV.1.2. 2 ^{ème} étape : Définition des critères.....	97
IV.1.3. 3 ^{ème} étape : Définition des métriques.....	99
IV.1.4. 4 ^{ème} étape : Définition des relations internes du modèle	101
IV.1.5. Validation de la structure du modèle.....	103
IV.2. Partie 2 - Paramétrage d'un modèle	104
Notations	107
IV.2.1. 1 ^{ère} étape : Détermination des relations internes au modèle	108
IV.2.2. 2 ^{ème} étape : Déterminations des valeurs des paramètres par élicitation d'avis d'experts 111	
IV.2.3. 3 ^{ème} étape : Agrégation des avis d'experts.....	119
IV.2.4. Validation du modèle de prévision.....	126
IV.3. Conclusion.....	127
Chapitre V Applications : Construction et Utilisation de Modèles de Prédiction pour les Facteurs « Conformité » et « Fiabilité »	131
V.1. Construction Phase 2 et Utilisation du modèle de prévision du facteur Conformité.....	134
Notations	135
V.1.1. Particularités de la Conformité	136
V.1.2. Définition de la structure du modèle Conformité	137
V.1.3. Paramétrage du modèle Conformité	152
V.1.4. Utilisation opérationnelle du modèle de prévision de la Conformité	160
V.2. Construction Phase 2 et Utilisation du modèle de prévision du facteur Fiabilité.....	176
Notations et hypothèses de travail.....	177
V.2.1. Particularités de la Fiabilité	178
V.2.2. Définition de la structure du modèle Fiabilité	181
V.2.3. Paramétrage du modèle Fiabilité	191
V.2.4. Utilisation opérationnelle du modèle de prévision de la Fiabilité	193
V.3. Conclusion.....	199
Conclusion et Perspectives.....	201
Bibliographie.....	205
Glossaire.....	211
Annexes.....	215
Tables des annexes	215

Annexe 1 : Définition des Facteur et Critères Qualité logiciels selon McCall.....	216
Annexe 2 : Méthode mathématique d'analyse multicritère et établissement des poids	217
Annexe 3 : Questionnaire d'évaluation de la pertinence des facteurs qualité potentiels pour MBDA	219
Annexe 4 : Trame d'entretien d'élicitation des paramètres du modèle de prévision de la Conformité	227
Annexe 5 : Objectifs intermédiaires pour les métriques du modèle de prévision de la Conformité	231
Annexe 6 : Questionnaire d'évaluation de la métrique P_E Coefficient de pertinence des études de fiabilité	233
Annexe 7 : Questionnaire d'évaluation de la métrique P_A Coefficient de pertinence des AMDEC produit	236
Annexe 8 : Trame d'entretien d'élicitation des paramètres du modèle de prévision de la qualité des prévisions de Fiabilité	237
Annexe 9 : Objectifs intermédiaires pour les métriques du modèle de qualité des prévisions de Fiabilité.....	239
Annexe 10 : Résultats du Benchmark Qualité Produit.....	240

Table des Figures

Figure 1 : Jalonnement du cycle de vie des systèmes développés par MBDA.....	29
Figure 2 : Processus de passage de jalon MBDA.....	30
Figure 3 : Triptyque Coût, Qualité, Délais.....	32
Figure 4 : Maîtrise de la qualité, adaptée de [Ferreboeuf, 2000].....	38
Figure 5 : Formalisme du réseau bayésien.....	52
Figure 6 : Comparaison d'estimations biaisées mais de faible variance (cible de gauche) avec des estimations à la moyenne non biaisée mais à forte variance (cible de droite), [Gingerenzer ² , 2016] ...	56
Figure 7 : Arborescence Facteur, Critères, Métriques, pour la Fiabilité. Adapté de [McCall, 1977]. ..	64
Figure 8 : Utilisation des modèles de prévision de la qualité en préparation des passages de jalon.....	73
Figure 9 : Utilisation des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison pour un jalon.....	74
Figure 10 : Principe de la méthodologie de construction des modèles de prévision de la qualité produit.....	75
Figure 11 : Phase 1 de la méthodologie de construction du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison.....	76
Figure 12 : Phase 1 de la méthodologie de construction du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison appliquée à MBDA.....	82
Figure 13 : Score de pertinence des facteurs qualité produit MBDA envisageables.....	86
Figure 14 : Score de non pertinence des facteurs qualité produit MBDA envisageables.....	86
Figure 15 : Pourcentage de réponses sans avis sur la pertinence des facteurs MBDA envisageables ..	87
Figure 16 : Utilisation des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison aux principaux jalons.....	93
Figure 17 : Phase 2 de la méthodologie de construction du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison.....	94
Figure 18 : Structure Facteur, Critères, Métriques (FCM).....	95
Figure 19 : Phase 2, Construction de la structure du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison, Partie 1, Structuration d'un modèle de prévision.....	96
Figure 20 : Exemple de modèle Facteur, Critère, Métrique pour une machine à café.....	100
Figure 21 : Structure du modèle de prévision de la qualité en réseau.....	101
Figure 22 : Représentation de M_1 et M_2 parents modifiants de C_1	102
Figure 23 : Exemple de réseau structuré pour le facteur utilisabilité.....	102
Figure 24 : Phase 2 de la méthodologie, Partie 2 - Paramétrage d'un modèle de prévision.....	104
Figure 25 : Composants d'un modèle de prévision de la qualité produit.....	106
Figure 26 : Première étape du paramétrage : Définir les relations internes au modèle.....	108
Figure 27 : Critère C_j sans parent modifiant.....	109
Figure 28 : Critère C_j ayant des parents modifiants.....	110
Figure 29 : Seconde étape du paramétrage : Détermination des paramètres par élicitation.....	111
Figure 30 : Échelle de notation d'une réponse d'un expert e à un jalon l concernant une métrique k	114
Figure 31 : Troisième étape du paramétrage : Agrégation des avis d'experts.....	119
Figure 32 : Intervalles de valeurs de métriques tirés des avis d'experts.....	120
Figure 33 : Deux interprétations possibles pour une valeur de métrique atteignant 80% de l'objectif qualité produit intermédiaire (jalons ou métriques différents).....	121
Figure 34 : Degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison d'après les réponses de l'expert 1.....	122
Figure 35 : Degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison d'après les réponses de l'expert 2.....	122
Figure 36 : Agrégation des réponses des experts 1 et 2.....	124
Figure 37 : Méthodologie de construction des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison.....	129

Figure 38 : Architecture produit MBDA : système de systèmes, systèmes, sous-systèmes et équipements	132
Figure 39 : Application de la Phase 2 et utilisation du modèle pour le facteur Conformité.....	134
Figure 40 : Acquisition de la conformité d'un système tout au long de sa phase de développement .	136
Figure 41 : Partie 1, conformité de la définition du système par rapport aux exigences du client.....	150
Figure 42 : Partie 2, conformité du système fabriqué par rapport à sa définition	151
Figure 43 : Relations entre sous-facteurs et facteur dans le modèle Conformité	151
Figure 44 : Champs permettant la saisie des caractéristiques particulières du système en cours de développement.....	161
Figure 45 : Tableau récapitulatif des valeurs des métriques en entrée du modèle de prévision de la Conformité de la Définition du système par rapport aux exigences du client.....	161
Figure 46 : Tableau récapitulatif des valeurs des métriques en entrée du modèle de prévision de la Conformité du système par rapport à sa Définition.....	162
Figure 47 : Tableau de bord de l'outil permettant l'utilisation du modèle de prévision de la conformité de la définition aux exigences du client	163
Figure 48 : Modèle de prévision sous forme de réseau avec degrés d'atteinte des objectifs qualité produit intermédiaires	164
Figure 49 : Graphe d'évolution de la métrique Couverture du besoin.....	164
Figure 50 : Niveaux de Conformité calculés pour le système A au jalon J1, Facteur τ_{cDef}	165
Figure 51 : Valeur des métriques calculables au jalon J1 pour le système A.....	166
Figure 52 : Niveaux de Conformité calculés pour le système A jusqu'au jalon J2.....	166
Figure 53 : Valeur des métriques calculables au jalon J2 pour le système A.....	167
Figure 54 : Niveaux de Conformité calculés pour le système A jusqu'au jalon J3.....	168
Figure 55 : Valeur des métriques calculables au jalon J3 pour le système A.....	169
Figure 56 : Niveau de Conformité calculé pour le système B au jalon J2.....	170
Figure 57 : Valeur des métriques calculables au jalon J2 pour le système B	171
Figure 58 : Niveaux de Conformité calculés pour le système B jusqu'au jalon J3	171
Figure 59 : Valeur des métriques calculables au jalon J3 pour le système B	172
Figure 60 : Niveaux de qualité mesurés pour le système C en production série	173
Figure 61 : Valeur des métriques calculables pour le système C au moment de la mesure 1	174
Figure 62 : Valeur des métriques calculables pour le système C au moment de la mesure 2	174
Figure 63 : Prise en compte de la fiabilité tout au long du cycle de vie du système	178
Figure 64 : Mesure de $\Delta\lambda_{obs}$	181
Figure 65 : Modèle fiabilité structuré.....	190
Figure 66 : Tableau de bord de l'outil permettant l'utilisation du modèle de qualité des prévisions de fiabilité	194
Figure 67 : Niveaux de qualité des prévisions de Fiabilité calculés pour le système D aux jalons J1 à J4	195
Figure 68 : Taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{prév}$ pour le système D.....	196
Figure 69 : Niveaux de qualité des prévisions de Fiabilité calculés pour le système E aux jalons J1 à J4	197
Figure 70 : Taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{prév}$ pour le système E	198

Table des Tableaux

Tableau 1 : Comparatif des méthodes d'analyse de données et de prévisions.....	53
Tableau 2 : Exemple d'échelle de correspondance verbale – numérique pour l'évaluation d'une fréquence.....	58
Tableau 3 : Comparatif des méthodes d'élicitation.....	60
Tableau 4 : Facteurs qualité logiciel [McCall, 1977].....	64
Tableau 5 : Critères qualité logiciel [McCall, 1977].....	64
Tableau 6 : Prise en compte des Facteurs Qualité retenus pour différents modèles.....	66
Tableau 7 : Prise en compte des Critères Qualité logiciel retenus pour différents modèles.....	66
Tableau 8 : Classification des facteurs qualité produit en fonction de leur pertinence et de leur nature.....	80
Tableau 9 : Répartition des personnes interrogées sur la définition de la qualité produit.....	83
Tableau 10 : Définition des 17 facteurs qualité produit envisageables pour MBDA.....	84
Tableau 11 : Répartition des personnes interrogées pour la hiérarchisation des facteurs qualité produit.....	85
Tableau 12 : Pertinence des facteurs qualité produit envisageables pour MBDA.....	88
Tableau 13 : Classification des facteurs qualité produit MBDA.....	88
Tableau 14 : Exemple de définition des objectifs à terminaison pour deux des facteurs.....	97
Tableau 15 : Sélection des personnes à interroger pour définir les critères associés à un facteur qualité produit.....	98
Tableau 16 : Règles d'équivalence des réponses d'expert.....	114
Tableau 17 : Valeurs des métriques et critères évaluées par l'expert e.....	117
Tableau 18 : Répartition des personnes interrogées pour définir la structure du modèle conformité.....	138
Tableau 19 : Critères de Conformité du système.....	139
Tableau 20 : Partie 1 du modèle Conformité, Métriques et leurs caractéristiques.....	148
Tableau 21 : Partie 2 du modèle Conformité, Métriques et leurs caractéristiques.....	149
Tableau 22 : Relations en critères sans parent modifiant et métriques Conformité.....	152
Tableau 23 : Relations entre critères et facteurs Conformité.....	153
Tableau 24 : Calcul de τ_{cDef} en fonction des jalons.....	153
Tableau 25 : Poids des arcs du critère « Qualité des spécifications ».....	154
Tableau 26 : Poids des arcs du critère « Qualité de la définition ».....	155
Tableau 27 : Poids des arcs des métriques de maturité (Readiness Level) du critère « Q _{DEF} ».....	155
Tableau 28 : Poids des arcs du critère « Qualité de la justification ».....	156
Tableau 29 : Poids des arcs du critère « Qualité du Système de Production ».....	156
Tableau 30 : Poids des arcs du critère « Qualité de la Supply Chain ».....	156
Tableau 31 : Poids des arcs du facteur « Conformité du système à sa Définition ».....	157
Tableau 32 : Réponses des experts et agrégation des objectifs intermédiaires pour la métrique M_{spec}	157
Tableau 33 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système A au jalon J1.....	165
Tableau 34 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système A au jalon J1.....	166
Tableau 35 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système A jusqu'au jalon J2.....	167
Tableau 36 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système A jusqu'au jalon J2.....	167
Tableau 37 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système A jusqu'au jalon J3.....	168
Tableau 38 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système A au jalon J3.....	169
Tableau 39 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système B au jalon J2.....	170

Tableau 40 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système B aux jalons J2	171
Tableau 41 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système B jusqu'au jalon J3	172
Tableau 42 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système B jusqu'au jalon J3.....	172
Tableau 43 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur pour le système C en phase de production série	173
Tableau 44 : Classification des défaillances FIDES.....	184
Tableau 45 : Correspondance causes de défaillance - critères de fiabilité	185
Tableau 46 : Métriques du modèle Fiabilité et leurs caractéristiques	190
Tableau 47 : Relations en critères sans parent modifiant et métriques Conformité	191
Tableau 48 : Degré d'atteinte des objectifs à terminaison des critères pour le système D aux jalons J1 à J4	196

Abréviations et Sigles

AC : Action Corrective

ACP : Analyse en Composantes Principales

AFC : Analyse Factorielle des Correspondances

AFDM : Analyse Factorielle de Données Mixtes

AHP : Analytic Hierarchy Process

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

AQ : Avis Qualité

COQUAMO : Constructive Quality Model

DE : Demande d'Evolution

DD : Dossier de Définition

DFC : Dossier de Fabrication - Contrôle

DFM : Design For Manufacturability

DI : Dossier d'Industrialisation

DJD : Dossier Justificatif de la Définition

DMAIC : Define Measure Analyse Improve Control

DSmT : Dezert-Smarandache Theory

FCM : Facteurs, Critères, Métriques

GQM : Goal, Question, Metric

IQ : Ingénieur Qualité

IRL : Intergration Readiness Level

MRL : Manufacturing Readiness Level

MSP : Maîtrise Statistique des Procédés

N.A. : Non Applicable

N.D. : Non Disponible

NE : Non-conformité Externe

NI : Non-conformité Interne

PGE : Plan Général d'Essais

SCE : Supply Capability Evaluation

SMQ : Système de Management de la Qualité

SQuaRE : System and software Quality Requirements and Evaluation

SR : Special Requirement (Exigence Spéciale)

SRL : System Readiness Level

STB : Spécification Technique du Besoin

TQM : Total Quality Management (management par la qualité totale)

TRL : Technical Readiness Level

Introduction Générale

La maîtrise de la qualité est aujourd'hui essentielle pour les entreprises, afin de satisfaire les exigences des clients. Une organisation et un cadre construit sur la base d'un système de management de la qualité (SMQ) sont nécessaires pour le développement de systèmes. Les systèmes ayant une complexité grandissante, cette exigence de qualité prend encore plus d'ampleur.

Nous nous intéressons dans ce mémoire au cas particulier des systèmes complexes. Les systèmes de ce type intègrent des éléments de natures diverses : mécanique, électronique et logiciel. Leurs fonctionnalités et leurs performances sont des propriétés émergentes de leurs constituants. Ce qui signifie que les capacités d'un système complexe ne se résument pas à la simple addition des performances de ses composants. En effet, il existe différents types d'interactions entre leurs nombreux composants (asservissement, boucle de rétroaction positive ou négative, phénomène d'emballement, d'oscillations, etc.), qui sont à l'origine du comportement de l'ensemble du système. De plus, ces interactions s'inscrivent sur plusieurs échelles temporelles et spatiales. Il n'est donc pas aisé de prévoir les performances de tels systèmes.

La conception de systèmes complexes demande habituellement plusieurs années de travail et nécessite l'intervention de nombreux acteurs aux domaines de compétences techniques différents au sein même de l'entreprise ou à l'extérieur, chez les fournisseurs et sous-traitants. Cela est particulièrement vrai dans le secteur de l'aéronautique et de la défense, pour lesquels le développement d'un nouveau système peut prendre de 3 à 10 ans en moyenne, la production est limitée à quelques exemplaires (rarement plus de quelques centaines) et le produit peut ensuite rester en service plusieurs décennies (20 – 30 ans, parfois plus).

Les particularités propres aux systèmes complexes, qui sont leur grand nombre de composants de natures diverses en interactions, leurs propriétés émergentes, les différentes échelles (spatiales et temporelles) de fonctionnement, rendent donc difficile pour les ingénieurs qualité et les personnes en charge du suivi du projet d'avoir une vision globale et objective de la qualité d'un système en cours de son développement, et de la future qualité de ce système en utilisation (i.e. à terminaison). Cette difficulté est encore accrue lorsque le développement de système complexe implique de très nombreuses personnes sur plusieurs années, comme c'est le cas dans le secteur aéronautique et défense. En effet, dans ce cas, les interfaces entre les équipes de travail sont multipliées et complexifient l'organisation du projet.

Il existe aujourd'hui différentes méthodes et divers outils spécialement développés pour manager la qualité des systèmes ou des processus au sein des entreprises. D'une part, la prise en compte de la qualité en tant que processus transverse permet aujourd'hui une déclinaison cohérente et efficace de la qualité dans l'ensemble des processus de l'entreprise. D'autre part, il existe des méthodes et outils utilisés dans l'industrie pour prévoir certaines caractéristiques des produits (telle qu'une performance spécifique) à différents moments de leur cycle de vie.

Cependant, ces méthodes et outils présentent certaines limites. Concernant le management de la qualité en tant que processus, il est difficile d'établir le lien entre la maîtrise des nombreux processus d'une entreprise, qui concerne le management au niveau global et la qualité produit pour un système en service. Quant aux méthodes et outils d'évaluation et de prévision des caractéristiques des systèmes, ils ne couvrent qu'une partie des caractéristiques des produits. Ils ne permettent pas d'aborder la totalité de la qualité produit. Ces outils sont souvent utilisés dans une seule phase du cycle de vie des produits, chaque

phase ayant ses propres spécificités et les besoins en termes d'évaluation de la qualité produit étant différents.

Ces limites peuvent être particulièrement problématiques dans un contexte de développement de systèmes complexes en faible quantité et à long cycle de vie. En effet, il est nécessaire, dans ce cadre, de disposer de moyens permettant de suivre et de piloter la qualité des systèmes à tous les niveaux de l'organisation projet et de façon continue tout au long du cycle de vie des systèmes. C'est cette capacité de suivi et de pilotage qui assure d'atteindre la qualité voulue une fois le produit fini. Elle est d'autant plus nécessaire que le développement d'un système complexe implique de nombreux acteurs internes et externes à l'entreprise et s'étale dans le temps.

Mais les méthodes existantes permettent soit de définir l'organisation générale, d'avoir une vue au niveau global de l'entreprise, soit d'étudier une caractéristique précise des systèmes. Elles ne permettent pas d'avoir à la fois des mesures directes sur le système et une vue globale de la qualité du système valable tout au long de son cycle de vie comme le nécessite le développement de systèmes complexes. Dans tout projet, les aspects de coûts et de délais sont pourtant aujourd'hui suivis grâce à des indicateurs prévisionnels et comparés à des objectifs quantifiables clairement définis. Des estimations de coûts et de délais sont réalisées grâce à des modèles. La situation d'un projet est ainsi évaluée de manière continue et des projections sur le résultat final sont régulièrement réalisées. Mais il n'existe pas d'équivalent pour la qualité produit. Dans ces conditions, il est donc difficile d'évaluer le niveau de qualité d'un système complexe en cours de développement et de le comparer à un objectif qualité une fois qu'il sera en service. La projection de la qualité dans le futur est très incertaine.

Il existe donc un réel besoin de lier les mesures relatives à la qualité du système au cours de son cycle de vie, et en particulier pendant la phase de développement, avec la capacité de satisfaire les exigences des clients, lorsque le système est en cours d'utilisation. Un modèle utilisable tout au long du développement d'un système complexe et qui permette la prévision de la qualité produit répondrait à ce besoin.

Dans ce cadre, une thèse CIFRE a été menée au sein de MBDA, entreprise qui conçoit, développe et produit des systèmes d'armes destinés aux différents corps d'armée. Ce sont des systèmes complexes qui ont la particularité de nécessiter plusieurs années de développement, d'être produits en petite quantité et d'être utilisés en opération plusieurs décennies. Chaque projet de développement de système est unique et les méthodes de travail évoluent au cours du temps. Il est donc difficile de comparer plusieurs développements entre eux afin d'identifier les bonnes pratiques qualité, les meilleures méthodes et outils à utiliser pour leur conception et production et d'en tirer des leçons. Il est également impossible de comparer simplement le déroulement et l'avancement de deux développements de nouveaux systèmes différents afin de savoir lequel a atteint le meilleur niveau de qualité à un instant t.

Dans ces circonstances, il est nécessaire pour MBDA de pouvoir manager la qualité des systèmes tout au long de leur cycle de vie et en particulier lors de la phase de développement afin de satisfaire le besoin du client. Afin d'identifier et d'anticiper les problèmes qualité dès la phase de développement du système, l'entreprise souhaitait développer des modèles permettant d'évaluer de la manière la plus objective possible la qualité des systèmes tout au long de leur cycle de vie et de prévoir leur qualité à terminaison (lors de leur utilisation par le client). En effet, plus un écart dans la conception d'un système par rapport au besoin du client est identifié tôt durant le développement, moins il est coûteux pour l'entreprise de corriger cet écart. Avec un tel modèle, il serait possible de détecter un problème qualité au plus tôt au cours d'un développement, d'en identifier l'origine et d'agir en conséquence pour garantir le niveau de qualité voulu au moment de livrer le système au client.

La problématique de cette thèse est donc de développer une méthodologie permettant d'une part de produire une définition de la qualité produit d'un système complexe qui soit valable tout au long de son

cycle de vie, et d'autre part permettant la construction de modèles de prévision de la qualité produit à terminaison lors du développement et de la production de systèmes complexes.

Afin d'apporter une réponse au manque d'outils d'évaluation et de prévision de la qualité produit pour des systèmes complexes et à ce besoin industriel, notre contribution consiste en une méthodologie en deux phases.

La première phase de notre méthodologie permet d'établir une définition de la qualité produit des systèmes complexes du point de vue du client adaptée au contexte industriel. Cette définition consiste à caractériser la qualité produit des systèmes complexes à travers plusieurs facteurs qualité produit. Elle a l'avantage d'être valable pour toutes les phases du cycle de vie des systèmes, permettant ainsi une continuité dans l'évaluation de la qualité produit tout au long d'un projet. Utiliser cette méthodologie permet également à une entreprise d'avoir l'assurance que cette définition de la qualité produit est parfaitement adaptée à son contexte et aux systèmes qu'elle développe.

La deuxième phase de notre méthodologie permet de construire des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison. Les modèles ainsi construits permettent, d'une part, d'obtenir une évaluation globale de la qualité produit tout au long du cycle de vie des systèmes basée sur des mesures directes et d'autre part, d'établir une prévision de ce que sera la qualité produit à terminaison. Un modèle par facteur qualité produit peut ainsi être construit, en fonction des besoins de l'entreprise.

Les deux phases de la méthodologie reposent sur l'exploitation d'avis d'experts. Cette façon de procéder a l'avantage de permettre d'utiliser cette méthodologie sans disposer d'une quantité importante de données à propos des produits développés par une entreprise. La mise en œuvre de cette méthodologie est donc possible dans des contextes où la production se fait en faible quantité, où il y a peu de systèmes différents à étudier ou encore lorsque les systèmes ont une durée de vie en service de plusieurs décennies, compliquant la traçabilité des données.

Ce mémoire, qui décrit la démarche suivie et présente notre proposition ainsi que son application, se structure en cinq chapitres :

Chapitre I : Contexte industriel et Problématique de Recherche

Le premier chapitre a pour objectif de souligner l'importance de la maîtrise de la qualité produit pour une entreprise qui conçoit et produit des systèmes complexes. La notion de système complexe est exposée, nous présentons les spécificités des systèmes complexes et de leur développement ainsi que l'impact de ces spécificités sur l'organisation projet au sein d'une entreprise. Les principes de l'assurance qualité produit comme moyen de manager la qualité sont rappelés et les limites pour le développement de systèmes complexes sont abordées. Nous justifions ainsi le besoin de développer de nouveaux outils de pilotage de la qualité produit dans le contexte du développement de systèmes complexes en faible quantité. Ce chapitre présente également le contexte et la problématique industrielle au sein du groupe MBDA à l'origine de ce travail de thèse. Enfin, notre problématique de recherche liée à la prévision de la qualité produit à terminaison est développée en deux axes. Cette problématique guide ensuite les travaux exposés dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Etat de l'art

Le second chapitre est consacré à la définition de la qualité dans un contexte industriel et aux moyens existants pour sa mise en œuvre et sa prévision au sein d'une démarche qualité cohérente. La définition de la qualité est développée dans la première partie. Elle y est abordée à partir de sa définition courante pour aller à sa définition normée. Les évolutions de la prise en compte de la qualité dans l'industrie sont abordées à travers quelques rappels sur l'histoire de la qualité.

La seconde partie du chapitre développe le concept de la qualité en tant que processus au sein des entreprises. Les différents niveaux et moyens de déploiement d'une démarche qualité sont présentés dans cette partie. Les limites du management de la qualité en tant que processus dans le cadre du développement de systèmes complexes sont discutées, ainsi que le besoin de prévoir la qualité qui en découle.

La troisième partie de ce chapitre présente les approches prédictives de la qualité produit et les méthodes statistiques et d'élucubrations d'avis d'experts qui peuvent être utilisées dans ce cadre. Les avantages et inconvénients de ces méthodes et outils sont présentés et discutés.

Enfin, ce chapitre est clos par une analyse de l'adéquation des éléments introduits au contexte de notre problématique afin d'en dégager les méthodes et outils applicables dans la méthodologie que nous proposons ensuite.

Chapitre III : Méthodologie de Construction du Modèle de Prévision de la Qualité Produit à Terminaison - Phase 1

Le troisième chapitre présente notre proposition pour répondre à la problématique posée. Il introduit les deux phases que comporte la méthodologie pour construire des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison qui soient adaptés aux systèmes complexes. Le chapitre développe ensuite la Phase 1 qui permet de définir la qualité produit à terminaison des systèmes complexes du point de vue du client en fonction du contexte industriel à travers différents facteurs qualité produit. La définition de la qualité ainsi construite est adaptée aux systèmes complexes dans leur ensemble tout en tenant compte des spécificités de l'entreprise qui met en œuvre cette méthodologie.

La première phase de la méthodologie est ensuite mise en œuvre pour l'entreprise MBDA. Il en ressort une liste de 11 facteurs qualité produits adaptés aux systèmes que propose l'entreprise. A l'issue de cette phase, deux facteurs sont sélectionnés par MBDA pour faire l'objet de modèles de prévision en priorité : « Conformité » et « Fiabilité ».

Chapitre IV : Méthodologie de Construction du Modèle de Prévision de la Qualité Produit à Terminaison - Phase 2

Ce chapitre décrit la Phase 2 de la méthodologie qui permet de construire des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison pour chacun des facteurs qualité produit identifiés et sélectionnés lors de la Phase 1. L'intérêt des modèles construits est de réaliser une évaluation objective de la qualité produit des systèmes tout au long de leur cycle de vie et de déterminer, à partir de cette évaluation, la capacité à atteindre le niveau de qualité voulu à terminaison. Le principe est de fournir, via ces modèles, une prévision du niveau de qualité produit qui sera atteint à terminaison, par rapport à un objectif qualité fixé pour ainsi guider la prise de décision au cours du développement de nouveaux systèmes.

La méthodologie décrite s'appuie sur l'élucubrations d'avis d'experts et permet d'obtenir des modèles de prévision utilisables tout au long du cycle de vie des systèmes.

Chapitre V : Applications : Construction et Utilisation de Modèles de Prévision pour les Facteurs « Conformité » et « Fiabilité »

Le dernier chapitre est consacré à la mise en œuvre, au sein du groupe MBDA, de la Phase 2 de la méthodologie proposée. Deux cas d'étude sont exposés, ils concernent les modèles de prévision de la conformité et de la fiabilité des systèmes. L'utilisation des deux modèles est illustrée par leur application sur des systèmes développés par MBDA. La partie consacrée au facteur conformité détaille l'application de chacune des étapes de la méthodologie présentée au chapitre IV dans le contexte de l'entreprise

MBDA. La partie concernant le facteur fiabilité porte en priorité sur les particularités de traitement du facteur fiabilité qui sont le fait qu'il existe déjà une fiabilité prévisionnelle calculée par MBDA et que le modèle évalue la qualité de cette prévision de fiabilité. L'utilisation de ces modèles, via deux outils créés pour l'occasion, est ensuite développée dans les cas de 5 systèmes MBDA en cours de développement ou déjà en service.

Chapitre I : Contexte Industriel et Problématique de Recherche

Il est aujourd'hui vital pour toute entreprise de répondre aux besoins de ses clients pour rester compétitive. Dans un environnement changeant, à la concurrence mondialisée, il est indispensable pour une entreprise d'avoir la capacité de maîtriser la qualité de ses produits afin de répondre aux besoins de ses clients. Dans ce cadre, diverses stratégies ont été développées autour de méthodologies, d'outils de management pour satisfaire les objectifs qualité des entreprises. Il est ainsi possible aujourd'hui de définir une organisation qualité permettant de cadrer les activités de l'entreprise et de préconiser certaines méthodes de travail pour maximiser les chances de livrer au client un produit conforme à ses attentes, tout en répondant aux contraintes de coûts et de délais.

Dans le cas d'une entreprise qui développe des systèmes complexes - systèmes qui peuvent impliquer plusieurs dizaines, voire centaines de personnes - un système de management de la qualité est indispensable pour capitaliser et bénéficier de l'expérience entre les différents développements. Il est en effet nécessaire de définir un cadre de travail commun pour que les acteurs impliqués dans le développement de ces systèmes puissent avancer ensemble vers une solution qui satisfera le client tout en permettant à l'entreprise de dégager la marge nécessaire à son fonctionnement.

Mais au-delà des aspects organisationnels, la pérennité de l'entreprise peut être mise en jeu. En effet, dans le cas d'un système développé qui ne répondrait pas aux exigences du client, l'entreprise se doit d'assumer le coût d'éventuelles modifications sur le système livré au client ou de pénalités, ou encore le coût d'un abandon total en cas d'échec. L'impact financier est d'autant plus important pour l'entreprise que les sommes investies dans le développement avorté sont conséquentes, pouvant aller jusqu'à la faillite. Ainsi, des stratégies sont développées par les entreprises pour minimiser ces risques, garantir un niveau de qualité suffisant et s'assurer de conserver une marge financière suffisante et de la tenue des délais.

Ce premier chapitre a pour objectif de souligner l'importance de la maîtrise de la qualité produit pour une entreprise qui conçoit et produit des systèmes complexes. La notion de systèmes complexes est précisée et les principes de l'assurance qualité produit, utilisée comme moyen de gérer la qualité, sont présentés. Le problème industriel à l'origine de ce travail de thèse ainsi que la problématique de recherche qui en découle sont ensuite développés.

I.1. Développement de systèmes complexes

Le contexte industriel considéré dans ce travail de recherche concerne le développement et la production de systèmes complexes.

Nous entendons par système complexe, un système qui :

- Inclut des composants de diverses natures (mécanique, électronique, logiciel,...) ;
- Comporte de nombreux composants avec des interactions nombreuses et variées (boucle de retour, relations non-linéaires, interdépendance...) ;
- Impliquent, pour leur développement et leur production, l'intervention de nombreux spécialistes aux domaines de compétences techniques différents.

La principale particularité des systèmes complexes est liée au fait, que leur performance technique n'est pas déterminée par une simple combinaison linéaire des performances de leurs composants [Fellows 2012] car ils sont connectés les uns aux autres (voir intégrés). Ces interactions peuvent comporter des boucles de retour d'informations et être de nature non linéaires [Anderson 1999]. Une modification minime sur un ou deux paramètres du système peut entraîner des modifications majeures dans le comportement du système complet. En effet, les caractéristiques finales du système complet ne sont pas le résultat d'une simple addition des caractéristiques de ses composants. La prévision des caractéristiques finales de ce type de système nécessite donc des moyens de modélisation avancés.

Le processus de conception de systèmes complexes est une succession de décisions et d'arbitrages qui impacteront les caractéristiques futures du système [Herrmann 2015]. Ces choix peuvent impacter dans de grandes proportions le futur système et doivent, en grande partie, être faits très tôt dans le développement. Car, plus un écart dans la conception d'un système par rapport aux exigences du client est détecté tôt durant le développement, moins il est coûteux de corriger cet écart.

Il est donc indispensable d'utiliser un processus de développement rigoureux qui inclut un système de management de la qualité (SMQ) adapté afin de garantir les caractéristiques finales du système tout au long de sa vie opérationnelle et ainsi garantir la satisfaction des exigences du client.

Le développement de systèmes complexes nécessite une organisation particulière pour répondre à ses spécificités. Les principales caractéristiques de cette complexité organisationnelle sont la fragmentation du travail en différentes équipes et différents métiers, les différents niveaux hiérarchiques impliqués dans le développement, la répartition sur différents sites géographiques et la multiplication des technologies impliquées. Plus les systèmes deviennent complexes, plus les méthodes de management doivent évoluer pour permettre le suivi et le contrôle du processus de développement [Lead et al. 2010]. Des modèles ont donc été proposés pour diriger le développement de systèmes complexes [Mendling et al. 2010]. La plupart d'entre eux proposent de mesurer l'efficacité des processus de l'entreprise ou certaines caractéristiques clés du système en cours de développement. Cependant, ces modèles ne peuvent donner une vue complète de ce que sera la future satisfaction du client une fois le système mis en service. En effet, le développement de tels systèmes implique des processus interdépendants et des tâches distribuées entre de multiples équipes de conception aux spécialités diverses. Dans un tel contexte, le simple suivi de quelques indicateurs d'efficacité ne suffit pas à garantir la satisfaction finale de l'ensemble des exigences du client.

La complexité du développement de tels systèmes réside à la fois dans leur propre nature et dans les caractéristiques des organisations nécessaires à leur développement. Les méthodologies de management de la qualité proposent d'apporter des principes pour le développement et la production de systèmes complexes, dans l'optique de satisfaire les exigences du client en intégrant les principes de l'assurance qualité.

I.2. L'assurance qualité

L'intégration des principes de l'assurance qualité au sein de méthodologies de management de la qualité a permis d'apporter une maîtrise de la qualité dans le cadre du développement et de la production de systèmes complexes.

Les fondements de l'assurance qualité apparaissent au début du XXème siècle, pendant l'entre-deux-guerres, et ont pour objectif d'atteindre la satisfaction du client à moindre coût. Ils reposent alors exclusivement sur le contrôle statistique de la qualité [Lérat-Pytlak, 2002]. Des méthodes d'échantillonnage sont définies, le but est alors de trouver une réponse aux problèmes de fabrication récurrents. A cette époque se développent également les normes pour l'industrie avec la création en 1926 de la Fédération internationale des associations nationales de normalisation.

Les systèmes normatifs ont été, par la suite, renforcés et le contrôle statistique de la qualité s'est généralisé après la seconde guerre mondiale. La période de croissance et de forte compétitivité des entreprises durant l'après-guerre met en lumière les limitations du contrôle statistique tourné exclusivement vers la fabrication [Gautier 1995]. Le contrôle de la qualité a posteriori, en production, ne permet d'anticiper les problèmes qualité que de manière très limitée.

À la fin des années 1970, il est devenu indispensable pour les entreprises de pouvoir améliorer la qualité des produits qu'elles proposent et de réduire les coûts de production pour pouvoir faire face à la concurrence, en particulier celle des compagnies japonaises [Prajogo et Sohal 2001]. Au début des années 1980 s'est donc développée l'Assurance Qualité, au sens moderne, comme moyen d'identifier les méthodes et techniques les plus appropriées pour concevoir et fabriquer des produits ayant un niveau de qualité élevé tout en maîtrisant les coûts et les délais. L'Assurance Qualité permet de mettre en place des actions pour garantir la qualité du produit final, et donc la satisfaction du client, dès le début du développement d'un système.

Le Total Quality Management (TQM) fût développé dans cette optique comme un système de management qui incorpore des méthodes et outils pour la qualité prenant en compte l'avis du client [Oakland 2014]. Cependant, les méthodes de management de la qualité reposent souvent sur des méthodes informelles dont les concepts ne sont pas suffisamment définis [Juan et Vicente 2004].

Les principes du TQM ont donc été par la suite intégrés dans la série de norme ISO 9000, qui définit les principes essentiels et le vocabulaire d'un système de management de la qualité (SMQ), pour pallier ce manque de formalisme. Aujourd'hui, la plupart des grandes entreprises possèdent un système de management de la qualité qui repose sur les normes ISO 9001, qui spécifient les exigences relatives à un système de management de la qualité et l'ISO 9004 qui fournit les lignes directrices sur une gamme d'objectifs pour un SMQ afin de pérenniser les performances et les améliorer.

La norme ISO 9000:2005 définit une terminologie propre aux principes essentiels des systèmes de management de la qualité. L'objectif est de définir et de piloter les processus de l'entreprise qui sont nécessaires à la satisfaction des exigences du client. Pour cette tâche, la norme ISO 9004 définit des indicateurs de performance clés qui sont de plus en plus utilisés dans l'industrie pour piloter la qualité. Leur principe est d'agréger différents indicateurs qui rendent compte de la performance des processus de l'entreprise. Ce sont des moyens de mesure et d'analyse de l'avancement des résultats planifiés par les différents processus en fonction de la stratégie et des objectifs de l'entreprise. Ils doivent servir de base pour les prises de décisions stratégiques.

Néanmoins, les indicateurs de performance clés sont des indicateurs de haut niveau tournés vers les processus internes de l'entreprise comme l'évaluation des risques pour l'entreprise ou le suivi des coûts. Ces indicateurs ne sont pas conçus pour donner des informations concernant directement le système en

cours de développement et donc sur la future satisfaction du client final (l'utilisateur). De façon générale, le constat est qu'il est difficile de faire un lien direct entre le management des processus de l'entreprise par la qualité et la satisfaction d'exigences client pour un système complexe donné.

I.3. Contexte et problématique industrielle

La problématique industrielle émane de la société MBDA qui par ses activités se doit de garantir le niveau de qualité demandé par ses clients. En effet, la société MBDA conçoit, fabrique et assure le maintien en service de missiles et systèmes de missiles destinés aux trois types d'armées (terre, air et marine). L'entreprise est implantée dans cinq pays d'Europe et aux États-Unis.

Les systèmes développés par MBDA, en plus d'être complexes, ont la particularité d'être produits en faible quantité et d'avoir une durée de vie en service de plusieurs décennies dans la plupart des cas. Leur développement dure en moyenne de 4 à 5 ans mais certains peuvent durer 10 ans.

Le groupe propose au total 45 programmes de systèmes de missiles et en développe 15 autres (un programme regroupe plusieurs projets connexes). Les systèmes aujourd'hui en service ont été développés à des périodes différentes. Suivant la période à laquelle ils ont été conçus, les systèmes d'armes proposés par la société sont basés sur des technologies différentes. De plus, MBDA est issue de la fusion, en 2001, de plusieurs sociétés européennes du secteur de la défense. Les méthodes et outils de travail employés avant 2001, lors de la conception de systèmes aujourd'hui encore en service, sont donc multiples.

Le contexte d'un programme a également une influence importante sur les projets et donc sur les développements de systèmes qu'il recouvre ; en effet, les contraintes ne sont pas les mêmes en fonction du client (marché national, export), de la plateforme sur laquelle sera intégré le système (véhicule terrestre, bateau, avion, etc.), des besoins opérationnels particuliers (disponibilité, zones de déploiement...), des systèmes produits par la concurrence, etc.

Chaque projet est donc unique. Les méthodes et outils utilisés pour la conception diffèrent également en fonction de l'époque à laquelle le système a été développé. Depuis 10 ans, un système commun de management de la société a permis d'uniformiser les pratiques entre les principales entités du groupe basées en Angleterre, en France et en Italie. L'entreprise est aujourd'hui certifiée EN 9100, norme européenne qui décrit les exigences pour un système d'assurance de la qualité appliqué au secteur aéronautique, spatial et armement. La norme EN 9100 reprend dans son intégralité l'ISO 9001 et la complète par des exigences spécifiques au secteur industriel aéronautique, défense et espace. Ces éléments doivent être mis en place tout au long du cycle de vie des produits.

Le cycle de vie du produit est défini, pour l'ensemble des programmes sur un modèle linéaire allant du lancement du développement J0 jusqu'au retrait du service Jf (Figure 1). Ce cycle de vie est séquencé en plusieurs phases majeures avec des jalons prévus pour valider chaque passage d'une phase à une autre.

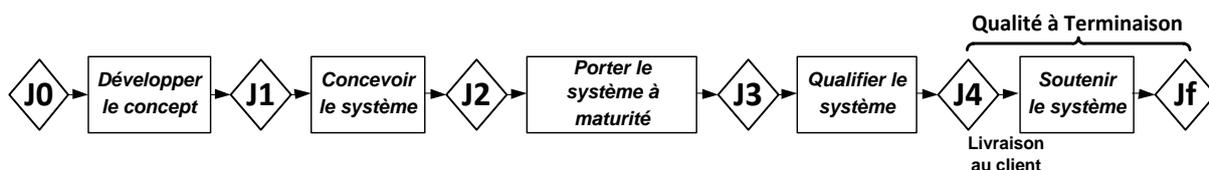


Figure 1 : Jalonnement du cycle de vie des systèmes développés par MBDA

Pour chacun des jalons en développement (J1 à J4), une réunion de revue de passage, qui regroupe les responsables du programme et des experts, est organisée afin de décider de poursuivre le cycle de vie du système et de démarrer la phase suivante (Figure 2). La décision est basée à la fois sur des évaluations du management de projet (management du contrat, du client,...) et du système lui-même (maturité, qualité de la conception, revue des pairs...) qui sont réalisées en préparation à la réunion de passage de jalon. À l'issue de la revue de passage de jalon, la décision peut être soit de continuer le projet en passant à la phase suivante, soit, en cas de points bloquants, de prononcer un passage conditionnel en attendant la résolution de ces points sans pour autant stopper le déroulement du projet. Dans le cas d'un point bloquant déclaré comme majeur (problème à résoudre sans attendre), le passage de jalon n'est pas autorisé, des actions à entreprendre sont décidées et une nouvelle revue de passage est planifiée.

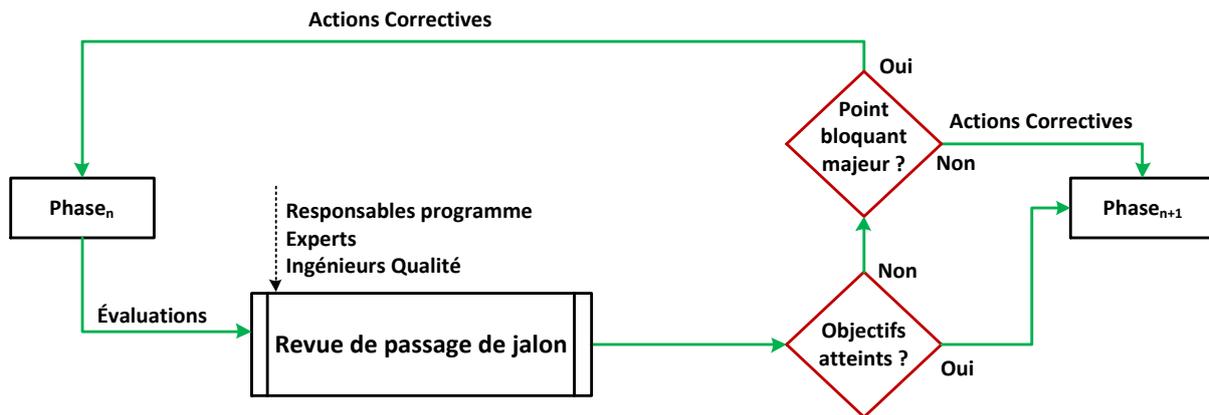


Figure 2 : Processus de passage de jalon MBDA

Parmi les experts impliqués dans le processus de revue de passage de jalon, les ingénieurs qualité (IQ) jouent un rôle important en tant que facilitateur et évaluateur du travail accompli.

Lors de la phase de préparation du passage de jalon, ils apportent leur support en participant à la mise en œuvre et en s'assurant du respect de la procédure définie pour cette tâche et font le lien entre les équipes chargées des évaluations du système de management et celles chargées d'évaluer le produit lui-même.

Lors de la réunion de passage de jalon elle-même, leur rôle est de donner un éclairage qualité et d'apporter un regard critique sur les résultats de l'évaluation.

Suite à la revue, ils s'assurent de la conformité du processus avec le système de management de l'entreprise, soutiennent le suivi du plan d'action issu de la revue, identifient les retours d'expérience et leur prise en compte pour le futur.

En plus du rôle de facilitateur, l'ingénieur qualité apporte son expertise sur l'avancement du programme et sur les résultats de l'évaluation, ce qui constitue une grande partie de la valeur ajoutée de cette fonction dans le développement d'un système. La difficulté de cette tâche est qu'elle repose à la fois sur les capacités d'analyse et de synthèse des informations provenant des différentes équipes de développement et sur l'expérience personnelle de l'ingénieur qualité.

En effet, les informations prises en compte lors de ces évaluations sont très diverses. Elles concernent des éléments techniques sur le futur système lui-même, qui proviennent des différents secteurs de développement (conception électronique, conception mécanique, fiabilité et sécurité, industrialisation...), des résultats de tests et essais, du bon suivi du planning, de la gestion des coûts... Différents outils et indicateurs sont utilisés au sein de l'entreprise pour suivre chacun de ces éléments mais ils ne peuvent se substituer à l'analyse critique des différents experts. Une autre difficulté sur ce type d'analyse est l'impossibilité de comparer simplement le déroulement et l'avancement de deux

développements de nouveaux systèmes différents afin de savoir lequel a atteint le meilleur niveau de qualité. Ceci s'explique du fait qu'à un moment donné, les systèmes en cours de développement sont obligatoirement différents. Il serait en effet contre-productif pour l'entreprise de développer des systèmes qui se concurrenceraient ne serait-ce qu'en partie sur une même plateforme (bateau, avion, camion...) ou pour un même usage. La seule comparaison possible entre deux développements ne peut se faire qu'avec le système de génération précédente, s'il existe, dont le développement a débuté deux décennies auparavant, avec une organisation de l'entreprise et des méthodes de travail différentes et des technologies qui ont évoluées.

D'autres programmes de développement consistent à faire évoluer un système déjà existant, pour lui procurer des capacités opérationnelles supplémentaires ou l'intégrer sur une nouvelle plateforme. Dans ce cas, le développement du système à modifier étant plus récent, des comparaisons sont envisageables. Cependant, certaines limites existent. Un changement de plateforme de mise en œuvre du système n'est pas anodin et modifie profondément le contexte de développement et d'utilisation. De plus, les personnes impliquées dans le nouveau développement ne sont pas les mêmes que lors du développement original, il faut donc que le retour d'expérience du premier développement ait été correctement capitalisé et partagé avec la nouvelle équipe.

Les constats suivants ont donc été relevés :

- Malgré l'usage de nombreux indicateurs et la définition de méthode d'analyse et d'évaluation de programme, il n'est pas toujours évident de se prononcer sur la future réussite d'un développement de système ;
- Il n'est pas toujours aisé, d'utiliser au mieux l'historique et le retour d'expérience d'anciens développements disponibles au sein de l'entreprise ;
- L'expérience personnelle joue un rôle important dans la capacité à analyser la situation d'un projet ;
- La valeur ajoutée du travail des ingénieurs qualité n'est pas toujours perçue à sa juste valeur au sein de l'entreprise ;
- Le travail de collecte et de traitement des informations est chronophage et sa complexité augmente avec l'étendue des périodes à analyser et le nombre de caractéristiques à traiter.

Afin de répondre à ces différentes limites, il a été décidé de développer un modèle de prévision de la « qualité produit à terminaison » pour aider les ingénieurs qualité dans leur tâche. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un outil permettant d'aider les ingénieurs qualité à évaluer et à prévoir l'évolution de la qualité produit au cours du développement d'un système.

Cet outil doit permettre :

- De réaliser le bilan le plus objectif possible du travail déjà réalisé pour le développement d'un système du point de vue de sa qualité ;
- D'aider à se projeter aux jalons suivants et surtout à celui de la livraison en proposant une estimation du niveau de qualité qu'atteindra le système à ce moment.

Une méthodologie pour définir et utiliser cet outil doit être conçue.

I.4. Problématique de recherche : la prévision de la Qualité produit à terminaison

Comme présenté précédemment, il est aujourd'hui essentiel pour une entreprise qui développe des systèmes complexes de définir un système de management de la qualité (SMQ) pour répondre aux demandes du client. L'objectif est de satisfaire les exigences du client tout en limitant les coûts pour l'entreprise. Pour cela, il faut s'assurer que les caractéristiques finales du produit perdurent tout au long de la phase d'utilisation. Le terme « qualité produit à terminaison » désigne par la suite les caractéristiques du système en utilisation, du point de vue du client.

Il était usuel d'énoncer le triptyque « coût, qualité, délais » lorsqu'il est question de la performance d'un projet (Figure 2).

Dès la phase préparatoire, les responsables projet s'efforcent de fixer des objectifs quantitatifs en termes de coûts (coût de production, marge cible, prix de vente...) et de délais (date de livraison au client, échéances pour les principaux jalons...). Puis, les évolutions de ces paramètres sont suivies tout au long du projet au travers de plannings, du suivi budgétaire et des moyens engagés ainsi que des estimations successives des coûts de production. Des modèles de coûts et de délais permettent d'estimer ces valeurs. La situation d'un projet peut ainsi être évaluée par rapport à ces objectifs de manière continue et des projections sur le résultat final peuvent être réalisées.

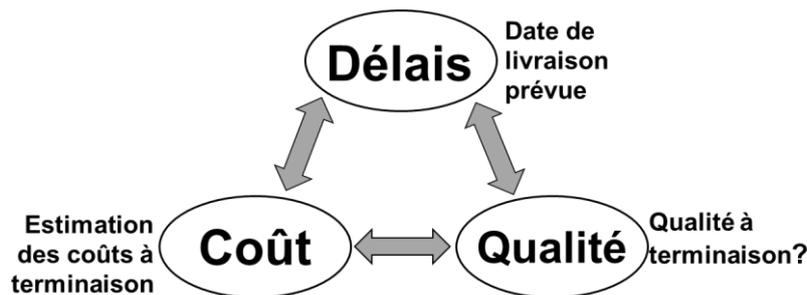


Figure 3 : Triptyque Coût, Qualité, Délais

Par contre, il n'existe pas d'objectif qualité quantifiable universellement défini. Si un délai ou un coût peut s'exprimer facilement (en jours, mois, années pour le premier, dans une devise adaptée pour le second), il est plus délicat de donner une définition précise, quantifiable et opérationnelle de l'objectif « qualité à terminaison ». Il est donc difficile d'évaluer le niveau de qualité d'un système complexe en cours de développement et de le comparer à l'objectif qualité produit à terminaison. Toute projection dans le futur devient hypothétique.

La problématique ainsi adressée est d'élaborer un modèle utilisable tout au long du développement d'un système complexe et qui permette la prévision de la qualité produit à terminaison. Cette prévision pourra s'appuyer sur l'exploitation des données disponibles sur le système en cours de conception, des performances des processus de développement et du retour d'expérience. Ce modèle doit pouvoir être utilisé dès le début d'un programme de développement d'un nouveau système et jusqu'à sa mise en service chez le client. Les prévisions réalisées grâce à ce modèle doivent aider à mettre en place au plus tôt les actions nécessaires pour atteindre le niveau de qualité produit requis pour la satisfaction du client.

La réalisation d'un modèle de prévision de la qualité produit nécessite donc de produire des éléments permettant de définir un objectif en terme de qualité produit, de suivre son niveau de réalisation et d'en estimer, tout au long du cycle de vie, le niveau qui sera réellement atteint une fois le système fini livré au client.

La première étape est donc de déterminer comment définir et caractériser la qualité produit à terminaison. Ce modèle qualité doit être adapté aux particularités des systèmes complexes et doit pouvoir prendre en compte les spécificités du contexte : un secteur industriel particulier, un type de clientèle, le système de management de l'entreprise amenée à utiliser ce modèle. Il ne faut pas oublier que l'objectif est la prévision de la qualité produit à terminaison. Cette caractérisation de la qualité produit est essentielle pour la construction du modèle de prévision.

La deuxième étape est de définir le modèle de prévision de la qualité produit à terminaison lui-même. Le modèle doit s'appuyer sur la caractérisation de la qualité produit choisie. Les contraintes propres aux systèmes complexes (multi-domaine, fragmentation du travail...) doivent être prises en compte. Les contraintes dues au contexte de développement de ce type de système doivent également être prises en compte, sachant que :

- Les exigences client diffèrent d'un développement à un autre ;
- La quantité de données exploitables est limitée à quelques systèmes, produits en faible quantité ;
- Les données exploitables sont de natures hétérogènes ;
- Le retour d'expérience est un savoir principalement détenu par les experts de l'entreprise.

Ces éléments sont dimensionnants pour la réponse à apporter à la problématique de la prévision de la qualité produit.

La problématique peut donc se caractériser par ces deux axes :

Axe 1 : Comment définir et caractériser la qualité produit à terminaison d'un système complexe du point de vue du client ?

Axe 2 : Comment prévoir la qualité produit à terminaison d'un système complexe, du point de vue du client, au cours de son développement ?

La définition de la qualité produit à terminaison (Axe 1) est le prérequis à la recherche de moyen de prévision de cette qualité (Axe 2).

I.5. Conclusion

Le développement de systèmes complexes impose aux entreprises de définir un système de management structuré de la qualité pour pouvoir satisfaire les exigences des clients tout en maîtrisant les coûts et les délais. Les normes qualité existantes et les méthodes de management de la qualité constituent un cadre pour définir de tels systèmes de management. Cependant, garantir la qualité produit à terminaison d'un système complexe reste délicat. Le suivi du développement d'un système complexe demande de prendre en considération de nombreuses données de natures très différentes et leurs analyses reposent sur les experts de l'entreprise. La complexité du système en développement et de l'organisation nécessaire pour mener le projet compliquent l'évaluation du travail réalisé et sa projection dans l'avenir.

L'objectif de ce travail de thèse est de proposer une méthode qui permette à une entreprise qui développe des systèmes complexes de construire un modèle de prévision de la qualité produit à terminaison, à utiliser tout au long des phases de développement. Ce travail est mené suivant deux axes :

- Axe 1 : définition d'un modèle qualité produit qui permette de caractériser la qualité d'un système complexe en fonction des exigences client et qui prend en compte les spécificités du type d'industrie considéré ;
- Axe 2 : proposition d'une méthode de prévision de la qualité produit à terminaison en cours de développement adapté au contexte de l'entreprise.

La conception d'une telle méthode nécessite d'identifier les pratiques et modèles existants qui permettront par la suite de poser les bases de notre proposition. Le chapitre suivant présente un ensemble d'éléments bibliographiques sur lesquels nous allons nous appuyer pour construire les éléments de réponse à la problématique posée.

Chapitre II : État de l'Art

Dans ce second chapitre, nous nous intéressons à la définition de la qualité dans un contexte industriel, aux moyens existants pour la mise en œuvre d'une démarche qualité et à la prévision de la qualité produit afin de construire les bases de notre proposition.

La première partie de ce chapitre est dédiée à la définition de la qualité, en partant de sa définition commune pour aller à sa définition normée. Les différents aspects de la qualité dans l'industrie sont ensuite abordés à travers quelques rappels sur l'histoire de la qualité dans l'industrie.

La seconde partie du chapitre développe le principe de la qualité en tant que processus en entreprise. Ses différents niveaux et moyens de déploiement y sont présentés. Les limites du management de la qualité en tant que processus dans le cadre du développement de systèmes complexes sont discutées, ainsi que le besoin de prévoir la qualité qui en découle.

La troisième partie est consacrée aux approches prédictives de la qualité produit. Les méthodes statistiques et d'élicitations d'avis d'experts sont introduites et discutées.

Enfin, la dernière partie analyse les éléments présentés dans ce chapitre dans le contexte de notre problématique.

II.1. Définition de la Qualité

Avant de nous intéresser aux pratiques de la qualité en entreprise, il est nécessaire de comprendre ce que signifie la qualité. Nous proposons dans cette partie un rappel des définitions courantes et normées de la qualité ainsi que de l'évolution de sa pratique au cours du siècle dernier pour en comprendre les différents aspects.

II.1.1. Définition courante de la Qualité

Le mot qualité est employé de nombreuses façons en fonction du contexte (langage courant, industrie, etc.). La définition utilisée couramment, indépendamment du contexte est celle-ci :

« Emprunté du latin *qualitas*, « qualité, manière d'être »

Ce qui appartient en propre à une chose et la distingue d'une autre ; caractère particulier, propriété. [...] Ce qui confère un intérêt, un atout, un avantage. [...]

Degré d'excellence relative, valeur que l'on attribue à une chose et qui permet de la juger, de la classer par rapport à une norme de référence ou par rapport à des choses analogues. [...]

Certificat de qualité, délivré par une autorité officielle ou compétente, et qui atteste qu'un produit, un service possède les caractéristiques annoncées [...]

Dictionnaire académie française, 9^{ème} édition.

La notion de qualité repose donc sur les caractéristiques propres d'une chose. C'est ce qui permet de réaliser un jugement et de faire des comparaisons par rapport à quelque chose de similaire ou à un élément de référence. La qualité n'est pas absolue mais relative et évaluée par comparaison.

Dans un contexte industriel, toute entreprise se préoccupe aujourd'hui de la qualité des produits ou services qu'elle propose [Fiegenwald, 2012]. Historiquement, la qualité a d'abord été un moyen de réduire le nombre de défauts sur les produits, puis les domaines d'application ont été élargis incluant la conception, la production, le maintien en service, etc. [Montgomery, 2009].

Cependant, dans ce contexte, la définition générale de la qualité doit être précisée, car la qualité peut être floue et subjective [Gautier, 1995]. Il faut pouvoir définir explicitement la référence à partir de laquelle sera évaluée la qualité (des besoins, des normes...), qui sera juge de cette qualité, quelles sont les caractéristiques des produits ou services qui sont évaluées. A partir des années 1980, les référentiels « qualité » ont été l'objet de normalisation. Ainsi, la série de normes ISO 9000 a permis de donner une définition de la qualité adaptée aux besoins des entreprises [Guler et al., 2002].

II.1.2. Définition normée de la Qualité

La série de normes ISO 9000 donne, depuis 1987, les directives pour construire un système qualité [Oakland, 2014]. La norme ISO 9000 dans sa version de 2015, définit les principes et le vocabulaire qualité pour les entreprises et organisations. Ainsi, la qualité est définie de la sorte :

« **Qualité** : aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un objet à satisfaire des **exigences**.

La qualité des produits et services d'un organisme est déterminée par la capacité à **satisfaire les clients** et par l'impact prévu et imprévu sur les parties intéressées pertinentes.

La qualité des produits et services inclut non seulement leur fonction et performances prévues, mais aussi la valeur et le bénéfice perçus par le client. »

ISO 9000:2015, quatrième édition

La qualité concerne donc les produits et services proposés par un organisme. Elle est liée aux exigences et à la capacité à satisfaire les clients. La norme définit aussi les notions d'exigence et de satisfaction du client.

« **Exigence** : besoin ou attente formulé, généralement implicite ou obligatoire. »

« **Satisfaction du client** : perception du client sur le niveau de satisfaction de ses attentes. »

La qualité a donc pour référence les besoins et attentes du client formalisés sous forme d'exigences. Elle est la capacité à satisfaire ces exigences d'un point de vue technique et inclut également la perception qu'a le client de la satisfaction de ses attentes.

Les principes définis dans la série de normes ISO 9000 doivent permettre de maîtriser la qualité. La qualité est maîtrisée lorsque le besoin du client est correctement spécifié et que le produit correspond à ce qui a été spécifié (Figure 3).

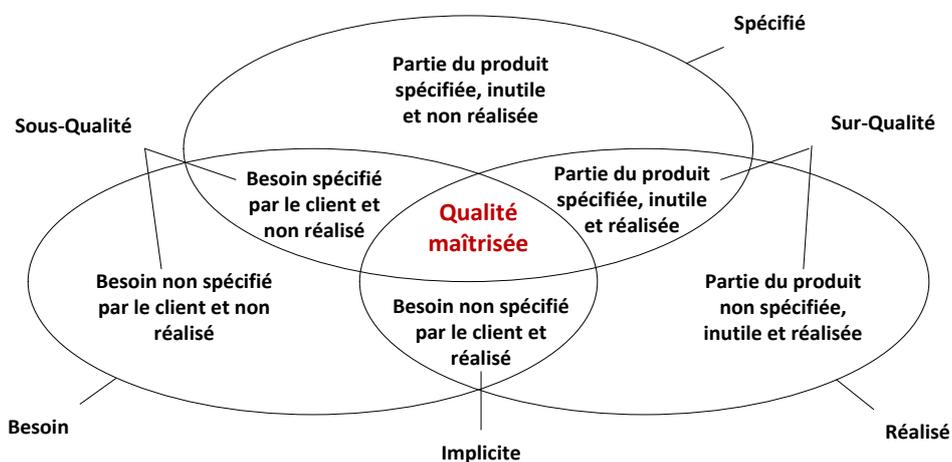


Figure 4 : Maîtrise de la qualité, adaptée de [Ferreboeuf, 2000]

La qualité vise à concevoir et réaliser un produit ou un service qui satisfera le client. Pour y parvenir, la série de normes ISO 9000 propose une approche par processus qui permet de raisonner de façon transversale au sein des entreprises. Le principe de base est de concevoir l'entreprise comme un ensemble de processus cohérents et liés entre eux, qui permet la satisfaction du client [Goetsch et al., 2013].

Pour comprendre pourquoi l'approche par processus de la qualité est aujourd'hui celle adoptée par la norme et la plupart des entreprises, un rappel de l'histoire récente de la qualité est utile.

II.1.3. Evolution de la qualité : du contrôle du résultat au management de la qualité

Si l'approche de la qualité par processus est aujourd'hui celle privilégiée par la norme, il n'en a pas toujours été ainsi.

L'évolution de la qualité dans l'industrie peut se résumer en deux phases principales.

La première phase débute à la fin du XIX^{ème} siècle [Gautier, 1995]. A cette époque naît l'organisation scientifique du travail, grâce à Taylor, dans le but d'améliorer la productivité des ouvriers et de l'appareil de production. Ce sont alors les performances des machines qui dictent la qualité des produits. La machine est au centre de l'attention, reléguant le produit au second plan. L'objectif est alors de produire en quantité, la qualité n'intervient qu'a posteriori. Le contrôle de la qualité se limite à trier les pièces conformes de celles qui ne le sont pas. La satisfaction du client est ainsi atteinte en ne livrant que des produits contrôlés conformes. Cependant, le coût de cette démarche purement corrective est d'autant plus élevé qu'il y a de produits non conformes. De plus, elle ne cherche pas à corriger les problèmes récurrents.

Afin de lutter contre les problèmes persistants de qualité et de réduire les coûts, le contrôle statistique de la qualité est développé entre les deux guerres mondiales. Des méthodes statistiques d'échantillonnage sont mises en place dans les années 1920 par Dodge, Roming et Jones pour la Western Electric Company afin de garantir la qualité des produits [Dodge et Roming, 1929]. Ainsi, au lieu de contrôler les produits une fois la production terminée, ceux-ci sont contrôlés tout au long de la fabrication. Aux Etats-Unis apparaissent également les normes « Military Standard » ayant le même objectif.

Ces normes ainsi que le contrôle statistique de la qualité sont renforcés lors de la seconde guerre mondiale afin de pouvoir livrer du matériel parfaitement fonctionnel et en grande quantité. La standardisation se développe alors dans le domaine de l'armement.

La seconde phase débute après la seconde guerre mondiale. Les limites du contrôle statistique de la qualité sont alors mises en lumière par le retour de la croissance et le besoin de compétitivité des entreprises [Prajogo, 2001]. Les problèmes de fabrication étaient les seuls pris en compte par le contrôle statistique. A ce moment apparaît l'Assurance Qualité (AQ) afin de traiter aussi bien les causes des problèmes que leurs effets [Deeb, 2008]. La qualité ne se limite alors plus à contrôler la production mais concerne aussi les aspects organisationnels, la conception des produits et les services de l'entreprise connexes à la production. Cette vision organisationnelle de la qualité prend en compte l'aspect humain en impliquant le personnel de l'entreprise dans la démarche [Segrestin, 1996]. Les différentes activités de l'entreprise peuvent se définir comme des processus qui, à partir d'une entrée provenant d'un fournisseur opèrent des transformations afin de produire une sortie pour un client. Tous ces processus interagissent pour fournir un résultat conforme avec les objectifs de l'entreprise. Le contrôle systématique a posteriori, devenu obsolète, doit faire place à la maîtrise des processus.

La qualité se caractérise donc suivant deux aspects : la qualité produit et la maîtrise des processus [Avrillion, 2005]. La qualité produit est celle qui intéresse directement le client, elle dépend des caractéristiques du produit final. Le moyen le plus efficace aujourd'hui pour une entreprise d'obtenir la qualité produit est la maîtrise des processus, qui permet de gérer au mieux les performances de l'entreprise et d'assurer la confiance dans le résultat obtenu. Ces deux aspects sont développés dans les paragraphes suivants.

II.1.3.1. La Qualité produit

La qualité produit est celle qui intéresse le client, elle est basée sur les attributs (caractéristiques) du produit. Elle est l'aspect le plus concret de la qualité, elle se traduit par la réalisation du produit et est directement perçue par le client.

Cependant, sa définition n'est pas aisée, voire problématique [Giroux 2006]. Plusieurs approches ont été proposées pour aborder la qualité produit [Trentin, 2012] suivant différentes perspectives. Du point de vue de la fabrication, la qualité produit est la conformité aux spécifications [Crosby, 1979]. Mais l'objectif est la satisfaction du client, et du point de vue du client, seule la conformité du produit à son besoin compte [Buzzell et al, 1987].

[Garvin, 1984] synthétise les différents aspects de la qualité produit à travers huit dimensions. Les cinq premières correspondent aux attributs techniques du produit : la performance (le produit remplit-il ses fonctions), la fiabilité (maintien du fonctionnement du produit dans le temps), la durée de vie (combien de temps le produit est utilisable), la maintenabilité (la facilité de réparation), la conformité aux standards (le degré de conformité en regard de ce qui était prévu).

S'ajoutent à ces cinq aspects trois autres éléments : l'esthétique (les formes et les couleurs), les fonctionnalités supplémentaires (les fonctions secondaires qui complètent l'usage de base), la qualité perçue (basée sur des éléments indirects tels que l'image du produit, la renommée de la marque). Ces éléments permettront de faire la différence par rapport à la concurrence.

Ces huit dimensions sont généralement distinctes et indépendantes. Cependant, elles peuvent parfois se renforcer mutuellement ou bien être contradictoires [Rungtusanatham, 1999].

La qualité produit est le résultat des différentes activités de l'entreprise, que ce soit en production ou en amont, lors de la conception du produit. La maîtrise des processus quant à elle permet l'obtention de cette qualité.

II.1.3.2. La maîtrise des processus

L'objectif de la maîtrise des processus est d'obtenir des résultats cohérents et prévisibles, en matière de qualité, de la manière la plus efficace possible [ISO 9000, 2015]. Bien identifier et comprendre les processus à l'œuvre dans l'entreprise permet de porter les efforts sur les processus les plus essentiels et d'optimiser les performances. Un management efficace des processus vise une utilisation optimale des ressources et assure la confiance en la cohérence et l'efficacité des activités menées par l'entreprise.

La variabilité des processus et des caractéristiques des produits doit être maîtrisée afin d'assurer l'obtention d'un produit de qualité. La maîtrise des processus cherche donc à rendre stable les processus de l'entreprise [Deeb, 2008].

Les méthodes et outils liés à la maîtrise des processus peuvent être classés selon leur application, à la production ou à la conception des produits.

En production :

Les processus de production dispose d'un grand nombre d'outils, de méthodes et de concepts pour sa maîtrise [Avrillion, 2005].

Les outils et méthodes sont de deux natures : pour le contrôle de la qualité et pour la résolution de problème de qualité (par exemple le diagramme d'Ishikawa). Le contrôle de la qualité consiste en un ensemble de procédures qui permettent de mesurer et de suivre dans le temps l'évolution de la qualité des éléments produits et de maintenir ou d'améliorer les processus [Golder et al., 2012]. Ces méthodes peuvent être de plusieurs types :

- Les méthodes en ligne permettant de suivre les variations du système de production et des caractéristiques des produits. Elles sont souvent statistiques, telles que les cartes de contrôle ;
- Les méthodes hors ligne permettant de simuler ou d'expérimenter différents paramètres du processus de production afin de l'améliorer ;
- Les méthodes de contrôle permettant d'identifier et d'écarter les produits non conformes.

Ces méthodes et outils doivent être intégrés dans une démarche structurée, et les moyens de mesure maîtrisés pour être pertinents et efficaces [Cherfi et al., 2002]. Les entreprises doivent sélectionner les outils et méthodes les plus appropriés suivant le contexte.

Les phases amont du cycle de vie du produit, qui concernent la conception du produit, sont également devenues des éléments essentiels de la maîtrise de la qualité.

En conception :

Le besoin de maîtriser la qualité en amont de la production, dès la phase de conception du produit, est d'autant plus important que lors de cette phase sont fixés 80% des coûts du produit [Zhao, 2014]. Bonne ou mauvaise, la conception d'un produit demandera le même investissement au départ. Mais dans le second cas, un défaut de conception pourra entraîner des coûts très importants s'il doit être corrigé plus tard dans une phase avancée de conception ou lorsque la production aura débuté. En effet dans cette phase amont du cycle de vie de produit, sont déterminées ses futures caractéristiques, et donc sa capacité à satisfaire le client.

Des méthodes et outils ont donc été développés pour la conception afin d'aider à la maîtrise de la qualité en conception : conception à l'écoute du marché, ingénierie robuste, « Design For Manufacturability » (DFM) [Pitchumani, 2005], « Design For Supportability », etc.

Mais comme pour le processus de production, les méthodes et outils ne sont rien sans une démarche qualité cohérente pour les déployer en conception.

Le management qualité concerne donc plusieurs départements au sein des entreprises [Reichenbacher, 2011]. Il intervient à différents niveaux structurels et au cours de différentes phases du cycle de vie du produit. Une modélisation du management qualité à travers ces méthodes et outils pour prendre en compte à la fois la qualité produit et la maîtrise des processus, est nécessaire pour son déploiement en entreprise. La qualité abordée en tant que processus au sein de l'entreprise permet ce management de la qualité, ce qui est développé dans la partie suivante.

II.2. La Qualité en tant que processus

La qualité est aujourd'hui abordée comme un processus transverse qui concerne tous les autres processus au sein des entreprises, ainsi que tous les employés. Ce processus qualité permet d'obtenir la qualité des produits et des services en impliquant toute l'entreprise [Gogue, 2000]. Le processus peut ainsi se décliner sur trois niveaux structurels au sein de l'entreprise [Deeb, 2008] : stratégique, tactique et opérationnel [Marcotte, 1995], [Gentil, 2001], [Pujo, 2002].

II.2.1. Les différents niveaux du processus qualité en entreprise

Chacun des trois niveaux de déclinaison du processus qualité en entreprise déploie dans son périmètre les objectifs de l'entreprise par ses activités propres. Cette organisation permet une déclinaison cohérente et efficace de la qualité dans l'ensemble des processus de l'entreprise.

II.2.1.1 Niveau stratégique

Le niveau stratégique, ou de management, contrôle l'ensemble des activités de l'entreprise. L'objectif est de déterminer et d'organiser la politique qualité générale de l'entreprise. Les responsables qualité y sont désignés, la planification des activités propres à la qualité et les ressources y sont gérées. Cette planification vise à définir les modalités de surveillance et de contrôle des processus en entreprise et à maintenir une démarche d'amélioration continue. Elle consiste aussi à choisir les méthodes et outils qualité à utiliser aux niveaux tactique et opérationnel, ainsi que la planification et l'accompagnement nécessaire à leur déploiement.

A ce niveau incombe également la responsabilité de préparer l'entreprise aux certifications (ISO 9001 par exemple) et de les maintenir. Le processus qualité est mis en œuvre à ce niveau en prenant en compte la stratégie générale de l'entreprise et s'intègre aux projets de développement de produits, aux plans de production, de maintenance, etc.

II.2.1.2 Niveau tactique

Le processus qualité au niveau tactique (ou support) est la mise en application de la démarche définie au niveau stratégique. Il concerne en particulier les processus liés aux produits tels que la conception, la production et la maintenance.

L'objectif est la maîtrise de la qualité des processus de l'entreprise et de la qualité des produits. Cela passe par l'adaptation des méthodes et outils qualité définis au niveau stratégique au contexte de l'entreprise. A ce niveau les moyens nécessaires pour satisfaire les objectifs de qualité et de son amélioration définis au niveau supérieur sont également mis en place. Ceci consiste à planifier les actions qui permettront le déploiement de la stratégie d'amélioration de la qualité.

Les problèmes de qualité doivent être identifiés à ce niveau afin de mettre en place les solutions adéquates et d'ajuster la stratégie qualité de l'entreprise si besoin.

Le niveau tactique permet de faire la liaison entre le niveau stratégique et le niveau opérationnel qui exécute la stratégie définie suivant la démarche planifiée et les moyens alloués.

II.2.1.3 Niveau Opérationnel

Au niveau opérationnel, la stratégie et les moyens dédiés à la qualité sont mis en place de façon pratique dans les différents processus de l'entreprise. L'objectif est de réaliser la maîtrise de la qualité à travers la démarche prévue, l'utilisation des méthodes et outils déployés au sein de l'entreprise et par des contrôles réguliers. Des actions préventives et correctives sont mises en place afin d'améliorer la qualité conformément aux objectifs fixés.

Le produit lui-même fait l'objet d'une surveillance directe de sa qualité tout au long des phases de conception et de production.

Le processus qualité agit ainsi, à ce niveau, sur les non-conformités détectées sur les processus et le produit lui-même par des actions correctives et préventives.

La maîtrise de la qualité en entreprise est donc réalisée grâce au processus qualité. Ce processus qualité se décline sur les différents niveaux structurels de l'entreprise pour s'intégrer de manière cohérente avec les autres processus de l'entreprise et atteindre les objectifs stratégiques. Le processus qualité s'appuie sur de nombreux moyens, tels que des outils et des méthodes, qui sont abordés dans le paragraphe suivant.

II.2.2. Moyens de déploiement du processus Qualité

Le processus qualité doit s'intégrer aux autres processus de l'entreprise afin de pouvoir garantir efficacement la satisfaction du client en lui fournissant un produit de qualité. Sa mise en place au sein de l'entreprise repose sur le déploiement d'outils, de méthodes, de méthodologies et d'approches qualité [Deeb, 2008].

Ces éléments peuvent se définir de la façon suivante :

- **Les outils qualité** : Ils permettent de réaliser de façon efficace une action précise. Ils peuvent avoir pour objet le contrôle de la qualité, son amélioration, l'analyse et la résolution de problèmes qualité. Dans cette catégorie se trouvent les outils statistiques tels que les cartes de contrôle utilisées pour maîtriser les processus en production. L'analyse des non-conformités peut se faire via des outils comme le diagramme de Pareto par exemple. La recherche des causes de non qualité s'appuie sur des outils du type diagramme d'Ishikawa, 8D, ou diagramme de corrélation [Dale, 1998]. Les outils disponibles sont nombreux et cette liste n'est pas exhaustive. En fonction de l'objectif recherché, du contexte et des connaissances des opérateurs, d'autres outils peuvent être privilégiés (tels que le diagramme de cheminement ou les histogrammes par exemple).
- **Les méthodes qualité** : Les méthodes qualité formalisent la marche à suivre pour assurer les activités de la qualité. Elles comportent un certain nombre de règles et de principes qui se rapportent à une activité précise. Elles peuvent inclure plusieurs outils. Ainsi, la Maîtrise Statistique des Procédés (MSP) par exemple, qui permet de s'assurer qu'un processus de

fabrication est sous contrôle, utilise comme outils la carte de contrôle et l'indice de capacité. L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est également une méthode utile à la maîtrise de la qualité [Fox, 1993].

- **Les méthodologies qualité :** Elles regroupent plusieurs activités au sein d'une démarche cohérente et structurée pour atteindre un objectif déterminé. Plusieurs méthodes qualité peuvent être mises en relation au sein d'une même méthodologie. La méthodologie Six Sigma, par exemple, vise à améliorer la qualité et l'efficacité des processus en basant la démarche sur les retours des clients et un système de mesure des processus afin d'en réduire la variabilité. Le Six Sigma intègre [Chorafas, 2012], entre autres, la méthode MSP et les plans d'expériences. Chacun de ces outils et méthodes s'incorporent dans une des cinq phases du Six Sigma : Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer (Improve), Maîtriser (Control), soit DMAIC en anglais. La roue de Deming par exemple, constitue une autre méthodologie, composée de quatre étapes : Plan, Do, Check, Act (PDCA).
- **Les approches qualité :** Elles sont constituées comme un ensemble de méthodologies qualité. Les approches qualité ne proposent en général pas de procédure rigoureuse à suivre mais plutôt un ensemble cohérent d'activités coordonnées pour la maîtrise de la qualité. Le Management Total de la Qualité (Total Quality Management, TQM) par exemple a pour objectif la maîtrise et l'amélioration continue de la qualité pour la satisfaction du client [Hellsten, 2000]. Ce système de management fait appel aux méthodologies, méthodes et outils de la qualité pour atteindre cet objectif. Ainsi, les différents niveaux structurels de l'entreprise sont couverts par l'approche TQM par la réalisation d'activités managériales et techniques. La série de normes ISO 9000 a intégré les principes du TQM.

La qualité s'aborde donc aujourd'hui comme un processus aux différents niveaux décisionnels dans l'entreprise. Ce processus qualité n'a de sens que s'il est intégré aux autres processus de l'entreprise. Pour cela, il se décline aux différents niveaux de l'entreprise : stratégique, tactique et opérationnel. Cette déclinaison s'opère via le déploiement de différentes méthodologies, différentes méthodes et différents outils au sein d'une approche qualité cohérente.

II.2.3. Les limites du management de la qualité

Le management de la qualité, en traitant la qualité comme un processus au sein de l'entreprise, permet de définir un ensemble cohérent d'activités pour maîtriser la qualité tout en impliquant l'ensemble de l'entreprise. Cependant, ce système de management demande encore des évolutions pour formaliser encore plus les relations entre les différents niveaux de déploiement, les différentes phases du cycle de vie du produit et entre les composantes de ces démarches.

Cette limite est encore plus problématique dans le contexte de conception et de production de systèmes complexes. En effet, ces systèmes nécessitent de longues périodes de développement, de nombreux intervenants, des domaines d'ingénieries variés (cf. I.1.). Ces caractéristiques impliquent plusieurs difficultés dans la maîtrise de la qualité :

- Le lien entre la maîtrise des processus et la qualité produit est plus difficile à établir. En effet, les processus qui interviennent tout au long du cycle de vie d'un système sont nombreux et variés. Connaître l'impact réel de chacun de ces processus sur les caractéristiques du système, et donc sa qualité, n'est pas possible de manière exacte. Les fonctionnalités d'un système ne

sont en effet pas la simple combinaison des sorties de chacun des processus qui interviennent dans leur réalisation mais sont des propriétés émergentes (cf. I.1).

- L'impact de la qualité du processus de conception sur la qualité produit est difficile à anticiper. Le système en cours de conception n'est pas complètement connu. Il est difficile d'avoir une vue complète de l'état de la conception d'un système lorsque celle-ci est répartie entre plusieurs entités au sein et à l'extérieur de l'entreprise et que les différents composants du système sont à des stades d'avancement différents (allant de l'étude préliminaire au composant déjà qualifié). Sans une bonne connaissance de l'état d'avancement et du niveau de qualité des composants du système, il serait très hasardeux d'essayer d'en déduire la future qualité une fois le système produit.
- Les systèmes de management de la qualité s'appuient sur les méthodes et outils les plus adaptés à chacune des phases du cycle de vie des systèmes. Cette façon de faire est une manière très efficace de procéder mais, en contrepartie, elle ne permet pas d'avoir une continuité dans la façon d'aborder la qualité des systèmes tout au long de leur cycle de vie. Avoir une vue globale et cohérente de la qualité d'un système du début de sa conception jusqu'à son retrait du service n'est pas possible avec ces seuls outils.

Le management de la qualité, dans le contexte du développement de système complexe, ne permet donc pas de lier directement la qualité des processus à celle du produit, et donc en fin de compte, avec la satisfaction du client.

Nous nous intéressons donc, dans la partie suivante (II.3.), aux moyens de prévision des caractéristiques des systèmes complexes et de leur qualité, car ce sont des moyens envisageables pour évaluer la qualité produit des systèmes complexes tout au long de leur cycle de vie et ainsi faire le lien entre les processus de l'entreprise et la satisfaction du client.

II.3. Approches prédictives de la Qualité

Afin de s'assurer du respect des exigences du client, et donc de sa satisfaction, des moyens de prévision (méthodes, outils...) peuvent être utilisés pour tenter d'évaluer quelles seront les futures caractéristiques du produit qui impactent sa qualité. L'intérêt de ces moyens de prévision est qu'ils permettent d'avoir une indication sur certains aspects de la qualité du produit, tels que sa fiabilité ou ses performances, dès les phases amont du cycle de vie et indépendamment du processus de management de la qualité lui-même.

L'objectif de satisfaction du client passe donc par l'obtention de la qualité produit à terminaison (cf. I.4.), c'est-à-dire la qualité du produit au moment où il sera livré au client et tout au long de sa phase d'utilisation. Evaluer cette qualité à terminaison demande de pouvoir comparer les futures caractéristiques du produit avec les exigences du client pour s'assurer de leur respect. Le management de la qualité, en tant que processus (cf. II.2.), permet d'assurer la qualité à travers les différents processus de l'entreprise. Cependant, il ne permet pas de connaître directement la qualité produit à terminaison, qui est pourtant un élément essentiel à la réussite d'un développement de produit. La gestion de projet s'appuie donc sur le cadre défini par le management de qualité pour assurer l'obtention de la qualité mais ne peut pas évaluer la future qualité du produit, et donc son degré de satisfaction des exigences du client directement par ce moyen. Dans le cas de produits tels que les systèmes complexes, il est alors difficile de piloter le développement sans évaluer les futures caractéristiques et donc la qualité du système qui sera livré au client.

Le management des risques en contexte incertain

Dans le cadre de notre travail de développement de modèle prédictif de la qualité produit à terminaison, les outils développés pour le management des risques constitue une solution à considérer pour modéliser l'incertitude de l'atteinte des objectifs qualité produit. En effet, la prévision de la qualité d'un système peut être considérée comme le fait de déterminer le risque qu'un ou plusieurs facteurs qualité produit ne soit pas, à terminaison, au niveau suffisant pour satisfaire les exigences du client. La norme ISO 31000:2009, sur le management des risques définit ainsi le risque :

« *Le risque est l'effet de l'incertitude sur les objectifs.* »

La norme liste également la qualité produit parmi les objectifs qui sont concernés par le management des risques.

Les méthodes de management des risques intègrent des moyens de représenter et de traiter l'incertain et peuvent être classées en deux groupes suivant le type d'approche :

- **l'approche disciplinaire** : analyse les sources de risques séparément (risques humains, organisationnels, techniques environnementaux...), par des méthodes et outils spécifiques ;
- **l'approche multidisciplinaire** : recouvre différentes natures de risque via des méthodes et outils génériques.

La principale limite des approches disciplinaires est que les différents éléments étudiés distinctement suivant la discipline considérée sont en réalité en interaction. Un management cohérent des risques doit prendre en compte toutes ces disciplines et analyser leurs liens, ce que ne permet pas une analyse disciplinaire seule.

Les méthodes issues de l'approche multidisciplinaire ont pour objectif de pallier cette limite propre aux méthodes disciplinaires en permettant prendre en compte les risques de toutes natures [Fallet-Fidry, 2012].

Une autre approche du risque est également possible via l'aide à la décision multicritère. La principale différence des méthodes multicritère par rapport à celle du management des risques est de ne pas faire appel aux probabilités. Lorsqu'il est difficile de définir des probabilités ou de que celles-ci manquent, ces méthodes deviennent particulièrement intéressantes (voir Annexe 2).

Cependant, plusieurs limites aux méthodes de management des risques développées subsistent [Fallet-Fidry, 2012] :

- Les méthodes sont souvent propre à un type d'industrie particulier : elles sont non génériques et donc non transposables directement dans un autre contexte d'application ;
- Tous les aspects disciplinaires ne sont pas toujours pris en compte ;
- Pour employer ces méthodes, un retour d'expérience fiable et en grande quantité est nécessaire.

Ces méthodes ne peuvent donc répondre en l'état à notre problématique, notamment à cause du retour d'expérience nécessaire et du fait qu'elles ne soient pas conçues pour traiter de la qualité produit.

Néanmoins, certains outils et théories sur lesquels reposent ces méthodes de management des risques peuvent servir de base pour le développement d'une méthodologie adaptée à la question de la prévision de la qualité produit. Une réponse partielle au problème de l'évaluation de la qualité produit à terminaison, dans un contexte de maîtrise des processus, peut s'appuyer sur les moyens de prévision des caractéristiques des produits. C'est pourquoi, nous proposons d'étudier les moyens sur lesquelles reposent les méthodes de management des risques, à défaut de pouvoir utiliser directement ces méthodes dans notre contexte.

Ces moyens sont, d'une part, basés sur des méthodes et outils statistiques et d'autre part, sur l'élicitation de connaissances d'experts. Les deux aspects sont abordés dans cette partie. Nous faisons ensuite un point sur le cas particulier de la qualité dans le domaine du développement de logiciels, lequel est particulièrement avancé dans l'utilisation de modèle de prévision de la qualité produit. L'objet de cette partie n'est pas d'être exhaustif dans l'analyse des moyens de prévision mais de se focaliser sur les éléments intéressants dans le contexte de notre problématique.

II.3.1. Les outils statistiques de la Qualité

Plusieurs familles d'outils statistiques et d'analyse de données permettent d'évaluer les caractéristiques ou la qualité produit des systèmes complexes et de faire des prévisions dans certains cas.

Nous proposons de comparer les principaux outils statistiques et méthodes d'analyse de données selon les critères suivants, qui correspondent aux spécificités de la qualité produit pour des systèmes complexes (cf. I.1.) :

- **Le pouvoir de prévision** : afin d'utiliser ces outils tout au long du cycle de vie des systèmes, en particulier en conception, il est nécessaire qu'ils ne soient pas seulement descriptifs mais aussi prédictifs;
- **La prise en compte d'avis d'experts** : les systèmes complexes sont difficilement comparables les uns aux autres à cause de leurs particularités et sont dans certains cas produits en faible quantité. Il n'y a donc pas toujours de données exploitables en quantité suffisante pour utiliser certains outils statistiques, notamment dans le cas de petites séries ou de produits qui évoluent très rapidement. Il est donc nécessaire de pouvoir utiliser les avis d'experts comme source d'information ;

- **La lisibilité du modèle** : le processus de management de la qualité implique beaucoup d'acteurs au sein de l'entreprise, il faut qu'ils puissent communiquer entre eux des prévisions en rapport avec la qualité du produit malgré des niveaux de connaissance très différents en matière de statistiques. La structure et la logique du modèle obtenu par ces outils doivent donc être compréhensibles par ces acteurs sans nouveaux prérequis afin d'être utilisés en entreprise ;
- **Le traitement de l'incertain** : le contexte du développement de systèmes complexes implique des incertitudes tout au long du cycle de vie : en début de développement sur les caractéristiques finales, en cours de développement sur les performances qui résulteront de l'assemblage des différents composants, sur l'influence de l'environnement d'utilisation du système sur ses caractéristiques, sur l'efficacité des fournisseurs, etc. Il faut que les outils utilisés puissent fonctionner malgré ces incertitudes et rendent compte des conséquences que cela peut impliquer.

II.3.1.1. Outils d'analyse de données et de prévision

Les débuts de l'analyse de données et des méthodes de prévision modernes remontent au XVII^{ème} siècle avec les échanges entre Fermat et Pascal sur les probabilités et au XVIII^{ème} siècle avec les travaux de Thomas Bayes.

Depuis, l'arrivée de la micro-informatique a permis la collecte de données en grande quantité et leur analyse de manière simple et à faible coût. Ainsi, les recherches en analyse de données se multiplient à partir des années 1950, notamment sur les analyses bayésiennes. De nouvelles façons de travailler les données ont ainsi pu émerger.

Par ailleurs, de nouveaux outils, tels que les méthodes d'apprentissage et de classification, ont permis de renverser la logique d'analyse statistique classique, qui consiste à poser des hypothèses qui sont vérifiées a posteriori. Ces outils construisent les hypothèses au fur et à mesure de l'accumulation des observations.

Le développement des techniques automatiques d'apprentissage dans les années 90, a permis de simplifier la construction de modèles complexes. Cela permet de proposer des modèles évolutifs qu'il est possible de mettre à jour automatiquement lorsque de nouvelles données peuvent être exploitées.

Ces outils et méthodes peuvent avoir deux objectifs différents :

- La description, qui vise à réduire, résumer, synthétiser les données afin de donner une vision plus lisible et interprétable ;
- La prévision, qui cible une ou plusieurs variables pour permettre d'estimer leurs futures valeurs.

Nous proposons de regrouper ces outils et méthodes selon leur principe de fonctionnement en cinq catégories que nous détaillons ensuite :

- Les méthodes par réduction des dimensions permettent de représenter les données à analyser sur un plan ou dans un espace à trois dimensions tout en préservant l'information (II.3.1.1.1).
- Les méthodes par classification permettent de séparer des individus en plusieurs classes (II.3.1.1.2). Ces méthodes fonctionnent par apprentissage automatique. Deux cas de figure existent alors : les méthodes supervisées et celles non supervisées.
- Les méthodes par régression établissent des équations permettant de modéliser les interactions entre les différentes variables, élément important en analyse prédictive (II.3.1.1.3).

- Les réseaux de neurones artificiels (II.3.1.1.4), ce sont des algorithmes d'apprentissage probabilistes qui permettent la classification rapide d'individus.
- Les réseaux bayésiens (II.3.1.1.5), qui sont des modèles graphiques probabilistes permettant la représentation de connaissances et le calcul de probabilités conditionnelles.

II.3.1.1.1. Méthodes par réduction des dimensions : analyses factorielles

Les méthodes d'analyse factorielle permettent de décrire et visualiser les données sur un espace multi dimensionnel. Elles permettent d'identifier des corrélations entre variables et des groupes d'individus (un individu est un élément de l'ensemble étudié) similaires tout en éliminant le bruit dans les mesures [Comrey et Lee, 2013] [Brown, 2015].

De nouvelles variables sont créées via ces méthodes et permettent de définir un espace multi dimensionnel sur lequel il est possible de projeter les données. Ainsi, elles vont apparaître sous forme de nuages de points et de façon plus facilement interprétable visuellement. La position des points les uns par rapport aux autres et leurs distances par rapport aux axes de l'espace de projection permettent de visualiser les corrélations entre variables et les sous-groupes plus ou moins homogènes dans la population étudiée.

Les analyses factorielles les plus courantes sont :

- **Analyse en Composantes Principales (ACP)** : elle a pour origine les travaux de Karl Pearson, publiés en 1901 [Pearson, 1901]. Elle permet de définir des variables indépendantes les unes des autres à partir de variables liées entre elles (corrélées). Ces nouvelles variables sont des combinaisons linéaires des variables existantes. Elle est utilisée pour traiter des variables quantitatives.
- **Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM)** : le principe est le même que celui de l'ACP mais la méthode permet de traiter à la fois des données qualitatives et quantitatives [Escofier, 1979].
- **Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)** : elle permet de trouver des liens ou des correspondances entre deux variables. L'AFC a surtout été développée à partir de 1970 par Benzecri [1992]. Cette technique traite les tableaux de contingence de deux variables. À la différence de l'ACP, l'espace de représentation créé est commun aux variables et aux individus.

Ces méthodes d'analyse factorielle sont utilisées dans beaucoup de domaines d'étude différents lorsqu'un grand nombre de variables sont à analyser et à interpréter. Dans le domaine de la maîtrise de la qualité, une des applications possible est d'utiliser ces outils pour déterminer l'influence de paramètres de conception ou de production sur les caractéristiques du produit.

II.3.1.1.2. Méthodes par classification des données

Les méthodes par classification ont pour principe de définir une fonction de classification (appelée hypothèse ou règle) qui permet de définir une classe pour un élément donné.

Deux façons de procéder existent [Bousslama, 2012] :

- Par apprentissage supervisé (arbres de décisions, K plus proches voisins, apprentissage de règles...) : les éléments sont positionnés dans des familles prédéfinies. Des exemples

d'individus pour chacune des classes prédéterminées sont utilisés pour l'apprentissage. Une fonction de classification est ainsi construite qui permettra ensuite de classer de nouveaux individus ;

- Par apprentissage non supervisé (par clustering, par expérimentation, par algorithmes génétiques...) : les classes ne sont pas déterminées au préalable mais automatiquement grâce aux données d'entrée.

Ces méthodes imposent d'avoir une base de données pour l'apprentissage conséquente ou une très bonne connaissance des caractéristiques des éléments à classer.

II.3.1.1.3. Méthodes par régression

Les méthodes statistiques de régression permettent d'analyser les relations entre plusieurs variables, et en particulier comment varie une variable en fonction des autres. Alors que les méthodes de classification s'intéressent aux variables catégorielles, les méthodes de régression traitent de variables quantitatives. L'objectif est de définir une fonction de régression (ou d'estimation) qui exprime une variable aléatoire en fonction de variables explicatives indépendantes [Hair, 2009].

Il existe différents types de régressions en fonction du type de liens recherché entre les variables. Les principaux types de régression sont :

- Régression linéaire : fonction linéaire qui relie une variable aléatoire à une ou plusieurs variables explicatives ;
- Régression polynomiale : fonction polynomiale de degré n qui relie une variable aléatoire à une ou plusieurs variables explicatives ;
- Régression non paramétrique : fonction d'estimation non paramétrée, elle est définie par l'analyse des données à modéliser ;
- Régression multiple : fonction qui relie une ou plusieurs variables aléatoires à une ou plusieurs variables explicatives ;
- Régression géométrique : fonction qui donne la forme géométrique (cercle, ellipse, etc.) la plus proche des données, souvent au sens de la méthode des moindres carrés.

L'utilisation de méthode de régression suppose de disposer d'un échantillon représentatif de la population à étudier, que les variables explicatives soient linéairement indépendantes et mesurées sans erreur, que l'erreur sur les mesures soit une variable aléatoire de moyenne nulle et de variance constante.

II.3.1.1.4. Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont utilisés à la fois pour de la classification et pour des applications en intelligence artificielle, y compris pour réaliser des prévisions [Verron, 2007].

Un tel réseau se constitue de plusieurs couches de neurones artificiels. Chaque neurone est en réalité une fonction mathématique paramétrable qui transforme des valeurs en entrée en une valeur de sortie, laquelle servira d'entrée aux neurones de la couche inférieure. La première couche constitue l'entrée du réseau, par laquelle sont introduites les valeurs des variables à analyser [Alpaydin, 2013]. La sortie du réseau est une variable correspondant au but recherché (classification, prévision...). Ils sont par exemple utilisés dans l'industrie pour le contrôle de la qualité et la maîtrise de processus [Zemouri, 2004].

Deux grandes catégories de réseaux de neurones artificiels peuvent être distinguées suivant le mode de paramétrage.

- La première concerne les réseaux à apprentissage supervisé où le réseau est contraint de converger vers une solution précise en comparant le résultat de son analyse avec une solution attendue.
- La seconde regroupe les réseaux à apprentissage non supervisé où le réseau converge librement vers un état final, sans que les réponses soient prédéfinies. Le réseau cherche alors des corrélations entre les entrées qui permettent de caractériser la structure des données.

Dans les deux cas, une base de données d'apprentissage conséquente est nécessaire pour paramétrer le réseau de neurone artificiel.

Bien que ce type de réseaux s'accommode assez facilement de données manquantes ou bruitées, il faut tout de même disposer d'un échantillon d'apprentissage conséquent et surtout suffisamment représentatif de la variété des cas possibles pour que le résultat soit pertinent. Il faut également noter que les réseaux ainsi construits ne peuvent pas fournir de façon immédiatement exploitable les règles justifiant le résultat obtenu. Pour identifier la logique derrière un réseau de neurones, si nécessaire, il faut employer des moyens de déduction détournés, par analyse des sorties en fonction d'un jeu d'entrées prédéterminé.

II.3.1.1.5. Réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens sont des modèles de graphes orientés, acycliques qui représentent plusieurs variables aléatoires. Ils permettent à la fois de construire des modèles de représentation des connaissances, de calculer des probabilités conditionnelles et de servir de base pour des modèles d'aide à la décision [Pearl, 1986]. Ils sont également utilisés pour traiter des risques industriels [Leger, 2009].

L'intérêt particulier des réseaux bayésiens est de tenir compte simultanément de connaissances a priori d'experts (dans le graphe) et de l'expérience contenue dans les données (probabilités) [Naïm, 2007]. Le fait de représenter des variables à analyser via un réseau bayésien permet plus d'objectivité dans l'observation des dépendances entre variables en éliminant les biais dus à la mémorisation ou au jugement d'un individu par exemple.

Un réseau bayésien se construit, pour une application donnée, par la description des relations causales entre variables d'intérêt. Le réseau se présente comme des graphes orientés sans boucle dans lesquels chaque nœud représente une variable et chaque arc représente une relation de causalité entre deux variables, tel que représenté sur la Figure 5 pour deux variables A (nœud parent) et B (nœud fils). Dans ce graphe, les relations de cause à effet entre les variables ne sont pas déterministes, mais probabilistes. Ainsi, l'observation d'une cause ou de plusieurs causes n'entraîne pas systématiquement l'effet ou les effets qui en dépendent, mais modifie la probabilité de les observer. Dans le cas des variables A et B, il est possible de lier les probabilités d'occurrence des événements A et B notées $P(A)$ et $P(B)$ par la relation suivante :

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)}$$

Les probabilités qui permettent de lier les différents états de variables au sein du réseau sont formalisées dans des tables de probabilités conditionnelles.

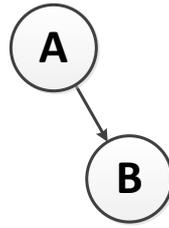


Figure 5 : Formalisme du réseau bayésien

Un nœud parent relié à un fils peut avoir une influence dépendante des autres nœuds parents de ce nœud fils. Cependant, dans ce cas, Cain [2001] les définit comme des parents modifiants :

Une variable parent dont l'effet sur une de ses variables filles est dépendant de l'état d'une autre variable parent est un parent modifiant.

Ces nœuds parents peuvent alors nécessiter une attention particulière si l'usage prévu du réseau bayésien est sensible à ces liens d'influence.

Les réseaux bayésiens sont également performants pour intégrer les incertitudes [Droguett et Mosleh, 2012] et fonctionner malgré des données manquantes. Ils peuvent être couplés avec des méthodes d'apprentissage automatique ou usant du savoir d'experts et traiter les incertitudes.

II.3.1.2. Comparatifs des méthodes d'analyse de données et de prévision

Les cinq catégories de méthodes et outils d'analyse de données et de prévisions présentées dans cette partie sont comparées suivant les critères que nous avons définis (II.3.1.1. voir Tableau 1).

Concernant le pouvoir de prévision de ces méthodes, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux bayésiens sont les plus adaptés à la prévision. Les méthodes par réduction des dimensions et classification sont descriptives et donc non adaptées à cet usage. Les méthodes par régression peuvent servir à réaliser des prévisions.

Pour la prise en compte d'avis d'experts, seuls les réseaux bayésiens peuvent être utilisés. Toutes les méthodes d'analyse factorielles et de régression ainsi que les réseaux de neurones artificiels nécessitent de nombreuses données pour être utilisés. Concernant les méthodes de classification de données, celles par apprentissage supervisé peuvent utiliser les avis d'experts pour définir les exemples d'apprentissage. Mais apprentissage supervisé ou non, ces méthodes demandent de pouvoir utiliser de nombreuses données pour établir la fonction de classification.

La lisibilité est bonne dans le cas des méthodes de réduction des dimensions, de régression et les réseaux bayésiens car ce sont des méthodes dont les résultats sont représentés de façon graphique. Le principe des classes des méthodes de classification est compréhensible, par contre, la fonction de classification n'est pas toujours simple à interpréter. Les réseaux de neurones sont eux totalement obscurs sur leur fonctionnement. Seuls des moyens détournés permettent de déduire le fonctionnement interne d'un réseau de neurones fonctionnel. Les réseaux bayésiens sont plus lisibles que les réseaux de neurones et prennent mieux en compte les effets d'interaction.

Le traitement explicite de l'incertain n'est possible qu'avec les réseaux bayésiens. Leur utilisation peut être couplée avec le traitement de l'incertain par l'intégration de la théorie de Dempster-Shafer [Simon et Weber, 2008] par exemple ou encore avec le modèle des croyances transférables [Villeneuve, 2011].

L'adéquation des méthodes d'analyse de données et de prévision passée en revue avec les critères choisis est présentée dans le Tableau 1.

Méthode	Pouvoir de prévision	Prise en compte des avis d'experts	Lisibilité du modèle	Traitement explicite de l'incertain
Réduction des dimensions	Très faible	Non	Bonne	Non
Classification	Faible	Possible	Moyenne	Non
Régression	Moyen	Non	Bonne	Non
Réseaux de neurones artificiels	Elevé	Non	Nulle	Non
Réseaux Bayésiens	Elevé	Possible	Bonne	Possible

Tableau 1 : Comparatif des méthodes d'analyse de données et de prévisions.

Les méthodes qui permettent de prendre en compte les avis d'experts (la classification et les réseaux bayésiens) peuvent être couplées avec les moyens d'élicitation d'avis d'experts présentés dans la partie suivante (cf. II.3.2.).

II.3.2. L'élicitation d'avis d'experts pour la prévision de la Qualité

L'élicitation d'avis d'expert est un autre moyen d'appréhender la qualité et de faire des prévisions avec peu d'informations quantitatives, ce qui est particulièrement intéressant dans le contexte du développement de systèmes complexes produit en faible quantité et d'autant plus s'ils ont un long cycle de vie (plusieurs décennies). Différentes méthodologies permettent de capitaliser les connaissances disponibles au sein d'une entreprise afin de s'en servir pour la maîtrise de la qualité. En effet, les connaissances issues de l'élicitation peuvent ensuite être utilisées au sein de modèle et d'outils destinés au management de la qualité.

L'élicitation consiste à inciter et aider un expert à formaliser ses connaissances ou à statuer sur différentes hypothèses afin de capitaliser son savoir. La formalisation de ce savoir permet de le diffuser ou d'alimenter des modèles mathématiques, comme par exemple des moteurs d'inférence ou des modèles prédictifs.

En effet, une personne qui possède une expertise dispose de connaissances acquises à travers ses expériences. Ces connaissances sont une source d'informations intéressante à exploiter mais peuvent souffrir de plusieurs biais. L'intérêt de ce savoir d'expert ainsi que les principaux biais sont discutés dans le paragraphe II.3.2.1.

L'élicitation permet de capitaliser les connaissances d'expert afin de les exploiter. Elle doit s'appuyer sur une démarche structurée pour être efficace (cf II.3.2.2.).

Une démarche d'élicitation doit s'appuyer sur deux éléments méthodologiques :

- Le premier pour capitaliser et formaliser le savoir des experts par élicitation (cf. II.3.2.3.) ;
- Le second pour agréger les données issues de l'élicitation d'experts et les exploiter (cf. II.3.2.3.).

II.3.2.1. Expériences et heuristiques des experts

Utiliser une démarche d'élicitation permet de capitaliser les connaissances que possèdent différentes personnes de par leurs expériences en vue de les partager et les exploiter. Pour conduire une telle démarche, il faut comprendre quelles sont ces connaissances, leur intérêt et les limites à leur exploitation que posent les biais.

Au sein d'une entreprise, les experts et personnes ayant une longue carrière dans un domaine donné ont acquis, au fil des expériences vécues, des connaissances à la fois explicites et tacites [Nonaka, 2000].

- Le savoir explicite est codifié, il peut être verbalisé et est expliqué par des théories,
- Le savoir tacite est acquis par l'expérience, il est la connaissance de ce qui fonctionne [Hall, 2003].

Le savoir explicite désigne les connaissances acquises principalement à l'école, à l'université, lors de formation [Koskinen, 2003]. Ces connaissances peuvent être exprimées par des chiffres ou des mots et peuvent donc facilement être formalisées pour être ensuite communiquées et partagées. Elles sont par exemples des caractéristiques physiques de matériaux, des informations techniques à propos d'un matériel, des méthodes de calcul, etc.

A l'inverse, le savoir tacite est habituellement difficile à exprimer directement par des mots. Il désigne les connaissances basées sur l'expérience, les savoir-faire pratiques. Ce savoir-faire n'est pas décrit dans des documents mais acquis par l'expérience, par la pratique d'une activité. Ainsi de nombreux experts sont incapables de verbaliser tout ce qu'ils savent, d'expliquer comment ils tirent leurs conclusions et prennent des décisions ou de détailler ce qu'ils sont capables de faire. [Polanyi, 1966] résume ainsi ce concept : « Nous en savons plus que nous ne pouvons le dire ».

S'appuyant en grande partie sur le savoir tacite et l'intuition, une heuristique de jugement est un processus cognitif, c'est-à-dire une succession d'opérations mentales, qui permettent d'établir des hypothèses et de tirer des conclusions. Elle peut guider une prise de décision.

Dans un contexte particulièrement incertain, les experts ont tendance à user de leur heuristique pour établir leur jugement [Toret, 2014]. En effet, la théorie des probabilités et les statistiques sont les meilleurs outils pour traiter le risque, mais sont moins performants lorsqu'il s'agit de prendre des décisions en contexte incertain [Neth et al., 2015]. Pour faire face au manque d'informations qui caractérise une situation incertaine, le cerveau utilise l'heuristique pour pouvoir raisonner. Des heuristiques simples permettent, dans un contexte incertain, de produire de meilleures prévisions qu'un modèle rationnel complexe en réduisant la variance de ces prévisions [Gigerenzer, 2016a].

Ce phénomène est appelé « less-is-more effect » : bien qu'un modèle complexe incorpore plus d'informations et produit des estimations plus sophistiquées qu'une heuristique, cette dernière peut produire de meilleures prévisions tout en nécessitant moins d'efforts [Gigerenzer, 2016b].

Bien qu'une heuristique soit basée sur des connaissances souvent difficiles à formaliser et des éléments inconscients, les conclusions qu'elle permet d'établir peuvent s'exprimer de façon formelle. Ce qui est par exemple le cas lorsqu'un individu évalue la probabilité a priori qu'un événement se produise [Tversky et al., 1975], qui peut se formuler comme un pourcentage ou un ratio.

II.3.2.1.1. Les principaux biais

Cependant, les heuristiques peuvent comporter des biais qui conduisent à des erreurs systématiques lors de l'évaluation d'une situation [Kahneman, 2003]. Il est nécessaire de pouvoir identifier ces biais pour les minimiser afin de ne pas fausser une prise de décision. Les principaux biais auxquels les experts peuvent être confrontés sont :

Le biais de représentativité

Une estimation repose en général non pas sur des calculs de fréquences ou de probabilités rigoureux et bien documentés mais sur un raisonnement par analogie.

Cette évaluation se fait par comparaison du problème posé avec des catégories représentatives auxquelles l'évaluateur a déjà été confronté. Cette façon de faire peut conduire à ignorer certaines spécificités du cas de figure à évaluer afin de le rattacher à une situation plus familière.

Le biais d'ancrage et d'ajustement

La représentation que peut se faire un expert d'un problème a une très forte influence sur ses estimations initiales des valeurs à déterminer. La réponse finale de l'expert est construite par ajustement de ces valeurs initiales.

Un problème mal posé ou la suggestion d'une valeur initiale erronée peuvent conduire à fausser l'appréciation de la personne chargée d'estimer un paramètre ou une probabilité.

Le biais d'évaluation des probabilités

La gravité des conséquences d'un événement redouté influe sur l'estimation de sa fréquence d'occurrence. Plus les conséquences potentielles sont graves, plus la probabilité d'occurrence risque d'être surévaluée.

Le biais de disponibilité

Les expériences les plus récentes, les plus marquantes et les plus familières sont celles qui reviennent le plus facilement à l'esprit. Elles auront tendance à avoir un poids plus important que les autres expériences dans le raisonnement et peuvent donc conduire à des erreurs d'évaluation en sous-estimant ou au contraire en surévaluant certains effets.

Le biais d'illusion des séries

L'esprit humain a tendance à sous-estimer l'effet du hasard et la variabilité des données. Cela conduit parfois à identifier des corrélations et des relations là où il n'y a en réalité qu'une coïncidence.

Le biais de conformisme

Un individu aura tendance à modifier son jugement pour le rapprocher de celui du groupe plutôt que d'affirmer son jugement personnel. Ce biais a pour effet de conduire un avis de groupe vers un extrême plutôt que vers un avis médian qui ferait la synthèse des points de vue des différents membres du groupe.

Le biais d'effet de seuil

Ce biais concerne l'évaluation de probabilité. Un expert examinera de façon plus détaillée les différences entre deux probabilités proches d'un extrême de l'échelle (probabilité de 0 ou 1) qu'entre deux probabilités en milieu d'échelle.

Cette liste de biais n'est pas exhaustive, mais elle présente les principaux biais qui interviennent lors de l'élicitation de savoir expert et illustre les voies d'influence possibles : la mémoire et le raisonnement.

II.3.2.1.2. Influence et prises en compte des biais pour l'élicitation

Les biais n'agissant pas de manière consciente, la stratégie pour conduire l'élicitation des connaissances d'experts doit être conçue de manière à les minimiser et à ne pas introduire d'éléments qui influenceraient le jugement des personnes interrogées. La bonne définition du contexte et des hypothèses retenues aux personnes à interroger permet de réduire grandement le risque d'erreur [Gingerenzer, 1991]. Il n'est pas indispensable d'éliminer en totalité les biais dans les réponses et prévisions issues de l'élicitation d'heuristiques. En effet, des prévisions modérément biaisées mais à la variance très faible seront plus exploitables que des prévisions non biaisées mais avec une grande variance, comme l'illustre la Figure 6.

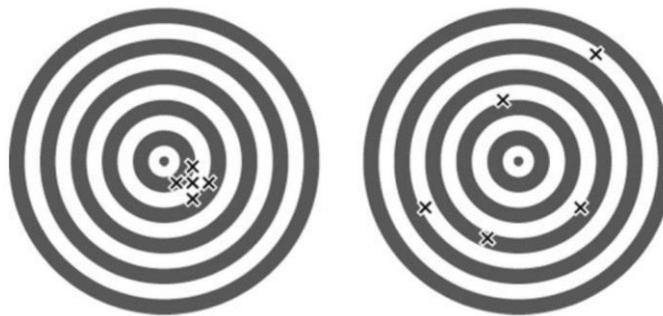


Figure 6 : Comparaison d'estimations biaisées mais de faible variance (cible de gauche) avec des estimations à la moyenne non biaisée mais à forte variance (cible de droite), [Gingerenzer², 2016]

De plus, en l'absence de modèle préexistant pour formaliser les heuristiques des experts, la construction d'un premier modèle, même biaisé, permet de disposer d'une base objective pour analyser le futur retour d'expérience et la discussion entre experts afin d'améliorer le modèle et les méthodes de travail. Ces tâches sont difficiles à effectuer de façon objective sans disposer d'un modèle objectif.

Les méthodes d'élicitation d'avis d'experts (cf. II.3.2.2.) et les méthodes d'agrégation de ces avis (cf. II.3.2.3.) présentées dans les paragraphes suivants déploient des stratégies qui permettent de minimiser l'influence de ces biais. Mais il faut toujours avoir conscience de leur influence lors de l'analyse de résultats issus d'élicitation d'avis d'experts.

II.3.2.2. Préparation de l'élicitation

Les premiers travaux visant à développer une méthode structurée pour l'élicitation d'avis d'experts ont été conjointement menés à partir de 1946 par l'U.S. Air force et Douglas Aircraft au sein de projet RAND (Research AND Development) [Ayyub, 2001].

Une méthode en particulier a émergé de ce projet pour structurer l'élicitation : la méthode Delphi.

La méthode Delphi a été définie en 8 étapes par Helmer [1967] :

1. Sélection des questions à traiter et construction de questionnaires ;
2. Sélection des experts qui ont le plus de connaissances à propos du sujet concerné ;
3. Explication du contexte du problème aux experts ;
4. Élicitation des experts individuellement et de façon anonyme ;
5. Agrégation des réponses et représentation sous forme de valeur moyenne et de quartiles (25 % et 75%) ;
6. Revue des résultats par les experts. Les réponses en dehors de l'interquartile doivent faire l'objet de justification écrite ;
7. Revue des corrections et des résultats par les experts. Cette étape doit être répétée jusqu'à l'obtention d'un consensus ;
8. Rédaction d'un récapitulatif des résultats avec une argumentation pour chaque valeur hors de l'interquartile.

L'élicitation elle-même est conduite de façon individuelle, sans que l'expert interrogé ne connaisse le nom des autres experts sélectionnés. Cette façon de procéder permet d'éviter l'influence des autres experts sur le répondant [Brown, 1968].

La méthode Delphi est relativement longue et coûteuse à mettre en place car elle nécessite plusieurs itérations avec de nombreux experts [Grubisic, 2008]. Cependant, ses principes sont utilisés pour de nombreuses applications basées sur l'élicitation élaborées depuis sa publication [Loo, 2002], par exemple pour la rédaction de recommandations dans le secteur du nucléaire ou le traitement des incertitudes dans le secteur de la défense [Ayyub, 2006]. La plupart des méthodes d'élicitation peuvent donc être découpées en trois phases :

- 1ère phase : Structure et rédaction du questionnaire, sélection et préparation des experts ;
- 2ème phase : Elicitation des experts ;
- 3ème phase : Traitement et agrégation des résultats, revue avec les experts pour consensus, documentation et communication du travail réalisé.

Plusieurs principes méthodologiques doivent également être respectés pour conduire un processus d'élicitation qui ne soit pas biaisé. Cooke [1991] définit les principes généraux qui permettent de réaliser une démarche d'élicitation pour un usage scientifique. Il résume ces principes ainsi [Cooke, 2000] :

- **Responsabilité / reproductibilité** : toutes les données, y compris les noms et les évaluations des experts, et tous les outils de traitement sont disponibles pour examen par les pairs. Les résultats doivent être reproductibles par des examinateurs compétents.
- **Contrôle empirique** : les évaluations quantitatives d'experts sont soumises à des contrôles de qualité empiriques.
- **Neutralité** : la méthode d'agrégation et d'évaluation des résultats doit inciter les experts à exprimer leurs véritables opinions et à ne pas fausser les résultats.
- **Justice** : les experts ne sont pas jugés avant d'avoir traité les résultats de leurs évaluations.

Il en conclut [Cook, 2000] qu'une combinaison structurée d'avis d'experts permet d'établir des modèles aux performances satisfaisantes même dans les cas où les experts ne le peuvent individuellement.

Ces principes ont été mis en application dans des méthodes et outils destinés à l'élicitation de jugement d'experts à l'Université de Technologie de Delft. Ils ont pu être testés sur plus de 80 000 élicitations conduites avec environ 900 experts au cours d'une quinzaine d'années [Goossens, 2008]. Plusieurs secteurs d'activité ont été couverts tels que les industries de la chimie, du nucléaire, aérospatiale et la santé. Ces méthodes et outils permettent d'obtenir des informations qualitatives et quantitatives qui seraient inaccessibles autrement dans un contexte incertain.

II.3.2.3. Méthodes d'élicitation d'avis d'experts

Différentes stratégies existent pour l'élicitation du savoir des experts. Les principales méthodes d'élicitation sont présentées dans cette partie, tout d'abord l'élicitation directe, puis indirecte et enfin l'élicitation paramétrique. L'intérêt de l'élicitation est de pallier au manque d'informations en quantité suffisante pour des analyses statistiques par la formalisation de connaissances d'experts.

II.3.2.3.1. Élicitation directe

Le moyen le plus rapide et intuitif de conduire l'élicitation d'un expert est de l'interroger directement sur les valeurs ou hypothèses nécessaires pour construire le modèle voulu.

Pour cela, une échelle de notation peut être proposée à la personne interrogée afin que les réponses récoltées soient facilement exploitables. Par exemple, pour évaluer une probabilité, une échelle de 0 à 1 pourra être proposée.

Une échelle de correspondance entre expression verbale et valeur numérique peut également être proposée si les personnes interrogées préfèrent répondre ainsi. Le principe est de définir une échelle qualitative composée d'adjectifs ou d'adverbes et d'y associer des valeurs numériques pour le traitement. Par exemple, dans le cas de l'évaluation d'une fréquence d'occurrence d'un événement, l'échelle présentée dans le Tableau 2 peut être proposée.

Fréquence évaluée	Équivalent numérique
Jamais	0
Parfois]0 ; 0,4]
Régulièrement]0,4 ; 0,6]
Souvent]0,6 ; 1[
Toujours	1

Tableau 2 : Exemple d'échelle de correspondance verbale – numérique pour l'évaluation d'une fréquence.

Ce type d'échelle peut être combiné avec l'utilisation de fonctions floues pour traduire des informations imprécises [Ribeiro, 1996].

La principale limite de cette façon de procéder est que dans de nombreux cas, les experts ont beaucoup de difficultés à répondre directement aux questions posées. En effet, ils ne raisonnent pas toujours avec des valeurs formalisées. De plus, nous avons vu au paragraphe précédent (II.3.2.1.) que les connaissances des experts sont en grande partie constituées de savoirs tacites et d'heuristiques qui sont par nature difficilement formalisables, voir dans certains cas totalement inconscientes.

Interroger directement les experts ne permet pas non plus de minimiser les biais de perception et de jugement auxquels ils sont sujets.

II.3.2.3.2. Élicitation indirecte

L'élicitation indirecte consiste à déterminer une probabilité en proposant à l'expert interrogé différents paris ou loteries, avec de l'argent en jeu.

Par exemple, pour déterminer la probabilité d'occurrence d'un événement E, un ticket de loterie imaginaire de 100€ permet à l'expert de recevoir cette somme si l'événement E se produit. La méthode consiste ensuite à demander à l'expert combien serait-il prêt à dépenser pour acquérir ce ticket de loterie. Plus cette somme est élevée, plus la probabilité d'occurrence de l'événement E sera élevée.

Il est également possible de procéder par encadrement de la valeur recherchée en la comparant à d'autres événements dont la probabilité est connue ou plus facile à estimer.

Selon Ayyub [2001], le principal inconvénient de cette technique est que la valeur d'usage de l'argent n'est pas nécessairement transposable aux cas de figure à évaluer.

De plus, le rapport à l'argent n'est pas toujours rationnel et peut être très différent d'une personne à une autre.

II.3.2.3.3. Élicitation par estimation paramétrique

L'estimation paramétrique a été définie par Preyssl et Cooke [1989] pour évaluer l'intervalle de confiance d'un paramètre tel qu'une valeur moyenne [Ayyub, 2001]. Cette estimation est réalisée en deux étapes :

- Déterminer une estimation moyenne (m) d'une probabilité ;
- Déterminer la probabilité (r) que la valeur réelle excède dix fois l'estimation moyenne (m).

Un intervalle de confiance peut ensuite être calculé grâce aux valeurs (m) et (r).

Cette méthode est applicable seulement pour l'élicitation de probabilités continues. Elle nécessite d'interroger directement l'expert sur les valeurs moyennes et extrêmes de la probabilité recherchée. Les mêmes difficultés à donner une réponse directe et précise que lors d'une élicitation directe sont donc présentes.

La valeur (r), de la probabilité que la valeur réelle excède dix fois l'estimation moyenne, est encore plus difficile à évaluer a priori par l'expert s'il ne raisonne pas habituellement de manière probabiliste pour exercer son jugement.

II.3.2.3.4. Synthèse des méthodes d'élicitation

La méthode d'élicitation indirecte est conçue pour permettre de limiter au plus les biais.

Cependant, elle est plus compliquée à mettre en place que l'élicitation directe et ne s'adapte pas toujours très bien aux paramètres à évaluer ou au contexte. Elle peut finalement compliquer l'évaluation des paramètres si les mécanismes d'interrogation sont mal choisis et nécessitent d'entraîner les experts avec des exemples de valeurs connues à éliciter (afin de comparer ensuite leur réponse à la valeur réelle). De plus, elle peut introduire de nouveaux biais (par exemple via la perception de la valeur de l'argent).

L'élicitation paramétrique permet de compléter l'élicitation directe. Mais ce type d'élicitation demande une très bonne connaissance des paramètres à évaluer de la part des experts, ce qui est contradictoire avec un contexte incertain, et nécessite d'être familier avec l'usage des probabilités.

Lorsque le contexte le permet, il est donc intéressant de travailler par élicitation directe en veillant à respecter les principes méthodologiques définis pour une bonne élicitation afin de limiter l'influence des biais.

Le Tableau 3 propose un comparatif de ces trois méthodes d'élicitation suivant trois critères :

- Sensibilité au biais : caractérise la nature de la méthode à être influencée par des biais (cf. II.2.1.) ou à les minimiser ;
- Simplicité d'utilisation : caractérise la facilité à utiliser la méthode (si elle ne nécessite pas de longue préparation ou d'entraînement) ;
- Maîtrise des probabilités : caractérise quel niveau de connaissances des probabilités est nécessaire pour l'expert dont le savoir est élicité.

Méthode	Sensibilité aux biais	Simplicité d'utilisation	Maîtrise des probabilités
Élicitation directe	Importante	Oui	Variable
Élicitation indirecte	Faible	Moyenne	Non nécessaire
Élicitation paramétrique	Moyenne	Oui	Indispensable

Tableau 3 : Comparatif des méthodes d'élicitation.

Chacune de ces trois méthodes d'élicitation présente des avantages et des inconvénients, le choix d'une méthode plutôt qu'une autre doit se faire en fonction du contexte d'utilisation (besoin d'aller vite, niveau de maîtrise des probabilités par les personnes interrogées) et du besoin de précision (sensibilité aux biais).

II.3.2.4. Méthodes d'agrégation d'avis d'experts

Les avis donnés sur une question sont sensiblement différents d'un expert à un autre. Cela s'explique par des connaissances et des expériences vécues différentes d'une personne à une autre. Plus l'incertitude est importante, plus les avis des experts risquent de diverger et, parfois d'être contradictoires.

Afin de pouvoir utiliser ces connaissances au sein de modèles, il est nécessaire de définir des règles permettant d'agréger ces différents avis et de traiter les contradictions. Plusieurs solutions existent pour accomplir cette tâche, les méthodes les plus courantes sont listées dans cette partie.

II.3.2.4.1. Consensus entre experts

Le consensus d'opinions s'obtient par la discussion entre experts. Cette discussion doit se faire de préférence avec l'aide d'un animateur et a pour objectif de définir des valeurs communément acceptées avec éventuellement un intervalle de confiance associé ou des quartiles.

Cette façon de procéder a pour défaut de favoriser plusieurs biais (cf. II.3.2.1.1.) [Ayyub, 2001] :

- Le biais de conformisme,
- Les individus à forte personnalité,
- Les biais dus au renforcement des expériences communes,
- La volonté d'obtenir au plus vite le consensus au risque de faire des impasses.

L'animateur de la discussion doit donc chercher à réduire ces biais. Mais, il ne pourra les éliminer totalement.

II.3.2.4.2. Agrégation par centiles

Lorsque les experts sont interrogés sur la valeur d'un paramètre, l'agrégation peut se faire en choisissant un centile de l'ensemble des réponses données. Le 50ème centile est alors la valeur médiane. D'autres centiles peuvent être choisis en fonction du besoin (25ème ou 75ème centile par exemple), pour privilégier une approche plus prudente par exemple.

II.3.2.4.3. Moyenne pondérée des réponses des experts

L'agrégation des avis d'expert peut également être la moyenne pondérée des réponses. Cela permet d'accorder plus ou moins d'importance aux différentes réponses prises en compte en fonction de critères prédéfinis, comme le niveau d'expérience des experts, leur niveau de certitude, etc.

Plusieurs types de moyennes sont possibles :

- La moyenne arithmétique pondérée ;
- La moyenne géométrique pondérée : utilisée lorsque les valeurs ont un caractère multiplicatif, elle permet d'être moins sensible que la moyenne arithmétique aux valeurs les plus élevées ;
- La moyenne harmonique pondérée : utilisée lorsqu'il y a des liens de proportionnalité inverses, elle permet d'être moins sensible que la moyenne arithmétique aux valeurs les plus élevées ;
- la valeur maximale ou minimale : approche la plus conservative.

Utiliser des moyennes pondérées requière de pouvoir définir les coefficients de pondération pour chacun des experts interrogés. Ces coefficients peuvent être déterminés en testant les experts sur des valeurs connues, mais cela demande de pouvoir soumettre aux experts des problèmes aux conditions similaires à la valeur à éliciter. Cette façon de faire demande donc du temps supplémentaire pour la phase d'évaluation des experts et qu'il soit possible d'établir les cas de figures aux valeurs connues pour conduire les évaluations.

Ces coefficients peuvent également être basés sur une prise en compte de l'expérience de l'expert ou d'une autoévaluation du niveau de confiance de la valeur issue de l'élicitation par l'expert lui-même, mais cela suppose de pouvoir démontrer au préalable la pertinence de ces coefficients.

II.3.2.4.4. Règles de Dempster

Dans le cadre de la théorie des croyances, Dempster et Shafer ont proposé de combiner plusieurs sources d'informations (les fonctions de masses) par une règle orthogonale normalisée.

Elle permet de prendre en compte la fiabilité de chaque source d'informations lorsque celle-ci est quantifiable [Martin, 2007]. Cependant, plus l'incertitude sur l'information est grande, plus il est probable que des conflits apparaissent dans la combinaison de ces informations.

En cas de disparités importantes entre les réponses des experts, les conclusions tirées de ces règles de calcul peuvent être contre-intuitives [Ayub, 2001]. Zadeh a démontré par l'exemple [Zadeh, 1986] que la somme orthogonale n'était pas appropriée dans les cas où les sources d'informations sont non fiables. Cette règle est à exclure dans les cas de fortes incertitudes [Samet, 2014].

D'autres règles de combinaison ont été proposées, telle la règle orthogonale non normalisée de Smets [1989]. Ces règles permettent d'aboutir aux mêmes décisions mais n'excluent pas tous les conflits.

Pour répondre à cette limitation, la théorie de Dezert-Smarandache (DSmT) [Dezert, 2004] propose une extension de la théorie classique de Dempster-Shafer. La DSmT permet de résoudre le problème des paradoxes de la théorie de Dempster-Shafer lorsqu'elle est utilisée avec des sources d'informations conflictuelles (des avis d'experts contradictoires par exemple) [Smarandache, 2004]. La DSmT propose un cadre d'application plus large que la plupart des autres théories permettant la fusion d'informations et couvre un large éventail de situations [Dezert, 2009].

Cette théorie a pu être appliquée avec succès dans de nombreux domaines tels que la surveillance par satellite, la robotique, la médecine, etc.

II.3.2.4.5. Synthèse des méthodes d'agrégation d'avis d'experts

Les méthodes d'agrégation d'avis d'experts issues des règles de Dempster, telles que la DSmT, sont les plus complètes et les plus généralistes. Cependant, elles ont pour inconvénient d'être plus difficiles à interpréter par un utilisateur qui n'est pas familier de ces méthodes.

À l'inverse, les méthodes par consensus et par moyenne des réponses sont beaucoup plus lisibles et compréhensibles par tous. Mais elles ne permettent pas de gérer avec satisfaction les cas où les avis sont fortement contradictoires.

Les choix d'une méthode d'agrégation est donc un arbitrage entre la simplicité de lecture et de compréhension et la prise en compte de données conflictuelles. Si les avis des experts sont très dispersés et que la valeur retenue du paramètre est plus importante que sa provenance précise, alors les méthodes telles que la DSmT sont à privilégier. Au contraire, si les différents avis d'expert sont relativement similaires, un consensus ou une moyenne permet d'utiliser un mécanisme facilement compréhensible par tous et facile à faire évoluer. La construction de la procédure d'élicitation doit alors prendre en compte ce choix pour limiter les biais.

Le principe de l'élicitation d'avis d'experts présenté dans cette partie s'accorde bien avec le contexte de notre problématique, qui concerne le développement de systèmes complexes produits en faible quantité et à long cycle de vie (cf. I.3.). Cependant, ces méthodes d'élicitation sont surtout exploitables pour l'évaluation des caractéristiques des systèmes et ne peuvent répondre à elles seules à notre problématique. Il est donc nécessaire de faire le lien entre les caractéristiques des systèmes et la qualité à terminaison. Pour cela, il est intéressant de se pencher sur les travaux menés dans le cas de la qualité dans le secteur du logiciel. En effet, la question de la définition de la qualité par rapport aux caractéristiques du produit a été particulièrement étudiée dans ce domaine avec l'objectif de construire des modèles permettant d'évaluer la qualité à terminaison tout au long du développement.

II.3.3. Le cas particulier de la Qualité du logiciel

Le problème de l'évaluation et de la prévision de la qualité produit a été traité en particulier dans le cadre du développement de logiciels à travers divers modèles. Nous proposons dans cette partie de faire le point sur les modèles qualité du logiciel issus d'une approche très développée à ce jour : Factors, Criteria, Metrics (Facteurs, Critères, Métriques ou FCM).

Si le domaine du développement logiciel ne recouvre pas toutes les spécificités du développement de systèmes complexes au sens le plus large, le besoin d'évaluer la qualité à terminaison tout au long du cycle de vie et, en particulier pendant la conception, est bien présent. Plusieurs modèles qualité ont été développés pour cette application sur la base de l'approche FCM. Ils constituent une base intéressante pour la prévision de la qualité à terminaison tout au long du cycle de vie et certains principes de cette approche sont utilisés en ingénierie système [Lead et al., 2010].

Ainsi, l'approche FCM a été initialement conçue pour identifier des objectifs généraux pour les projets de développement logiciel dans le secteur de la défense. Cette méthodologie a été développée dans les années 70 par le Rome Lab de l'US Air Force et General Electric.

La première étape de cette méthodologie consiste à définir les facteurs de la qualité du produit étudié.

- Un **facteur** est défini comme une caractéristique du produit qui contribue activement à sa qualité du point de vue utilisateur [Beugnard, 1998]. Il peut être relié à un coût par l'intermédiaire des activités qu'il engendre [McCall, 1977]. Les facteurs reflètent le point de vue de l'utilisateur, ils renseignent sur le point de vue externe à l'entreprise. Les facteurs de qualité sont caractérisés par des critères qualité.
- Un **critère** qualité porte sur le produit lui-même ou sur son processus de développement. Sur la base des critères qualité, il est possible de définir et d'évaluer les facteurs qualité. Les critères représentent le point de vue interne à l'entreprise.
- Enfin, les **métriques** sont les moyens de mesure qui permettent de caractériser les critères.

Les modèles construits par la méthodologie FCM peuvent se représenter sous la forme d'une arborescence à trois niveaux (Figure 7), où chacun des facteurs qualité produit est défini par un ensemble de critères qualité eux-mêmes caractérisés par des métriques.

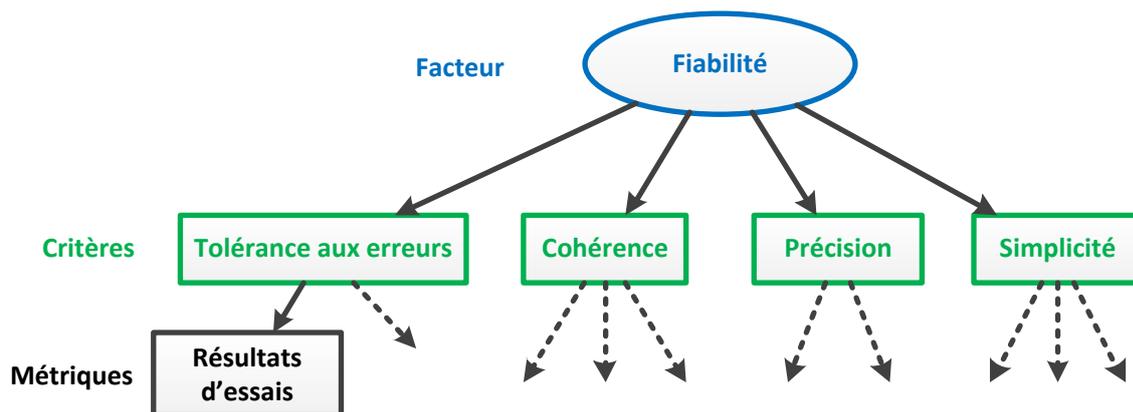


Figure 7 : Arborescence Facteur, Critères, Métriques, pour la Fiabilité. Adapté de [McCall, 1977].

Lors de ses travaux pour le Rome Lab, McCall fait la synthèse des facteurs qualité logiciel issus des publications de plus d'une trentaine de chercheurs dans ce domaine. Il les synthétise dans une liste de 11 facteurs qualité logiciel non hiérarchisée [McCall, 1977], référencée en Tableau 4.

Conformité	Utilisabilité	Portabilité
Fiabilité	Maintenabilité	Réutilisabilité
Efficience	Testabilité	Interopérabilité
Intégrité	Flexibilité	

Tableau 4 : Facteurs qualité logiciel [McCall, 1977]

Les définitions de ces facteurs sont disponibles en Annexe 1.

McCall associe, à ces 11 facteurs, des critères qualité logiciel également extraits de l'analyse des travaux existants (Tableau 5). Ils permettent d'évaluer les facteurs qualité.

Traçabilité	Exploitabilité	Évolutivité
Exhaustivité	Formation	Adaptabilité
Cohérence	Communicatif	Modularité
Précision	Simplicité	Autonomie du système logiciel
Tolérance aux erreurs	Concision	Autonomie machine
Efficacité d'exécution	Instrumentation	Standard de communication
Efficacité de stockage	Auto-descriptif	Données communes

Tableau 5 : Critères qualité logiciel [McCall, 1977]

La méthodologie proposée par McCall a servi de base pour la plupart des modèles qualité logiciel développés par la suite.

La méthodologie FCM a été reprise et complétée par le « Constructive Quality Model » (COQUAMO) proposé par Kitchenham [1987].

Ce nouveau modèle qualité doit aider à prendre des décisions pour le développement de logiciel grâce à des analyses, des prévisions de la qualité et des recommandations. Il propose une nouvelle sélection de facteurs et de critères basée sur les principaux travaux publiés à cette époque. Le modèle de McCall est amélioré sur plusieurs points : les facteurs qualité sont rendus aussi indépendants les uns des autres que possible et les normes et procédures propres au domaine informatique sont incorporées au modèle. La principale innovation de ce modèle est de chercher à prédire de façon quantitative la qualité des logiciels au moment de leur livraison au client.

Dans les années 90, la méthodologie est généralisée à l'ingénierie système par le processus Goal/Question/Metric (GQM) [Basili, 1994] du Centre for Systems and Software Engineering de l'Université de South Bank. Cette méthodologie permet de développer des métriques adaptées à tout type de projet en ingénierie système [Wilbur et al., 1995] et des facteurs qualité peuvent en être déduits pour les systèmes complexes [Long, 2012]. La méthodologie en elle-même ne propose pas de facteurs ou de critères mais décrit la procédure à suivre pour déterminer des mesures de la qualité et des objectifs qualité pour le suivi de projet.

Au niveau normatif, le modèle qualité logiciel a été décrit, au début des années 1990, par la norme ISO/CEI 9126-1, définissant ainsi un référentiel international. De nombreuses études dans le domaine de la caractérisation de la qualité sont basées sur cette norme. Elle a été reprise et complétée par l'ISO 25000 et le modèle SQuaRE. La norme ISO IEC 25010:2011, System and software quality models, et la norme ISO/CEI 25012:2008, sur la qualité des données, remplacent l'ancienne norme ISO 9126.

Ces normes ISO définissent, de la même façon que les modèles précédemment développés, des critères et facteurs qualité.

Par la suite, le comité européen de normalisation [CEN, 2008] reprend ce même système de facteurs qualité pour caractériser la qualité des systèmes complexes sans pour autant définir de critère.

Les facteurs et critères qualité de ces différents modèles et normes sont synthétisés dans les Tableaux 6 et 7 (un « X » indique la présence du critère ou du facteur en colonne dans le modèle dont l'auteur figure en début de ligne). Certains de ces critères et facteurs sont présents sous forme de synonymes, ceux-ci sont indiqués directement dans les tableaux par un renvoi chiffré directement sous les tableaux (par exemple « 1 »).

Auteurs	Conformité	Fiabilité	Efficacité	Intégrité	Utilisabilité	Maintenabilité	Testabilité	Flexibilité	Portabilité	Réutilisabilité	Interopérabilité	Intelligibilité	Sécurité	Robustesse	Performance	Fabricabilité
MacCall 1977	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
Kitchenham 1987	X	X	X	X	X	X	X	2	X	X	X	X		X		
CEN 2008	1	X	X		X	X	X				X		X		X	X
ISO IEC 2510:2011	1	X	X	X	X	X	X	3	X	X	4	X	X		5	
Long 2012	X	X		X	X	X	X	2	X	X	X		X	X		

1 : pertinence ; 2 : évolutivité ; 3 : adaptabilité ; 4 compatibilité ; 5 : capacité ; X : présence du facteur

Tableau 6 : Prise en compte des Facteurs Qualité retenus pour différents modèles.

Auteurs	Traçabilité	Exhaustivité	Cohérence	Précision	Tolérance d'erreur	Efficacité d'exécution	Efficacité de stockage	Contrôle des accès	Exploitabilité	Formation	Communicatif	Simplicité	Concision	Instrumentation	Auto-descriptif	Evolutivité	Adaptabilité	Modularité	Autonomie du système logiciel	Autonomie machine	Standards de communication	Données communes	
MacCall 1977	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kitchenham 1987	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ISO IEC 2510:2011	X	X	X	X	X	X	1	X	X	X	X					X	X	X				2	2

1 : utilisation des ressources ; 2 : conformité aux standards ; X : présence du critère

Tableau 7 : Prise en compte des Critères Qualité logiciel retenus pour différents modèles.

Si les modèles qualité basés sur la méthodologie FCM sont bien adaptés au développement de logiciels, ils ne permettent pas de traiter le cas des systèmes complexes tels que définis dans le paragraphe I.1. Par exemple, certains facteurs qualité concernent des propriétés propres au logiciel, alors que d'autres éléments indispensables pour caractériser les systèmes complexes ne figurent pas dans ces modèles.

La sécurité par exemple, est considérée par McCall comme étant couverte par le facteur intégrité. Si cette considération est valable pour la sécurité des données informatiques, elle ne l'est pas pour la sécurité des personnes et des biens.

Dans le cadre du développement de systèmes complexes, la notion de robustesse est un élément qui apparaît régulièrement, alors qu'elle ne figure pas dans le modèle de McCall.

La notion de robustesse est présente dans des travaux ultérieurs [Kitchenham, 1987] et [Long, 2012] au même titre que la sécurité. Ces deux éléments sont également indispensables dans le cadre du secteur de la défense, comme le précise le comité européen de normalisation [CEN, 2008].

Les modèles qualité tirés de la méthodologie FCM, bien qu'adaptés aux spécificités du développement de logiciels, ne permettent pas en l'état de prendre en compte les facteurs liés à des contextes industriels particuliers.

Cependant, les modèles développés sur la base de cette méthodologie permettent de caractériser efficacement la qualité d'un produit du point de vue du client tout au long du cycle de vie si des facteurs adaptés sont définis [Kitchenham, 1987] [CEN, 2008] [ISO/CEI 25012:2008] [Long, 2012]. De plus, il est possible de développer des modèles de prévision de la qualité au périmètre d'application plus large que le seul logiciel sur la base de ces modèles.

II.3.4. Les limites des approches prédictives

Les méthodes et outils abordés dans cette partie sont habituellement utilisés dans l'industrie pour prévoir certaines caractéristiques des produits (telle que la fiabilité, une performance spécifique, ...) à différents moments de leur cycle de vie. Cela permet de rester vigilant sur une partie de la qualité produit. Cependant, seules certaines caractéristiques du produit sont couvertes, ce qui ne permet pas d'aborder la totalité de la qualité produit. Ces outils sont souvent utilisés dans une seule phase du cycle de vie des produits, chaque phase ayant ses propres spécificités et les besoins en termes d'évaluation de la qualité produit étant différents. Il faut donc combiner l'utilisation de plusieurs méthodes et outils pour assurer le suivi de la qualité produit sur l'ensemble du cycle de vie, sans être assuré que l'ensemble sera cohérent. La prévision réalisée en phase de conception via un premier outil sera-telle comparable à celle réalisée en phase de production avec un second outil et aux retours d'informations sur les produits en service ?

Une seule et même démarche pour l'ensemble du cycle de vie du produit est nécessaire pour garantir la continuité des prévisions et des mesures. Cette démarche peut s'appuyer sur la démarche FCM et les méthodes d'élicitation :

- Les modèles de prévision de la qualité des logiciels, basés sur la démarche FCM, permettent à la fois de couvrir tous les aspects de la qualité produit dans le domaine du logiciel et de conserver la cohérence de l'évaluation de la qualité tout au long du cycle de vie. Cependant, ces modèles ne sont pas applicables à tous les systèmes complexes car seules les spécificités propres aux logiciels sont prises en compte. Celles qui correspondent aux autres domaines qui peuvent entrer en compte dans la conception d'un système complexe (la mécanique, l'électronique par exemple) ne sont pas couvertes par ces modèles, car ils ne sont pas conçus pour cela. Cependant, la méthodologie FCM elle-même est intéressante et peut servir de base pour des modèles aux champs d'application différents de celui du logiciel.

- La même difficulté est présente pour les méthodes d'élicitation qui sont également souvent très génériques, et demandent donc un travail d'adaptation pour pouvoir être utilisées de manière opérationnelle ou bien, au contraire sont adaptées à un domaine très précis et ne peuvent donc pas être utilisées telles quelles dans un autre contexte. Ce sont donc également des outils qui peuvent servir de base à la construction d'une démarche de prévision de la qualité produit mais à condition de faire le travail nécessaire à leur adaptation au contexte d'utilisation.

II.4. Adéquation au contexte de notre problématique

Le contexte de notre étude (cf. I.3.) concerne le développement de systèmes complexes. La question de la prévision de la qualité à terminaison d'un système complexe est à l'origine de notre problématique (cf I.4.) car, dans le cadre du développement de systèmes complexes, les limites du management de la qualité soulevée au paragraphe II.2.3. s'appliquent pleinement : manque de lien entre maîtrise des processus et qualité produit, impacte du processus de conception sur la qualité à terminaison difficile à anticiper, absence de vue globale sur l'ensemble du cycle de vie. Des modèles de prévision de cette qualité permettraient d'apporter une réponse à ces difficultés.

Ce contexte a pour contrainte de ne permettre de travailler qu'avec peu de données et de cas d'études, seuls quelques systèmes déjà développés peuvent servir de base de travail. Un système est produit en quelques dizaines d'exemplaires, quelques centaines au plus. De plus, le nombre conséquent de variables qui pourraient avoir un impact sur la qualité finale des systèmes interdit la possibilité de créer une base simulée de cas de figures exploitables. En effet, cela demanderait de connaître et de caractériser de façon précise les variables entrant en jeu pour pouvoir simuler de façon pertinente leur évolution, ce qui n'est pas possible avec la quantité de données disponibles. Les problèmes qualité peuvent intervenir à tous les niveaux : sur un composant, sur un équipement, un sous-système plus ou moins sophistiqué, au niveau du système complet sur une ou plusieurs de ses fonctionnalités. Les conséquences peuvent toucher différentes caractéristiques du système (ses performance, sa fiabilité, etc.). Les conditions et contraintes de développement ne sont pas les mêmes d'un système à un autre et le nombre de développements conduits simultanément est limité. Les méthodes et conditions de travail ne sont pas comparables entre d'anciens développements et ceux en cours.

Méthodes de prévision :

L'usage de toutes les méthodes qui nécessitent un grand nombre de données est donc exclu, soit toutes les méthodes d'analyses factorielles et de régression ainsi que les réseaux de neurones artificiels. Concernant les méthodes de classification de données, celle par apprentissage non-supervisé sont également inadéquates.

Les réseaux bayésiens répondent particulièrement bien aux contraintes de notre contexte d'étude. Ce type d'outils permet de structurer les connaissances et de traiter les probabilités associées pour traiter des risques industriels. Ce sont les plus adaptés à l'objectif de prévision de la qualité produit à terminaison en utilisant les connaissances des experts.

Ils permettent d'identifier clairement les liens de cause à effet entre les variables et fournissent une base précise et détaillée pour la prise de décision [Grubisic, 2008]. Il est également possible de coupler les connaissances d'experts avec celles issues d'analyses statistiques au sein de réseaux bayésiens [Villeneuve, 2012].

Le formalisme des réseaux bayésiens permet une représentation graphique du modèle facilement lisible et compréhensible pour des personnes non familières des modèles statistiques. Il permet les échanges entre experts de disciplines différentes et la communication entre les différents acteurs du développement d'un système complexe. Les relations entre les composants du modèle sont clairement représentées et les éléments peuvent être hiérarchisés. La représentation graphique est intuitive, y compris pour des personnes n'ayant pas l'habitude de travailler avec ce type de réseaux. Les réseaux bayésiens sont également utilisés dans le cadre de modèle de prévision. Ce formalisme est donc adapté pour la construction de modèle de prévision de la qualité produit à terminaison principalement basé sur les connaissances des experts.

Nous retenons donc le formalisme des réseaux bayésiens pour proposer des modèles de prévision de la qualité des systèmes à terminaison (Chapitre IV).

Elicitation d'avis d'experts :

La méthodologie proposée doit, dans notre contexte utiliser les avis d'experts afin de construire et de paramétrer les modèles de prévisions de la qualité. En effet, une grande partie du savoir réside dans les connaissances des experts de l'entreprise. Afin de profiter des expériences de développement de systèmes complexes, ces connaissances doivent faire l'objet d'une élicitation et doivent être agrégées pour ensuite être intégrées dans un modèle de prévision de la qualité à terminaison. Les connaissances issues de l'élicitation doivent être les plus fiables possibles pour que le modèle construit soit pertinent. Ainsi les principes de base pour limiter les biais lors de l'élicitation doivent être respectés (cf. II.3.2.3.). **L'élicitation directe (cf. II.3.2.2.1.) sera à privilégier, c'est en effet le moyen le plus simple pour les experts de répondre.**

L'élicitation indirecte est plus longue et complexe à utiliser et ne se justifie que si les biais s'avèrent trop important par élicitation directe. L'élicitation paramétrique n'est pas utilisable dans ce contexte en raison de la maîtrise des statistique qu'elle requiert de la part des personnes participant à l'élicitation.

Définition de la qualité produit :

Afin de réaliser une prévision de la qualité système à terminaison, il faut pouvoir faire le lien entre cette qualité et les différentes caractéristiques du système tout au long de son cycle de vie. Cela suppose de définir la qualité des systèmes complexes étudiés ainsi que des moyens d'évaluer cette qualité à différents instants du cycle de vie.

L'approche FCM est une bonne base pour la définition d'un modèle de prévision de la qualité des systèmes complexes (cf. II.3.3.). En effet, elle permet de définir la qualité à travers les différents aspects d'un système du point de vue du client (les Facteurs) et autorise l'entreprise à évaluer cette qualité tout au long du cycle de vie (via les Critères et les Métriques). Nous choisissons donc d'utiliser cette approche pour bâtir notre méthodologie.

Notre approche est donc d'adapter la méthodologie FCM aux systèmes complexes. La qualité d'un système complexe pourra ainsi être définie par plusieurs facteurs et des modèles de prévision de la qualité pourront être construits pour chacun de ces facteurs.

Sur la base de ces éléments, nous proposons dans les Chapitres III et IV une méthodologie qui permet de construire des modèles qui :

- Tiennent compte de l'ensemble des caractéristiques qualité d'un système complexe ;
- Sont adaptés au contexte de l'entreprise qui les déploie ;
- Sont valables tout au long du cycle de vie d'un système complexe ;
- Permettent de réaliser des prévisions de la qualité produit à terminaison des systèmes complexes tout au long de leur cycle de vie.

Cette méthodologie est donc basée sur **l'approche FCM** pour définir et évaluer la qualité des systèmes tout au long du cycle de vie, utilise le **formalisme des réseaux bayésiens** pour leur représentation graphique claire et adaptée aux modèles de prévision, et repose sur **l'élicitation d'avis d'experts** pour construire les modèles de la prévision de la qualité des systèmes.

Ces modèles permettront de répondre aux limites du management de la qualité (cf. II.2.3.) qui résident dans la difficulté à établir des liens entre la maîtrise des processus et la qualité produit et le manque d'une vision unifiée de la qualité tout au long du cycle de vie des systèmes complexes.

Les Chapitre III et IV développent notre méthodologie, basée sur les méthodes et approches retenues ici.

Chapitre III

Méthodologie de Construction du Modèle de Prévision de la Qualité Produit à Terminaison

- Phase 1 -

Le présent chapitre (III) ainsi que les chapitres suivants (IV et V) décrivent la méthodologie que nous proposons pour répondre à notre problématique rappelée ci-après ainsi que son application sur des cas concrets de l'entreprise MBDA. La méthodologie proposée vise à construire un modèle de prévision de la qualité produit à terminaison (c'est-à-dire lorsque le système est en usage chez le client), par facteur qualité, qui soit adapté aux systèmes complexes.

*Pour rappel, un **facteur qualité** est une caractéristique du produit qui contribue activement à sa qualité du point de vue utilisateur. Les facteurs renseignent sur le point de vue externe à l'entreprise (cf. II.3.3.).*

La méthodologie se compose de deux phases. La première phase permet d'établir une définition de la qualité produit pour des systèmes complexes et la deuxième de construire un modèle de prévision de la qualité produit à terminaison, pour ces mêmes systèmes.

Les particularités des systèmes complexes sont qu'ils intègrent des éléments de natures diverses : mécanique, électronique et logiciel et que les fonctionnalités et les performances de ces systèmes sont des propriétés émergentes. Leur performance n'est pas déterminée par une simple combinaison linéaire de leurs composants.

La problématique soulevée dans le paragraphe 4 du chapitre I comporte deux axes :

Axe 1 : Comment définir et caractériser la qualité produit à terminaison d'un système complexe du point de vue du client ?

Axe 2 : Comment prévoir la qualité produit à terminaison d'un système complexe, du point de vue du client, au cours de son développement ?

Cette problématique impose, pour y répondre, de définir un modèle de caractérisation de la qualité produit à terminaison du point de vue du client et un modèle de prévision de cette qualité au cours du développement de systèmes complexes. Le principe des modèles que nous proposons de construire permet de donner un indicateur prédictif de l'atteinte des objectifs qualité que se sera fixée l'entreprise. La prévision de la qualité produit à terminaison permet de s'assurer que le développement se déroule de façon à atteindre l'objectif qualité produit à terminaison ou d'entreprendre des actions correctives dans le cas contraire. Chacune des deux phases de la méthodologie proposée, qui sont présentées plus en détail dans cette introduction, répond à un axe de la problématique.

Présentation de la méthodologie complète

Dans le chapitre précédent (II), nous nous sommes intéressés à la définition de la qualité et avons passé en revue les moyens existants pour sa mise en œuvre et sa prévision. Nous sommes arrivés à la conclusion qu'il était difficile d'évaluer la qualité à terminaison des systèmes complexes tout au long de leur cycle de vie. Des modèles de prévision de la qualité à terminaison permettraient d'apporter une réponse à ce problème.

Pour rappel, plusieurs méthodes et outils ont été présentés dans le chapitre II, à l'issue duquel nous avons choisi de retenir les plus adaptés à notre problématique (cf. II.4.) :

- La structure Facteurs, Critères, Métriques comme base des modèles de prévision de la qualité à terminaison des systèmes complexes ;
- L'élicitation d'avis d'experts comme source d'information, afin de pouvoir travailler malgré le manque d'informations ;
- Les principes d'agrégation des données issues de l'élicitation d'avis d'experts pour déterminer les paramètres du modèle ;
- Le formalisme des réseaux bayésiens pour sa simplicité de lecture et du fait qu'il permette de construire des modèles de prévision.

Le principe est d'utiliser les modèles de prévision ainsi construits (un pour chaque facteur qualité produit) pour la préparation des jalons majeurs du développement de systèmes complexes (Figure 8, cf. I.3.) afin d'obtenir, à chaque jalon (J₁ à J₄) du développement, une évaluation objective de la qualité produit du système en développement et un indicateur de la qualité produit à terminaison (en service chez le client).

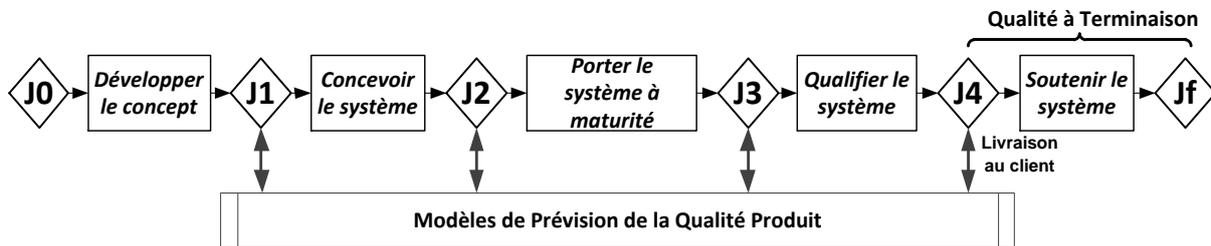


Figure 8 : Utilisation des modèles de prévision de la qualité en préparation des passages de jalon

Grâce à ces modèles, la qualité des systèmes en développement ainsi que la prévision à terminaison peuvent être évaluées à la fin de chacune des phases du cycle de vie (Figure 9). Pour cela, un objectif qualité produit à terminaison doit être défini puis décliné en objectifs intermédiaires pour chacun des jalons du cycle de vie des systèmes.

En effet, le jalonnement du cycle de vie des systèmes permet généralement de réaliser des revues d'avancement afin d'évaluer le travail déjà réalisé et de décider s'il est pertinent de poursuivre le cycle de vie et si des actions correctives ou préventives doivent être entreprises. Les modèles proposés s'inscrivent dans cette logique en mettant à disposition des indicateurs concernant la qualité produit, au moment de son évaluation et sa prévision à terminaison afin de guider la prise de décision.

Ainsi, pour chacun des jalons, les modèles permettent d'évaluer la qualité produit par rapport à l'objectif intermédiaire défini au jalon concerné et de donner sur cette base **un indicateur prédictif du degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison**.

Si le niveau de qualité du système n'est pas satisfaisant, les modèles permettent d'aider à remonter à la source du problème pour qu'il soit corrigé. Ainsi, en fonction du niveau d'atteinte des objectifs au jalon considéré, le modèle recommande de (Figure 9) :

- Débuter la phase suivante sans réserve (objectif intermédiaire au jalon atteint) ;
- Débuter la phase suivante sous réserve d'entreprendre des actions correctives (objectif intermédiaire partiellement atteint, prévision de la qualité à terminaison acceptable) ;
- Ne pas débuter la phase suivante avant d'avoir appliqué des actions correctives (objectif intermédiaire non atteint et prévision de la qualité à terminaison non acceptable).

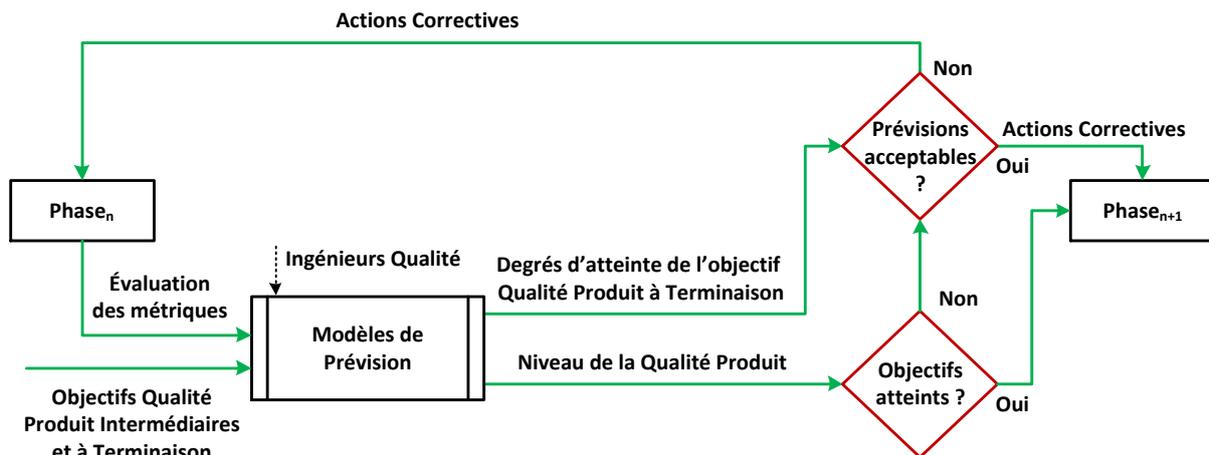


Figure 9 : Utilisation des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison pour un jalon

La méthodologie présentée dans les chapitres III et IV, décrit pas à pas les étapes permettant à une entreprise qui développe des systèmes complexes de construire des modèles de prévision de la Qualité Produit à terminaison. Un modèle est construit pour chaque facteur qualité choisi pour être étudié, et sera adapté aux spécificités du secteur d'activité de l'entreprise et de son organisation interne. Les modèles de prévision tels que définis par cette méthodologie, permettent aux ingénieurs qualité de l'entreprise d'analyser de façon objective, en cours de développement d'un système complexe, l'avancement du travail réalisé, de prévoir ce que sera le niveau de qualité à terminaison et de corriger au plus tôt les dérives par rapport aux objectifs qualité produit.

La méthodologie prend également en compte, lors de son utilisation et dans les modèles construits, les éléments nécessaires à l'intégration des contraintes exposées dans le Chapitre I, c'est-à-dire :

- Des systèmes complexes produits en petite quantité ;
- Des durées de vie en service de plusieurs décennies ;
- Un savoir détenu par les experts au sein de l'entreprise.

La méthodologie se divise en deux phases, répondant aux deux axes de la problématique :

- **Phase 1** : Caractérisation de la qualité produit à travers différents facteurs qualité (III.1.);
- **Phase 2** : Prévision de la qualité produit à terminaison ; structuration et paramétrage du modèle de prévision (IV.1.).

Ces deux phases détaillent les différentes étapes de la méthodologie qui sont nécessaire pour obtenir les modèles de prévision de la qualité des systèmes complexes à terminaison (Figure 10).

Pour la première phase (III.1.), il a été choisi de définir le modèle de la qualité produit à terminaison sur la base du modèle Facteurs, Critères, Métriques (FCM), présenté au Chapitre II (cf. II.3.3.). Cette première phase permet de le généraliser aux systèmes complexes dans leur ensemble tout en tenant compte des spécificités de l'entreprise qui met en œuvre cette méthodologie. Pour cela des facteurs qualité produit adaptés aux particularités des systèmes développés par l'entreprise sont définis et sélectionnés.

La seconde phase (IV.1.), qui consiste à établir les modèles de prévision, quant-à-elle, s'appuie sur la définition de la qualité produit obtenue à l'issue de la phase 1. Elle détaille comment les critères et métriques sont définis et les modèles de prévisions sont paramétrés, au moyen de l'élicitation du savoir des experts de l'entreprise, pour chacun des facteurs.

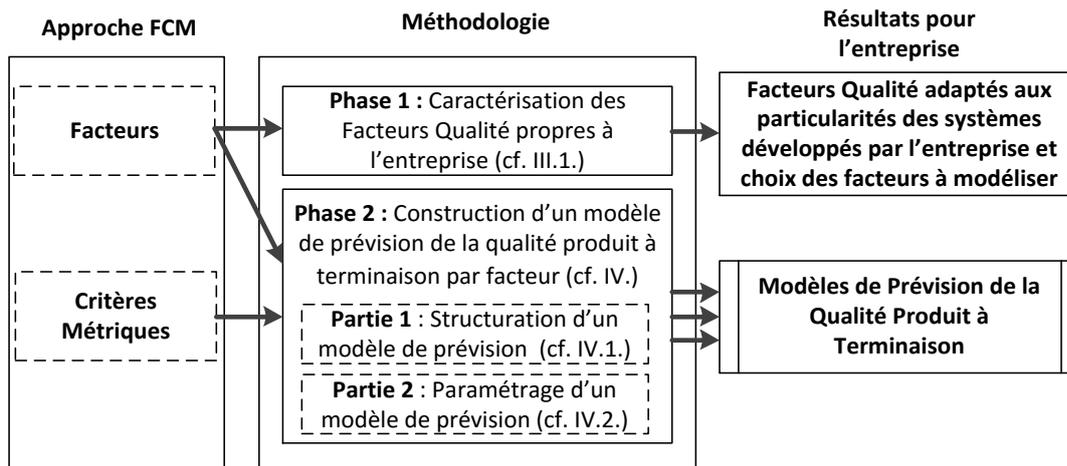


Figure 10 : Principe de la méthodologie de construction des modèles de prévision de la qualité produit

III.1. Méthodologie Phase 1 : Caractérisation des Facteurs Qualité propre à l'entreprise

Comme évoqué dans le second chapitre (cf. II.3.3.), le modèle qualité produit le plus exhaustif, qui couvre l'ensemble du cycle de vie, est le modèle FCM. Du fait de son origine, il ne traite que de la qualité dans le secteur du logiciel. Son principe est de décrire la qualité du logiciel à travers différents facteurs qualité, qui sont des caractéristiques du produit qui contribuent activement à sa qualité, du point de vue de l'utilisateur.

Afin de pouvoir utiliser le modèle FCM, comme structure d'un modèle de prévision de la qualité produit dans le contexte de la thèse, il faut en amont définir les facteurs adaptés aux systèmes complexes développés par l'entreprise. Il n'est pas nécessaire que ces facteurs qualité produit soient strictement indépendants, le modèle FCM permet de prendre en compte les dépendances via des critères ou métriques communs à plusieurs facteurs.

La phase 1 de la méthodologie vise à adapter le modèle FCM au contexte d'une entreprise et aux systèmes complexes en définissant les étapes qui permettent de caractériser les facteurs qualité produit qui serviront de base au modèle de prévision (Figure 11 Figure 12). Les quatre étapes qui la composent sont présentées ci-après.

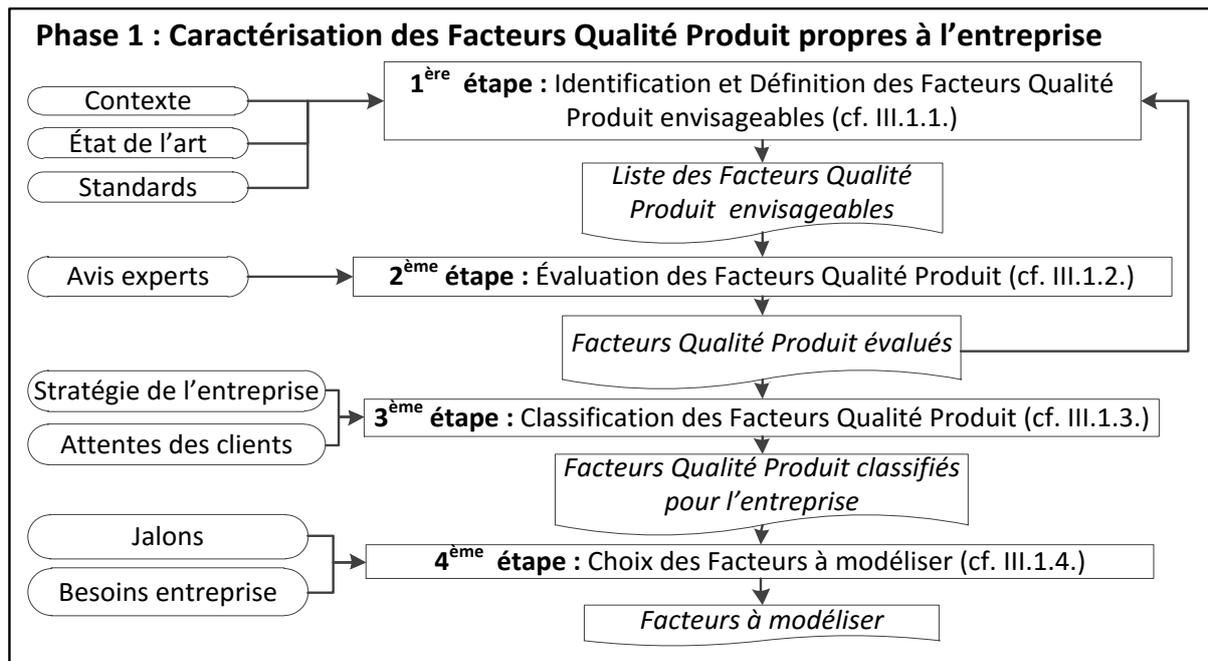


Figure 11 : Phase 1 de la méthodologie de construction du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison

Pour illustrer chacune des étapes de cette méthodologie, un exemple simple et fictif appliqué à une machine à café à filtre est utilisé. Cet exemple est très simple en comparaison d'un système complexe. L'utilisation réelle de cette méthodologie dans un cas aussi simple ne serait pas forcément nécessaire. Mais l'objectif de cet exemple est de faciliter la compréhension du rôle de chacune des étapes sans les difficultés que représentent le traitement de systèmes complexes. Des cas d'application sur des systèmes complexes concrets sont développés plus spécifiquement dans le paragraphe III.2. avec l'application de la méthodologie pour le groupe MBDA.

III.1.1. 1^{ère} étape : Identification et Définition des Facteurs Qualité Produit envisageables

La première étape de la phase 1 consiste à identifier et définir les facteurs qualité produit envisageables pour le secteur industriel pris en considération. En effet, les facteurs sont spécifiques à un type de produit donné, par exemple les facteurs exposés dans le chapitre II (cf. II.3.3.) sont adaptés aux produits logiciels. Les clients ne sont pas les mêmes suivant le secteur industriel et leurs besoins diffèrent. Il faut donc prendre en compte ces spécificités pour définir les facteurs qualité produit en fonction du contexte industriel.

Les facteurs qualité produit envisageables sont identifiés à partir d'un état de l'art sur le secteur industriel concerné par les activités de l'entreprise. Les modèles qualité déjà existants pour d'autres usages, les normes et standards sont également des sources d'information à prendre en considération. Les pratiques spécifiques au secteur étudié doivent être identifiées et la relation entre le client et l'industriel bien définie.

Les caractéristiques des facteurs doivent couvrir l'ensemble des attentes du client envers le produit fini. Afin d'être plus pertinent dans le choix de ces facteurs, cette revue de l'état de l'art peut être complétée par une enquête menée auprès d'acteurs du secteur industriel étudié, entreprises et clients si cela est pertinent.

La bonne compréhension et la bonne appropriation des facteurs qualité par les personnels qui interviendront dans la construction du modèle, à savoir les ingénieurs qualité, ainsi que des ingénieurs impliqués dans le développement des systèmes et des managers, dépendent de la précision de leur définition. Ainsi chaque facteur doit être clairement défini.

Exemple explicatif : La machine à café

Dans le cas de la machine à café, les facteurs qualité produit envisageables pourraient être identifiés relativement facilement, sans avoir à réaliser un état de l'art important. Mais ce n'est pas le cas pour des systèmes complexes, comme cela sera illustré dans l'application de la partie III.2. Les facteurs qualité produit envisageables sont :

- L'utilisabilité : facilité d'utilisation de la machine et ergonomie ;
- L'efficacité énergétique : niveau de consommation électrique de la machine ;
- La légalité : respect des normes et réglementations ;
- La fiabilité : aptitude de la machine à rester fonctionnelle dans les conditions données pour la période de temps donnée ;
- L'évolutivité : possibilité d'ajouter de nouvelles fonctionnalités à la machine (moulin à café, buse vapeur par exemple) ;
- La flexibilité : souplesse des conditions d'utilisation (possibilité d'utiliser différents types ou conditionnements de café, préparation d'autres boissons chaudes par exemple).

Cette première liste de facteurs qualité produit peut être très fournie. Tous n'ont pas forcément la même importance pour les clients et les étapes suivantes permettent d'évaluer, classer et sélectionner ces facteurs pour ne conserver que les plus pertinents.

III.1.2. 2^{ème} étape : Evaluation des Facteurs Qualité Produit envisageables

L'objectif de cette étape est d'évaluer les facteurs qualité produit envisageables identifiés lors de l'étape précédente en fonction de leur importance pour le client afin de pouvoir ensuite classer les plus pertinents.

La liste de facteurs telle que constituée à l'étape précédente ne comporte pas d'éléments qui permette à l'entreprise de choisir les facteurs adaptés à ses produits, ses clients et sa stratégie. Il est donc nécessaire d'évaluer la pertinence des facteurs en fonction du contexte propre à l'entreprise.

La solution la plus immédiate pour cette tâche serait d'interroger directement les clients sur la pertinence de chacun des facteurs qualité envisageables, car c'est leur point de vue qui est recherché. Dans une entreprise commercialisant des produits grand public, le service marketing permet de capter et de formaliser le besoin du client.

Cependant, la méthodologie que nous proposons s'adresse aux entreprises qui développent des systèmes complexes, produits en quantité restreinte. Dans ce contexte, le client est une institution ou une autre entreprise qui sera représentée par des personnes dédiées, elles-mêmes différentes de l'utilisateur final. Il n'existe pas d'interlocuteur unique qui soit concerné au quotidien par tous les aspects de la qualité du système. Il serait donc logique d'interroger des représentants de chaque catégorie d'utilisateur du système. S'adresser à ces différents interlocuteurs demanderait de les interroger en fonction de leurs rôle et responsabilités chez le client et donc une importante mobilisation du client ainsi qu'un important travail de synthèse pour exploiter les réponses.

La solution retenue est de s'adresser directement aux personnels au sein de l'entreprise qui ont une bonne connaissance du client. Cela permet d'obtenir directement une vue synthétique de la qualité des systèmes telle que perçue par le client grâce aux années d'expériences acquises par les personnes interrogées.

Contenu du questionnaire

Pour guider le recueil des informations au sein de l'entreprise et faciliter son traitement, nous proposons de construire un questionnaire d'évaluation de la pertinence des facteurs qualité produit envisageables. L'objectif est de définir le degré d'importance de chacun d'eux pour le client. Dans le questionnaire, chacun des facteurs qualité envisageables lors de la 1^{ère} étape doit être clairement définis. Pour chacun des facteurs, il est demandé aux répondants d'évaluer sa pertinence du point de vue du client.

Afin d'obtenir des résultats exploitables, il est préférable de proposer une échelle de notation prédéfinie. Ce système de notation aide les personnes sondées à répondre aux questions et permet de comparer et d'analyser facilement les différentes évaluations. Dans le but d'éviter un choix médian indéterminé l'échelle doit être constituée d'un nombre pair de niveaux.

L'échelle de notation ne doit pas comporter de trop nombreux niveaux car il devient problématique pour les sondés de répondre s'ils n'ont pas les éléments nécessaires pour choisir entre deux nuances proches. Définir une échelle à quatre niveaux, avec deux niveaux pour les facteurs pertinents et deux niveaux pour ceux qui ne le sont pas (par exemple, pertinent : « indispensable », « important », et non pertinent : « utile », « non pertinent »), est suffisant pour distinguer différents niveaux d'importance parmi les facteurs et identifier ceux qui ne sont pas pertinents, dans le contexte des systèmes produits par l'entreprise, pour ses clients.

Par contre, il est préférable de conserver la possibilité pour le sondé d'indiquer son incapacité à répondre plutôt que de le contraindre à évaluer un facteur sur lequel il hésite. En effet, cela permet d'identifier

des facteurs à la définition imprécise ou un autre problème sur la définition de ce facteur (par exemple si le facteur ne porte pas sur la qualité produit, ou s'il concerne un aspect déjà couvert par un autre facteur ou encore s'il est contradictoire, etc.). Le facteur considéré peut également être hors du champ de compétence de la personne interrogée.

Sélections des personnes à interroger

Le principe est d'interroger un panel d'employés choisis dans l'entreprise pour leur connaissance du client et du produit. La sélection des personnes à interroger se fait de manière à prendre en compte les besoins du client sur tous les usages et fonctions du système à délivrer. Il faut couvrir à la fois les étapes de spécification du besoin du client, tenir compte de l'éventuelle implication de celui-ci lors des phases de conception et de développement, sans oublier les phases de production et de maintien en condition opérationnelle. Il est également préférable d'interroger des employés de différentes nationalités si l'entreprise est implantée dans plusieurs pays afin de s'assurer qu'il n'y ait pas de différences de langage ou culturelles dans la perception de la pertinence des facteurs.

Les avantages à interroger des employés plutôt que le client dans ce contexte sont donc doubles :

- Le temps nécessaire pour réaliser cette 2^{ème} étape est réduit en simplifiant la méthode d'enquête et d'analyse, en ne s'adressant qu'à des personnes de proximité ;
- Les résultats sont plus pertinents car ils permettent de couvrir une grande partie du retour d'expérience de l'entreprise en sélectionnant de manière adéquate les employés à questionner.

L'inconvénient de cette façon de procéder est qu'une partie du besoin du client pourrait être oublié si les personnes interrogées ne représentent pas l'ensemble des exigences possibles ou que les réponses soient influencées par un biais propre à l'entreprise.

Les personnes à interroger au sein de l'entreprise doivent donc :

- Avoir des profils variés tels que des ingénieurs, chefs de projets, des personnes en relation avec le client, etc. ;
- Couvrir l'ensemble du cycle de vie des systèmes ;
- Couvrir l'ensemble des caractéristiques des systèmes ;
- Être réparties entre les différents pays où est implantée l'entreprise ;
- Être suffisamment nombreuses (une quinzaine de personnes au moins).

Exploitation des résultats

Afin de traiter les réponses issues du questionnaire, il est préférable de calculer pour chacun des facteurs les pourcentages de répondant ayant jugé le facteur pertinent, non pertinent et sans avis. Les facteurs évalués peuvent être traités suivant trois cas de figure :

- Les facteurs pertinents : les facteurs considérés comme pertinents vis-à-vis du client par une large majorité des personnes interrogées sont conservés ;
- Les facteurs non pertinents : les facteurs considérés comme non pertinents vis-à-vis du client par une large majorité des personnes interrogées sont écartés ;
- Les facteurs nécessitant une analyse plus approfondie.

Les seuils à partir desquels il est possible de considérer qu'un facteur est largement considéré comme pertinent ou au contraire non pertinent (de l'ordre de 95% des réponses exprimées) doit être ajusté en fonction du contexte de l'enquête et de la dispersion des réponses.

Les facteurs n'ayant pas reçu le nombre de suffrages suffisant pour être conservés ou écartés doivent être examinés de façon plus spécifique avec les répondants. Quatre causes peuvent expliquer la dispersion des évaluations de leur pertinence :

- Le facteur est pertinent mais seulement pour certains types de produits, il doit dans ce cas être considéré comme pertinents suivant le contexte ;
- Le facteur a été mal compris, il sera alors nécessaire de le redéfinir de manière plus précise et de le réévaluer si besoin. C'est généralement le cas des facteurs pour lesquels plusieurs répondants n'ont pas donné leur avis ;
- Le facteur est redondant avec un autre, il peut alors être supprimé ou fusionné avec un autre facteur ;
- Le facteur n'est pas pertinent, dans ce cas il doit être écarté.

À l'issue de cette étape est obtenue une liste des Facteurs Qualité Produit jugés comme pertinents vis-à-vis du client.

III.1.3. 3^{ème} étape : Classification des Facteurs Qualité Produit

La pertinence des facteurs qualité produit envisageables vis-à-vis du client a été évaluée à l'étape précédente (III.1.2.). Il faut à présent sélectionner ceux à retenir pour définir la qualité des systèmes développés par l'entreprise et ceux à écarter sur la base de cette évaluation. Pour cela, plusieurs catégories de facteurs qualité peuvent être identifiées en fonction des réponses obtenues et de leur nature obligatoire ou non (Tableau 8). Ces catégories permettront ensuite de déterminer comment prendre en compte ces facteurs qualité de manière appropriée dans l'entreprise :

- **1^{ère} catégorie** : elle comporte les facteurs qualités produit pertinents obligatoires qui ne donnent pas d'avantages compétitifs. Cela est le cas des obligations légales (par exemple, les aspects liés à la sécurité).
- **2^{ème} catégorie** : elle est constituée de facteurs qualité produit reconnus comme pertinents pour le client en toutes circonstances et qui ne sont pas dans la première catégorie. Tous les systèmes développés devront répondre à ces facteurs pour satisfaire le client. Ce sont les basiques incontournables pour l'entreprise.
- **3^{ème} catégorie** : elle concerne les facteurs qualité produit dont la pertinence est variable suivant le type de système considéré. Certains clients ont des besoins spécifiques sur leur système que d'autres n'auront pas.
- **Facteurs écartés** : les facteurs ayant été identifiés comme non pertinents vis-à-vis du client sont à écarter.

Cette catégorisation des facteurs qualité produit guide la sélection des facteurs qualité à modéliser en priorité par l'entreprise pour prévoir la qualité à terminaison lors de la 4^{ème} étape (III.1.4.).

	1^{ère} catégorie	2^{ème} catégorie	3^{ème} catégorie	Facteurs écartés
Toujours Pertinent	Oui	Oui	Non	Non
Obligatoire	Oui	Non	Non	Non
Pertinent dans certains cas seulement	Non	Non	Oui	Non

Tableau 8 : Classification des facteurs qualité produit en fonction de leur pertinence et de leur nature

III.1.4. 4^{ème} étape : Choix des Facteurs à modéliser

La 3^{ème} étape (III.1.3.) a permis de classer les facteurs qualité produit qui sont pertinents pour caractériser la qualité des systèmes que proposent l'entreprise et d'écartier les autres. Il est nécessaire de choisir quels seront les facteurs qualité à modéliser en priorité parmi ceux qui ont été retenus. En effet, il n'est pas toujours utile pour une entreprise de disposer de modèles de prévision de la qualité produit pour tous les facteurs retenus mais il sera parfois préférable de concentrer le travail de modélisation sur les facteurs les plus problématiques.

Ainsi, tous les facteurs retenus lors de la 3^{ème} étape (III.1.3.) ne représentent pas le même niveau de difficulté d'obtention du niveau de qualité voulu par l'entreprise. Certains éléments sont déjà pleinement maîtrisés et ne nécessitent pas d'outil de suivi supplémentaire. Une analyse portée sur les retours clients peut aider à identifier les facteurs les plus problématiques d'un point de vue qualité.

En effet, il serait contre-productif de consacrer des ressources au développement d'un modèle de prévision pour des facteurs qui ne le nécessitent pas. La construction d'un modèle de prévision pour un seul facteur nécessite l'implication de nombreuses personnes sur une période suffisamment longue pour réaliser chacune des étapes de la construction du modèle, conduire plusieurs itérations si nécessaire et valider le modèle.

De plus, seuls les facteurs de la seconde catégorie, qui portent sur des caractéristiques du produit lui-même et qui ne sont pas issus d'une obligation légale peuvent être traités par le modèle de prévision proposé par la suite. Les facteurs qui ne portent pas sur ce type de besoin (1^{ère} catégorie), telles que les obligations légales ou les exigences de sécurité, ne découlent pas du besoin du client, car ils sont obligatoires, et sont donc non négociables. En aucun cas, il ne sera possible pour l'entreprise de revoir le niveau d'exigences sur ces facteurs ou de livrer au client un système qui ne les satisferait pas complètement. Cette différence de nature impose donc un traitement spécifique de ces facteurs, ce qui est déjà souvent le cas dans les entreprises concevant des systèmes complexes. Ces facteurs ne seront pas traités par la suite.

La priorité sera souvent portée sur les facteurs de la seconde catégorie, qui sont reconnus comme indispensables pour l'ensemble des systèmes, contrairement aux facteurs de la 3^{ème} catégorie. En effet, les modèles de prévision concernant les facteurs de la seconde catégorie seront utilisables pour tous les futurs systèmes développés.

Pour résumer, la sélection des facteurs à modéliser pour en prévoir le niveau de qualité à terminaison se fait sur les critères suivants :

- Sont traités en priorité les facteurs de la seconde catégorie par rapport à la catégorie 3 ;
- Les facteurs de la première catégorie sont exclus ;
- Les facteurs les plus problématiques sont prioritaires.

À l'issue de la phase 1 de la méthodologie, l'entreprise dispose de facteurs adaptés aux systèmes qu'elle développe qui permettent de définir la qualité à terminaison du point de vue du client. Une sélection de facteurs à modéliser a été réalisée suivant les besoins de l'entreprise.

L'application de la phase 1 de la méthodologie au cas réel du groupe MBDA est détaillée dans la partie suivante III.2. Cette application permet d'illustrer l'intérêt de la méthodologie dans le cadre du développement de systèmes complexes.

III.2. Application Phase 1 : Caractérisation des Facteurs Qualité Produit pour MBDA

La première phase de la méthodologie qui est proposée consiste à caractériser le premier niveau du modèle FCM. Les différentes étapes de la phase 1 de la méthodologie ont été présentées dans la première partie de ce chapitre (cf. III.1.). Cette seconde partie de chapitre est consacrée à l'application de la méthodologie à un cas concret, l'identification et la définition des facteurs qualité produit dans le contexte de l'entreprise MBDA.

La société MBDA conçoit, développe et fabrique des systèmes d'armes. Ces systèmes complexes nécessitent plusieurs années de développement. Ils sont produits en petite quantité et ont une vie en service qui peut atteindre plusieurs décennies. Dans ce contexte, il est nécessaire de disposer d'outils permettant d'assurer la satisfaction des exigences clients lors de la livraison du système (cf. I.3.).

Les quatre étapes de la méthodologie précédemment définie (cf. III.1.) sont mises en œuvre telles que représentées sur Figure 12.

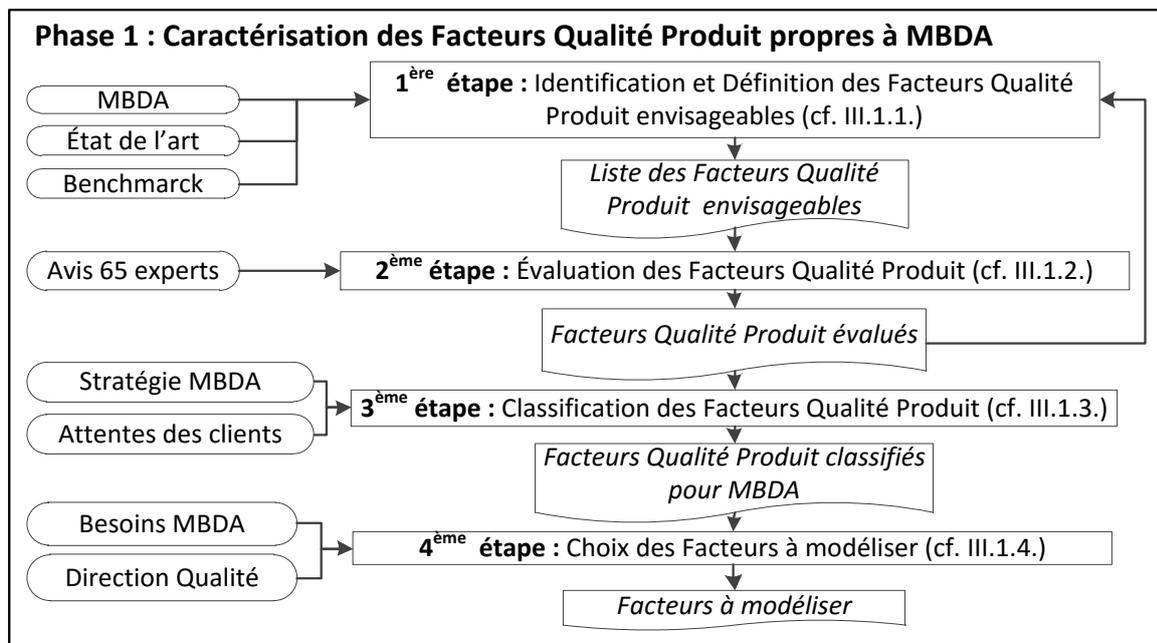


Figure 12 : Phase 1 de la méthodologie de construction du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison appliquée à MBDA

III.2.1. 1^{ère} étape : Identification et Définition des Facteurs Qualité Produit envisageables

La première étape consiste à identifier et définir les facteurs qualité produit envisageables pour les systèmes conçus par MBDA. Ce travail a été réalisé sur la base de trois sources d'information :

- Les modèles qualité déjà existants dans la littérature ;
- Des entretiens menés au sein de MBDA ;
- Un benchmark sur le management de la qualité produit dans l'industrie.

Pour le premier point, les facteurs provenant des modèles qualité pour le logiciel sont analysés pour retenir uniquement ceux qui peuvent convenir pour les systèmes complexes. Ainsi, des analyses des modèles de [McCall, 1977], [Kitchenham, 1987], le travail du Comité Européen de Normalisation [CEN, 2008] et la norme ISO/IEC 25010:2011 *Systems and software engineering*, les 12 facteurs suivant sont retenus (cf. II.3.3. Tableau 6): **conformité, efficacité, fiabilité, flexibilité, intelligibilité, interopérabilité, maintenabilité, portabilité, réutilisabilité, sécurité, testabilité et utilisabilité.**

Des interviews conduites au sein de MBDA ont également permis de compléter cette liste de facteurs. Dix-neuf personnes ont été rencontrées lors d'entretiens semi-dirigés d'une heure à une heure trente sur ce qu'est la qualité produit. Afin d'avoir des avis suffisamment représentatifs, des personnes travaillant sur différents aspects des systèmes ont donné leur avis (Tableau 9). Ont ainsi été interrogés des ingénieurs qualité en développement, en production et en rapport client, des chefs de projet, des personnes travaillant à la définition des futurs systèmes et aussi au support des systèmes en service. Parmi ces personnes, huit étaient des ingénieurs qualité.

	Direction technique	Direction des programmes	Direction des opérations
Ingénieur Qualité	1 personne	4 personnes	3 personnes
Autre	9 personnes	1 personne	2 personnes

Tableau 9 : Répartition des personnes interrogées sur la définition de la qualité produit

Ces interviews ont permis de confirmer huit des facteurs qualité produit envisageables identifiés dans la littérature : **conformité, efficacité, fiabilité, maintenabilité, portabilité, réutilisabilité, sécurité et utilisabilité.** Elles ont permis d'identifier trois nouveaux facteurs envisageables en plus des douze déjà identifiés : **résilience, qualité perçue, efficience.**

Enfin, le résultat d'un benchmark précédemment réalisé a été analysé à nouveau pour en tirer des facteurs qualité produit envisageables. Cette étude comparative a consisté en une enquête à l'initiative de MBDA sur le management de la qualité produit auprès de vingt entreprises industrielles : Airbus, Agustawestland Limited, Alenia Aermacchi, Eaton SAS, Eurocopter, MBDA, Rolls-Royce Defence, Snecma, Edscha, Sonceboz SA, Valeo, Ansaldo STS S.p.A., Faiveley Transport, Legrand, Schneider electric, Air liquide, Calor, Becton Dickinson, La Poste, Oxylane.

Le résultat de cette enquête est détaillé dans l'Annexe 10. La sélection des participants a été faite pour avoir à la fois des entreprises qui développent des systèmes complexes et d'autres proposant des produits de consommation courante afin de distinguer ce qui est commun de ce qui est spécifique selon le type de production.

La réinterprétation du résultat de cette enquête a permis d'identifier deux autres facteurs envisageables, **légalité** et **disponibilité**, portant le total à dix-sept facteurs. Le terme « disponibilité » est la traduction française choisie pour « deliverability », il n'a donc pas la définition habituelle de celle utilisée en sûreté de fonctionnement.

La liste finale comporte donc 17 facteurs qualité produits envisageables pour MBDA ainsi que leur définition (Tableau 10).

Facteurs Qualité Envisageables	Définitions
Conformité	Conformité du système au besoin exprimé par le client.
Disponibilité	Caractérise la facilité à s'approvisionner en composants et matières, à fournir, et donc à produire le système en quantité suffisante dans les délais demandés par le client.
Efficacité	Niveau d'obtention des résultats escomptés.
Efficience	Niveau de ressources nécessaire à un système pour réaliser une fonction donnée.
Fiabilité	Aptitude du système à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné.
Flexibilité	Caractérise la facilité avec laquelle le système peut évoluer.
Intelligibilité	Caractérise la facilité de compréhension de l'utilisation du produit et de la documentation associée.
Interopérabilité	Caractérise l'effort nécessaire pour qu'un système puisse interagir avec un autre.
Légalité	Respect des lois et de la réglementation
Maintenabilité	Caractérise l'effort nécessaire à maintenir le produit en état de fonctionnement ainsi que son niveau de performance à moindre coût.
Portabilité	Caractérise la facilité avec laquelle le produit peut être transféré d'un environnement à un autre.
Qualité perçue	Caractérise la perception immédiate, rationnelle et subjective, du tout comme du détail, que le client a vis-à-vis du système.
Résilience	Caractérise la capacité d'un produit à tolérer le bruit, des pannes, à fonctionner dans un mode dégradé en milieu hostile.
Réutilisabilité	Caractérise dans quelle mesure un produit peut être utilisé pour d'autres applications
Sécurité	Caractérise la capacité à minimiser et prévenir les risques matériels et humains.
Testabilité	Caractérise l'effort nécessaire pour tester un produit pour s'assurer qu'il effectue la fonction prévue.
Utilisabilité	Caractérise l'effort nécessaire à l'utilisation du produit.

Tableau 10 : Définition des 17 facteurs qualité produit envisageables pour MBDA

III.2.2. 2^{ème} étape : Evaluation des Facteurs Qualité Produit envisageables

Les facteurs identifiés et définis à l'étape précédente sont les facteurs susceptibles de caractériser la qualité à terminaison d'un système complexe développé par MBDA. Cependant, ces facteurs sont issus de sources diverses (état de l'art, enquête externe, interviews internes à l'entreprise, etc.) et ne sont pas forcément adaptés au contexte de MBDA ou pertinent pour le client. Il faut donc évaluer leur pertinence du point de vue du client, pour caractériser la qualité des systèmes produits par l'entreprise, avec pour finalité la sélection de ceux qui seront les plus adaptés.

Pour évaluer la pertinence des facteurs qualité produit du point de vue du client, un questionnaire est élaboré. Ce questionnaire reprend la liste des 17 facteurs qualité issus de la première étape et leur définition. Le questionnaire complet en version française et anglaise est en Annexe 3.

Pour chacun des facteurs, le questionnaire demande au répondant d'évaluer la pertinence du facteur pour le client sur une échelle à 5 niveaux, dont la possibilité de ne pas répondre (cf. II.1.2.) :

- indispensable ;
- important ;
- utile ;
- inadapté, sans objet ;
- sans avis.

Les niveaux « indispensable » et « important » caractérisent les facteurs envisageables considérés comme pertinents et les niveaux « utile » et « inadapté » caractérisent les facteurs non pertinents du point de vue du client.

Il a été choisi de répartir de façon homogène les interviews suivant les différents départements impliqués dans le développement, la production et le maintien en condition opérationnelle des systèmes. Le choix des personnes est fait de façon à couvrir les différentes phases du cycle de vie des systèmes et différents produits. Des ingénieurs qualité sont également inclus dans le panel. Les répondants sont répartis sur les trois principaux pays d'implantation de l'entreprise, l'Angleterre, la France et l'Italie, pour identifier les éventuelles spécificités de chaque pays. Au total, **65 personnes** ont été interrogées au sein de l'entreprise (Tableau 11), dont certaine ayant déjà participé à la première étape.

	Direction technique	Direction des programmes	Direction des opérations
France	12 personnes	12 personnes	10 personnes
Angleterre	6 personnes	7 personnes	8 personnes
Italie	3 personnes	6 personnes	1 personne
Total	21	25	19

Tableau 11 : Répartition des personnes interrogées pour la hiérarchisation des facteurs qualité produit

Afin d'interpréter les résultats, les proportions suivantes sont calculées pour chacun des facteurs :

- La proportion de répondants ayant jugé chacun des facteurs pertinent (réponses « indispensable » ou « important ») pour le client (Figure 13) ;
- La proportion de répondants ayant jugé chacun des facteurs non pertinent (réponses « utile » et « inadapté ») pour le client (Figure 14) ;
- La proportion de réponses sans avis (Figure 15).

Après agrégation des résultats, il apparaît qu'il n'y a pas de différences significatives dans la perception de la pertinence des facteurs en fonction du pays des répondants. Les résultats sont donc cohérents.

Le niveau limite pour considérer les facteurs qualité produit envisageables pertinents ou non est fixée à 95% des réponses.

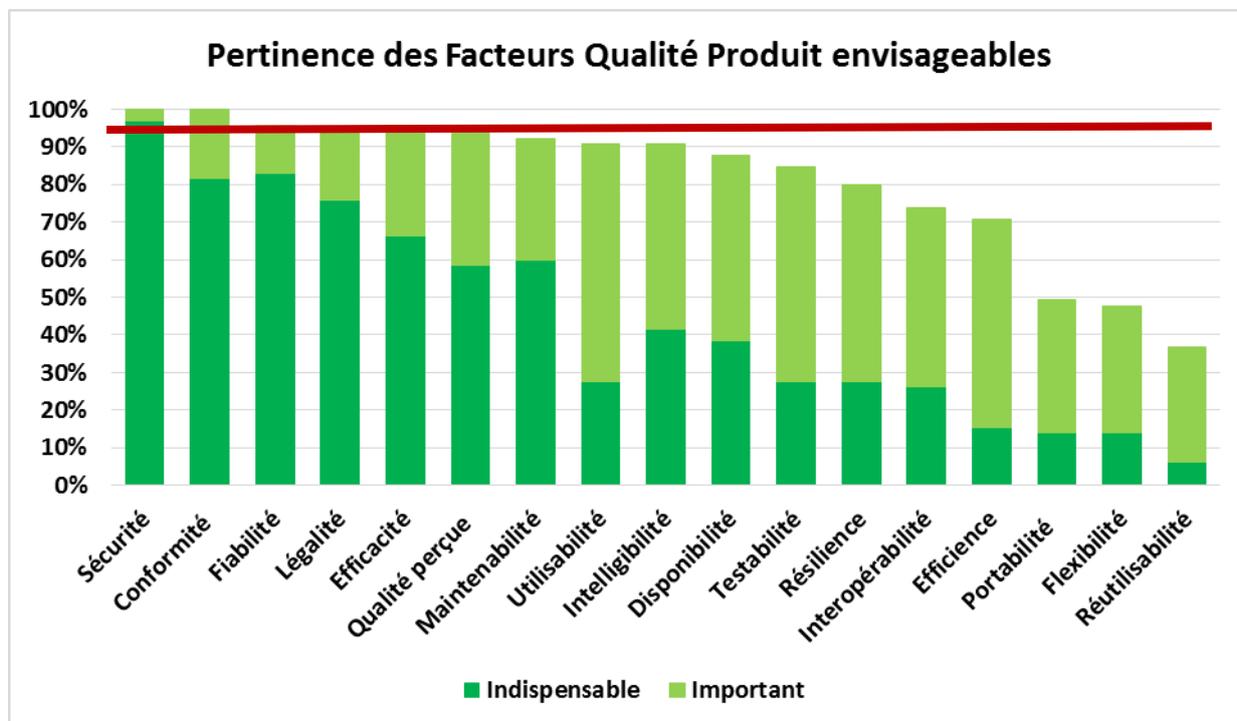


Figure 13 : Score de pertinence des facteurs qualité produit MBDA envisageables

Les facteurs **Sécurité**, **Conformité**, **Fiabilité**, **Légalité**, **Efficacité** et **Qualité perçue** sont jugés pertinents par au moins 95% des répondants (Figure 13, la limite rouge figure le niveau de 95%). Ces six facteurs qualité produit sont donc considérés pertinents pour les systèmes MBDA du point de vue du client.

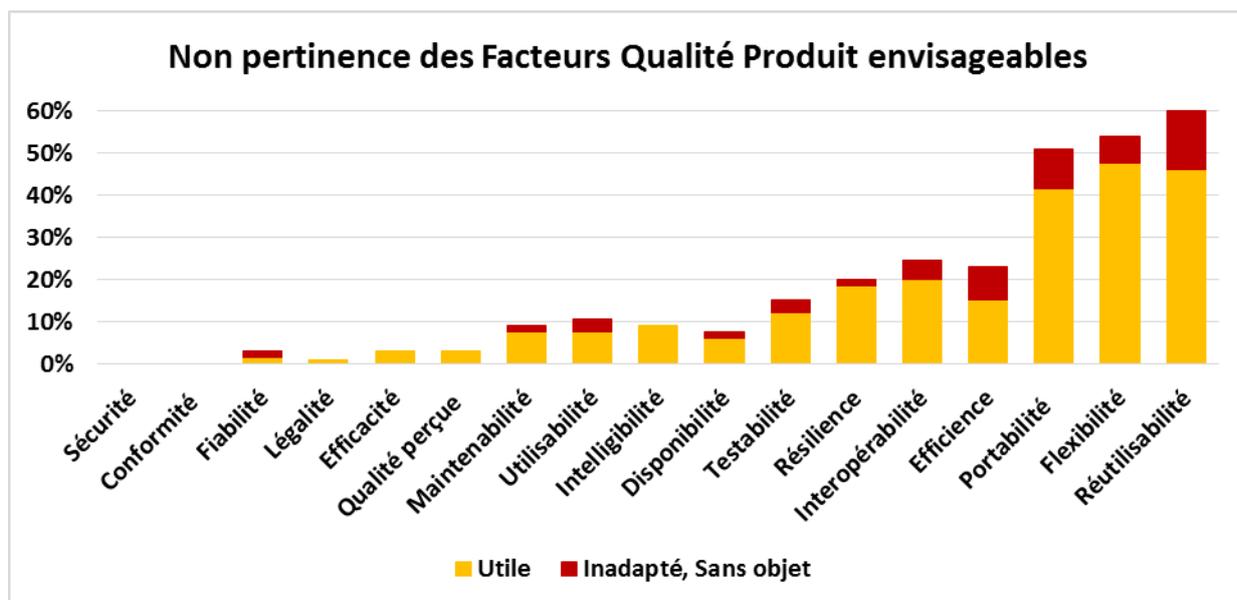


Figure 14 : Score de non pertinence des facteurs qualité produit MBDA envisageables

Aucun facteur qualité produit envisageable n'a été considéré comme non pertinent par au moins 95% des répondants (Figure 14). Il a donc été nécessaire d'analyser plus en détail les réponses au questionnaire, et en particulier les commentaires des répondants pour juger de la pertinence de ces facteurs pour caractériser la qualité des système MBDA du point de vue du client.

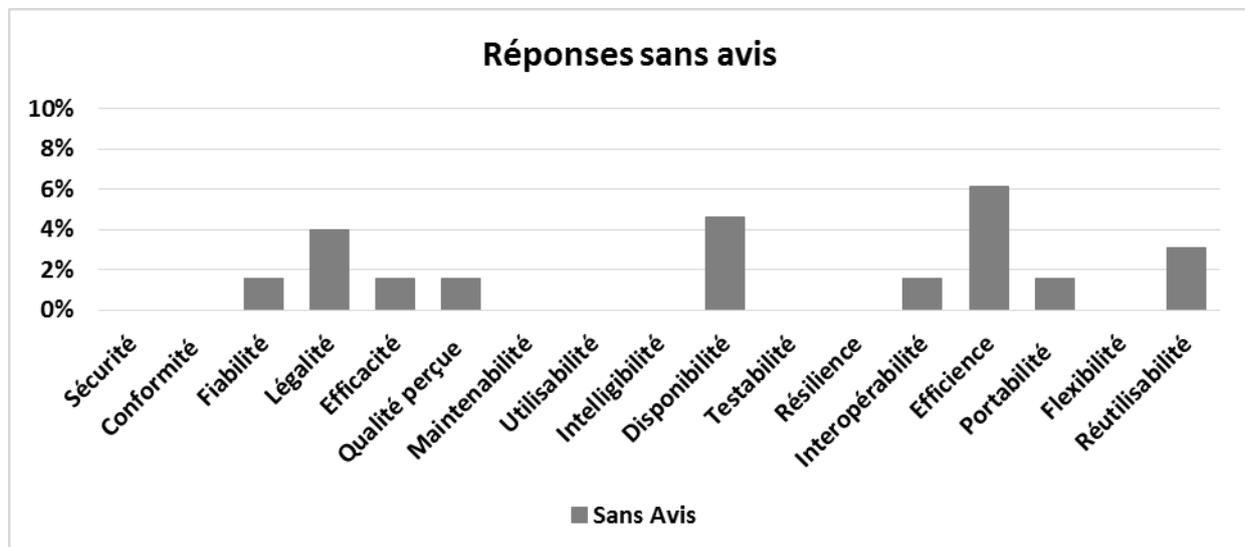


Figure 15 : Pourcentage de réponses sans avis sur la pertinence des facteurs MBDA envisageables

Les facteurs n'ayant pu être jugés pertinents ou non à ce stade présentent différents cas de figure qui ont été identifiés à l'aide des répondants :

- Il apparaît, en premier lieu, que le taux de réponse « sans avis » est faible, le maximum est atteint pour le facteur **Efficience**, avec 6% des réponses (Figure 15). En effet, le facteur **Efficience** n'a pas toujours été bien compris ou bien distingué du facteur **Efficacité** par les répondants. Un système est efficace s'il permet de réaliser entièrement l'objectif initialement fixé. Cet aspect est déjà couvert par le facteur **Conformité** car l'objectif initialement fixé est une partie du besoin exprimé par le client. Un système est efficient si un minimum de ressources est requis pour atteindre l'objectif fixé. L'**Efficience** n'est pas couverte par les autres facteurs, de plus, de nombreux répondants associent au facteur **Efficacité** le sens d'efficacité, faussant les résultats. Les niveaux de pertinence bruts, à l'issue du questionnaire, de ces deux facteurs ne sont donc pas fiables. Le facteur **Efficacité** est donc écarté et le facteur **Efficience** est considéré comme pertinent pour les systèmes développés par l'entreprise. Une attention particulière devra être portée sur la compréhension de la définition du facteur **Efficience** auprès des futurs utilisateurs du modèle de prévision pour éviter la confusion.
- Le facteur **Intelligibilité**, trop orienté logiciel, est supprimé pour ne conserver que l'**Utilisabilité**. Les deux facteurs étaient perçus comme redondants par les répondants. Le score inférieur à 95% de pertinence du facteur **Utilisabilité** s'explique par le fait que ce facteur ne concerne pas tous les systèmes conçus par MBDA. C'est donc un facteur pertinent en fonction du contexte.
- Les facteurs **Flexibilité** et **Portabilité** sont, dans leur définition, propres au développement de logiciel et s'adaptent mal aux systèmes complexes dans leur ensemble. En effet, le logiciel n'est qu'un composant des systèmes complexes parmi d'autres. Les facteurs doivent s'adresser au système dans son ensemble. Ces facteurs proposent des nuances qui ne sont pas nécessaires dans ce contexte d'application, ce qui explique leur faible pertinence. De plus, l'aspect couvert par

ces facteurs n'est pas pertinent pour tous les systèmes développés par MBDA, d'après les précisions des répondants. Ils sont donc remplacés par le facteur **Evolutivité**, qui caractérise la facilité avec laquelle le système peut être modifié. Ce facteur est considéré comme pertinent pour certains systèmes.

- Le facteur **Réutilisabilité** est considéré comme « important » ou « indispensable » pour seulement 38 % des personnes interrogées (Figure 13). En demandant des précisions aux répondants, il apparaît que ce facteur rend compte en réalité en partie d'un besoin interne à l'entreprise. Le besoin de **Réutilisabilité** de la part du client est couvert par le facteur **Evolutivité** précédemment introduit.
- Les facteurs **Testabilité** et **Résilience** sont écartés car, comme remarqué par certains répondants, ils ne correspondent pas à un besoin du client mais à des solutions techniques pour répondre à certains besoins de celui-ci. Ces éléments pourront éventuellement servir de critères dans la construction des modèles de prévision (phase 2) de certains des facteurs sélectionnés à l'issue de la phase 1.
- Les facteurs **Disponibilité**, **Interopérabilité** et **Maintenabilité**, dont la pertinence est proche de 90% (Figure 13), s'avèrent être pertinents en fonction des systèmes considérés.

Les facteurs qualité produit envisageables sont listés dans le Tableau 12 en fonction de leur pertinence évaluée pour les systèmes MBDA.

Facteurs toujours pertinents	Facteurs pertinents en fonction du contexte	Facteurs non pertinents
Conformité Efficience Fiabilité Légalité Qualité perçue Sécurité	Disponibilité Evolutivité (nouveau facteur) Interopérabilité Maintenabilité Utilisabilité	Efficacité Flexibilité Intelligibilité Portabilité Résilience Réutilisabilité Testabilité

Tableau 12 : Pertinence des facteurs qualité produit envisageables pour MBDA

III.2.3. 3^{ème} étape : Classification des Facteurs Qualité Produit

Une fois les réponses au questionnaire traitées et les facteurs triés en fonction de leur pertinence et de leur nature, il est possible de sélectionner ceux qui sont les plus adaptés aux systèmes produits par l'entreprise. La classification réalisée pour les 11 facteurs retenus est présentée dans le Tableau 13 ci-dessous.

1 ^{ère} Catégorie	2 ^{ème} Catégorie	3 ^{ème} Catégorie
Légalité Sécurité	Conformité Efficience Fiabilité Qualité perçue	Disponibilité Evolutivité Interopérabilité Maintenabilité Utilisabilité

Tableau 13 : Classification des facteurs qualité produit MBDA

- **1^{ère} Catégorie** : Deux facteurs parmi ceux qui sont pertinents sans conditions sont obligatoires pour pouvoir livrer les systèmes aux clients : **Légalité et Sécurité**. Ces deux facteurs ne sont jamais négociables, leur niveau de qualité à terminaison est imposé par les lois et réglementations.

- 2^{ème} Catégorie** : Quatre facteurs qualité produit sont clairement identifiés comme pertinents pour caractériser les systèmes développés par l'entreprise, indépendamment de leur nature et de l'identité du client : **Conformité, Efficience, Fiabilité et Qualité Perçue**.

- **3^{ème} Catégorie** : Un troisième groupe est constitué des facteurs qui correspondent à des exigences potentielles des clients : Disponibilité, Évolutivité, Interopérabilité, Maintenabilité et Utilisabilité. Pour le développement de certains systèmes, ces facteurs peuvent représenter de vrais défis alors qu'à l'inverse, certains clients n'auront aucune exigence dans ce domaine. C'est le contexte d'un projet qui détermine si ces facteurs sont pertinents pour caractériser la qualité du système considéré. Ils ne sont intégrés au modèle de prévision que si leur niveau de qualité exigé à terminaison le nécessite.

- Les facteurs envisageables jugés non pertinents à l'issue de l'étape précédente ne sont pas conservés.

III.2.4. 4^{ème} étape : Choix des Facteurs à modéliser

Une fois les facteurs permettant de caractériser la qualité à terminaison des systèmes produits par l'entreprise déterminés, il est nécessaire de choisir lesquels feront l'objet d'un modèle de prévision.

Ce sont donc les facteurs qualité identifiés comme indispensables qui sont traités en priorité, car ils concernent tous les systèmes développés au sein de l'entreprise. La **Conformité** et la **Fiabilité** sont les deux facteurs jugés les plus pertinents et importants vis-à-vis du client. Par ailleurs, ils présentent des difficultés de suivi tout au long du cycle de vie des systèmes et l'obtention d'un bon niveau de qualité sur ces deux aspects est délicate. Ils sont dans la 2nd catégorie et ils couvrent une très grande partie des exigences du client concernant les systèmes conçus par l'entreprise.

Le facteur **Conformité** implique des personnes et des processus plus nombreux et variés que ceux de la **Fiabilité**. Il est cependant une composante essentielle et complexe de la qualité produit à terminaison. Ce facteur concerne tous les systèmes développés par l'entreprise et porte sur un aspect qualité qui peut régulièrement poser problème. Il est donc prioritaire par rapport aux autres facteurs.

La fiabilité occupe une place très importante dans la conception et le développement de système d'arme. Un département au sein de MBDA lui est consacré avec des ingénieurs spécialistes en fiabilité. Les résultats de ces études servent également à produire les études de sécurité et à planifier les opérations de maintenances si elles sont nécessaires.

L'avantage du facteur Fiabilité est qu'il correspond à une activité bien précise dans le développement d'un système complexe des études de fiabilité. Les experts concernés par ce facteur donc facilement identifiables, ce sont les ingénieurs en fiabilité. Le périmètre de travail sur ce facteur est donc relativement réduit. Il constitue un bon sujet pour une première application de la méthodologie.

Les facteurs **Conformité** et **Fiabilité** sont donc choisis prioritairement pour faire l'objet de modèles de prévision de la qualité à terminaison. Ce choix a été discuté et validé avec le comité de direction de la

qualité de l'entreprise. Dans le cas d'une autre entreprise, les facteurs qualité sélectionnés pour être modélisés seraient potentiellement différents.

III.3. Conclusion

En introduction de ce chapitre, la méthodologie de construction des modèles de prévision de la qualité produit a été introduite. Elle se compose de deux phases (Figure 10) :

- **Phase 1** : Caractérisation de la qualité produit à travers différents facteurs adaptés à l'entreprise;
- **Phase 2** : Prévision de la qualité produit à terminaison ; structuration et paramétrage du modèle de prévision.

Seule la première phase a été traitée dans ce chapitre (cf. III.1). Elle permet de répondre à la question de la caractérisation de la qualité des systèmes complexes du point de vue du client. La qualité produit des systèmes complexes que développe une entreprise peut ainsi être définie à travers plusieurs facteurs adaptés aux caractéristiques de l'entreprise. A l'issue de cette phase, une sélection de facteurs qui feront l'objet en priorité d'un modèle de prévision de la qualité produit à terminaison est réalisée par l'entreprise.

La méthodologie proposée peut comporter plusieurs itérations pour obtenir un résultat adéquat. Les principales contraintes pour l'application de cette méthodologie sont le temps nécessaire pour identifier les facteurs qualité potentiels et la disponibilité des personnes à interroger pour hiérarchiser et classifier les facteurs.

Cette première phase a été appliquée dans le contexte réel du groupe MBDA qui conçoit et produit des systèmes d'armes (cf. III.2.). Une liste de 11 facteurs qualité produit adaptés aux systèmes développés par l'entreprise a ainsi été construite sur la base d'enquêtes internes et externes à l'entreprise et suite à une évaluation de la pertinence de ces facteurs. Les 11 facteurs sont : Légalité, Sécurité, Conformité, Efficacité, Fiabilité, Qualité Perçue, Disponibilité, Évolutivité, Interopérabilité, Maintenabilité et Utilisabilité.

Les facteurs Conformité et Fiabilité ont été choisis pour être traités en priorité sur la base de leur importance pour le client et pour l'entreprise et la difficulté d'obtention qu'ils représentent.

Sur la base de ces facteurs qualité, il est possible de prendre en compte le besoin du client tout au long du cycle de vie des systèmes, y compris lors de son développement grâce à des modèles de prévision. Cette première phase de la méthodologie a fait l'objet d'une présentation lors du congrès international IFAC 2016 [Gitto et al., 2016a].

La phase 2 de la méthodologie permettant la construction et le paramétrage des modèles de prévision sera décrite dans le chapitre IV et son application aux facteurs Conformité et Fiabilité pour l'entreprise MBDA sera détaillée dans le chapitre V.

Chapitre IV

Méthodologie de Construction du Modèle de Prévision de la Qualité Produit à Terminaison

- Phase 2 -

Dans le chapitre précédent (Chapitre III) et dans un premier temps, notre méthodologie pour construire des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison a été introduite. Le chapitre III décrit en détail la première phase de cette méthodologie qui vise à caractériser la qualité des systèmes complexes que propose une entreprise du point de vue du client (cf. III.1.). Il présente également la mise en application de cette première phase de la méthodologie pour l'entreprise MBDA (cf. III.2.). A l'issue de cette phase, la qualité des systèmes développés par l'entreprise est caractérisée, du point de vue du client, par plusieurs facteurs qualité produit. Dans le cas de l'application à l'entreprise MBDA, ce sont 11 facteurs qualité produit qui ont été identifiés, dont deux, la Conformité et la Fiabilité, ont été choisis pour être modélisés.

La Phase 2 de la méthodologie concerne la construction d'un modèle de prévision de la qualité produit à terminaison pour chaque facteur qualité produit retenu. Elle fait l'objet du présent chapitre. L'ensemble des étapes de la Phase 2 est à reconduire pour chacun des facteurs que l'entreprise souhaite analyser. L'objectif est de réaliser une évaluation objective de la qualité produit lors des principaux jalons du cycle de vie des systèmes et de déterminer, à partir de cette évaluation, la capacité à atteindre le niveau de qualité voulu à terminaison (Figure 16).

Le principe retenu est de définir un objectif qualité produit à terminaison ainsi que des objectifs qualité produit intermédiaires aux principaux jalons. L'objectif est de fournir des indicateurs concernant la qualité produit lors des revues permettant de décider de passer d'une phase du cycle de vie des systèmes à une autre (Figure 16). A chacun des jalons du cycle de vie du système, le niveau de qualité pour le facteur considéré est évalué, puis il est comparé à l'objectif qualité produit intermédiaire défini pour ce jalon. A partir de cette comparaison, le modèle permet également de prévoir quel sera le niveau de qualité à terminaison via un indicateur de degrés d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison exprimé en pourcentage. Un degré d'atteinte de 100% signifie alors que le niveau de qualité produit à terminaison atteindra probablement l'objectif fixé.

La Figure 16 présente un cycle de vie générique, avec ses principaux jalons, qui correspond aux étapes habituelles pour un système complexe. Les modèles de prévision définis pour chacun des facteurs sont utilisés en préparation du passage de ces jalons.

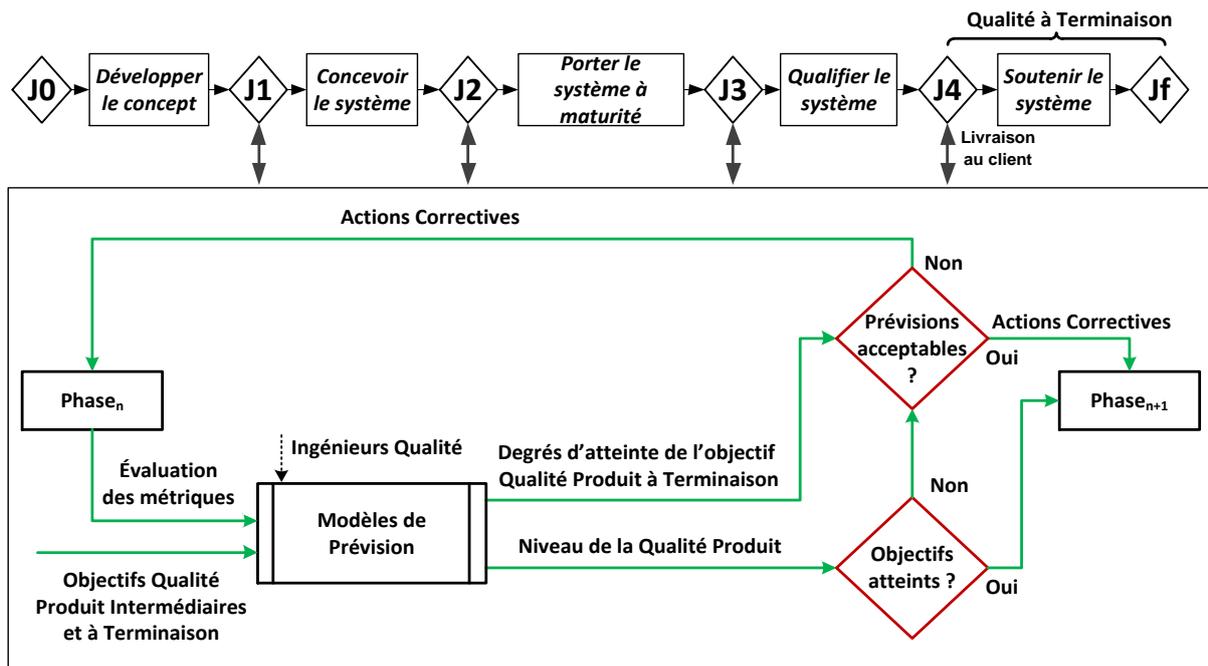


Figure 16 : Utilisation des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison aux principaux jalons

Comme expliqué en introduction du chapitre III, les recommandations sont de :

- Débuter la phase suivante sans réserve si le niveau de qualité produit atteint l'objectif qualité produit intermédiaire au jalon ;
- Débuter la phase suivante sous réserve d'entreprendre des actions correctives si l'objectif qualité produit intermédiaire est partiellement atteint et que la prévision de la qualité à terminaison est acceptable ;
- Ne pas débuter la phase suivante avant d'avoir appliqué des actions correctives si l'objectif intermédiaire est non atteint et la prévision de la qualité à terminaison non acceptable.

Ainsi, en phase 2, l'objectif visé par la méthodologie proposée est de produire des modèles de prévision permettant pour le facteur qualité qu'ils couvrent :

- **D'évaluer de façon objective la qualité produit** à chacun des jalons ;
- De prévoir la qualité produit à terminaison grâce au **degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison**.

Le principe est donc de fournir, via les modèles, une prévision du niveau relatif de qualité produit qui sera atteint à terminaison par rapport à l'objectif qualité fixé pour guider la prise de décision lors du passage d'une phase du cycle de vie à une autre.

La construction du modèle se déroule en deux temps (Figure 17) :

- Partie 1 : structuration du modèle de prévision, basée sur l'approche Facteur, Critères, Métriques (FCM) ;
- Partie 2 : paramétrage du modèle de prévision (définition des constantes du modèle, des objectifs qualité produits intermédiaires, etc.).

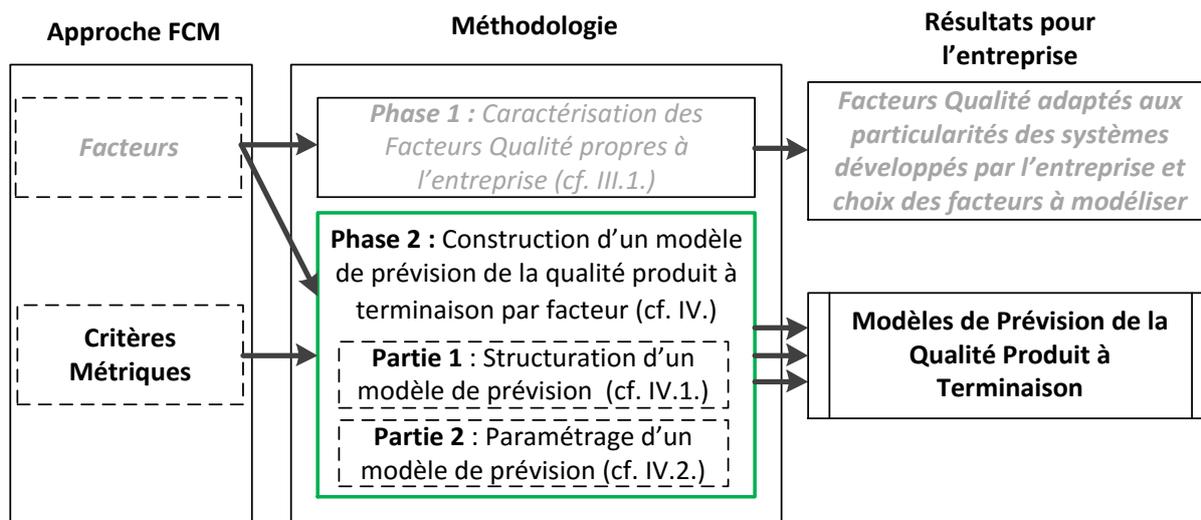


Figure 17 : Phase 2 de la méthodologie de construction du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison

La phase 2 de la méthodologie, tout comme la phase 1, s'appuie sur les méthodes et outils identifiés comme les plus adaptés à notre problématique (cf. II.4.), qui sont, pour rappel :

- La structure Facteurs, Critères, Métriques comme base des modèles de prévision de la qualité à terminaison des systèmes complexes ;
- L'éllicitation d'avis d'experts comme source d'information, afin de pouvoir travailler malgré le manque d'informations (informations absentes à cause d'un faible nombre de systèmes à étudier ou informations peu structurées et non disponibles immédiatement) ;
- Les principes d'agrégation des données issues de l'éllicitation d'avis d'experts pour paramétrer le modèle ;
- Le formalisme des réseaux bayésiens pour sa simplicité de lecture et du fait qu'il permette de construire des modèles de prévision.

La Phase 2 doit être réalisée pour chacun des facteurs qualité produit dont l'entreprise souhaite obtenir un modèle de prévision.

La Partie 1 de la Phase 2, concernant la structuration du modèle, est développée dans le paragraphe IV.1. La Partie 2 de la Phase 2, dédiée au paramétrage du modèle, est ensuite détaillée dans le paragraphe IV.2. L'ensemble de la Phase 2 de la méthodologie est ensuite illustrée sur les cas réels des facteurs Conformité et Fiabilité pour l'entreprise MBDA dans le Chapitre V.

IV.1. Partie 1 - Structuration d'un modèle de prévision

La structure du modèle de prévision est basée sur celle de l'approche FCM (Figure 18). Les facteurs constituent le premier niveau du modèle. Pour chacun des facteurs, les critères associés constituent le second niveau et les métriques le troisième niveau (cf. II.3.3.). Les facteurs qualité produit ont été déterminés lors de la première phase de la méthodologie (cf. Chapitre III). Les critères et métriques associés aux facteurs à modéliser sont définis lors de la phase 2 de la méthodologie.

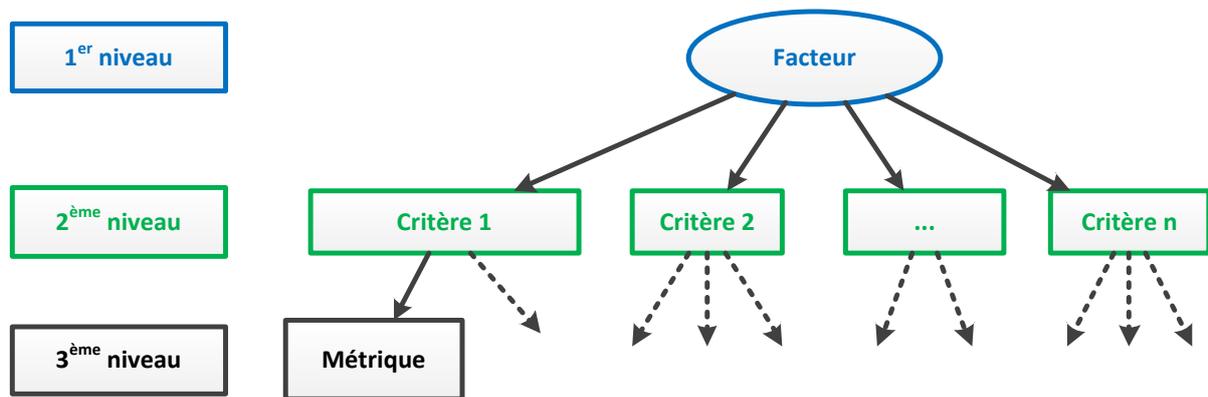


Figure 18 : Structure Facteur, Critères, Métriques (FCM)

Le code couleur utilisé dans la Figure 18 (facteurs en bleu, critères en vert et métriques en noir) est utilisé dans la suite de ce chapitre ainsi que dans le chapitre suivant (Chapitre V).

Pour ce faire, la structuration du modèle de prévision est déclinée en quatre étapes (Figure 19) :

- La première étape consiste à définir l'objectif qualité produit à terminaison pour quantifier l'indicateur du facteur à modéliser. Par rapport à cet objectif sera réalisée la prévision du degré d'atteinte de la qualité à terminaison (IV.1.1.) ;
- La deuxième étape permet de définir les critères associés au facteur qualité produit (IV.1.2.) ;
- La troisième étape permet de définir les métriques associées aux critères (IV.1.3.) ;
- La quatrième étape permet, une fois ces critères et métriques définis, de structurer le modèle (IV.1.4).

Le résultat de ces quatre étapes doit ensuite être soumis à une procédure de validation (IV.1.5.), qui peut donner lieu à la reprise partielle de certaines étapes si certains points ne sont pas satisfaisants (Figure 19).

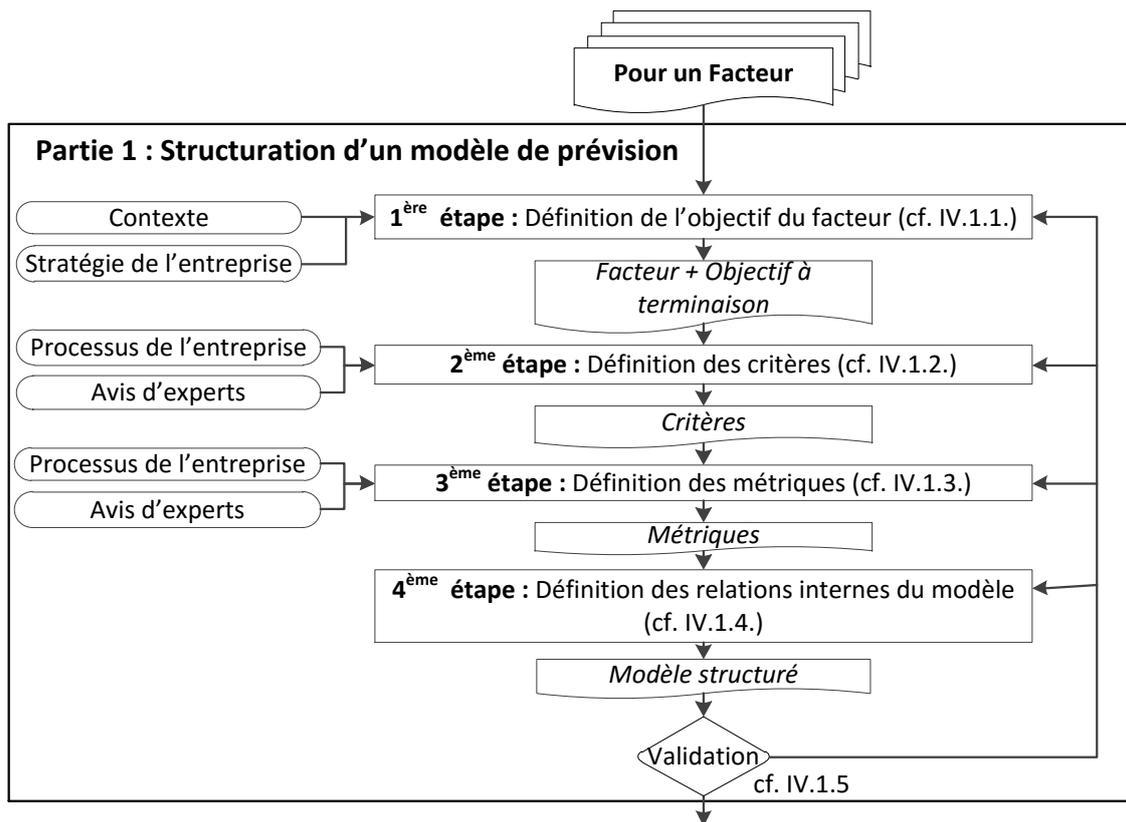


Figure 19 : Phase 2, Construction de la structure du modèle de prévision de la qualité produit à terminaison, Partie 1, Structuration d'un modèle de prévision

La méthodologie sera illustrée par le même exemple fictif que celui développé dans le chapitre précédent : la machine à café (cf. III.1.). Cet exemple ne sera pas utilisé dans la seconde partie car celle-ci s'appuie principalement sur l'élicitation d'avis d'experts. Cet exemple étant un cas de figure simplifié par rapport à un système complexe réel, et fictif, il n'existe pas de données élicitées.

IV.1.1. 1^{ère} étape : Définition de l'objectif à terminaison du facteur

Les facteurs qualité constituent le premier niveau du modèle FCM (cf. II.3.3.). Pour chacun des facteurs qualité produit choisis par l'entreprise (cf. III.1.4.), un modèle de prévision doit être construit.

Afin de déterminer si le système fini satisfera le besoin du client vis-à-vis des facteurs qualité produit, il faut pouvoir caractériser ce besoin pour chacun des facteurs. Ce besoin constitue l'objectif qualité produit à atteindre à terminaison.

Pour définir un objectif qualité produit à terminaison exploitable dans le modèle, il est nécessaire de :

- Caractériser cet objectif pour le facteur qualité considéré lorsque le système est en service (à terminaison) ;
- Définir un moyen de mesurer l'atteinte de cet objectif à terminaison ;
- Quantifier cet objectif pour traduire le niveau d'exigence du client.

La caractérisation de l'objectif qualité produit à terminaison pour un facteur est réalisé lors de la construction du modèle de prévision. Si le facteur correspond à un domaine d'expertise particulier, des

moyens de le caractériser peuvent déjà exister. Par exemple, la fiabilité d'un système est souvent caractérisée par un taux de défaillance ou une probabilité de bon fonctionnement. Si non, les pratiques de l'entreprise, telles que des indicateurs de performance déjà existants, des enquêtes auprès des utilisateurs ou autres, permettent également de définir cet objectif et le moyen de mesure associé.

Le moyen de mesure est associé à chaque facteur pour rendre compte de la manière la plus objective possible du degré d'atteinte de l'objectif fixé à terminaison.

La quantification de l'objectif est, quant à elle, déterminée au sein de l'entreprise au début d'un nouveau développement en exprimant le besoin du client (qui peut être négocié contractuellement) pour le facteur considéré. Elle peut s'appuyer sur le retour d'expérience concernant des systèmes comparables déjà en service (quel niveau est acceptable pour le client, en usage ?), sur l'expression du besoin du client ou sur toutes autres sources d'informations (modélisation, simulation, etc.).

Exemple explicatif : La machine à café

Les facteurs « utilisabilité » et « efficacité énergétique » peuvent être traités comme cela est détaillé dans le Tableau 14.

Facteur	Caractérisation	Moyen de mesure	Objectif
Utilisabilité	Temps nécessaire pour préparer le café	$\frac{\text{Temps de préparation nécessaire}}{\text{Nombre de cafés produits}}$	Temps maximum en seconde
Efficacité énergétique	Consommation électrique pour préparer le café	$\frac{\text{Energie consommée pour la préparation}}{\text{Nombre de cafés produits}}$	Consommation maximale en Wh

Tableau 14 : Exemple de définition des objectifs à terminaison pour deux des facteurs

Pour chacun des nouveaux modèles de cafetière développés, un objectif pourra ainsi être déterminé.

IV.1.2. 2^{ème} étape : Définition des critères

Le second niveau du modèle (cf. II.3.3) est constitué par les critères définissant le facteur qualité produit choisi.

Pour rappel (cf. II.3.3.) :

Un critère qualité porte sur le produit lui-même ou sur son processus de développement. Sur la base des critères qualité, il est possible de définir et d'évaluer les facteurs qualité. Les critères représentent le point de vue interne à l'entreprise.

Les critères portent sur le système lui-même ou sur ses processus de développement et de production, et conditionnent l'atteinte de l'objectif fixé pour le facteur. Il n'est pas nécessaire que les critères soient strictement indépendants. Les effets d'influence entre critères sont traités lors du paramétrage du modèle (cf. IV.2.). Pour pouvoir évaluer le niveau de qualité atteint pour un facteur donné, il est nécessaire d'identifier les principaux critères qui ont une influence sur l'obtention de ce niveau de qualité.

Exemple explicatif : La machine à café

Pour le facteur qualité « utilisabilité », des critères possibles sont :

- La qualité des interfaces homme-machine (IHM) : caractérise l'affordance (capacité de l'objet à suggérer son utilisation) et la facilité d'apprentissage de l'usage des interfaces ;
- La qualité du processus d'utilisation de la machine à café : caractérise la facilité de préparation du café (nombre limité d'actions nécessaires, d'ustensiles...).

La définition de ces critères doit donc passer par un travail similaire à celui mené pour déterminer les facteurs qualité produit (cf. III.1.). En effet, même si certains facteurs pertinents pour l'entreprise peuvent être les mêmes que ceux retenus dans de précédents modèles de la qualité, comme par exemple pour le logiciel (Chapitre II), les critères qui leur sont associés ne sont pas directement utilisables, car inadaptés aux systèmes complexes (où le logiciel n'est qu'un des composants du produit). Les critères provenant d'un autre modèle ne prennent pas en compte d'éventuelles spécificités des processus de l'entreprise (cf. II.4.). En effet, ces modèles n'ont pas été conçus pour tenir compte d'aspects tels que l'ingénierie système, la conception mécanique, électronique, etc.

Méthode d'identification et de définition des critères

Afin de déterminer les critères adaptés au contexte de l'entreprise, il est nécessaire d'étudier quels sont les éléments internes à l'entreprise répartis tout au long du cycle de vie qui ont un impact sur le niveau de qualité à terminaison du facteur.

Un état de l'art du domaine concerné peut constituer un point de départ afin d'identifier les principaux éléments qui peuvent influencer sur l'atteinte de l'objectif visé. Il faut alors déterminer comment ces éléments sont mis en œuvre au sein de l'entreprise à travers les différents processus impliqués dans le développement du système.

Il est nécessaires d'identifier les processus internes à l'entreprise qui impactent le niveau de qualité à terminaison du facteur qualité produit considéré. Ensuite, une sélection de personnes qui interviennent dans le cadre de ces processus au sein de l'entreprise est interrogée pour définir les critères associés au facteur étudié.

Sélection des personnes à interroger

Pour cela, il faut interroger individuellement les principaux acteurs du développement et de la production du système pour sélectionner les critères à retenir. L'identification des personnes à interroger doit être réalisée de façon à couvrir l'ensemble du cycle de vie des systèmes et des activités au sein de l'entreprise qui impactent le niveau de qualité du facteur étudié. Ce travail de sélection peut s'appuyer sur un tableau listant d'une part les différentes phases du cycle de vie des systèmes et d'autre part les activités concernés par le facteur qualité produit. Pour chacune des cases du tableau (voir Tableau 15) une ou plusieurs personnes doivent être sélectionnées pour être interrogées.

Phase CdV / Activité	Développer le concept	Concevoir le système	Porter le système à maturité	Qualifier le système	...
Activité 1					
Activité 2					
...					

Tableau 15 : Sélection des personnes à interroger pour définir les critères associés à un facteur qualité produit

Les personnes à interroger peuvent être des ingénieurs, des experts, des chefs de projet, des qualitatifs, etc. Leur nombre varie en fonction de la quantité et de la complexité des processus internes à l'entreprise qui impactent le niveau de qualité à terminaison, l'objectif étant d'obtenir des points de vue qui recouvrent tous les aspects de l'obtention de la qualité à terminaison. Un groupe de cinq à dix personnes peut suffire si les activités de l'entreprise et les phases du cycle de vie concernées sont couvertes (une même personne peut être concernée par plusieurs activités et, ou plusieurs phases du cycle de vie). Le choix des personnes à interroger ne peut se faire qu'en ayant une bonne connaissance des acteurs du développement des systèmes, en privilégiant l'expérience et la volonté de participer à l'élaboration du modèle.

Conduite des entretiens

Des entretiens en discussion libre sur les éléments qui influent sur l'obtention du niveau de qualité à terminaison d'une heure à une heure trente sont suffisants pour identifier et définir les critères. L'entretien doit débuter par une courte présentation ou un rappel du principe de fonctionnement du modèle de prévision en construction, des facteurs qualité produit identifiés et l'explication de l'objectif de l'entretien. S'en suit une discussion sur les éléments qui, selon la personne interrogée, impactent le niveau de qualité à terminaison du facteur étudié.

Afin de conduire au mieux cette étape, les recommandations concernant la conduite d'une démarche d'élicitation d'avis d'expert doivent être suivies (cf. II.3.2.2.). Celles-ci consistent à interroger individuellement les personnes choisies dans un premier temps. Cela évite l'autocensure (biais) et permet à des personnes ayant participé à des développements très différents de pleinement exposer leurs expériences. De plus, il est plus facile de planifier des rencontres individuelles plutôt que d'organiser des réunions regroupant l'ensemble des personnes à interroger, car les moments de disponibilité en commun sont d'autant plus rares que les participants sont nombreux.

IV.1.3. 3^{ème} étape : Définition des métriques

Les métriques sont les moyens de mesure qui permettent de caractériser les critères (cf. II.3.3.). Elles évaluent les processus et livrables internes de l'entreprise qui sont liés aux critères auxquels elles se rapportent.

Elles permettent l'obtention des données nécessaires à l'évaluation du niveau de qualité des critères à un instant précis du développement ou de la production. Lorsque le modèle de prévision de la qualité produit est utilisé pour préparer le passage d'un jalon majeur du développement du système (cf. I.3.), la valeur de chacune des métriques est calculée suivant les modalités fixées lors de leur définition pour alimenter le modèle.

Exemple explicatif : La machine à café

Dans l'exemple de la machine à café, les métriques qui peuvent être identifiées comme associées au critère « qualité des interfaces homme-machine (IHM) » (et donc au facteur utilisabilité) sont (Figure 20) :

- La note obtenue lors de l'audit d'ergonomie ;
- La note obtenue à l'issue des tests utilisateurs sur des maquettes et prototypes ;
- La pertinence des tests utilisateurs.

Ce sont en effet des éléments qui permettent d'évaluer la qualité IHM d'un produit au cours du développement.

Les métriques associées au critère de « qualité du processus d'utilisation » peuvent être par exemple :

- Le temps moyen nécessaire pour préparer le café ;
- Le nombre d'actions nécessaires de la part de l'utilisateur.

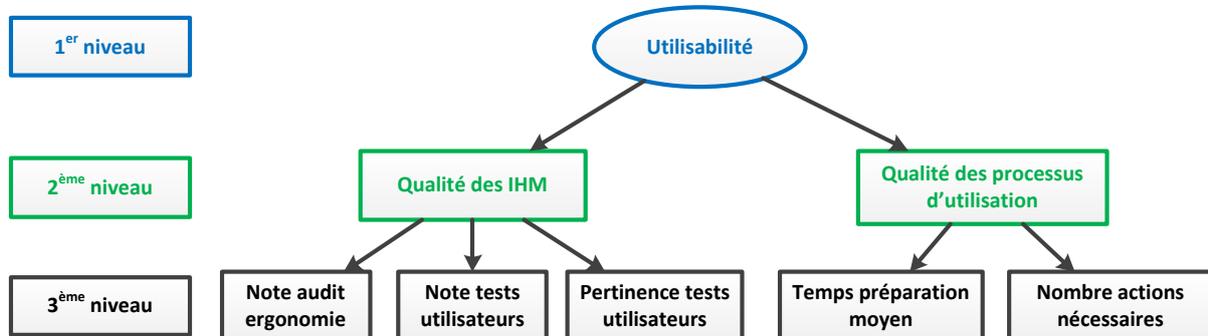


Figure 20 : Exemple de modèle Facteur, Critère, Métrique pour une machine à café

Dans le cas de systèmes complexes, identifier les métriques n'est pas aussi simple que l'est cet exemple et nécessite donc d'interroger des experts.

Les ingénieurs qualité et les experts qui travaillent sur les processus concernés par les critères, doivent être interrogés pour déterminer les métriques les plus adaptées. Les modalités d'interview sont les mêmes que pour la définition des critères, entretiens informels individuels (cf. IV.1.2.). La définition des métriques peut être basée sur l'exploitation des bases de données de l'entreprise, de la documentation associée au projet, des caractéristiques des prototypes, des résultats d'essais, des évaluations subjectives...

Pour pouvoir ensuite être traitées dans le modèle de prévision de la qualité produit à terminaison, les métriques doivent être exprimées de façon numérique, comme des pourcentages qu'il faut maximiser par exemple (c'est-à-dire que l'objectif à terminaison est de tendre vers une valeur de 100% pour les métriques). Pour faciliter la lecture et le traitement des métriques tout en évitant de potentielles erreurs, il peut être préférable de choisir une échelle numérique unique pour toutes les métriques du modèle (par exemple de 0 à 100). Avoir à traiter avec plusieurs échelles augmente les risques de confusion.

De même que pour les critères, il n'est pas nécessaire que les métriques soient strictement indépendantes. Les effets d'influence entre métriques sont traités lors du paramétrage du modèle (cf. IV.2.).

IV.1.4. 4^{ème} étape : Définition des relations internes du modèle

Une fois les critères et les métriques définis, l'ensemble du modèle peut être structuré.

L'objectif est d'avoir une représentation graphique du modèle qualité produit pour un facteur donné afin de permettre aux utilisateurs du modèle, c'est-à-dire aux ingénieurs qualité et aux responsables de projet ou à d'autres acteurs, de comprendre rapidement quels sont les composants (facteur, critères et métriques) du modèle et leurs interactions. La structure de l'approche FCM est celle qui a été retenue pour construire le modèle de prévision de la qualité produit à terminaison (cf. II.5.). La représentation graphique fait donc apparaître les relations entre les différents niveaux de la structure de type FCM (cf. II.3.3) : le facteur (1^{er} niveau), les critères (2^{ème} niveau) et les métriques (3^{ème} niveau).

Le modèle de prévision structuré s'inspire du formalisme des réseaux bayésiens (cf. II.4.).

Pour rappel, le formalisme choisi (cf. II.4.) consiste à construire un réseau où le facteur, les critères et les métriques occupent la position de nœud (Figure 21). Les arcs représentent les relations entre les métriques et les critères et entre les critères et le facteur. Cette représentation graphique est facilement lisible et compréhensible, elle permet les échanges entre experts de domaines différents.

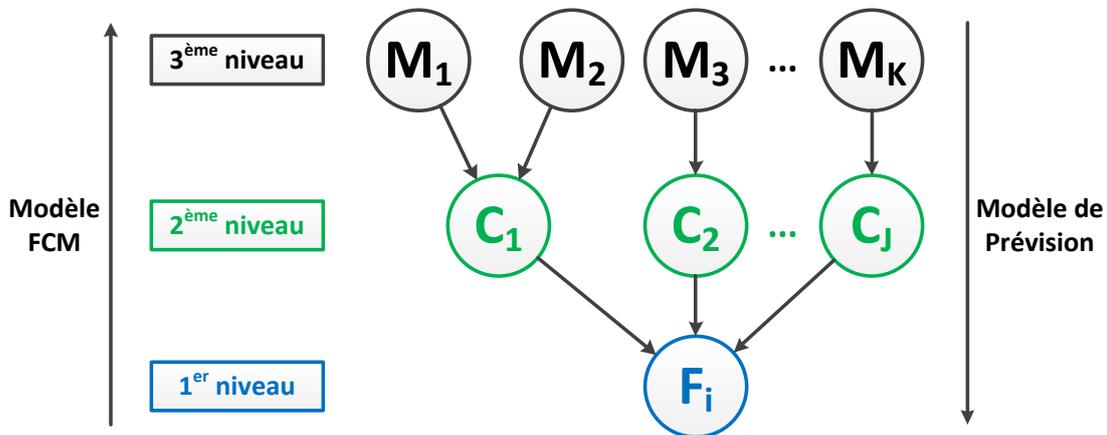


Figure 21 : Structure du modèle de prévision de la qualité en réseau

Un Facteur (F_i) est caractérisé par ses J Critères et, à chacun des critères, sont associées des Métriques (M_k). Les relations d'influence des métriques sur les critères et des critères sur le facteur sont représentées par les arcs orientés du réseau (Figure 21). De même que pour un réseau bayésien, le nœud à l'origine d'un arc est un nœud parent et le nœud à l'autre extrémité de l'arc est un nœud fils (cf. II.3.1.1.5.).

Tous les critères retenus pour un facteur donné ont, par définition, une influence sur celui-ci. Tous les critères seront donc reliés au facteur dans le réseau et toutes les métriques seront liées à au moins un critère. Ainsi le réseau est structuré avec, comme présenté en Figure 21, les métriques en entrée et le facteur considéré en sortie.

Certains critères et métriques ont, du fait de leur définition, une influence sur leurs nœuds fils qui dépend directement des valeurs des autres nœuds parents. C'est-à-dire, que deux métriques par exemple, auront un impact sur le critère qu'elles caractérisent comme plus ou moins important en fonction des valeurs de ces deux métriques considérées ensemble et non pas considérées indépendamment. Ces nœuds parents particuliers sont appelés parents modifiants (voir exemple suivant). Ils doivent être identifiés pour pouvoir ensuite être correctement traités lors du paramétrage du modèle (cf. II.3.1.1.5.).

Les deux nœuds parents modifiants sont reliés à la même variable fille. Afin de faire apparaître ce lien d'influence dans la modélisation, il est choisi de le représenter par un arc commun dans le réseau (voir illustration en Figure 22).

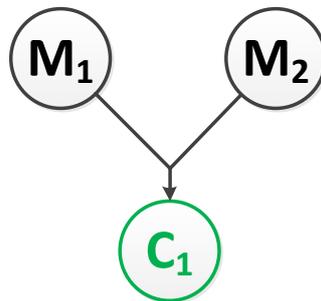


Figure 22 : Représentation de M_1 et M_2 parents modifiants de C_1 .

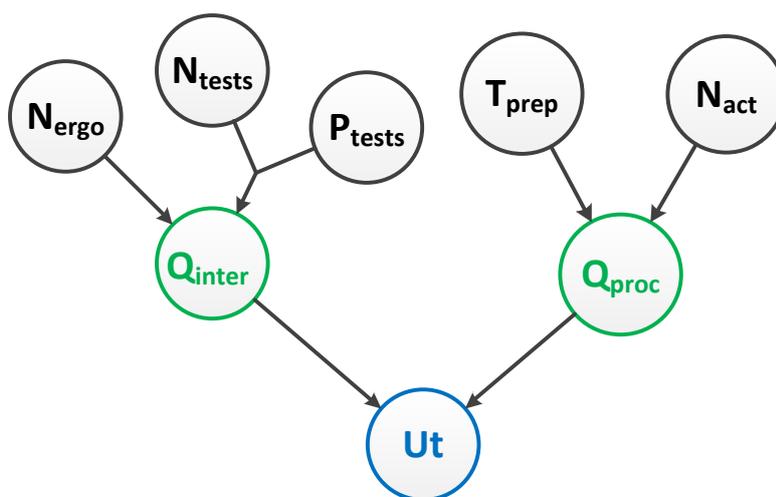
Les nœuds de type « parents modifiants » permettent de prendre en compte les influences qui existent entre plusieurs métriques ou plusieurs critères.

Exemple explicatif : La machine à café

Une des métriques pour le facteur utilisabilité, associée au critère « qualité de la conception des interfaces » Q_{inter} est la note obtenue à l'issue des tests utilisateurs N_{tests} . La validité de cette métrique dépend directement de la pertinence des tests utilisateurs réalisés (cf. Figure 23). En effet, une bonne note aura, par exemple, peu de sens si les tests réalisés ne sont pas pertinents. Au contraire, si les tests réalisés sont pertinents, alors la confiance dans la note obtenue à l'issue des tests sera élevée.

Le risque que les tests utilisateurs soient moins pertinents dans certains cas est alors prise en compte dans le modèle par la métrique parent modifiant « pertinence des tests utilisateur » P_{tests} pour différencier les cas de figure où ces tests sont correctement élaborés des autres cas. Une proposition de réseau structuré pour le facteur utilisabilité est donnée en Figure 23.

Notation :



- N_{ergo} : « Note ergonomie » ;
- N_{tests} : « Note des tests utilisateurs » ;
- P_{tests} : « Pertinence des tests utilisateurs » ;
- T_{prep} : « Temps de préparation » ;
- N_{act} : « Nombre d'actions nécessaires » ;
- Q_{inter} : « Qualité des interfaces homme-machine » ;
- Q_{proc} : « Qualité du processus de préparation » ;
- Ut : « Utilisabilité ».

Figure 23 : Exemple de réseau structuré pour le facteur utilisabilité

IV.1.5. Validation de la structure du modèle

Les différents composants (facteurs, critères et métriques) du modèle qualité produit ayant été définis et le modèle ayant été structuré, il est nécessaire de vérifier que la structure obtenue correspond à la représentation des experts interrogés afin de poursuivre le paramétrage du modèle sur une base fiable.

Pour ce faire, nous proposons de nous appuyer sur les recommandations habituellement utilisées dans le cas d'élicitation d'avis d'experts et en particulier les principes de la méthode Delphi (cf. II.3.2.2.). Ainsi, l'ensemble des personnes qui, dans un premier temps ont été questionnées individuellement pour permettre la construction du modèle doit être réuni. La liste des critères et métriques sélectionnés doit être revue et validée par les participants, les éventuelles ambiguïtés dans leurs définitions doivent être levées. Chacun des critères et métriques est présenté un à un avec sa définition.

Les relations entre métriques et critères, critères et facteur sont ensuite présentées et justifiées. Les personnes interrogées doivent donner leur avis sur la bonne traduction de leurs propos dans le modèle et doivent échanger sur les éléments du modèle où les points de vue divergents pour arriver à un consensus. La cohérence et la complétude du modèle doivent être vérifiées. Pour cela, il est demandé aux participants de se prononcer sur l'absence éventuelle d'un critère ou d'une métrique pour caractériser le facteur.

Le modèle doit ensuite éventuellement être modifié pour tenir compte des différentes remarques soulevées lors de la revue de validation. En cas de modification, une ou plusieurs étapes de la méthodologie peuvent être reprises avec les participants pour redéfinir le moyen de caractériser l'objectif à terminaison (1^{ère} étape), préciser ou rajouter un critère ou une métrique (2^{ème} et 3^{ème} étape), ou modifier les relations internes du modèle (4^{ème} étape) (voir illustration en Figure 19).

La nouvelle version du modèle doit être communiquée aux participants pour qu'ils puissent réagir en cas de problème sur les corrections apportées ou pour signaler d'éventuels oublis lors de la revue de validation.

Une fois la structure du modèle validée, la Partie 2 de la Phase 2, de paramétrage du modèle pour la prévision de la qualité produit peut débuter.

IV.2. Partie 2 - Paramétrage d'un modèle

La structure du modèle ayant été définie, il doit être paramétré pour pouvoir être utilisé, à chaque jalon, en tant que moyen d'évaluation de la qualité produit au jalon et de prévision du degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison.

Le modèle construit à l'issue de cette deuxième phase de la méthodologie est conçu pour être utilisé aux différents jalons du cycle de vie d'un système (Figure 16). En effet, comme expliqué au Chapitre I.3, le cycle de vie des systèmes est généralement divisé en plusieurs phases séparées par des jalons qui sont l'occasion d'évaluer le travail déjà réalisé pour ensuite décider de poursuivre le cycle de vie du système et le cas échéant démarrer la phase suivante.

La méthodologie décrite dans les paragraphes suivants consiste à paramétrer le modèle obtenu à l'issue de la Partie 1 (cf. IV.1.). C'est-à-dire, définir les relations mathématiques internes au modèle ainsi que les valeurs des constantes qui interviennent dans ces relations ainsi que lors de l'interprétation des résultats du modèle.

La prévision de la qualité à terminaison repose sur l'évaluation des métriques à chaque jalon. Le modèle de prévision permet de calculer, à partir des métriques, le niveau de qualité des critères et du facteur ainsi que leurs degrés d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison.

La méthodologie permettant de paramétrer le modèle repose principalement sur l'élicitation d'avis d'experts de l'entreprise (cf. Chapitre II.3). Elle se déroule en trois étapes, plus une étape de validation du modèle paramétré (Figure 24).

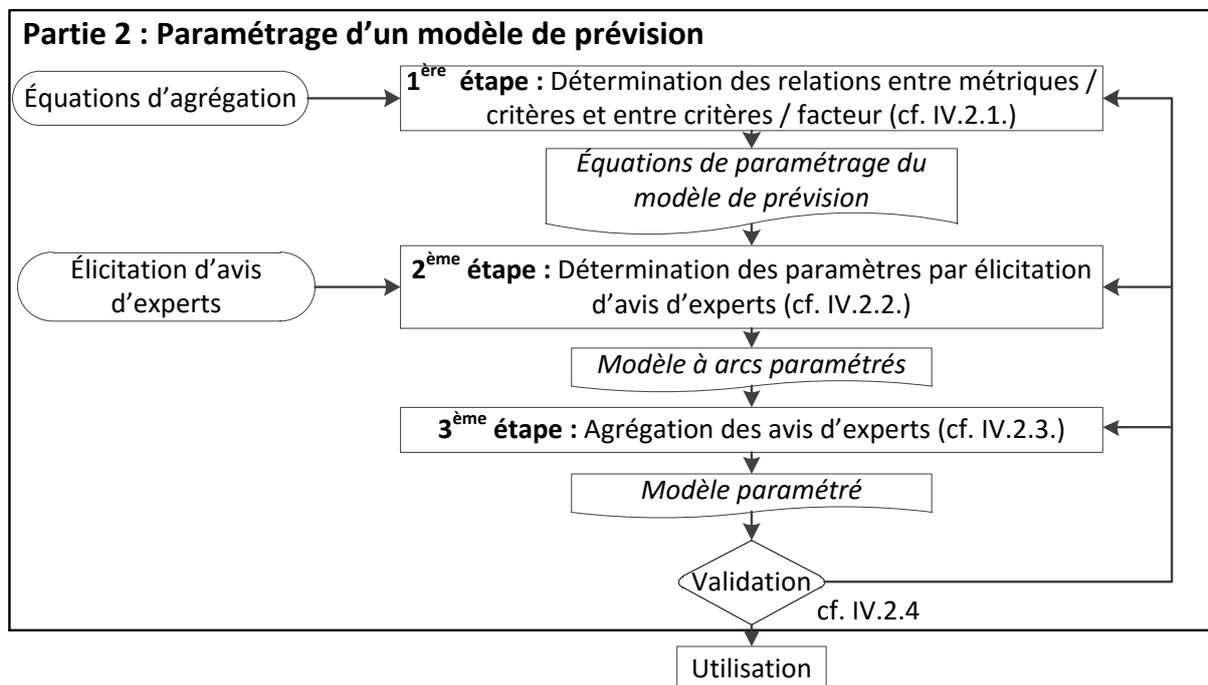


Figure 24 : Phase 2 de la méthodologie, Partie 2 - Paramétrage d'un modèle de prévision

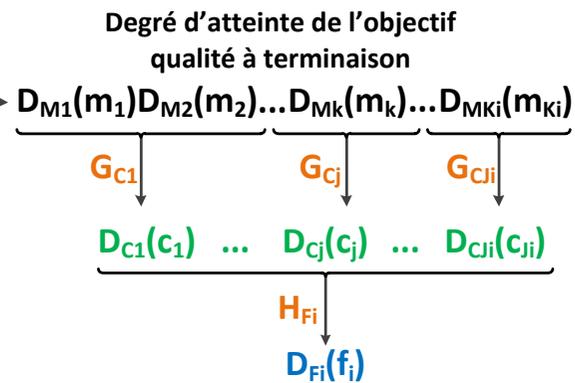
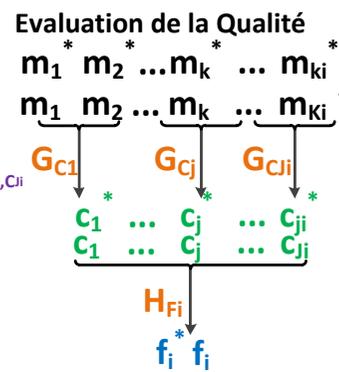
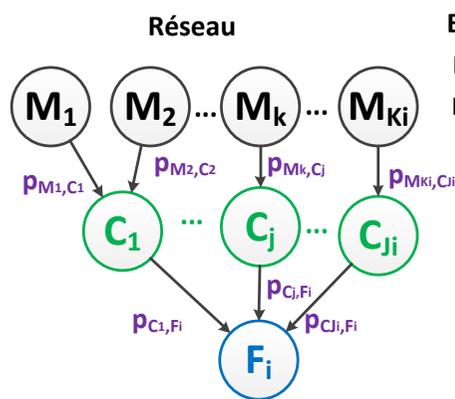
- **Première étape :** Elle consiste à déterminer quelles relations mathématiques (combinaison linéaire, produit...) vont permettre de calculer les niveaux de qualité produit des critères puis du facteur en fonction des métriques. Ce sont les fonctions nommées G_{Cj} et H_{Fi} en orange sur la Figure 25. Ainsi, à chaque jalon du cycle de vie, la valeur des métriques et les niveaux de qualité

produit des critères et du facteur peuvent être évaluées. Ces fonctions comportent des constantes définies comme les poids des arcs du modèle (p_{M_i,C_j} et p_{C_j,F_i} , en violet sur la Figure 25) qui permettent de rendre compte de l'importance relative des métriques et des critères.

- **Deuxième étape :** Une fois les relations mathématiques déterminées, il faut définir la valeur des poids des arcs (Figure 25, p_{M_i,C_j} et p_{C_j,F_i}) auxquels ces relations font appel afin de pouvoir les utiliser. Ces poids sont définis par élicitation d'avis d'experts.
Les experts sont également amenés à se prononcer sur les objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques à chacun des jalons (Figure 25). Ces objectifs intermédiaires sont définis de telle sorte que, lorsqu'ils sont atteints au cours d'un développement, cela signifie que le niveau de qualité et sa progression sont suffisants pour que l'objectif qualité produit à terminaison soit atteint. Les objectifs intermédiaires pour les critères sont ensuite calculés grâce aux fonctions G_{C_j} à partir des objectifs intermédiaires pour les métriques et ceux pour les facteurs sont calculés grâce aux fonctions H_{F_i} à partir des objectifs intermédiaires pour les critères. Il est possible de conduire l'élicitation des objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques en même temps que celle des poids des arcs afin de gagner en efficacité.
- **Troisième étape :** Elle permet d'agrèger les différentes valeurs obtenues à l'étape 2 pour en obtenir une seule qui rend compte des différents avis d'expert (Figure 25). En effet, chaque expert interrogé lors de l'élicitation donne sur la base de ses propres expériences un avis qui peut différer des autres. Il est donc nécessaire de définir comment prendre en compte ces différents avis. L'agrégation des objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques permet de définir les fonctions de calcul du degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison pour les métriques, soit les fonctions nommées D_{M_k} , sur la Figure 25. Les degrés d'atteinte des objectifs à terminaison pour les critères, $D_{C_j}(c_j)$, sont ensuite calculés à partir des fonctions permettant de calculer la valeur du critère en fonction de ses métriques G_{C_j} et des degrés d'atteinte de l'objectif à terminaison des métriques. Enfin, le degré d'atteinte de l'objectif à terminaison pour le facteur, $D_{F_i}(f_i)$, est calculé via la fonction permettant de calculer la valeur du facteur en fonction de ces critères H_{F_i} et des degrés d'atteinte de l'objectif à terminaison des critères.

Ces valeurs et fonctions sont incorporées au modèle de prévision de la qualité à terminaison. Il est alors possible d'évaluer la qualité produit à un jalon donné et de prévoir les degrés d'atteinte des objectifs qualité produit à terminaison définis lors de la Partie 1 (cf. IV.1.1.) à partir de la valeur que prennent les métriques.

La notation utilisée dans ce chapitre est définie sur la page suivante en Figure 25.



Légende	
M_k	: Métrique
m_k	: Valeur de métrique
m_k^*	: Valeur attendue pour m_k
$D_{Mk}(m_k)$: Degré d'atteinte de l'objectif qualité à terminaison
C_j	: Critère
c_j	: Valeur de critère
c_j^*	: Valeur attendue pour c_j
$D_{Cj}(c_j)$: Degré d'atteinte de l'objectif qualité à terminaison
F_i	: Facteur
f_i	: Valeur de facteur
f_i^*	: Valeur attendue pour f_i
$D_{Fi}(f_i)$: Degré d'atteinte de l'objectif qualité à terminaison
D_{Mk}, G_{Cj}, H_{Fi}	: Fonction
$p_{Mk,Cj}$: Poids de l'arc

Figure 25 : Composants d'un modèle de prévision de la qualité produit

Notations

Le code de couleur utilisé sur la Figure 25 est utilisé jusqu'à la fin du chapitre :

- En **bleu**, toutes les valeurs concernant le premier niveau du modèle, celui du Facteur ;
- En **vert**, toutes les valeurs concernant le second niveau du modèle, celui des Critères ;
- En **noir**, toutes les valeurs concernant le troisième niveau du modèle, celui des Métriques ;
- En **orange**, toutes les fonctions ;
- En **violet**, tous les poids des arcs du modèle.

- $\{e, i, j, k, l\} \in N^5$: indices
- l : Jalon $l, l \in \{1, L\}$, L nombre de jalons
- F_i : Facteur $i, i \in \{1, I\}$, I nombre de facteurs

À un jalon l donné, pour F_i :

- f_i : Valeur prise par F_i
- f_i^* : Valeur attendue pour F_i
- C_j : Critère $j, j \in \{1, J_i\}$, J_i nombre de Critères de F_i
- c_j : Valeur prise par C_j
- c_j^* : Valeur attendue pour C_j
- M_k : Métrique $k, k \in \{1, K_i\}$, K_i nombre de Métriques de F_i
- m_k : Valeur prise par M_k
- m_k^* : Valeur attendue pour M_k
- p_{M_k, C_j} : poids de l'arc entre M_k et C_j
- p_{C_j, F_i} : poids de l'arc entre C_j et F_i
- e : Expert $e, e \in \{1, E\}$, E nombre d'experts
- H_{F_i} et G_{C_j} : fonctions permettant respectivement le calcul de f_i à partir des valeurs des critères associés et le calcul de c_j à partir des valeurs des métriques associées
- $D_{M_k}, D_{C_j}, D_{F_i}$: fonctions permettant respectivement le calcul du degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison d'une métrique M_k , d'un critère C_j et d'un facteur F_i . Les fonctions D_{C_j} et D_{F_i} se définissent par composition des fonctions H_{F_i} et G_{C_j} avec les fonctions D_{M_k} :

$$D_{C_j} = G_{C_j}(D_{M_1}; D_{M_2}; \dots; D_{M_{K_i}})$$

$$D_{F_i} = H_{F_i}(D_{C_1}; D_{C_2}; \dots; D_{C_{J_i}})$$

IV.2.1.1^{ère} étape : Détermination des relations internes au modèle

Il s'agit dans cette première étape de déterminer les relations mathématiques qui permettent de lier les trois niveaux du modèle qualité produit (Figure 26). Les valeurs prises par chacun des nœuds fils du modèle (correspondants aux critères et au facteur) sont déterminées par celles prises par les nœuds parents et par l'influence de chacun de ces nœuds parents sur leur nœud fils. Lors de l'utilisation du modèle, en préparation du passage d'un jalon du cycle de vie du système, les valeurs des métriques sont calculées en fonction du mode de calcul déterminé lors de leur définition (cf. IV.1.3.) et constitue les données d'entrée du modèle. Les valeurs des critères sont calculées à partir des valeurs des métriques, et servent ensuite à calculer le niveau de qualité produit correspondant au facteur. Ces relations permettent également de calculer les objectifs qualité produit intermédiaires et les degrés d'atteinte de l'objectifs qualité produit à terminaison au niveau des critères et du facteur en fonction de leurs valeurs au niveau des métriques.

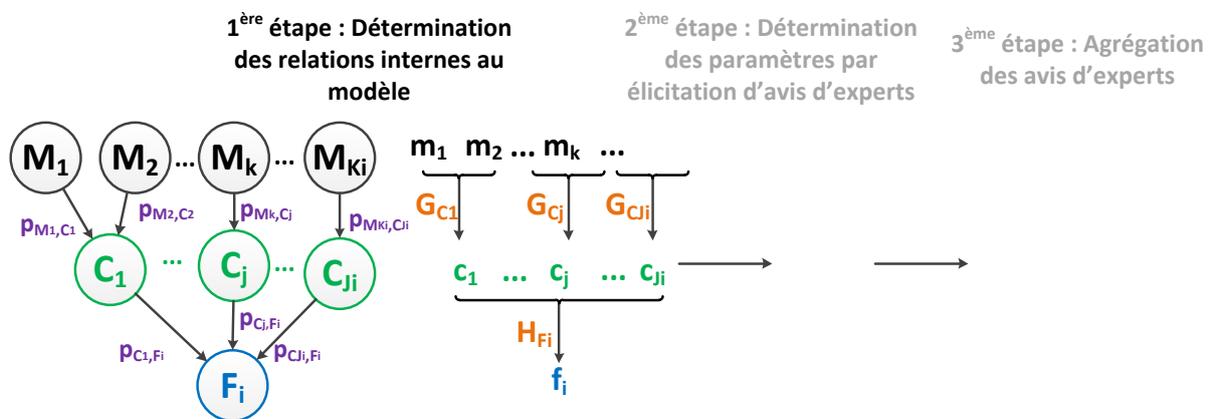


Figure 26 : Première étape du paramétrage : Définir les relations internes au modèle

Le paramétrage du modèle consiste donc à déterminer les relations entre métriques et critères et entre critères et facteur à la fois pour le niveau de qualité produit évalué à un jalon et pour le degré d'atteinte de l'objectifs qualité produit à terminaison (Figure 25). Les relations recherchées entre les métriques (M_k) et les critères (C_j) ou entre les critères (C_j) et le facteur (F_i) sont des fonctions telles que :

À un jalon l donné :

Soit F_i un facteur donné qui se caractérise par J_i critères (C_1, C_2, \dots, C_{J_i}) et K_i métriques (M_1, M_2, \dots, M_{K_i}). Ainsi, pour un critère C_j donné, la valeur prise par C_j notée c_j s'exprime de la manière suivante en fonction des valeurs prises par les K_i métriques :

$$c_j = G_{C_j}(m_1, m_2, \dots, m_{K_i}) \quad (1)$$

Avec G_{C_j} la fonction à définir.

De la même manière, la valeur prise par le facteur F_i (notée f_i) s'exprime, à partir des valeurs des J_i critères, de la manière suivante :

$$f_i = H_{F_i}(c_1, c_2, \dots, c_{J_i}) \quad (2)$$

Avec H_{F_i} la fonction à définir.

Pour chaque lien entre deux nœuds du réseau, un poids p_{M_k, C_j} (entre M_k et C_j) ou p_{C_j, F_i} (entre C_j et F_i) est nécessaire pour caractériser l'influence de chacune des variables dans l'expression des fonctions G_{C_j} et H_{F_i} . Les poids p_{M_k, C_j} et p_{C_j, F_i} sont les constantes qui permettent la définition des fonctions G_{C_j} et H_{F_i} . Ces constantes sont déterminées par l'élicitation d'avis d'experts, la méthode suivie pour leur obtention est détaillée dans les paragraphes IV.2.2.2. et IV.2.3.2.

Par convention, il a été choisi pour définir les relations internes au modèle de normaliser la somme des poids des arcs reliés au même nœud fils :

Pour F_i et un critère C_j :

$$\sum_{k=1}^{K_i} p_{M_k, C_j} = 1$$

Pour F_i :

$$\sum_{j=1}^{J_i} p_{C_j, F_i} = 1$$

Si M_k n'est pas liée à C_j , alors $p_{M_k, C_j} = 0$.

L'expression des fonctions G_{C_j} et H_{F_i} dépend de la présence ou non de parents modifiants. Les deux cas de figure sont donc détaillés ci-dessous :

- **Lorsqu'il n'y a pas de parents modifiants** (Figure 27), la fonction G_{C_j} est définie de telle sorte que :

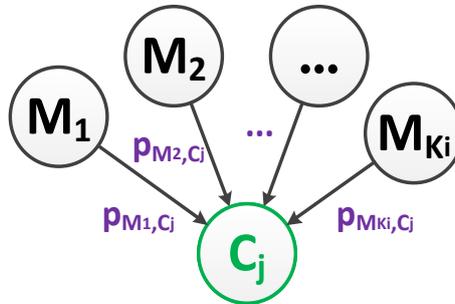


Figure 27 : Critère C_j sans parent modifiant

$$c_j = G_{C_j}(m_1, m_2, \dots, m_{K_i}) = \sum_{k=1}^{K_i} p_{M_k, C_j} \times m_k \quad (3)$$

Pour le facteur i , la relation se définit sur le même principe que pour les critères, de la manière suivante :

$$f_i = H_{F_i}(c_1, c_2, \dots, c_{J_i}) = \sum_{j=1}^{J_i} p_{C_j, F_i} \times c_j \quad (4)$$

- **Lorsqu'il y a des parents modifiants :**

Si M_1 et M_2 sont parents modifiants (Figure 28) :

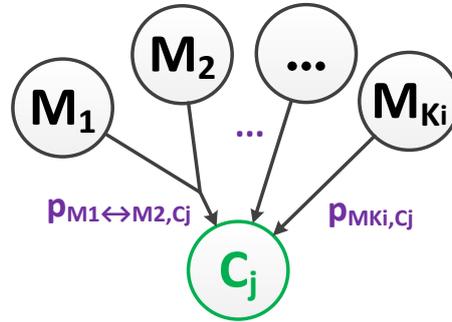


Figure 28 : Critère C_j ayant des parents modifiants

Un poids $p_{M_1 \leftrightarrow M_2, C_j}$ est défini pour le lien regroupant les deux métriques M_1 et M_2 , par convention l'équation (1) s'écrit :

$$c_j = G_{C_j}(m_1, m_2, \dots, m_{K_i}) = p_{M_1 \leftrightarrow M_2, C_j} \times m_1 \times m_2 + \dots + p_{M_{K_i}, C_j} \times m_{K_i} \quad (5)$$

De la même manière, pour le facteur i , si C_1 et C_2 sont parents modifiants, l'équation (2) s'écrit :

$$f_i = H_{F_i}(c_1, c_2, \dots, c_{j_i}) = p_{C_1 \leftrightarrow C_2, F_i} \times c_1 \times c_2 + \dots + p_{C_{j_i}, F_i} \times c_{j_i} \quad (6)$$

En fonction de la structure du modèle validée à l'issue de la première phase de la méthodologie et des parents modifiants identifiés, les équations qui permettent de relier chacun des niveaux du modèle peuvent donc être déterminées. Ces équations permettront ensuite de calculer les niveaux de qualité des critères en fonction des valeurs que prennent les métriques à chacun des jalons, et celui du facteur en fonction des critères. Elles permettent également de calculer les degrés d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison pour les critères à partir de ceux des métriques et pour le facteur à partir de ceux des critères. Pour pouvoir utiliser ces équations en pratique, il est d'abord nécessaire de déterminer les poids de chacun des arcs du modèle.

IV.2.2. 2^{ème} étape : Déterminations des valeurs des paramètres par élicitation d'avis d'experts

Une fois les relations internes au modèle définies, nous allons dans ce paragraphe déterminer les paramètres nécessaires à son utilisation (Figure 25). Ces paramètres sont :

- Les objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques (soient les groupes de valeurs $\min(m_k^*)$, m_k^* , $\max(m_k^*)$), puis pour les critères et le facteur à partir de ceux des métriques par calcul, à chaque jalon du cycle de vie des systèmes ;
- Les poids des arcs du modèle ($p_{M1,Cj}$, $p_{M2,Cj}$, ... , $p_{MKi,Cj}$), qui sont les constantes permettant d'évaluer les fonctions G_{Cj} (voir équation (1)) et H_{Fi} (voir équation (2)) puis les degrés d'atteinte des objectifs à terminaison (cf. IV.2.1.).

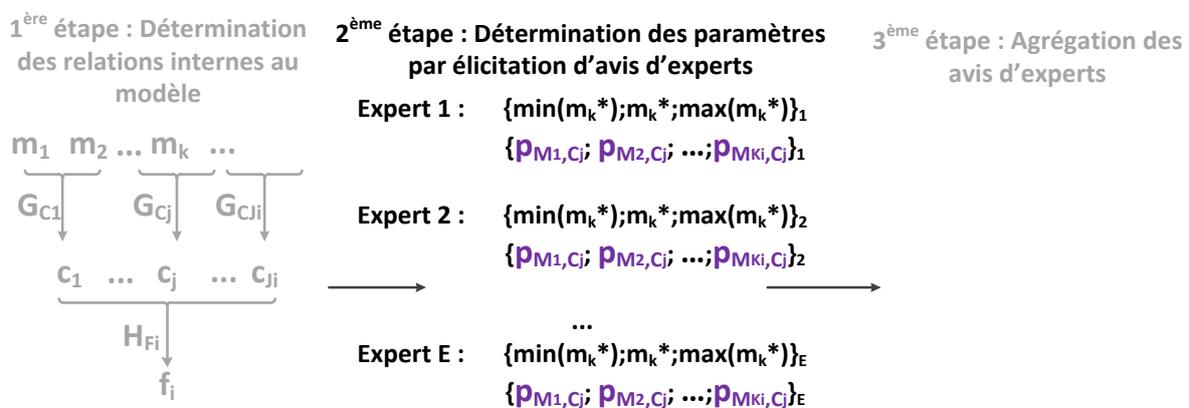


Figure 29 : Seconde étape du paramétrage : Détermination des paramètres par élicitation

Comme expliqué précédemment (cf. II.4.), la méthodologie que nous proposons repose sur l'élicitation d'avis d'experts. Pour conduire les phases d'élicitation qui suivent dans cette étape de la méthodologie, les principes exposés dans le paragraphe II.3.2.3. doivent être respectés.

L'élicitation, puis le traitement des résultats, se déroulent en trois parties :

- 1) Structure et rédaction du questionnaire, sélection des experts et préparation des entretiens ;
- 2) Elicitation des avis d'experts, qui consiste à interroger les experts sur les valeurs à déterminer ;
- 3) Traitement et agrégation des résultats, revue avec les experts pour consensus, documentation et communication du travail réalisé.

Dans ce paragraphe (cf. IV.2.2.) sont développées la structuration et l'élicitation qui permettent de recueillir les avis d'experts. À l'issue de la partie 2, les paramètres du modèle sont déterminés pour chacun des experts interrogés. Ces paramètres devront ensuite être traités et agrégés (Figure 29), suivant la méthode qui sera décrite en troisième partie (cf. IV.2.3).

Pour chacun des éléments déterminés par élicitation d'avis d'experts, les personnes sont interrogées individuellement et sans connaître les noms des autres personnes interrogées. Cela permet d'éviter d'influencer les réponses données (par le biais de conformisme par exemple, cf. II.3.2.1.1.), et de comparer les différentes réponses afin de savoir si celles-ci sont concordantes.

Remarque :

Les experts ne sont regroupés que lorsque les avis ont été agrégés afin de valider les réponses et obtenir un consensus lorsque cela est nécessaire. Les validations s'appuient sur des données empiriques issues de développement de systèmes passés lorsque cela est possible et sur des scénarios créés à cet effet pour compléter ces données.

Aucun jugement sur les compétences des experts et la pertinence de leur avis ne doit être porté avant que les résultats des élicitations ne soient analysés. Les résultats sont ensuite discutés lors de l'étape de validation (IV.2.4.).

Par soucis d'efficacité, il est possible de conduire l'élicitation des objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques (IV.2.2.1.) en même temps que celle des poids des arcs (IV.2.2.2.) en interrogeant les experts sur ces deux points.

IV.2.2.1. Déterminations des objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques à chacun des jalons

Comme expliqué en introduction de ce chapitre, le modèle construit par cette méthodologie doit permettre à la fois d'évaluer la qualité produit des systèmes aux principaux jalons du cycle de vie et de donner une prévision du degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison.

Les relations internes au modèle définies précédemment (cf. IV.2.1.) sont suffisantes pour obtenir une évaluation objective du niveau de qualité du système à un jalon donné mais ne permettent pas de juger de ce niveau de qualité ni de connaître de manière directe le futur niveau de qualité à terminaison.

La solution retenue pour permettre l'interprétation du niveau de qualité produit évalué par le modèle et sa projection à terminaison est de définir des objectifs intermédiaires de la qualité du système pour chacun des jalons du cycle de vie du système. Ainsi, le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison pour le système est évalué à chaque jalon du cycle de vie, par comparaison du niveau de qualité mesuré avec l'objectif qualité produit intermédiaire qui sert de référence au jalon considéré.

Ces objectifs fixent le niveau de qualité à atteindre au jalon pour minimiser le risque de ne pas atteindre le niveau de qualité attendu à terminaison. Toutefois, ils doivent rester réalistes et raisonnables par rapport au stade du cycle de vie concerné. Fixer un niveau de qualité très élevé pour un facteur donné en début de développement permettrait de s'assurer d'atteindre au plus vite le résultat voulu et de minimiser les incertitudes. Cependant, la qualité du système s'acquiert au fur et à mesure du développement, de la maturation de la conception et du système de production. Une exigence de qualité sur les facteurs trop importante en début de développement sera donc impossible à atteindre et rendrait le modèle inopérant car déconnecté de la réalité.

Ces objectifs intermédiaires de qualité du système sont donc déterminés par élicitation d'avis d'experts. Ainsi, le niveau de qualité calculé grâce au modèle peut être interprété à chaque jalon du cycle de vie en le comparant aux objectifs qualité produit intermédiaires fixés.

- Un niveau de qualité produit conforme ou supérieur à l'objectif signifie que le développement du système se déroule de façon nominale du point de vue de la qualité et que les moyens mis en place sont a priori suffisants pour atteindre l'objectif qualité produit à terminaison.
- A l'inverse, si le niveau de qualité mesuré grâce au modèle est inférieur à l'objectif attendu, cela signifie qu'il y a un risque de ne pas atteindre l'objectif qualité produit à terminaison si des moyens ne sont pas mis en œuvre pour corriger la situation. Ce risque est d'autant plus important

que l'écart entre l'objectif qualité produit intermédiaire et le niveau de qualité produit mesuré est grand.

Définition de l'objet de l'élicitation

L'élicitation directe de niveaux de qualité intermédiaires pour un facteur donné est complexe. En effet les facteurs sont du point de vue du client et pour un système à terminaison, en usage. Ces facteurs n'ayant, a priori, jamais été utilisés de la sorte par l'entreprise dans les phases du cycle de vie en amont à l'utilisation du système, il n'y a pas de données disponibles concernant le niveau de qualité attendu aux étapes intermédiaires. Quant aux experts choisis pour participer à l'élicitation, il est peu probable qu'ils aient l'habitude de travailler avec des facteurs correspondant à un si haut niveau d'abstraction des caractéristiques du système. Ils utilisent généralement des métriques de plus bas niveau.

Par contre, les métriques correspondent à des mesures beaucoup plus concrètes qui portent sur les processus internes à l'entreprise. Il est donc possible de réaliser l'élicitation sur la valeur que doit prendre chaque métrique à chaque jalon pour atteindre le niveau de qualité produit à terminaison voulu. Ces valeurs constituent les objectifs intermédiaires pour les métriques.

Pour rappel, seuls les objectifs qualité produit intermédiaires au niveau des métriques doivent obligatoirement faire l'objet de l'élicitation d'avis d'experts (cf. IV.2.). A partir des valeurs des objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques, il est ensuite possible de calculer les objectifs qualité produit intermédiaires pour chaque critère puis, les objectifs qualité produit intermédiaires pour le facteur grâce aux fonctions G_{C_j} (1) et H_{F_i} (2) (cf. IV.2.1., Figure 25).

Personnes à interroger

Le questionnaire doit être soumis à des personnes concernées dans leur travail au quotidien par les éléments visés par ces métriques. Un groupe de 5 à 10 personnes peut être suffisant à condition de choisir des participants ayant une expérience professionnelle suffisamment longue des développements de systèmes complexes. Ces personnes peuvent être des ingénieurs impliqués dans le développement des systèmes, des ingénieurs qualité, des experts dans les domaines techniques auxquels font appel ces métriques, etc. Il est possible d'interroger les experts ayant déjà participé à la définition des critères et des métriques lors de la Partie 1 de la Phase 2 de la méthodologie (cf. IV1.). Le Tableau 15 peut également servir pour cette étape afin de veiller à couvrir l'ensemble des activités de l'entreprise et des phases du cycle de vie concernées par ces métriques.

Construction du questionnaire

Les experts sont consultés via un questionnaire pour déterminer des intervalles d'évolution souhaitable pour chacune des métriques. Ces intervalles doivent être définis de façon à ce que **les valeurs identifiées comme souhaitables pour les métriques soient celles qui minimisent le risque de ne pas atteindre l'objectif qualité produit à terminaison.**

L'élicitation des valeurs intermédiaires des métriques se fait de façon directe car les métriques, par leur nature très concrètes, ne nécessitent pas de passer par des mécanismes de comparaison ou d'analogie propre à l'élicitation indirecte (cf. II.3.2.2.). Le fait que ces valeurs ne soient pas de nature probabiliste permet d'éviter les biais qui sont liés à ce type de variable.

Pour chacune des métriques M_k , il est demandé à chaque expert e , pour chaque jalon l , de donner une valeur ou un intervalle de valeurs pour différents cas de figure. Le questionnaire conçu pour cette tâche est construit de la manière suivante :

Au jalon l et pour chaque expert e :

- Quel(le) serait la valeur ou l'intervalle de valeurs attendu(e) de $M_k, \mathbf{m}_k^* e$?
- Quel(le) serait la valeur ou l'intervalle de valeurs attendu(e) maximum atteignable de $M_k, \mathbf{max}(\mathbf{m}_k^*)_e$?
- Quel(le) serait la valeur ou l'intervalle de valeurs attendu(e) minimum acceptable de $M_k, \mathbf{min}(\mathbf{m}_k^*)_e$?

Afin de réaliser le paramétrage, les réponses des experts doivent pouvoir être comparées entre elles et traitées ensemble. Des règles d'équivalence entre les réponses de type valeurs ponctuelles et de type intervalles de valeurs ont donc été construites pour permettre de traiter toutes les réponses sous forme de valeurs ponctuelles. Les règles sont exposées dans le Tableau 16 ci-dessous.

	Valeur retenue en cas de réponse sous forme d'une valeur ponctuelle	Valeur retenue en cas de réponse sous forme d'un intervalle de valeurs
$\mathbf{min}(\mathbf{m}_k^*)_e$	Valeur donnée par l'expert	Minimum de l'intervalle donné par l'expert
$\mathbf{m}_k^* e$	Valeur donnée par l'expert	Milieu de l'intervalle donné par l'expert
$\mathbf{max}(\mathbf{m}_k^*)_e$	Valeur donnée par l'expert	Maximum de l'intervalle donné par l'expert

Tableau 16 : Règles d'équivalence des réponses d'expert

Les métriques ayant été définies comme des mesures exprimées en pourcentage (cf. III.2.1.3.), les réponses des experts peuvent être positionnées sur une échelle présentée en Figure 30.



Figure 30 : Échelle de notation d'une réponse d'un expert e à un jalon l concernant une métrique k.

A l'issue de cette élicitation, les objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques sont connus pour chacun des experts et représentés sous forme d'intervalles associés à une valeur attendue.

Les objectifs qualité produit intermédiaires des critères et du facteur sont calculés pour un expert grâce aux fonctions G_{C_j} (1) et H_{F_i} (2) à partir des caractéristiques des objectifs qualité produit intermédiaires des métriques selon les équations (3), (4), (5) et (6) comme suit :

$$c_j^* e = G_{C_j}(m_1^* e, m_2^* e, \dots, m_{K_i}^* e)$$

$$\mathbf{min}(c_j^*)_e = G_{C_j}(\mathbf{min}(m_1^*)_e, \mathbf{min}(m_2^*)_e, \dots, \mathbf{min}(m_{K_i}^*)_e)$$

$$\mathbf{max}(c_j^*)_e = G_{C_j}(\mathbf{max}(m_1^*)_e, \mathbf{max}(m_2^*)_e, \dots, \mathbf{max}(m_{K_i}^*)_e)$$

$$f_{i_e}^* = H_{F_i} (c_{1_e}^*, c_{2_e}^*, \dots, c_{j_i_e}^*)$$

$$\min(f_{i_e}^*) = H_{F_i} (\min(c_{1_e}^*), \min(c_{2_e}^*), \dots, \min(c_{j_i_e}^*))$$

$$\max(f_{i_e}^*) = H_{F_i} (\max(c_{1_e}^*), \max(c_{2_e}^*), \dots, \max(c_{j_i_e}^*))$$

Afin de pouvoir calculer ensuite les objectifs qualité produit intermédiaires au niveau des critères et du facteur grâce aux fonctions G_{C_j} et H_{F_i} , mais aussi les niveaux de qualité produit et les degrés d'atteinte des objectifs à terminaison, il faut déterminer les poids des arcs du modèle (IV.2.2.2.) qui interviennent dans ces fonctions par la méthode exposée dans le paragraphe suivant.

IV.2.2.2. Déterminations des poids des arcs

À chacun des arcs reliant plusieurs nœuds du modèle, un poids a été associé pour caractériser l'influence des nœuds parents sur le nœud fils mais il n'a pas encore été complètement défini. Chacun de ces poids est une composante des fonctions G_{C_j} (1) et H_{F_i} (2) définies dans le paragraphe IV.2.1., qui permettent de calculer les valeurs des critères et du facteur. Cette étape de la méthodologie consiste à déterminer ces poids (Figure 25).

Le poids de ces arcs pourrait être déterminé par des analyses statistiques sur la base d'enregistrements des niveaux de qualité produit de facteurs, critères et métriques provenant de systèmes déjà développés. Cependant deux contraintes s'opposent à cette solution dans notre contexte.

Premièrement, les facteurs, critères et métriques ont été définis spécifiquement pour ce modèle de prévision de la qualité produit. Il n'est donc pas garanti qu'il soit possible de calculer leur niveau de qualité produit a posteriori avec les données disponibles au sein de l'entreprise sur de précédents projets. Deuxièmement, comme expliqué précédemment (cf. II.4.), dans le contexte des systèmes complexes produits en petite quantité, le nombre de systèmes développés ou en service est faible, ce qui rend impossible la constitution de bases de données suffisamment fournies pour réaliser des analyses statistiques ayant du sens.

La solution la plus adéquate dans le contexte du développement de systèmes complexes produits en petite quantité pour déterminer le poids des arcs du modèle est donc l'éllicitation d'avis d'experts (cf. II.4.). Un questionnaire est donc conçu et soumis aux experts ayant une expérience dans les domaines visés par ces métriques et critères qui ont été interrogés pour la définition des objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques. Le plus efficace est de conduire l'éllicitation des poids des arcs en même temps que celle des objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques (cf. IV.2.2.1.) en interrogeant les experts sur ces deux points.

La structure du questionnaire d'éllicitation d'avis des experts est à adapter en fonction de la situation. Deux cas de figure peuvent en effet se présenter :

- 1) Les cas où les experts peuvent donner directement les poids des arcs : L'éllicitation consiste à déterminer les poids à attribuer à chacun de arcs reliant les métriques à un critère donné (et chacun des critères à un facteur donné) en utilisant des outils tirés de l'aide à la décision multicritère (cf. Annexe 2). Ainsi les experts sont invités à comparer deux à deux les métriques (et critères) reliés à un même nœud fils du modèle pour définir leur hiérarchie et leur poids. Une échelle de correspondance verbale – numérique (cf. II.3.2.3.1.) permettant d'évaluer l'influence

des nœuds parents est également proposée pour les experts qui préfèrent répondre sous cette forme.

- 2) Les cas où la combinaison de métriques ou de critères est trop complexe pour que les poids des arcs soient directement évalués par les experts : Le questionnaire d'élicitation doit être construit pour interroger les experts de manière indirecte (cf. II.3.2.3.2.), sur la valeur de ces poids pour faciliter l'élicitation des connaissances des experts. Cette méthode, détaillée ci-dessous, consiste à interroger les experts sur la valeur prise par une variable fille (critère ou facteur) en fonction de la valeur des variables parents (métriques ou critères). Différents scénarios sont donc conçus grâce aux objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques données précédemment par l'expert interrogé (cf. III.2.2.2.1.).

Le principe des questions à poser aux experts dans le second cas est le suivant :

Questionnaire d'élicitation des poids des arcs, (cas sans parent modifiant, Figure 27) :

Pour un expert e, au jalon l, pour le critère j (C_j):

- 1) Si toutes les métriques sont à leur valeur attendue $m_k^*_e$, quelle est la valeur $c_j^*_e$ prise par C_j ?
- 2) $\forall k \in \{1; K_j\}$, si M_k est à la valeur minimum acceptable $\min(m_k^*)_e$, et toutes les autres métriques à leur valeur attendue, quelle est la valeur $c_j^k_e$ prise par C_j ?

Ainsi, l'expert est invité à donner :

- 1) la valeur $c_j^*_e$ prise par le critère C_j lorsque toutes les métriques sont à leur valeur attendue. Cette valeur lui servira de référence implicite pour l'aider à répondre à la question suivante.
- 2) les valeurs $c_j^k_e$ prises par le critère pour toutes les combinaisons où seulement une métrique M_k est à sa valeur minimum acceptable et les autres sont à leur valeur attendue.

Dans le cas où le critère possède des parents modifiants, par exemple M_1 et M_2 (Figure 28), ces métriques sont évaluées ensemble. Ainsi, la question 2) les concernant devient :

- 2) Si le produit $m_1 \times m_2 = \min(m_1^*_e \times \min(m_2^*)_e; \min(m_1^*)_e \times m_2^*_e)$, est à la valeur minimum acceptable, et que toutes les autres métriques sont aux valeurs attendues, quelle est la valeur $c_j^{1,2}_e$ prise par C_j ?

Les poids sont ensuite déterminés pour un expert e par la résolution du système de K_i équations tirées de la question 2) :

Pour tout entier $n \in [1; K_i]$:

$$c_j^n_e = \left[\sum_{k=1}^{K_i} (p_{M_k, C_j} \times m_k^*_e) \right] + p_{M_n, C_j} \times (\min(m_n^*)_e - m_n^*_e) \quad (7)$$

Cette équation est construite à partir de l'expression (3)

$$c_j = G_{C_j}(m_1, m_2, \dots, m_{K_i}) = \sum_{k=1}^{K_i} p_{M_k, C_j} \times m_k$$

appliquée à la valeur de $c_j^*_e$ et à laquelle est soustraite la valeur attendue de la métrique M_n ($m_n^*_e$) pour la remplacer par sa valeur minimum acceptable, $\min(m_n^*)_e$. Ainsi K_i équations sont composées en

remplaçant pour chaque entier $n \in [1; K_i]$ la métrique correspondante par sa valeur minimum acceptable. Procéder de la sorte permet de définir autant d'équations qu'il y a de poids à déterminer et donc d'obtenir un système d'équations qui puisse être résolu.

Le cas illustré ici est défini pour la détermination des poids des arcs entre métriques et critères. Le principe est exactement le même entre critères et facteur.

Exemple explicatif : poids des arcs évalués indirectement par les experts

Considérons le critère C_j et ses trois métriques M_1 , M_2 et M_3 , avec M_2 et M_3 parents modifiants, pour un jalon donné :

La relation est donc de la forme :

$$c_j = p_{M_1} \times m_1 + p_{M_2 \leftrightarrow M_3} \times m_2 \times m_3$$

Afin de déterminer les deux poids qui interviennent en tant que constantes dans cette équation, un expert « e » est interrogé, premièrement sur les objectifs intermédiaires pour les métriques (cf. IV.2.2.1) :

- Quel(le)s sont les valeurs ou intervalles de valeurs attendu(e)s de M_1 , M_2 et M_3 ?
Réponses de l'expert : $m_1^*_e = 100\%$, $m_2^*_e = 100\%$ et $m_3^*_e = 100\%$
- Quel(le)s seraient les valeurs ou les intervalles de valeurs attendu(e)s minimum acceptable de M_1 , M_2 et M_3 ?
Réponses de l'expert : $\min(m_1^*_e) = 80\%$, $\min(m_2^*_e) = 90\%$ et $\min(m_3^*_e) = 100\%$

L'expert « e » est ensuite interrogé pour déterminer les poids des arcs :

- 1) Quel(le) est la valeur ou l'intervalle de valeurs attendu(e) de C_j ?
Réponse : $c_j^*_e = 100\%$
- 2) Pour la question 2), deux combinaisons sont possibles dans cet exemple (Cas 1 et Cas 2) :
Cas 1 : Si $M_2.M_3$ est à son niveau attendu $m_2^*_e$, $m_3^*_e$ et M_1 au niveau minimum acceptable $\min(m_1^*_e)$, quelle est la valeur $c_j^{1}_e$ prise par C_j ?
Réponse de l'expert : $c_j^1_e = 86\%$

Cas 2 : Si M_1 est à son niveau attendu $m_1^*_e$ et $M_2.M_3$ au niveau minimum acceptable $\min(m_2^*_e \times \min(m_3^*_e) ; \min(m_2^*_e) \times m_3^*_e)$, quelle est la valeur $c_j^{2,3}_e$ prise par C_j ?
Réponse de l'expert : $c_j^{2,3}_e = 97\%$

Deux cas de figure sont ainsi obtenus (Tableau 17).

	M_1	$M_2 \times M_3$	C_j
Cas 1	80%	100%	86%
Cas 2	100%	90%	97%

Tableau 17 : Valeurs des métriques et critères évaluées par l'expert e

Les équations obtenues d'après (7) sont :

$$0,86 = 0,8p_{M_1e} + p_{M_2 \leftrightarrow M_3e}$$

$$0,97 = p_{M_1e} + 0,9p_{M_2 \leftrightarrow M_3e}$$

Soit après résolution du système ci-dessus on obtient les résultats ci-dessous quant aux poids des arcs :

$$p_{M_1e} = 0,7 \text{ et } p_{M_2 \leftrightarrow M_3e} = 0,3$$

Il est ensuite possible de procéder de la même façon pour déterminer le poids des arcs liant les critères et le facteur.

IV.2.3. 3^{ème} étape : Agrégation des avis d'experts

Une fois l'élicitation des avis des experts menée, les paramètres des modèles sont déterminés pour chacun des experts. Il est ensuite nécessaire d'agréger les différentes réponses pour les incorporer dans un modèle unique de prévision de la qualité produit à terminaison qui synthétise l'ensemble des avis (Figure 31).

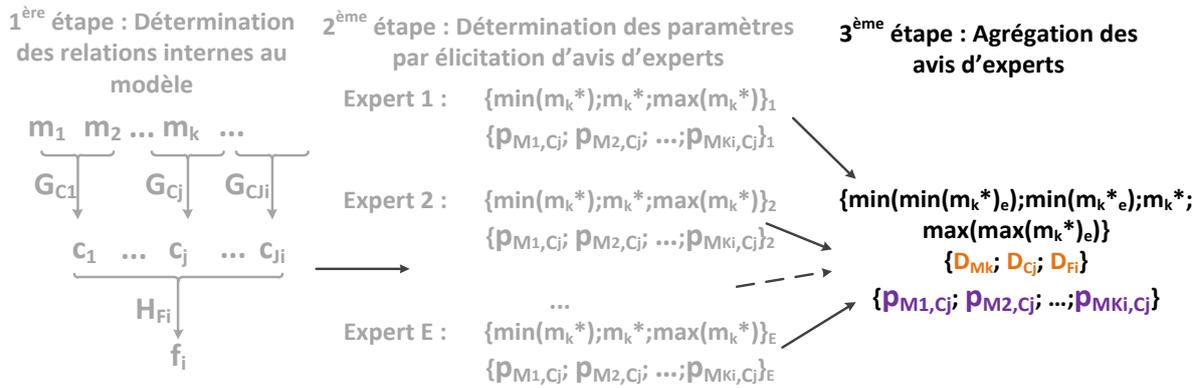


Figure 31 : Troisième étape du paramétrage : Agrégation des avis d'experts

IV.2.3.1. Agrégation des objectifs qualité produit intermédiaires

L'élicitation des valeurs pour les métriques (cf. IV.2.2.1.) a permis de définir, à chaque jalon, des valeurs attendues $m_k^*_e$, pour assurer l'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison, accompagnées d'intervalles de valeurs acceptables $[\min(m_k^*)_e; \max(m_k^*)_e]$, pour chacun des experts interrogés. Ces valeurs attendues associées à leur intervalle constituent les objectifs qualité produit intermédiaires au niveau des métriques, pour chacun des experts.

Ces valeurs obtenues à l'issue de l'étape 2 peuvent être différentes suivant les experts, chacun répondant suivant sa propre expérience. Elles doivent être agrégées afin d'obtenir un modèle unique, tenant compte de tous ces avis et utilisable tout au long du cycle de vie des systèmes (Figure 31). Ces valeurs servent donc à définir les fonctions permettant d'évaluer les degrés d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison pour les métriques (D_{Mk}), les critères (D_{Cj}) et le facteur (D_{Fi}).

Le rôle de l'agrégation est d'obtenir, pour chaque métrique du modèle des enveloppes de valeurs qui correspondent à différentes probabilités que le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison soit satisfaisant. Ces enveloppes de valeur sont déterminées par l'intersection des intervalles définis par les experts pour chaque jalon. La valeur attendue pour chaque métrique est définie par la moyenne arithmétique des réponses des experts. Par comparaison entre la valeur attendue et la valeur mesurée pour une métrique, le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison peut être déduit.

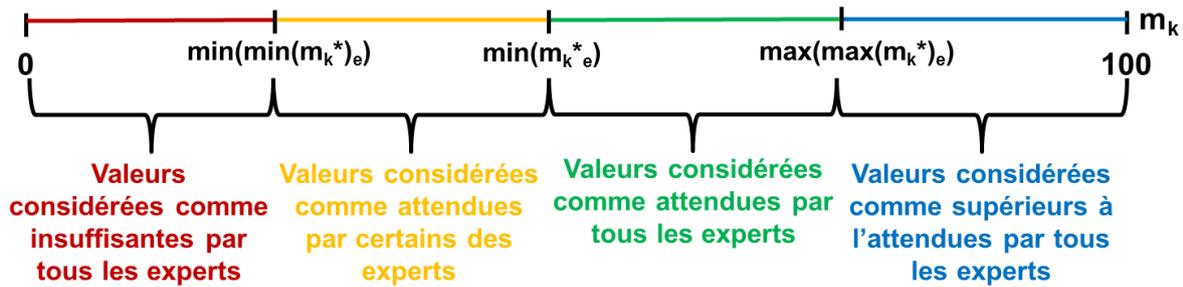


Figure 32 : Intervalles de valeurs de métriques tirés des avis d'experts

A partir des réponses des E experts, quatre intervalles sont distingués (Figure 32) :

- $m_k \in [0; \min(\min(m_k^*)_e)[$: Intervalle de valeurs considérées comme insuffisantes par tous les experts ; probabilité la plus faible d'atteindre l'objectif qualité produit à terminaison, des actions correctives et moyens supplémentaires sont indispensables pour assurer l'atteinte de l'objectif.
- $m_k \in [\min(\min(m_k^*)_e); \min(m_k^*)_e[$: Intervalle de valeurs considérées comme attendues par certains des experts ; probabilité réduite d'atteindre l'objectif qualité produit à terminaison, des actions correctives et des moyens supplémentaires sont requis pour assurer l'atteinte de l'objectif. Le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison permet de savoir dans quelle proportion la probabilité d'atteindre l'objectif est réduite ;
- $m_k \in [\min(m_k^*)_e); \max(\max(m_k^*)_e)]$: Intervalle de valeurs considérées comme attendues par tous les experts ; probabilité maximale d'atteindre l'objectif qualité produit à terminaison ;
- $m_k > \max(\max(m_k^*)_e)$: Intervalle de valeurs considérées comme supérieures à l'attendue par tous les experts ; avance sur le développement du système, probabilité maximale d'atteindre l'objectif qualité produit à terminaison. Cela peut signifier qu'il y a eu une erreur dans l'utilisation du modèle ou que le développement est exceptionnellement en avance sur les objectifs qualité produit.

Limites de l'agrégation

Le modèle pourrait simplement calculer le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit intermédiaire via le pourcentage de la valeur attendue. Un score de 100% signifierait alors que l'objectif qualité au jalon considéré est atteint, un score inférieur devrait alerter sur le risque de ne pas atteindre l'objectif qualité produit à terminaison. Cependant, exprimer le résultat seulement de la sorte ne permet pas une compréhension immédiate et intuitive de ce que sera le degré d'atteinte réel de l'objectif qualité produit à terminaison pour le critère ou le facteur considéré (Figure 33).

Pour un même pourcentage, le résultat pourra être considéré suivant la métrique, le critère, le facteur ou le jalon considéré, comme acceptable par :

- Tous les experts interrogés, alors l'objectif qualité produit à terminaison sera probablement atteint ;
- Une partie seulement des experts, alors l'objectif qualité produit à terminaison risque de ne pas être atteint ;
- Aucun expert interrogé, alors l'objectif qualité produit à terminaison ne sera probablement pas atteint, si aucune action corrective n'est entreprise ou moyens supplémentaires mis en place.

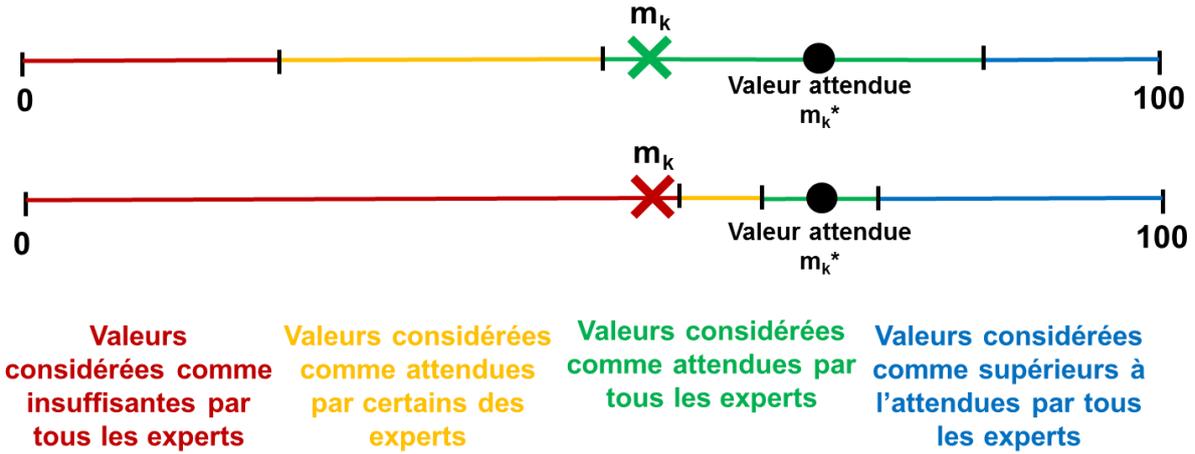


Figure 33 : Deux interprétations possibles pour une valeur de métrique atteignant 80% de l'objectif qualité produit intermédiaire (jalons ou métriques différents)

De ce fait, une métrique, un critère ou un facteur ayant atteint 80% de l'objectif qualité produit intermédiaire au jalon considéré, par exemple, pourra signifier, suivant les cas, que l'objectif qualité produit à terminaison sera très probablement atteint comme c'est le cas sur la première ligne de la Figure 33 (valeur considérée comme attendue par tous les experts) ou, au contraire que cet objectif ne peut être atteint en l'état, comme illustré sur la deuxième ligne de la Figure 33 (valeur considérée comme insuffisante par tous les experts). Ce comportement contre intuitif (deux interprétations différentes pour des pourcentages identiques) risquerait de perturber l'interprétation du modèle en induisant en erreur les utilisateurs. L'agrégation des avis d'experts serait également difficile avec un tel indicateur, les intervalles issus de l'éllicitation d'avis d'experts ne se superposent pas toujours. De plus, il n'est pas possible de savoir par cette seule indication dans quelles proportions la probabilité d'atteindre l'objectif à terminaison est réduite ou non.

Degrés d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison

Pour remédier aux biais exposés dans le paragraphe précédent, nous proposons de calculer le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit terminaison à chaque jalon par une fonction affine par morceaux (D_{M_k} pour une métrique M_k , D_{C_j} pour un critère C_j et D_{F_i} pour un facteur F_i) qui permette de faire la synthèse des différents avis des experts sur une échelle commune.

Opter pour une fonction affine par morceaux permet d'éviter les effets de seuil de la représentation discrète issue de l'agrégation des avis d'experts. Certains intervalles peuvent en effet être relativement grands et l'expression de la différence de degrés d'atteinte de l'objectif d'une extrémité à l'autre à l'intérieur d'un même intervalle n'est pas possible avec des fonctions discrètes. Ces fonctions d'évaluation permettent donc de définir divers degrés d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison pour une métrique dans chaque intervalle et de façon continue sur l'ensemble des valeurs possibles d'une manière fidèle à la représentation qu'en ont les experts et de façon intuitive à comprendre.

La convention que nous proposons pour ces fonctions est, dans le cas des réponses de E experts, la suivante :

$$\forall m_k \in [0; \min(m_k^*)_e], D_{M_k}(m_k)_e = \frac{m_k}{\min(m_k^*)_e} \times 50\%$$

$$\forall m_k \in [\min(m_k^*)_e; m_k^*_e], D_{M_k}(m_k)_e = \left(\frac{m_k - \min(m_k^*)_e}{m_k^*_e - \min(m_k^*)_e} + 1 \right) \times 50\% \quad (8)$$

$$\forall m_k \in [m_k^*{}_e; \max(m_k^*)_e], D_{M_k}(m_k)_e = \frac{m_k - m_k^*{}_e}{\max(m_k^*)_e - m_k^*{}_e} \times 50\% + 100\%$$

$$\forall m_k \in [\max(m_k^*)_e; 100], D_{M_k}(m_k)_e = 150\%$$

Le choix de cette convention est expliqué et illustré ci-dessous.

Les réponses des experts sont ainsi utilisées pour construire les fonctions de degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison pour les métriques (D_{M_k}). La Figure 34 et la Figure 35 illustrent l'utilisation de cette convention pour deux experts (expert1 et expert 2). Les réponses de l'expert 1 sont traduites dans la Figure 34, où figurent la valeur qu'il a jugée comme minimale acceptable $\min(m_k^*)_1$, celle qu'il a jugée comme attendue $m_k^*_1$ et la valeur qu'il a jugé maximale $\max(m_k^*)_1$. Elles permettent de définir la fonction affine par morceau $D_{M_{k1}}$ donnant le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison.

Expert 1 :

Degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison en fonction des valeurs de la métrique M_k (expert 1)

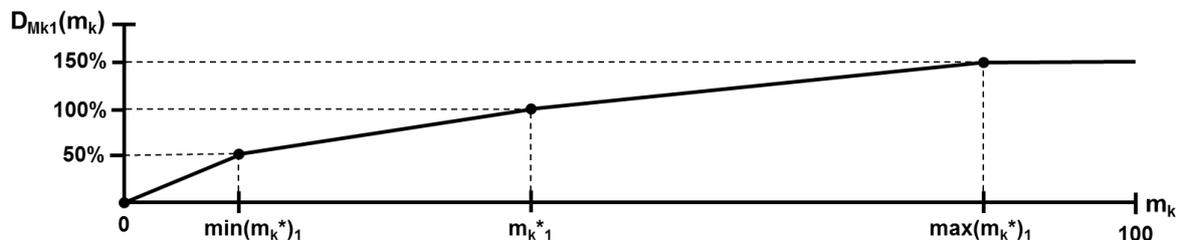


Figure 34 : Degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison d'après les réponses de l'expert 1.

De même pour l'expert 2 sur la Figure 35.

Expert 2 :

Degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison en fonction des valeurs de la métrique M_k (expert 2)

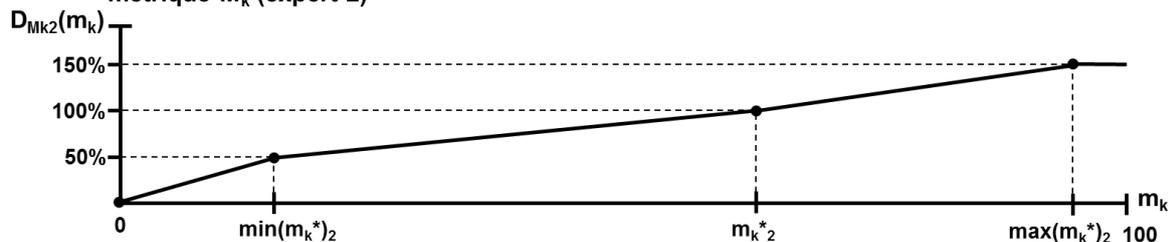


Figure 35 : Degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison d'après les réponses de l'expert 2.

Cette définition des fonctions D_{M_k} convient à la représentation de l'avis des experts dans la plupart des contextes de façon intuitive.

En effet, elle correspond à l'interprétation suivante :

- Si $m_k=0\%$, alors $D_{M_k}(0\%) = 0\%$, c'est-à-dire que si le niveau de la métrique est nulle, sans travail supplémentaire, il en sera de même à terminaison ;
- Si la métrique M_k est au niveau minimum acceptable ($m_k = \min(m_k^*)$), alors $D_{M_k}(\min(m_k^*)) = 50\%$, c'est-à-dire qu'une partie raisonnable du travail a été réalisé mais des

actions doivent impérativement être menées pour atteindre l'objectif à terminaison (50% correspond à la moyenne sur une échelle de 0% à 100%) ;

- Si la métrique M_k est au niveau attendu à ce stade du cycle de vie, ($m_k = m_k^*$), alors $D_{M_k}(m_k^*) = 100\%$, il est très probable que l'objectif à terminaison soit atteint sans action particulière à mener.
- Si la métrique M_k est au niveau maximal possible à ce stade du cycle de vie ($m_k = \max(m_k^*)$), alors $D_{M_k}(\max(m_k^*)) = 150\%$, le développement est en avance par rapport aux objectifs intermédiaires. La valeur de 150% permet de rendre compte de ce dépassement tout en limitant son influence au même poids que les valeurs au minimum acceptable (-50% par rapport à l'attendu pour le minimum et +50% par rapport à l'attendu pour le maximum). En fin de développement (jalon J4), $m_k^* = 100\%$ (par définition des métriques), le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison ne peut donc pas dépasser les 100% en pratique ;
- Lorsque m_k est entre chacune de ces bornes, $D_{M_k}(m_k)$ est calculé par la fonction affine passant par les deux bornes les plus proches (équation (8)).

Remarque : Il est possible d'opter pour d'autres conventions pour définir ces fonctions d'évaluation du degré d'atteinte de l'objectif à terminaison. Par exemple, si la valeur $\min(m_k^*)$ est considérée comme trop risquée pour l'atteinte de l'objectif qualité dans un contexte particulier, alors le degré d'atteinte de l'objectif correspondant peut être diminué. Au contraire, dans un contexte particulièrement peu contraint, il pourrait être considéré que la valeur $\min(m_k^*)$ offre des probabilités d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison suffisante et le degré d'atteinte de l'objectif correspondant peut alors être augmenté au-delà de 50%.

Si le contexte le justifie par ses particularités (incertitude accrue ou risque particulièrement élevé en cas d'échec par exemple), les experts peuvent donc être interrogés sur une échelle différente de celle proposée ici. Mais dans ce cas, il faut s'assurer lors de l'élicitation, que les experts interrogés comprennent bien à quel degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison correspondent les valeurs qu'ils doivent évaluer (minimum acceptable, valeur attendue, valeur maximale).

Agrégation des réponses des experts

Procéder de la sorte permet de réaliser l'agrégation des avis d'expert pour leur intégration dans le modèle de prévision, malgré quelques divergences dans les réponses issues de l'élicitation. Grâce à ces fonctions d'évaluation du degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison, une agrégation cohérente des avis des experts est possible. Cette agrégation se fait par la moyenne arithmétique des valeurs données par les fonctions D_{M_k} de chacun des experts.

$$\forall m_k \in [0; 100], D_{M_k}(m_k) = \frac{1}{E} \times \sum_{e=1}^E D_{M_k}(m_k)_e \quad (8 \text{ bis})$$

Pour reprendre l'exemple précédent, les fonctions obtenues grâce aux réponses des experts 1 et 2 sont fusionnées par la moyenne arithmétique des valeurs des fonctions D_{M_k} , telle que représentée sur la Figure 36.

Agrégation des réponses des experts 1 et 2 :

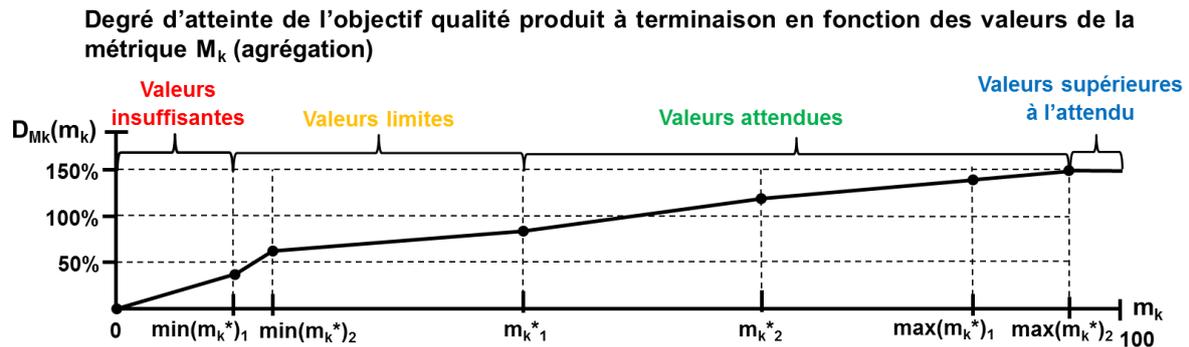


Figure 36 : Agrégation des réponses des experts 1 et 2

Ainsi, ces fonctions, définies pour chaque métrique à chaque jalon, permettent de donner une correspondance entre les valeurs des métriques, critères et facteur et le degré de satisfaction de l'objectif qualité produit à terminaison exprimé en pourcentage.

Au niveau des critères et du facteur, les degrés d'atteinte des objectifs qualité produit à terminaison sont calculés grâce aux fonctions G_{C_j} et H_{F_i} (cf. IV.2.1. équations (1) et (2)). Les équations (9) et (10) permettent de calculer les degrés d'atteinte des objectifs intermédiaires des critères et du facteur à partir respectivement des degrés d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison des métriques et des critères.

$$D_{C_j}(c_j) = G_{C_j}(D_{M_1}(m_1), D_{M_2}(m_2), \dots, D_{M_{K_i}}(m_{K_i})) \quad (9)$$

$$D_{F_i}(f_i) = H_{F_i}(D_{c_1}(c_1), D_{c_2}(c_2), \dots, D_{c_{J_i}}(c_{J_i})) \quad (10)$$

Une fonction d'évaluation du degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison D_{M_k} est donc à définir par cette méthodologie pour chaque métrique à chacun des jalons. Ainsi, la mesure de chaque métrique peut être située rapidement, à un jalon donné, dans un intervalle qui définit si cette valeur est suffisante pour tous les experts, suffisante pour certains experts ou insuffisante pour satisfaire l'objectif qualité produit à terminaison.

IV.2.3.2. Agrégation des poids des arcs

Concernant les poids des arcs, l'objectif est d'obtenir un poids unique pour chaque arc, à chaque jalon, qui sera ensuite intégré au modèle de prévision (Figure 25). En effet, les experts ayant évalué les poids des arcs suivant leur expérience, leurs réponses ne sont pas toutes exactement les mêmes. L'agrégation permet de prendre en compte chacun des avis au sein du même modèle de prévision.

Pour ce faire, différents cas de figure doivent être distingués :

- 1) Si la hiérarchie des poids des arcs élicités est la même pour chacun des experts interrogés (même ordre d'importance des nœuds parents), il y a alors consensus sur l'influence des nœuds parents. L'agrégation des réponses des différents experts se fait dans ce cas par la moyenne arithmétique des réponses des experts.

- 2) Lorsqu'un ou plusieurs experts ont des avis très divergents des réponses des autres experts, il est nécessaire de s'interroger sur l'origine de ces différences. Ces avis sont reconnaissables lorsqu'ils sont incompatibles avec les intervalles définis par les autres experts (par exemple une valeur jugée attendue alors qu'elle est insuffisante pour tous les autres experts). Ces différences peuvent être dues à une mauvaise interprétation de la part de l'expert interrogé ou à une erreur de transcription, dans ce cas, les valeurs doivent être corrigées ou écartées du calcul de la moyenne. Si ces écarts ne sont pas dus à une erreur, il faut rechercher le consensus entre experts, lors de la phase de validation (IV.2.4.), avant de calculer la moyenne des réponses.
- 3) Enfin, si l'ensemble des réponses des experts est très dispersé, il faut s'interroger sur la pertinence des nœuds parents. Les principaux éléments influents ont-ils tous été pris en compte ? Les parents modifiants ont-ils tous été correctement identifiés ? Les experts ont-ils les connaissances suffisantes pour répondre aux questions qui leurs sont posées ? Le périmètre du modèle est-il suffisamment restreint ? C'est la Partie 1 de la Phase 2 de la méthodologie (cf. IV.1.) qui est alors remise en cause. La définition des critères (IV.1.2.) et des métriques (IV.1.3) peuvent alors nécessiter des corrections. La partie 2 (cf. IV.2.), concernant le paramétrage devra être reconduite sur les éléments modifiés dans ce cas.

Lorsque les cas de figure 2) ou 3) se présentent, le modèle doit être corrigé et l'élicitation conduite à nouveau sur la partie du modèle modifiée, si besoin.

Utiliser une moyenne arithmétique pour agréger les avis d'experts est une méthode accessible et facilement compréhensible par les différents utilisateurs du modèle de prévision, ce qui répond aux exigences pour l'emploi de cette méthode. La revue et les évolutions du modèle s'en trouvent facilitées. C'est pour cela que cette façon de faire est privilégiée dans notre méthodologie. Cependant, si le contexte permet d'incorporer des informations sur la pertinence des réponses des experts ou que le consensus est impossible, les outils introduits au paragraphe II.3.2.4. peuvent être utilisés (autres types de moyennes, agrégation par centiles, règles de Dempster).

Les poids de chacun des arcs du modèle de prévision peuvent ainsi être définis et utilisés pour déterminer les équations (3), (4), (5) et (6) permettant de calculer la valeur de chacun des critères et du facteur du modèle en fonction des métriques.

IV.2.4. Validation du modèle de prévision

Une fois le modèle paramétré, l'ensemble du modèle doit être revu pour en valider les éléments issus de l'élicitation. Plusieurs éléments doivent être validés :

- Les poids des arcs du modèle de prévision ;
- Les objectifs qualité produit intermédiaires déterminés pour chacun des jalons du cycle de vie à tous les niveaux ;
- La cohérence des prévisions du modèle.

Pour valider ces trois éléments, il faut réunir l'ensemble des personnes ayant participé à l'élicitation pour valider le modèle.

Un travail préparatoire doit être réalisé concernant les objectifs qualité produit intermédiaires. Le principe est de commencer par identifier les réponses qui sont incompatibles entre elles ainsi que les cas où il n'y a pas de consensus entre les réponses des personnes interrogées, comme cela a été fait pour les poids des arcs (cf. IV.2.3.2.).

Dans le cas où seules quelques réponses ne sont pas en accord avec celles des autres experts interrogés, il faut tout d'abord voir directement avec les répondants s'il y a une erreur d'interprétation ou si l'expérience à laquelle se réfère l'expert pour répondre est bien dans le périmètre d'application du modèle.

Une fois les participants réunis, la revue doit débiter sur le rappel du principe de fonctionnement du modèle ainsi que de sa structure. Il est nécessaire que l'ensemble des participants ait bien en tête la dernière version du modèle de prévision. Puis les différents points sont passés en revue pour validation :

- **Poids des arcs** : les poids des arcs devant faire l'objet d'un consensus sont discutés (cf. IV.2.3.2., cas de figure 2). Dans le cas inverse, les valeurs des poids des arcs resteront celles calculées à partir des réponses à l'élicitation.
- **Objectifs qualité produit intermédiaires** : chacun des objectifs intermédiaires est présenté et discuté si le besoin s'en fait sentir. Des corrections peuvent alors être apportées à ces objectifs en fonction des remarques soulevées par les participants à la revue. L'étape 3, agrégation des avis d'expert (cf. IV.2.3.1.), peut être reprise si certains avis doivent être écartés ou corrigés.
- **Cohérence des prévisions du modèle** : pour valider la cohérence des prévisions du modèle, différents scénarios de développement doivent être conçus pour tester différentes combinaisons de métriques en entrée du modèle. Au moins quatre scénarios doivent être testés :
 - a) un où toutes les métriques sont à leur valeur attendue ;
 - b) un autre où les métriques sont toutes inférieures à leur valeur attendue ;
 - c) au moins deux autres avec des niveaux variables suivant les métriques.

Si cela est possible, il est également souhaitable de tester le modèle par des valeurs de métriques provenant de vrais développements afin de comparer les résultats donnés par le modèle avec le déroulement réel de ces développements. Cette étape permet de s'assurer que le modèle produit des résultats conformes aux conclusions d'une analyse à posteriori de développements de systèmes complexes.

Pour chacun des scénarios, les résultats donnés par le modèle sont analysés et discutés avec les participants à la revue. En cas d'incohérence dans les résultats, les éléments en cause (poids d'arc, objectif qualité produit intermédiaire ou règle de calcul) doivent être identifiés et corrigés en reprenant, au besoin, les étapes 1, 2 ou 3 (Figure 24).

IV.3. Conclusion

La seconde phase de la méthodologie, développée dans ce chapitre (Figure 37), permet de construire un modèle de prévision de la qualité produit à terminaison pour chacun des facteurs choisis pour être modélisés à l'issue de la première phase de la méthodologie (cf. III.1.4.). Cette méthodologie s'appuie en grande partie sur l'éllicitation d'avis d'experts au sein de l'entreprise, ce qui permet de construire les modèles de prévision y compris dans un contexte où les données manquent ou sont difficilement exploitables. Ces modèles sont utilisables du début du développement jusqu'à la livraison du système au client. Ils sont utilisés aux principaux jalons du cycle de vie des systèmes afin d'évaluer et de prévoir le degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison. Ces évaluations et prévisions de la qualité produit permettent d'identifier au plus tôt un problème qualité dans le développement d'un nouveau système, d'aider à en identifier la cause (en remontant aux métriques concernées) et permet donc de planifier des actions correctives afin d'atteindre les objectifs qualité produit à terminaison.

Cette seconde phase se déroule en deux parties (Figure 37) :

- La structuration du modèle ;
- Le paramétrage du modèle.

La structure choisie est celle du modèle FCM (cf. II.3.3), qui est alors adaptée aux systèmes complexes par la définition de facteurs (cf. III.1.), de critères et de métriques (cf. IV.1.) et correspond au contexte de développement de ces systèmes et au besoin du client.

Le paramétrage du modèle consiste à caractériser les relations entre métriques et critères (G_{Cj}), critères et facteur (H_{Fi}), les poids des arcs qui interviennent dans ces relations, les objectifs qualité produit intermédiaires et les fonctions de degré d'atteinte de l'objectif qualité produit à terminaison (D_{Mk}, D_{Cj}, D_{Fi}). Ce travail se déroule en trois étapes (Figure 37) :

- La définition des relations internes au modèle ;
- L'éllicitation d'avis d'experts pour déterminer les objectifs qualité produit intermédiaires pour les métriques et les poids des arcs ;
- L'agrégation des réponses des experts et la définition des fonctions permettant le calcul des degrés d'atteinte des objectifs qualité produit à terminaison.

Les modèles construits via cette méthodologie permettent de répondre à la difficulté soulevée (cf. II.3.4.) relativement au management de la qualité produit pour les systèmes complexes. En effet, ces modèles permettent une vue synthétique et valable tout au long du cycle de vie des systèmes, de la qualité produit à terminaison.

Ils aident également à identifier les sources de futurs problèmes qualité en orientant la recherche vers les processus en cause. Ces problèmes peuvent ainsi être corrigés au plus tôt afin de livrer un système qui satisfera le client. L'exploitation de ces modèles sera détaillée dans le chapitre V à travers deux facteurs importants pour l'entreprise MBDA.

L'utilisation de l'éllicitation d'avis d'experts pour paramétrer les modèles permet de répondre au manque de données exploitables au sein d'un modèle de prévision, dans le contexte du développement de systèmes complexes. Cependant, procéder ainsi demande de disposer de suffisamment d'experts au sein de l'entreprise sur les différents sujets à traiter au sein du modèle. La conduite de toutes les étapes de la méthodologie (Figure 37) nécessite également de mobiliser de nombreuses personnes le temps de plusieurs entretiens individuels pour l'éllicitation et de réunion de groupe pour les étapes de validation.

Il est également indispensable de préparer l'élicitation d'avis d'experts avec rigueur (cf. II.3.2.) et de bien s'assurer que les paramètres évalués ainsi que leur utilisation soient bien compris afin que les réponses obtenues soient pertinentes.

La mise en œuvre de cette méthodologie est développée dans le chapitre suivant sur deux cas concrets, la prévision de la conformité du système au besoin exprimé par le client et la qualité des prévisions de fiabilité. Pour rappel, ce sont les deux facteurs choisis pour être traités en priorité à la fin de la Phase 1 de la méthodologie appliquée dans l'entreprise MBDA (cf. III.2.4).

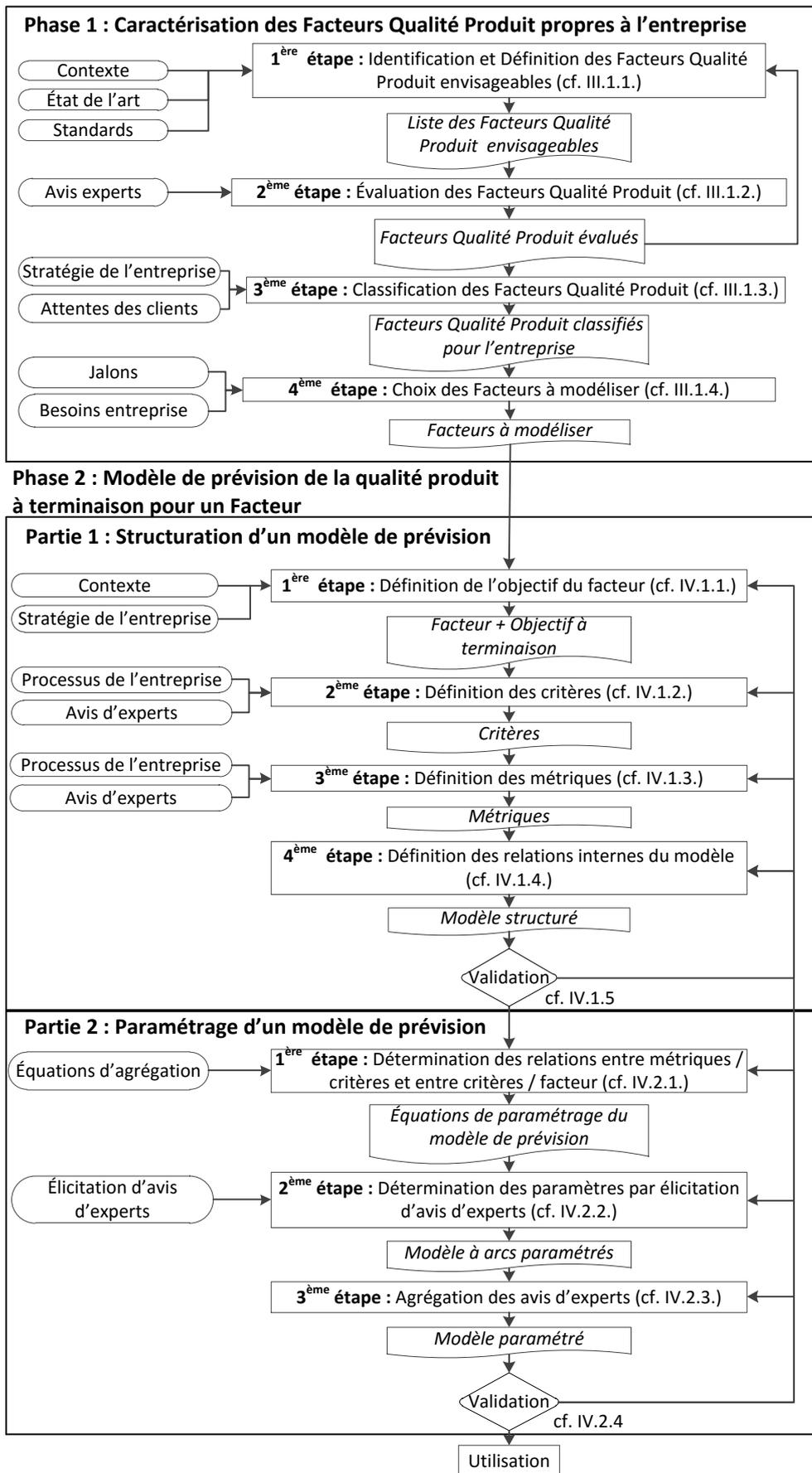


Figure 37: Méthodologie de construction des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison

Chapitre V

Applications : Construction et Utilisation de Modèles de Prévision pour les Facteurs « Conformité » et « Fiabilité »

L'objet du présent chapitre est d'appliquer la seconde phase de la méthodologie de construction d'un modèle de prévision de la qualité produit à terminaison, présentée dans le chapitre IV, pour l'entreprise MBDA, aux facteurs identifiés comme prioritaires à l'issue du chapitre III, à savoir la Conformité et la Fiabilité. L'utilisation de ces modèles est également développée dans le cadre de systèmes développés au sein de MBDA.

Comme évoqué précédemment, la société MBDA conçoit, développe et fabrique des systèmes d'armes. Ces systèmes complexes nécessitent plusieurs années de développement. Ils sont produits en petite quantité et ont une vie en service qui peut atteindre plusieurs décennies. Dans ce contexte, il est nécessaire de disposer d'outils permettant d'assurer la satisfaction des exigences clients à la livraison du système.

La méthodologie que nous proposons permet de construire des modèles de prévision de la qualité produit à terminaison, adaptés au contexte de l'entreprise. Ils apportent une évaluation de la qualité d'un système complexe à un instant donné tout en permettant une estimation de sa qualité future à terminaison. Les sorties de ces modèles permettent le pilotage de la qualité des systèmes tout au long de leur cycle de vie. Ils peuvent être utilisés à différents niveaux de l'architecture produit MBDA, pour des systèmes de systèmes, des systèmes ou des sous-systèmes (Figure 38), tous ses niveaux ayant les caractéristiques d'un système complexe tel que défini dans le Chapitre I.

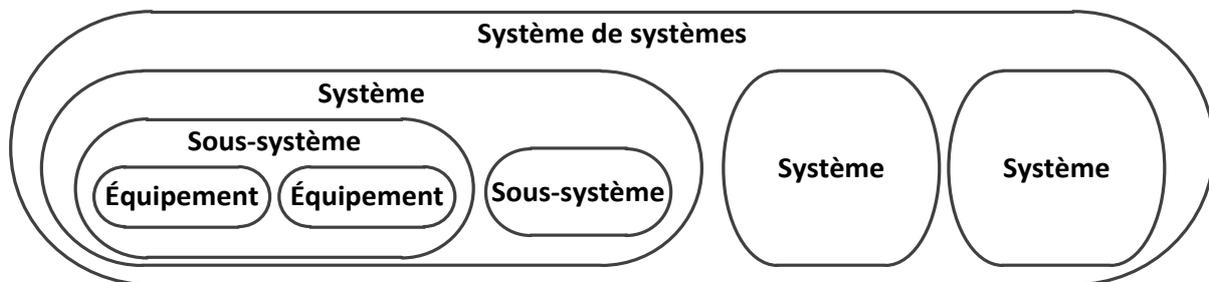


Figure 38 : Architecture produit MBDA : système de systèmes, systèmes, sous-systèmes et équipements

La distinction système de systèmes, système et sous-système n'a pas d'impact sur le fonctionnement des modèles construits, ces trois niveaux sont donc par la suite désignés par le terme « système » sans autre distinction. La notion « d'équipement » sert pour la définition de certaines métriques.

Pour rappel, la première phase de la méthodologie est consacrée à la définition des Facteurs Qualité Produit adaptés à l'entreprise MBDA. Elle se divise en quatre étapes qui ont été détaillées précédemment (cf. III.2. et Figure 37) :

- L'identification des facteurs qualité produit susceptibles de correspondre aux systèmes MBDA ;
- L'évaluation de ces facteurs en fonction de leur pertinence ;
- La classification des facteurs qualité adaptés aux systèmes que développe l'entreprise ;
- Le choix des facteurs qualité produit à modéliser.

L'application de cette première phase de la méthodologie a également été traitée dans le chapitre III. Les 11 facteurs qualité produit identifiés pour l'entreprise MBDA sont : Légimité, Sécurité, Conformité, Efficacité, Fiabilité, Qualité Perçue, Disponibilité, Évolutivité, Interopérabilité, Maintenabilité et Utilisabilité. Les facteurs Conformité et Fiabilité ont été retenus pour être modélisés en priorité (cf. III.2.4.).

La seconde phase de la méthodologie, pour la construction de modèles de prévision a été explicitée dans le Chapitre IV. Cette seconde phase se divise elle-même en deux sous-parties :

- Construction de la structure du modèle de prévision ;
- Paramétrage du modèle de prévision.

Un modèle de prévision y a été structuré, paramétré puis validé pour chacun de ces deux facteurs, Conformité et Fiabilité.

Le facteur conformité comporte deux aspects différents du point de vue des processus de l'entreprise, la conception et la production, qui sont détaillés par la suite (V.1.1.). Il permet également d'illustrer l'application réelle de la méthodologie proposée dans le chapitre IV, de présenter l'utilisation du modèle construit sur des systèmes complexes et de démontrer son intérêt en entreprise. Ce facteur implique de nombreuses personnes et processus au sein de l'entreprise et concerne tous les systèmes développés par MBDA.

La fiabilité fait déjà l'objet de modèle de prévision permettant le calcul d'une fiabilité prévisionnelle. Le modèle de prévision que nous proposons porte donc sur la qualité de ces prévisions (V.2.1.). L'application de la méthodologie à ce facteur démontre son adaptabilité au contexte particulier de l'entreprise en adaptant ses indicateurs et sa structure afin de prendre en compte le travail de calcul de la fiabilité prévisionnelle réalisé au sein de MBDA. Cela implique moins de personnes et de processus au sein de MBDA en comparaison de la conformité, mais elle occupe une place très importante dans la conception et le développement de système d'arme. Les prévisions de fiabilité servent à produire les études de sécurité et à planifier les opérations de maintenances lorsqu'elles sont nécessaires.

Le présent chapitre comporte deux parties, chacune dédiée à un facteur qualité produit :

La première partie du chapitre (V.1.) est l'application de la Phase 2 de la méthodologie au facteur qualité produit Conformité. Elle présente :

- Les particularités du traitement de la Conformité au sein de MBDA (V.1.1.) ;
- La structuration du modèle de prévision de la Conformité (V.1.2.) ;
- Le paramétrage du modèle de prévision (V.1.3.) ;
- L'utilisation du modèle construit pour trois systèmes développés par MBDA (V.2.4.).

La seconde partie du chapitre (V.2.) est l'application de la Phase 2 de la méthodologie au facteur qualité produit Fiabilité. Elle présente les mêmes étapes que la première partie du chapitre mais appliquée au facteur Fiabilité avec, pour finir, l'utilisation du modèle construit illustrée par le cas de deux systèmes développés par MBDA.

La partie consacrée au facteur conformité (V.1.) détaille chacune des étapes de la méthodologie présentée au chapitre IV. La partie concernant le facteur fiabilité (V.2.) porte en priorité sur les particularités de traitement du facteur fiabilité qui sont le fait qu'il existe déjà une fiabilité prévisionnelle calculée par MBDA et que le modèle évalue la qualité de cette prévision de fiabilité. Les aspects communs avec le modèle conformité seront moins détaillés.

V.1. Construction Phase 2 et Utilisation du modèle de prévision du facteur Conformité

Le facteur Conformité a été choisi pour faire l'objet d'un premier modèle de prévision de la qualité à terminaison (cf. III.2.4.). L'application de la phase 2 de la méthodologie (cf. IV.), détaillée dans ce chapitre, permet de construire ce modèle de prévision pour le facteur Conformité en suivant les étapes pour structurer et paramétrer le modèle de prévision (Figure 39). L'utilisation du modèle construit est ensuite présentée pour trois systèmes développés par MBDA.

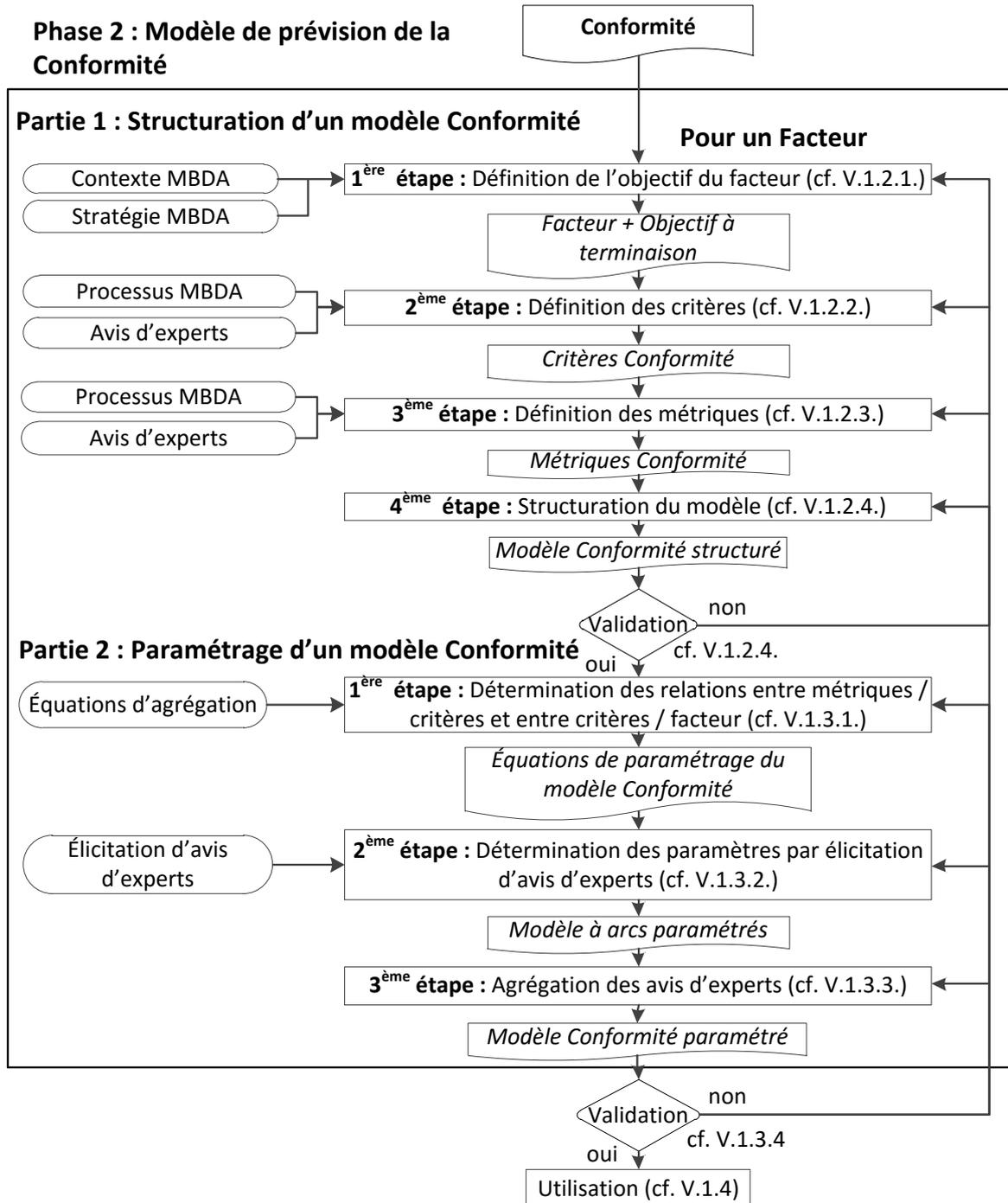


Figure 39 : Application de la Phase 2 et utilisation du modèle pour le facteur Conformité

Notations

Métriques

- $T_{CBesoin}$: Couverture du besoin du client
- $T_{évolSpec}$: Taux d'évolution des Spécifications Techniques du Besoin (STB) Système
- M_{Spec} : Maturité des STB équipement
- T_{STBpub} : Taux de STB Publiées
- $T_{DE,AC}$: Taux de Demande d'Evolution (DE) et d'Actions correctives (AC)
- $T_{RevDesign}$: Taux d'actions bloquantes non clôturées
- T_{SA} : Taux de Spécification d'Acceptation (SA) séries Publiées
- T_{DJD} : Taux d'exigences acquises
- P_{DJD} : Pertinence du Dossier Justificatif de Définition (DJD)

Critères

- Q_{spec} : Qualité des Spécifications
- Q_{Def} : Qualité de la Définition
- Q_{DJD} : Qualité de la Justification
- Q_{Sprod} : Qualité du Système de Production
- Q_{SC} : Qualité de la Supply Chain

Facteurs

- τ_{cDef} : Conformité de la Définition
- τ_{cprod} : Conformité du Produit à sa Définition

V.1.1. Particularités de la Conformité

Pour qu'un système soit conforme aux besoins du client, il faut à la fois que sa définition (c'est-à-dire la conception du système) réponde aux exigences formulées par le client, et que le système fabriqué soit conforme à la définition qui a été qualifiée.

En effet, la conformité d'un système est vérifiée lors de sa conception par une étape de qualification. Une fois qualifiée, la conception du système (sa définition) est considérée comme conforme aux exigences du client, seules les évolutions de définition peuvent être prises en compte.

Les systèmes produits doivent ensuite être conformes à cette définition pour pouvoir être livrés au client (Figure 40). Une fois en service, le niveau de conformité d'un système qualifié se mesure via les non-conformités enregistrées alors que le produit est en possession du client.

La conformité d'un système comporte donc deux aspects qu'il est nécessaire de traiter pour prévoir la conformité du système aux exigences du client à terminaison :

- La conformité de la définition du système par rapport aux exigences du client ;
- La conformité du système fabriqué par rapport à sa définition.

Le management du cycle de vie des systèmes au sein de MBDA distingue ces deux aspects.

La Figure 40 représente cette division de l'acquisition de la conformité du système par rapport à son cycle de vie, les éléments auxquels elle fait référence sont expliqués dans le paragraphe V.1.2.

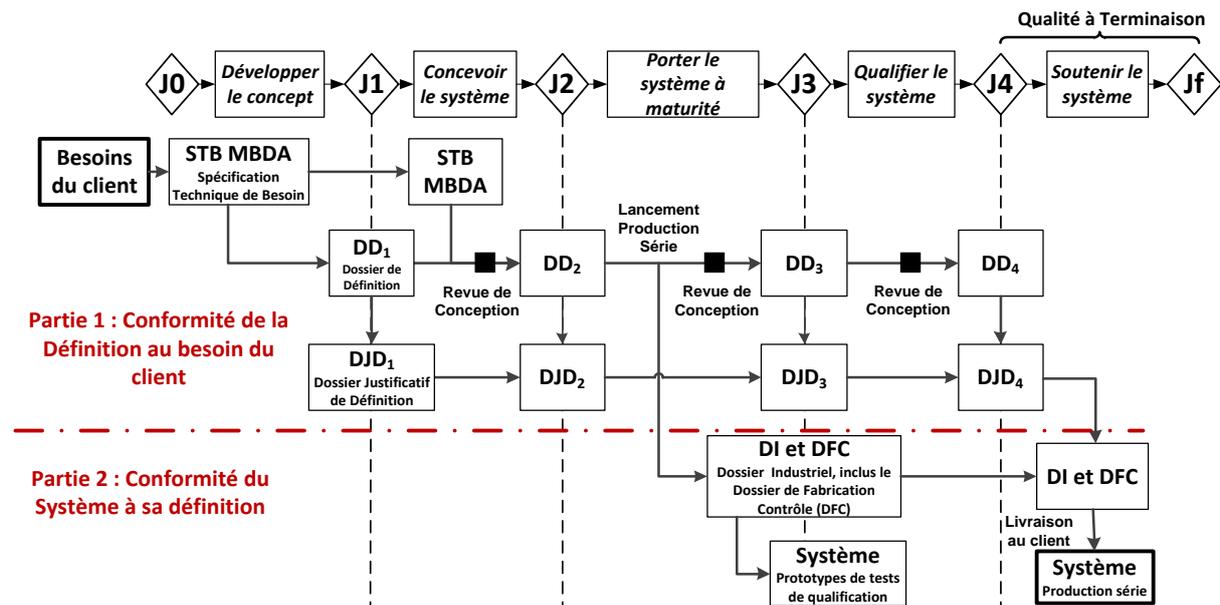


Figure 40 : Acquisition de la conformité d'un système tout au long de sa phase de développement

Au début du développement d'un système, le besoin du client est traduit dans les spécifications techniques du besoin (STB) MBDA. Une partie des STB au niveau du système sont déclinées au niveau des équipements composants le système, lorsque les exigences qu'elles contiennent concernent ces équipements. La conception du système est détaillée dans son Dossier de Définition (DD), accompagné du Dossier Justificatif de la Définition (DJD) qui assure que la définition du système répond aux exigences de la STB MBDA et la définition du système. Pour chacune des phases du cycle de vie du système, une version de chacun de ces dossiers est produite et évaluée lors des jalons de passage d'une

phase à une autre (Figure 40). La production série du système s'appuie sur le Dossier Industriel (DI), incluant le Dossier de Fabrication Contrôle (DFC), qui évolue en fonction des changements dans la définition du système ou dans le processus de fabrication.

Le besoin du client aboutit donc à une définition qualifiée et acceptée par le client à partir de laquelle est produit le système. Le support du client n'est pas pris en compte dans le périmètre du modèle concernant le facteur Conformité, mais peut rentrer en compte pour d'autre facteur qualité produit (maintenabilité ou utilisabilité par exemple).

Pour faciliter la construction et l'utilisation du modèle de prévision, tout en collant aux processus de l'entreprise, il est choisi de considérer le modèle de prévision de la conformité en deux sous-parties constituant un seul et même modèle :

- **Partie 1** : prévision de la conformité de la définition du système aux exigences du client ;
- **Partie 2** : prévision de la conformité du système fabriqué à sa définition qualifiée.

La principale particularité du modèle Conformité se situe donc dans cette distinction : par la suite, nous utilisons deux **sous-facteurs**, qui sont deux aspects du facteur Conformité :

- Conformité de la Définition du Système par rapport aux exigences du client (qui sera noté τ_{cDef});
- Conformité du Système fabriqué par rapport à sa Définition (qui sera noté τ_{cprod}).

La phase allant de J0 à J1 consiste à préparer la conception du système. Elle sert à la compréhension des besoins des différentes parties prenantes, à la définition de la stratégie d'expérimentation, à l'établissement des spécifications du produit, etc. Le modèle de prévision ne s'applique pas au jalon J0 qui est le démarrage développement. Les métriques de la Partie 1 du modèle sont évaluées à partir du jalon J1 à J4 ; elles n'évoluent ensuite qu'en cas de changements dans la conception du système. Les métriques de la Partie 2 sont évaluées dès que la production série débute et peuvent être évaluées tout au long de la production selon un rythme à adapter à celui des quantités produites. La conformité du système à terminaison s'établit donc dans un premier temps par la conformité de la définition aux exigences du client et dans un second temps par la conformité du système fabriqué à sa définition, le premier sous-facteur influant directement sur le résultat du second sous-facteur. Le modèle dans son ensemble couvre tout le cycle de vie des systèmes.

V.1.2. Définition de la structure du modèle Conformité

La première tâche de la méthodologie pour construire un modèle de prévision du niveau de qualité à terminaison d'un facteur donné consiste en la définition de la structure du modèle. Pour cela, les critères et métriques correspondants au facteur Conformité doivent être définis et structurés en un réseau qui sera ensuite paramétré.

V.1.2.1. 1^{ère} étape : Définition de l'objectif Conformité

Une fois le système entré en service, tout problème rencontré par le client ou constaté lors d'opérations de maintenance est enregistré et analysé par MBDA. Les causes de ces problèmes peuvent être diverses, une usure normale, une mauvaise utilisation du système, etc. Lorsque le problème concerne un aspect ou un comportement du produit qui ne correspond pas à celui prévu par la définition du système, celui-ci est enregistré comme non-conformité utilisateur.

L'indicateur choisi pour caractériser la conformité des systèmes en service est donc **le nombre de non-conformités utilisateur par système en usage chez le client**. L'objectif conformité est défini par un nombre maximum de non-conformités utilisateur par système en fonction du besoin exprimé par le client et de la stratégie de l'entreprise.

Il n'est pas nécessaire de décliner cet objectif au niveau des sous-facteurs pour l'utilisation du modèle de prévision. En effet, l'objectif Conformité à terminaison doit être atteint pour satisfaire le client quelles que soient les sources possibles de non-conformité.

V.1.2.2. 2^{ème} étape : Définition des critères du facteur Conformité

Afin d'identifier les critères adaptés au facteur Conformité, un panel de 20 personnes est constitué. Il est composé d'ingénieurs qualité et d'ingénieurs en conception des systèmes qui ont une expérience sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes produits par l'entreprise (Figure 40). Il est complété de personnes travaillant à la production et sur les périmètres spécifiques de l'approvisionnement (supply chain) et au maintien en condition opérationnelle. La répartition des personnes interrogées est indiquée dans le Tableau 18 ci-dessous.

Ingénieurs qualité	Conception système	Production	Supply chain	Maintien en condition opérationnelle
7 personnes	5 personnes	6 personnes	1 personne	1 personne

Tableau 18 : Répartition des personnes interrogées pour définir la structure du modèle conformité

Les personnes sont rencontrées en entretien individuel semi dirigé d'une heure à une heure trente pour définir les critères et les métriques du modèle Conformité (cf. IV.1.3.). La définition des critères s'appuie sur les processus illustrés sur la Figure 40.

Critères relatifs au sous-facteur Conformité de la Définition du Système par rapport aux exigences du client (τ_{cDef})

La définition du produit s'appuie sur les exigences exprimées par le client (Figure 40). Celles-ci doivent être traduites en Spécifications Techniques du Besoin (STB) et complétées des exigences propres à MBDA pour servir de base au développement du système. Les spécifications peuvent évoluer au cours du cycle de vie du système. La conformité de la définition dépend donc de la qualité des spécifications qui serviront de base au développement et ensuite de référence pour la qualification du système.

Le premier critère est donc la **qualité des spécifications** MBDA noté Q_{spec} .

La conformité de la définition du système dépend également de la qualité de la définition elle-même, de sa maturité, de sa complétude, etc. La conception du système est détaillée dans son Dossier de Définition (DD), qui connaît plusieurs versions tout au long du développement du produit, au fur et à mesure que la conception du système gagne en maturité (cf. Figure 40).

La **qualité de la définition**, notée Q_{Def} , est donc le second critère de conformité de la définition du système.

Enfin, il faut justifier que la définition du système satisfait l'ensemble des exigences contenues dans la STB. Le Dossier Justificatif de Définition (DJD), qui accompagne le Dossier de Définition assure ce rôle. Il synthétise tous les éléments de démonstration argumentant que la définition du système répond

aux spécifications MBDA par une argumentation adaptée, basée sur des analyses, des simulations des tests et essais. La justification assure la traçabilité entre les exigences et la définition du système.

La **qualité de la justification**, notée Q_{DJD} , est donc également un critère à prendre en compte pour la conformité de la définition du système.

La conformité de la définition du système aux exigences du client est donc conditionnée par les trois critères suivants :

- **Qualité des Spécifications Q_{Spec}** ;
- **Qualité de la Définition Q_{Def}** ;
- **Qualité de la Justification Q_{DJD}** .

Ces trois critères permettent de couvrir l'ensemble des opérations depuis les exigences exprimées par le client jusqu'à la qualification de la définition du système.

Critères relatifs au sous-facteur Conformité du Système Fabriqué par rapport à sa Définition (τ_{cprod})

Concernant la conformité du système fabriqué par rapport à sa définition, il est choisi de distinguer les opérations menées en interne à l'entreprise de celles menées en externe, chez les différents fournisseurs. L'entreprise met en œuvre des dispositions spécifiques pour assurer la qualité des équipements achetés. Le traitement des non-conformités est notamment différent dans les deux cas. Il est donc préférable de faire apparaître cette distinction dans le modèle.

La conformité du système fabriqué par rapport à sa définition est donc conditionnée par les deux critères suivants :

- **Qualité du Système de Production Q_{SProd}** ;
- **Qualité de la Supply Chain $Q_{s.c.}$** .

Les critères et sous-facteurs de la conformité, ainsi que leur notation, sont récapitulés dans le Tableau 19. Les métriques sont ensuite détaillées dans le paragraphe V.1.2.3.

Sous-facteurs Conformité	Critères Conformité	Notation
Conformité de la Définition du Système par rapport aux exigences du client (τ_{cDef})	Qualité des Spécifications	Q_{Spec}
	Qualité de la Définition	Q_{Def}
	Qualité de la Justification	Q_{DJD}
Conformité du Système fabriqué par rapport à sa Définition (τ_{cprod})	Qualité du Système de Production	Q_{Sprod}
	Qualité de la Supply Chain	Q_{SC}

Tableau 19 : Critères de Conformité du système

V.1.2.3. 3^{ème} étape : Définition des métriques Conformité

Les métriques permettant de caractériser le niveau de qualité des critères à chacun des jalons sont également identifiées par des interviews au sein de l'entreprise. Les personnes interrogées pour définir les critères à intégrer au modèle (20 au total : ingénieurs qualité, ingénieur système, production, support client...) le sont aussi à propos des métriques lors du même entretien (cf. V.1.2.2. Tableau 18).

Métriques relatives au sous-facteur Conformité de la définition du système par rapport aux exigences du client

La première partie du modèle de prévision de la conformité s'intéresse à la bonne traduction des exigences du client, à la qualité de la conception du système et à la qualité de la justification de cette conception à travers les trois critères suivants :

- **Qualité des Spécifications** Q_{spec} ;
- **Qualité de la Définition** Q_{Def} ;
- **Qualité de la Justification** Q_{JD} .

Pour chacun de ses trois critères, des métriques sont définies.

Critère Q_{Spec} : Qualité des Spécifications

Le premier point est de vérifier que les spécifications qui guideront le développement du produit prennent bien en compte l'ensemble des besoins du client. Il est également nécessaire de s'assurer de la qualité de la rédaction de ces spécifications, de leur maturité et de leurs évolutions.

- $T_{c\text{besoin}}$: Couverture du besoin

Le besoin du client est exprimé à travers des exigences, un cahier des charges ou sous une autre forme. Ces exigences sont traduites dans les STB MBDA qui prennent également en compte des besoins spécifiques de l'entreprise.

Il faut s'assurer que l'ensemble du besoin du client soit bien pris en compte dans les STB MBDA. Un taux de couverture est défini sur la base des matrices de couverture besoin client / spécifications MBDA, celles-ci permettent de tracer le lien entre les exigences internes de l'entreprise et celles exprimées par le client. Ce taux peut aussi être extrait d'un outil informatique de suivi des spécifications (lorsqu'il est utilisé) au niveau des STB du système.

La métrique de couverture du besoin client est le pourcentage des besoins exprimés par le client couverts par les STB de l'entreprise :

$$T_{c\text{besoin}} = \frac{\text{nbr besoins client couverts par les STB MBDA}}{\text{nbr besoins clients}} \times 100 \quad (11)$$

L'objectif à terminaison est une complétude de la couverture du besoin, soit 100%.

- $T_{\text{évol}\text{spec}}$: Taux d'évolution des STB Système :

Au niveau du système, la maturité des spécifications est évaluée par rapport à la proportion d'exigences modifiées entre deux jalons du cycle de vie du système. En effet, les exigences en début de développement connaissent de nombreux changements car elles sont affinées au fur et à mesure de la conception, mais elles doivent ensuite converger vers une version suffisamment mature pour le

développement et n'évoluer qu'en très faible proportion pour que la qualification se déroule dans de bonnes conditions.

$$T_{\text{évol spec}} = \frac{\text{nbr d'exigences système nouvelles ou modifiées entre 2 jalons}}{\text{nbr spécifications MBDA total}} \times 100 \quad (12)$$

L'objectif à terminaison est qu'il n'y ait plus d'évolution, soit 0%.

- M_{spec} : Maturité des STB équipement

Les STB du système sont déclinées pour les équipements qui le constituent, lorsque cela est nécessaire (ce n'est pas systématique), afin de guider le développement et de servir de base pour la qualification de ces équipements. Des réunions de revue des STB pour les équipements composant le système sont régulièrement menées tout au long du développement pour juger de la qualité et de la maturité de ces spécifications. La maturité des STB est évaluée grâce à un outil dédié, déjà existant chez MBDA, qui consiste en un questionnaire balayant d'une part, les règles de rédaction des STB (organisation de la rédaction et de la vérification, forme du document etc.) et d'autre part, le contenu lui-même (précision du vocabulaire employé, prise en compte de différents aspects fonctionnels, etc.). Chacun des points interrogés via ce questionnaire est noté sur une échelle de 0 à 5 (5 étant la maturité maximale) et une note de maturité sur 100 est calculée pour l'ensemble de la STB d'un équipement. Ce questionnaire est complété par les ingénieurs qualité en charge des équipements. Les STB systèmes ne font pas l'objet de ces évaluations.

La métrique choisie est la moyenne des notes de maturité obtenues pour chacune des STB des équipements du système :

$$M_{\text{spec}} = \text{moyenne des notes STB équipement} \quad (13)$$

L'objectif à terminaison est de 100%, soit une complète maturité des STB équipement.

- T_{STBpub} : Taux de STB équipement publiées

Il est important que les STB équipement soient publiées dans l'outil de suivi dédié pour qu'elles puissent être prises en compte par les concepteurs et les équipes en charge des essais. Les STB équipement doivent être disponibles suffisamment tôt dans le développement pour ne pas le retarder car elles sont la référence sur laquelle baser la définition du système.

$$T_{\text{STBpub}} = \frac{\text{nbr STB équipement publiées}}{\text{nbr STB équipement attendues}} \times 100 \quad (14)$$

L'objectif à terminaison est de 100%.

Critère Q_{Def} : Qualité de la définition

Les métriques concernant la qualité de la définition portent principalement sur le Dossier de Définition et les processus s'y rattachant (Figure 40).

- XRL : Indicateurs de Maturité (Readiness Level)

Les indicateurs de maturité Technique (TRL), d'Intégration (IRL), et Système (SRL) permettent de suivre l'évolution de la maturité du système et de ses composants tout au long de son développement. A ces trois indicateurs, s'ajoute celui de la classe de difficulté (CDA) à réaliser le système. Il est ainsi possible de définir des niveaux de maturité attendus pour chacun des jalons du cycle de vie afin de s'assurer du bon déroulement d'un projet.

Les indicateurs de maturité sont en cours de déploiement au sein de MBDA. Les trois métriques qui suivent ont été définies pour pouvoir remplacer le XRL dans le modèle qui est ensuite structuré lorsque les indicateurs de maturité ne sont pas disponibles. Mais les indicateurs de maturité remplaceront ensuite ces trois métriques dans le modèle en exploitation, lorsque leur usage sera répandu dans l'entreprise.

- $T_{DE,AC}$: Traitement des demandes d'évolution (DE) et des actions correctives (AC)

La maturité de la conception du système peut s'évaluer en partie par l'analyse des Demandes d'Evolution (DE) de la conception (c'est-à-dire les enregistrements de demande de modification de la conception du système) et des Actions Correctives (AC) décidées suite au traitement des non-conformités (NC).

Leur nombre est habituellement élevé en début de développement, car il est normal de travailler sur la définition du système et de la faire évoluer régulièrement lors des étapes préliminaires, mais il doit être très limité en phase de qualification, car la définition est déjà très mature à ce stade et des modifications remettraient en cause le travail de validation. Afin de calculer la métrique, deux ratios sont définis, T_{DE} pour les DE et T_{AC} pour les AC.

$$T_{DE} = \frac{\text{nbr de DE créées depuis le dernier jalon}}{\text{nbr total de DE au jalon en cours}} \times 100 \quad (15a)$$

$$T_{AC} = \frac{\text{nbr d'AC créées depuis le dernier jalon}}{\text{nbr total d'AC au jalon en cours}} \times 100 \quad (15b)$$

Les deux ratios sont pris en compte par une moyenne arithmétique (car ils sont de même importance) :

$$T_{DE,AC} = \frac{T_{DE} + T_{AC}}{2} \quad (15)$$

L'objectif à terminaison est qu'il n'y ait plus de DE et d'AC créés, soit 0%.

- $T_{revdesign}$: Taux d'actions bloquantes non clôturées

Plusieurs réunions de revue de conception sont planifiées tout au long du développement d'un système pour réaliser des revues critiques de la conception du système avant les revues de passage de jalon (Figure 40). Ces réunions regroupent les responsables projet, spécificateurs, concepteurs, responsables de l'industrialisation, qualitatifs, experts scientifiques et responsables du support produit, pour juger de l'avancement et de la maturité de la conception du système et identifier les défauts de conception. Plusieurs problèmes peuvent être soulevés lors de ces revues et des actions planifiées en conséquence pour apporter des éléments de réponse ou modifier la conception.

Certaines de ces actions sont dites bloquantes ou majeures et doivent impérativement être traitées pour permettre le passage du jalon correspondant (la métrique doit être à 0% pour que le passage de jalon soit possible) :

$$T_{revdesign} = \frac{\text{nbr d'actions bloquantes non clôturées}}{\text{nbr d'actions bloquantes relevées en revue de conception depuis le dernier jalon}} \times 100 \quad (16)$$

T_{SA} : Taux de Spécifications d'Acceptation (SA) séries publiées

Afin de pouvoir vérifier si les équipements produits et achetés sont conformes pour être intégrés au système, des Spécifications d'Acceptation (SA) sont rédigées. Les spécifications d'acceptation concernant les phases de développement (pour les premiers prototypes) et de série doivent être rédigées et publiées pour que le matériel produit puisse être évalué, testé et accepté.

Il est donc important que ces spécifications d'acceptation soient disponibles suffisamment tôt pour que les contrôles d'acceptation puissent être définis avant le démarrage de la phase de série. Le nombre de SA est comparé à celui des STB car leur quantité doit être égale. A un équipement correspond une STB et une SA. Le taux de publication des SA s'exprime de la manière suivante :

$$T_{SA} = \frac{\text{nbr SA série publiées}}{\text{nbr STB MBDA publiées}} \times 100 \quad (17)$$

L'objectif à terminaison est de 100%, soit toutes les SA publiées.

Critère Q_{DJD} : Qualité de la justification

- T_{DJD} : Taux de justification d'exigences acquises

La complétude du Dossier Justificatif de la Définition (DJD) se mesure par la proportion d'exigences dont la justification est acquise par rapport au total des exigences :

$$T_{DJD} = \frac{\text{nbr d'exigences MBDA dont la justification est acquise}}{\text{nbr total d'exigences MBDA}} \times 100 \quad (18)$$

Au début du développement, au jalon J1, la métrique T_{DJD} n'a pas d'utilité car la conception du système débute et il n'y a pas encore d'exigences acquises, ou encore trop peu. Par contre, il faut s'assurer que la logique d'essais soit bien définie pour chacune des exigences du système. La métrique T_{DJD} est donc remplacée à J1 par la proportion d'exigences couvertes dans le plan général d'essais, qui est le document décrivant la logique d'essais :

$$T_{PGE} = \frac{\text{nbr d'exigences dont la logique d'essais est définie}}{\text{nbr total d'exigences}} \times 100 \quad (19)$$

L'objectif à terminaison est de 100%, toutes les justifications d'exigences doivent être acquises pour qualifier le système.

- T_{SR} : Taux de justification d'Exigences Spéciales (SR) acquises

Un point de vigilance particulier est porté sur les exigences spéciales (Special Requirements, SR), telles que définies dans l'EN9100 :

Exigences Spéciales, définition de EN9100 :

« Toutes les exigences identifiées par le client, ou déterminées par l'organisme, qui présentent des risques élevés de ne pas être respectées, lesquelles nécessitent d'être incluses dans le processus de gestion des risques. Les facteurs utilisés pour la détermination des exigences spéciales comprennent la complexité du produit ou des procédés, l'expérience passée ou la maturité du produit ou des procédés. »

Une métrique est donc prévue pour mesurer spécifiquement la justification de ces exigences :

$$T_{SR} = \frac{\text{nbr de SR justifiées portant sur la définition du produit}}{\text{nbr total de SR portant sur la définition du produit}} \quad (20)$$

L'objectif à terminaison est de 100%.

Cette métrique est en partie redondante avec le Taux de justification d'exigences acquises (T_{DJD}), cela permet de donner plus d'importance aux exigences spéciales par rapport aux autres exigences.

- **P_{DJD} : Dossier Justificatif de la définition (DJD)**

Cette métrique permet de rendre compte de la complétude et de la qualité de rédaction du Dossier Justificatif de la définition (DJD).

Il faut vérifier que le DJD soit accepté lors de la revue de passage d'un jalon.

Le DJD doit être rédigé en respectant les recommandations du *Guide des bonnes pratiques* pour l'élaboration du DJD défini dans le référentiel qualité de l'entreprise.

Une échelle de notation est définie sur quatre niveaux :

- DJD respectant les bonnes pratiques : 100%
- DJD ne respectant pas certaines bonnes pratiques : 66%
- DJD ne respectant pas les bonnes pratiques : 33%
- DJD non acceptable : 0%

L'objectif est de 100%.

Métriques relatives au sous-facteur Conformité du système fabriqué par rapport à sa définition

La seconde partie du modèle de prévision de la conformité porte sur la qualité des éléments produits par l'entreprise et de ceux achetés à l'extérieur. Les métriques sont calculables après le passage du jalon J2.

Critère Q_{Sprod} : Qualité du système de production

Les métriques liées à ce critère concernent le système de production MBDA. Elles sont au nombre de quatre.

- **MRL : Indicateur de maturité**

L'indicateur de maturité de production, noté MRL (Manufacturing Readiness Level), permet de suivre l'évolution de la maturité du dispositif de production du système et de ses composants. Il est ainsi possible de définir des niveaux de maturité attendus tout au long du cycle de vie pour suivre le bon déroulement d'un projet. Au sein de MBDA, une note de maturité est définie en fonction de l'avancement de l'industrialisation du système. Cette note est définie par l'évaluation d'une soixantaine

de critères répartis en 9 thématiques : technologie de chaîne d’approvisionnement, conception, matériaux/matériels, coûts et financement, capacité et maîtrise des procédés, management de la qualité, personnel, équipements et installation, planification ordonnancement et maîtrise de la production. Des objectifs de niveau de maturité sont définis pour chacun des jalons du cycle de vie. La note de maturité obtenue est ramenée à un pourcentage pour être utilisée dans le modèle.

- **T_{NI} : Taux de Non-conformités Internes (NI) MBDA**

La proportion de systèmes impactés par des non-conformités internes (NI, non conformités détectées par MBDA sur des équipements produits par l’entreprise en cours d’activité de production et d’intégration) donne une indication sur la qualité des éléments produits par MBDA et sur la difficulté à produire conformément à la définition du système. Seules les non-conformités classées comme majeures sont prises en compte du fait de leur impact sur la production ou la sécurité. Une non-conformité (NC) est jugée majeure lorsqu’elle a pour effet de remettre en cause des exigences de la STB ou lorsqu’elle entraîne une limitation ou le non-respect des performances contractuelles, de l’interchangeabilité ou des accompagnements du système (documentation, emballage, etc.). Les NC sans ces incidences sont classées comme mineures. Ce classement est valable pour tout type de NC.

$$T_{NI} = \frac{\text{nbr de produits concernés par une NI majeure}}{\text{Quantité produite sur cette période}} \times 100 \quad (21)$$

Cette métrique doit être minimisée.

La période de mesure recommandée est fixée à trois mois glissants, car cette durée permet de disposer de suffisamment de systèmes produits pour calculer la métrique et la mettre à jour régulièrement. Cependant, tous les systèmes n’ont pas le même rythme de production et certains connaissent des périodes d’arrêt de production. Cette période peut donc être adaptée librement suivant le contexte.

- **T_{A-proc} : Taux de couverture AMDEC process**

Les AMDEC process permettent d’analyser les nouveaux procédés jugés à risque lors des revues de préparation à l’industrialisation pour identifier les risques et les prévenir. Des AMDEC correctement réalisées permettent d’anticiper les problèmes de production qui ont un impact sur la conformité du système. Il faut donc s’assurer qu’elles sont réalisées lorsque cela est nécessaire, c’est-à-dire lorsque qu’un procédé est nouveau, et donc non maîtrisé, ou si le client le demande.

Cette métrique permet de rendre compte de l’avancement de la réalisation des AMDEC process :

$$T_{A-proc} = \frac{\text{Nbr AMDEC}_{process} \text{ réalisées}}{\text{Nbr AMDEC}_{process} \text{ à réaliser}} \times 100 \quad (22)$$

L’objectif à terminaison est de 100%, toutes les AMDEC process doivent avoir été réalisées.

- **Q_{DFC} : Qualité du Dossier de Fabrication Contrôle**

La qualité du Dossier de Fabrication Contrôle (DFC) est primordiale pour préparer la production série. Ce dossier comporte les éléments permettant de mettre en production le système, de le produire et de contrôler que les éléments produits sont conformes à la définition. Il doit donc être complet et précis. Le DFC est évalué lors du calcul du MRL. Cependant, ce dossier étant particulièrement important, une liste d’éléments dont il faut vérifier en particulier qu’ils sont pris en compte dans le DFC été établie. Elle permet de donner une note de qualité sur 100 du DFC lors des revues d’industrialisation. L’objectif est de 100% à terminaison. Les éléments qui entrent en compte dans l’évaluation du DFC sont que :

- Les inspections des premiers articles sont réalisées et qu'elles ne révèlent pas d'écarts ;
- Le Dossier de Validation Process Article est validé ;
- Les Rapport d'Amélioration sont pris en compte tout au long de la production.

Chacun des éléments compte pour 1/3 de la note (~33%). Si tous ces points sont vérifiés, la métrique est à 100%.

Critère Q_{s.c.} : Qualité de la Supply Chain

Les métriques liées à ce critère concernent les fournisseurs de MBDA et leurs produits. Elles sont au nombre de trois.

- T_{NE} : Taux de Non-conformités Externes (NE)

Les non-conformités découvertes par l'entreprise sur des équipements achetés à l'extérieur sont enregistrées comme Non-conformités Externes (NE). De la même manière que pour les éléments produits et intégrés au sein du groupe, la proportion de non-conformités par produit réceptionné est calculée pour donner un indicateur de la qualité des composants achetés. Seules les non-conformités classées comme majeures sont prises en compte du fait de leur impact sur la production ou la sécurité, sur une période à définir en fonction du rythme de production (les règles de classement sont les mêmes que pour les NI).

$$T_{NE} = \frac{\text{nbr de produits concernés par une NE majeure sur une période}}{\text{nbr de produits réceptionnés sur cette période}} \times 100 \quad (23)$$

L'objectif de minimiser la métrique.

- T_{Derog} : Taux de dérogation

Lorsqu'un fournisseur souhaite livrer à l'entreprise un équipement ou un composant qui ne répond pas totalement aux exigences, il demande une dérogation. La proportion de dérogation sur les produits achetés est aussi un indicateur des difficultés du fournisseur à produire conformément à la définition du produit :

$$T_{Derog} = \frac{\text{nbr de produits concernés par une dérogation sur une période}}{\text{nbr de produits réceptionnés sur cette période}} \times 100 \quad (24)$$

La période de mesure recommandée est fixée à trois mois glissants et peut être adaptée librement suivant le contexte pour les mêmes raisons que celles avancées pour le calcul du taux de NI et de NE.

L'objectif est de minimiser la métrique.

- SCE : Maturité des process des fournisseurs

La maturité des process des fournisseurs est régulièrement évaluée à travers des audits SCE (Supply Capability Evaluation). Une note de capacité est calculée à l'issue de ces audits. L'indicateur choisi est la moyenne des notes des audits les plus récents.

L'audit consiste à évaluer la maturité des fournisseurs (sur une échelle à 5 niveaux) pour une vingtaine de critères répartis entre neuf aspects : politique de conception ; prise en compte des exigences de conception ; vérification de la conception ; conception orientée production ; conception orientée fiabilité, maintenabilité, disponibilité ; outils de conception et d'analyse, installations d'essais et de

qualification ; gestion des ressources ; gestion des activités de conception ; gestion des évolution. Une note sur 100 est tirée de cette évaluation.

$$SCE = \text{moyenne des notes d'audit SCE} \quad (25)$$

L'objectif est de 100% à terminaison, c'est-à-dire que les fournisseurs ont tous le niveau maturité attendu.

Le Tableau 20 récapitule les critères, les métriques ainsi que leur mode de calcul et l'objectif à terminaison pour la Partie 1 du modèle de prévision de la Conformité : Conformité de la Définition du système aux exigences du client. Le Tableau 21 fait de même pour la Partie 2 du modèle de prévision de la Conformité : Conformité du Système à sa Définition.

Critère	Métrique	Mesure	Objectif à terminaison
Qualité des Spécifications Q_{Sec}	T_{CBesoin} : Couverture du besoin du client	$\frac{nbr\ besoins\ client\ couverts\ par\ les\ STB\ MBDA}{nbr\ besoins\ clients} \times 100$	100%
	T_{évolspec} : Taux d'évolution des STB Système	$\frac{nbr\ d'exigences\ système\ nouvelles\ ou\ modifiées\ entre\ 2\ jalons}{nbr\ spécifications\ MBDA\ total} \times 100$	0%
	M_{Spec} : Maturité des STB équipement	moyenne des notes STB équipement (issue de l'outil d'évaluation existant chez MBDA)	100%
	T_{STBpub} : Taux de STB équipement Publiées	$\frac{nbr\ STB\ MBDA\ équipement\ publiées}{nbr\ STB\ MBDA\ équipement\ attendues} \times 100$	100%
Qualité de la Définition Q_{Def}	T_{DE,AC} : Taux de DE et AC	$T_{DE} = \frac{nbr\ de\ DE\ créées\ depuis\ le\ dernier\ jalon}{nbr\ total\ de\ DE\ au\ jalon\ en\ cours} \times 100$ $T_{AC} = \frac{nbr\ d'AC\ créées\ depuis\ le\ dernier\ jalon}{nbr\ total\ d'AC\ au\ jalon\ en\ cours} \times 100$ $T_{DE,AC} = \frac{T_{DE} + T_{AC}}{2}$	0%
	T_{RevDesign} : Taux d'actions bloquantes non clôturées	$\frac{nbr\ d'actions\ bloquantes\ non\ clôturées}{nbr\ d'actions\ bloquantes\ relevées\ en\ revue\ de\ conception\ depuis\ le\ dernier\ jalon} \times 100$	0%
	T_{SA} : Taux de SA séries Publiées	$\frac{nbr\ SA\ série\ publiées}{nbr\ STB\ MBDA\ publiées} \times 100$	100%
Qualité de la Justification Q_{JD}	T_{DJD} : Taux de justification d'exigences acquises	$\frac{nbr\ d'exigences\ MBDA\ dont\ la\ justification\ est\ acquise}{nbr\ total\ d'exigences\ MBDA} \times 100$	100%
	P_{DJD} : Pertinence du DJD	Taux de conformité au « Guide des bonnes pratiques pour l'élaboration du DJD »	100%
	T_{SR} : Taux de justification de SR acquises	$\frac{nbr\ de\ SR\ justifiées\ portant\ sur\ la\ définition\ du\ produit}{nbr\ total\ de\ SR\ portant\ sur\ la\ définition\ du\ produit} \times 100$	100%

Tableau 20 : Partie 1 du modèle Conformité, Métriques et leurs caractéristiques

STB : Spécification Technique su Besoin, DE : Demande d'Evolution, AC : Action Corrective ; SA : Spécification d'Acceptation, SR : Special Requirement.

Critère	Métrique	Mesure	Objectif à terminaison
Qualité du Système de Production Q _{Sprod}	MRL : Manufacturing Readiness Level	<i>Indicateurs de maturité de production (MRL)</i>	100%
	T_{NI} : Taux de NI	$\frac{\text{nbr de produits concernés par une NI majeure}}{\text{Quantité produite sur cette période}} \times 100$	0%
	T_{A-Proc} : Taux de couverture AMDEC process	$\frac{\text{Nbr AMDEC}_{\text{Process}} \text{ réalisées}}{\text{Nbr AMDEC}_{\text{Process}} \text{ à réaliser}} \times 100$	100%
	Q_{DFC} : Qualité du DFC	<i>Note de complétude du DFC par rapport aux règles du système qualité MBDA</i>	100%
Qualité de la Supply Chain Q _{Sc}	T_{NE} : Taux de NE	$\frac{\text{nbr de produits concernés par une NE majeure sur une période}}{\text{nbr de produits réceptionnés sur cette période}} \times 100$	0%
	T_{Derog} : Taux de dérogation	$\frac{\text{nbr de produits concernés par une dérogation sur une période}}{\text{nbr de produits réceptionnés sur cette période}} \times 100$	0%
	SCE : Note moyenne SCE	<i>SCE = moyenne des notes d'audit SCE</i>	100%

Tableau 21 : Partie 2 du modèle Conformité, Métriques et leurs caractéristiques

MRL : Manufacturing Readiness Level, NI : Non-conformité Interne, DFC : Dossier de Fabrication Contrôle, NE : Non-conformité Externe, SCE : Supply Capability Evaluation.

V.1.2.4. 4^{ème} étape : Structuration du modèle Conformité

Les métriques et critères parents modifiants sont à identifier pour structurer le modèle et préparer l'étape de paramétrage du modèle de prévision (cf. IV.1.4.).

Au niveau des critères de la partie conformité de la définition du système par rapport aux exigences client, tous ont une influence sur les autres :

- La qualité des spécifications impacte la définition et la justification car elles sont toutes deux basées sur les STB ;

- La qualité de la justification impacte l'influence de la qualité de la définition sur la conformité car une définition non justifiée ne peut garantir la conformité du système ;
- Et enfin, la justification s'appuyant sur la définition elle-même, la qualité de la définition influe sur l'impact de qualité de la justification. Justifier une définition qui est elle-même de mauvaise qualité n'assurera pas la conformité du système à terminaison.

Donc, les trois critères sont parents modifiants.

La métrique P_{DJD} « pertinence du DJD » impacte l'influence des métriques T_{DJD} « taux d'exigences acquises » et T_{SR} « taux d'exigences spéciales acquises ». En effet, si des exigences sont considérées comme acquises mais que leur justification n'est pas pertinente, il ne sera pas possible de considérer le DJD comme étant de bonne qualité. Au contraire, pour un même taux d'exigences acquises, la qualité de la justification sera meilleure si la métrique « pertinence du DJD » est maximale.

La métrique de pertinence du DJD est donc parent modifiant associé aux métriques de taux justification d'exigences et exigences spéciales acquises T_{DJD} et T_{SR} .

L'ensemble du modèle est structuré en reliant chacune des métriques aux critères qu'elles définissent et chacun des critères au facteur pour constituer un réseau en deux parties, l'une pour la conformité de la définition du système par rapport aux exigences du client et l'autre pour la conformité du système fabriqué par rapport à sa définition (Figure 41 et Figure 42).

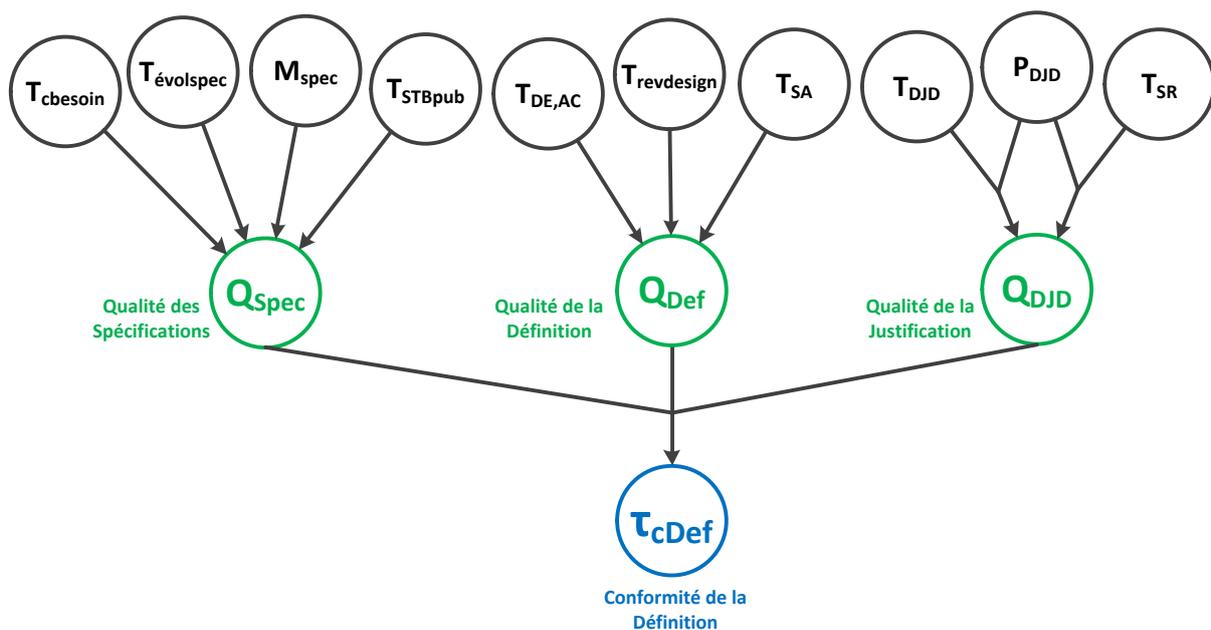


Figure 41 : Partie 1, conformité de la définition du système par rapport aux exigences du client

Il n'y a pas de parent modifiant identifié dans la partie 2 du modèle concernant la prévision de la conformité du système à sa définition.

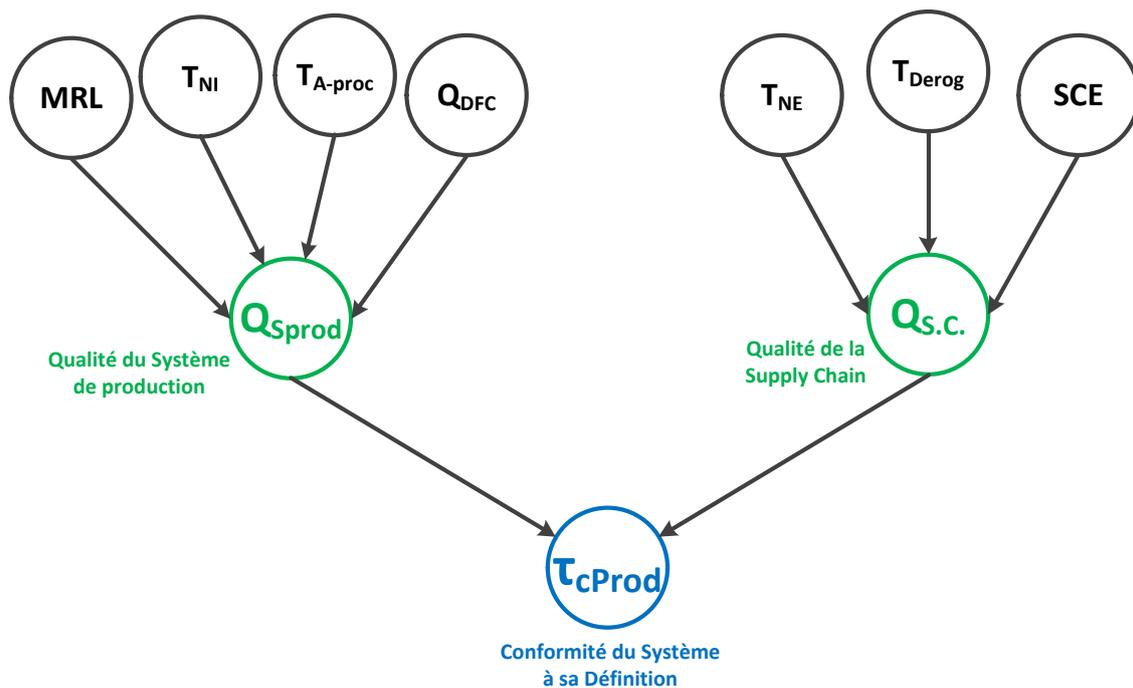


Figure 42 : Partie 2, conformité du système fabriqué par rapport à sa définition

L'ensemble du réseau constituant le modèle s'obtient en reliant les sous-facteurs au facteur Conformité (τ_c), les sous-facteurs étant parents modifiant l'un de l'autre, le système étant fabriqué suivant sa définition ayant été qualifiée (Figure 43). Les métriques de la Partie 1 du modèle sont évaluées à partir du jalon J1 à J4, elles n'évoluent ensuite qu'en cas de changements dans la conception du système. Les métriques de la Partie 2 sont évaluées dès que la production série débute et peuvent être évaluées tout au long de la production.

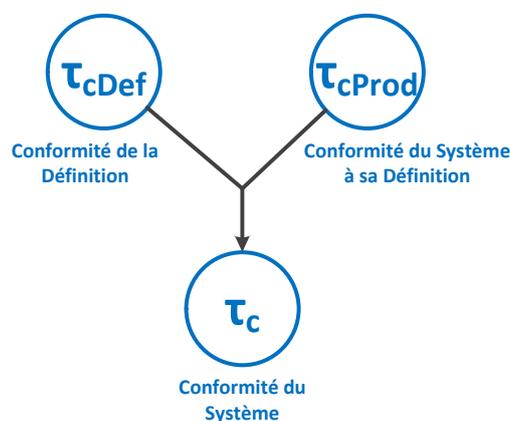


Figure 43 : Relations entre sous-facteurs et facteur dans le modèle Conformité

Une fois le modèle structuré, les personnes ayant participé à son élaboration ont été réunies (13 personnes présentes sur 20) pour valider la sélection des critères et métriques proposés ainsi que leurs liens d'influence. Cette revue de validation permet aux participants d'exposer leur jugement sur le modèle et d'échanger avec les autres intervenants, notamment sur les points où les avis divergent, afin de trouver un consensus. Aucune correction majeure n'a été apportée au modèle.

À l'issue de la revue, le modèle est partagé avec l'ensemble des 20 participants à la construction du modèle pour qu'ils puissent communiquer d'éventuelles remarques qui auraient été oubliées. Il n'y a pas eu de modifications à ce stade.

V.1.3. Paramétrage du modèle Conformité

La structure des deux parties du modèle a été définie lors de la phase précédente, le modèle doit ensuite être paramétré. Cela consiste à établir les relations quantitatives qui permettent l'évaluation des critères en fonction des métriques ainsi que du facteur en fonction des critères.

V.1.3.1. 1^{ère} étape : Détermination des relations internes au modèle Conformité

En fonction des poids des arcs et de la présence de parents modifiants ou non (cf. V.1.2.4.), les relations entre métriques et critères, et entre critères et facteur peuvent être déterminées.

Pour chacun des arcs du modèle, un poids est défini afin de caractériser l'influence d'un nœud parent sur son nœud fils. La convention choisie est de définir la somme des poids des arcs entre un nœud fils et ses nœuds parents égale à 1.

Pour rappel, la valeur des critères du modèle sans parent modifiant se calcule par la fonction G_{C_j} (cf. IV.2.1.) :

$$c_j = G_{C_j}(m_1, m_2, \dots, m_{K_i}) = \sum_{k=1}^{K_i} p_{M_k, C_j} \times m_k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{K_i} p_{M_k, C_j} = 1$$

Les critères sans parent modifiant sont (cf. V.1.2.4.) :

- Qualité des Spécifications Q_{spec} ;
- Qualité de la Définition Q_{Def} ;
- Qualité du Système de Production Q_{SProd} ;
- Qualité de la Supply Chain $Q_{S.C.}$.

La fonction G_{C_j} telle qu'exprimée par la relation (3) s'applique directement pour ces quatre critères (Tableau 22).

Critère	Equation associée
Qualité des Spécifications Q_{spec}	$Q_{spec} = p_{T_{cBesoin}, Q_{spec}} T_{cBesoin} + p_{T_{évolspec}, Q_{spec}} T_{évolspec} + p_{M_{spec}, Q_{spec}} M_{spec} + p_{T_{STBpub}, Q_{spec}} T_{STBpub} \quad (26)$
Qualité de la Définition Q_{Def}	$Q_{Def} = p_{T_{DE,AC}, Q_{Def}} T_{DE,AC} + p_{T_{RevDesign}, Q_{Def}} T_{RevDesign} + p_{T_{SA}, Q_{Def}} T_{SA} \quad (27)$
Qualité du Système de Production Q_{Sprod}	$Q_{Sprod} = p_{MRL, Q_{Sprod}} MRL + p_{T_{NI}, Q_{Sprod}} T_{NI} + p_{T_{A-proc}, Q_{Sprod}} T_{A-proc} + p_{Q_{DFC}, Q_{Sprod}} Q_{DFC} \quad (28)$
Qualité de la Supply Chain $Q_{S.C.}$	$Q_{S.C.} = p_{T_{NE}, Q_{S.C.}} T_{NE} + p_{T_{Derog}, Q_{S.C.}} T_{Derog} + p_{SCE, Q_{S.C.}} SCE \quad (29)$

Tableau 22 : Relations en critères sans parent modifiant et métriques Conformité

Le critère avec parents modifiants est « Qualité de la Justification » (cf. V.1.2.4.). La métrique P_{DJD} « Pertinence du DJD » est parent modifiant associée aux deux autres métriques. La valeur de la métrique P_{DJD} est donc multipliée aux valeurs des deux autres métriques parents (cf. IV.2.1.).

$$Q_{DJD} = P_{DJD} \left(p_{T_{DJD} \leftrightarrow P_{DJD}, Q_{DJD}} T_{DJD} + p_{T_{SR} \leftrightarrow P_{DJD}, Q_{DJD}} T_{SR} \right) \quad (30)$$

Concernant les facteurs, les trois critères parents du sous-facteur « conformité de la définition » τ_{cDef} sont parents modifiants associés entre eux. Les deux critères parents de « conformité du système à sa définition » τ_{cProd} ne sont pas parents modifiants (cf. V.1.2.4.). L'application des fonctions H_{Fi} permet d'obtenir les relations entre ces critères et leurs facteurs (Tableau 23), la somme des poids étant toujours égale à 1.

Facteur	Equation associée
Conformité de la Définition τ_{cDef}	$\tau_{cDef} = P_{Q_{Spec} \leftrightarrow Q_{Def} \leftrightarrow Q_{DJD}} Q_{Spec} \times Q_{Def} \times Q_{DJD} \quad (31)$
Conformité du Système à sa Définition τ_{cProd}	$\tau_{cProd} = p_{Q_{Sprod}, \tau_{cProd}} Q_{Sprod} + p_{Q_{S.C.}, \tau_{cProd}} Q_{S.C.} \quad (32)$

Tableau 23 : Relations entre critères et facteurs Conformité

Remarque : Aux jalons qui précèdent J3 (Figure 1 et Figure 22), entrée en phase de qualification, les valeurs de toutes les métriques et donc des critères ne sont pas disponibles, la formule (31) doit donc être adaptée pour pouvoir calculer le niveau du facteur conformité de la définition du système. Pour cela, il faut prendre en compte l'objectif d'exigences à acquérir pour chacun des jalons. Si cet objectif est trop faible (inférieur aux deux tiers), le critère Q_{DJD} « Qualité de la justification » n'est pas représentatif et n'est pas pris en compte dans le calcul du niveau de qualité du facteur.

Chacun des critères ayant une importance égale vis-à-vis du facteur à terminaison, les règles de calcul sont les suivantes (Tableau 24) :

- À J1, un seul des critères, Q_{Spec} « Qualité des Spécifications », est calculable, soit un tiers du poids total ;
- À J2 et J3: si la proportion d'exigences qu'il est prévu d'acquérir est inférieure à 67% (deux tiers), le critère Q_{DJD} « Qualité de la justification » n'est pas représentatif, le critère Q_{Def} « Qualité de la définition » est partiellement avancé, soit deux tiers du poids total, sinon, tous les critères sont calculables ;
- À J4, tous les critères sont calculables.

Jalon	Objectif d'exigences acquises	Conformité de la Définition τ_{cDef}
J1	N.A.	$\tau_{cDef} = \frac{1}{3} Q_{Spec} \quad (33)$
J2 ou J3	< 67%	$\tau_{cDef} = \frac{2}{3} Q_{Spec} \times Q_{Def} \quad (34)$
	≥ 67%	$\tau_{cDef} = Q_{Spec} \times Q_{Def} \times Q_{DJD} \quad (31)$
J4	100%	$\tau_{cDef} = Q_{Spec} \times Q_{Def} \times Q_{DJD} \quad (31)$

Tableau 24 : Calcul de τ_{cDef} en fonction des jalons

Les poids de chacun des arcs et les objectifs intermédiaires pour les métriques à chaque jalon doivent ensuite être définis pour utiliser les modèles de prévision de la conformité.

V.1.3.2. 2^{ème} étape : Détermination des paramètres du modèle Conformité par élicitation des avis d'experts

Une élicitation est réalisée pour déterminer les objectifs intermédiaires et les poids des arcs pour chacun des jalons du cycle de vie des systèmes. Des ingénieurs qualité sont interrogés pour définir ces valeurs au cours d'entretiens dirigés. Au total, sept ingénieurs qualité travaillant sur des systèmes en développement ont été interrogés sur la partie 1, conformité de la définition et six travaillant sur des systèmes en production pour la partie 2, conformité du système à sa définition.

L'objet de cette étape est d'obtenir de chaque expert, pour chaque métrique à chacun des jalons (cf. IV.2.2.) :

- La valeur attendue minimale acceptable $\min(\mathbf{m}_k^*)_e$, en dessous de laquelle il y a un risque accru d'échec à satisfaire l'objectif ;
- La valeur attendue $\mathbf{m}_k^*_e$, pour laquelle le développement du système aura le plus de chance d'atteindre l'objectif qualité sur le facteur conformité ;
- La valeur attendue maximale $\max(\mathbf{m}_k^*)_e$;
- Les poids des arcs du modèle.

La procédure suivie pour mener l'élicitation des avis d'experts suit les recommandations décrites au paragraphe IV.2.2. La trame pour les entretiens d'élicitation est présente en Annexe 4. Les entretiens sont individuels et durent une heure trente.

Ces valeurs doivent ensuite être agrégées pour être utilisées au sein des deux modèles de prévision de la conformité au cours de la troisième étape.

V.1.3.3. 3^{ème} étape : Agrégation des avis d'experts pour le modèle Conformité

Les avis d'experts issus de l'élicitation sont agrégés pour définir les poids des arcs, les objectifs intermédiaires et les fonctions donnant les degrés d'atteinte des objectifs qualité produit à terminaison.

Agrégations des poids des arcs

Partie 1, Q_{Spec} : Concernant les poids des arcs, les réponses de six des sept ingénieurs interrogés sont retenues (les réponses d'un des ingénieurs ont été écartées car elles n'étaient pas cohérentes avec les autres réponses, voir les explications au paragraphe V.1.3.4.), la moyenne de ces réponses est la fonction d'agrégation (cf. IV.2.3.). Le détail des réponses est présenté dans le Tableau 25.

	Couverture du besoin du client $T_{CBesoin}$	Taux d'évolution des STB Système $T_{évolspec}$	Maturité des STB équipements M_{Spec}	Taux de STB Publiées T_{STBpub}
Expert 1	0,25	0,25	0,25	0,25
Expert 2	0,40	0,20	0,20	0,20
Expert 3	0,40	0,20	0,30	0,10
Expert 4	0,25	0,25	0,25	0,25
Expert 5	0,29	0,13	0,29	0,29
Expert 6	0,30	0,20	0,20	0,30
Moyenne des Poids	0,31	0,21	0,23	0,25

Tableau 25 : Poids des arcs du critère « Qualité des spécifications »

En fonction de ces poids et de l'équation (26), le niveau de qualité des spécifications MBDA (système et équipements) s'exprime par l'équation (35).

$$Q_{spec} = 0,31 \times T_{cBesoin} + 0,21 \times T_{évolSpec} + 0,23 \times M_{spec} + 0,25 \times T_{STBpub} \quad (35)$$

Par la suite, les moyennes des réponses des experts sont directement données.

Partie 1, Q_{DEF} :

- **Cas 1 :** Les poids des métriques concernant la qualité de la définition en l'absence d'indicateurs de maturité sont donnés dans le Tableau 26.

Métriques		Poids
T_{DE,AC}	Taux de DE et AC	0,42
T_{RevDesign}	Taux d'actions bloquantes non clôturées	0,20
T_{SA}	Taux de SA séries Publiées	0,38

Tableau 26 : Poids des arcs du critère « Qualité de la définition »

Le niveau de qualité de la définition s'exprime donc, d'après l'équation (27), par la relation (36).

$$Q_{Def} = 0,42 \times T_{DE,AC} + 0,20 \times T_{RevDesign} + 0,38 \times T_{SA} \quad (36)$$

- **Cas 2 :** Le cas où les indicateurs de maturité sont disponibles n'a pas fait l'objet d'une élicitation des poids car il n'y pas eu de développement utilisant l'ensemble de ces indicateurs jusqu'à présent. Dans un premier temps, ces indicateurs peuvent raisonnablement être considérés de poids égaux car les différents niveaux de maturité ont été définis comme des objectifs à atteindre obligatoirement pour le passage d'un jalon (Tableau 27).

Métriques		Poids
TRL	Technical Readiness Level	0,25
IRL	Integration Readiness Level	0,25
SRL	System Readiness Level	0,25
CDA	Class of Difficulty Assessment	0,25

Tableau 27 : Poids des arcs des métriques de maturité (Readiness Level) du critère « Q_{DEF} »

Ces poids pourront ainsi servir lors des développements des systèmes utilisant ces métriques.

Partie 1, Q_{DIR} : Les exigences spéciales « SR » font partie des exigences du système, la métrique « Taux de SR acquises » est donc une composante de la métrique « Taux d'exigences acquises ». Elle a été ajoutée au modèle pour donner plus de poids aux exigences spéciales. Il est choisi, avec les experts interrogés, de les prendre en compte à poids égal. Les poids des arcs sont détaillés dans le Tableau 28.

Parent modifiant commun	Métriques		Poids
P_{DJD} Pertinence du DJD	T_{DJD}	Taux d'exigences acquises	0,5
	T_{SR}	Taux de SR acquises	0,5

Tableau 28 : Poids des arcs du critère « Qualité de la justification »

D'après l'équation (30), la relation permettant de calculer le niveau de qualité de Q_{DJD} est la (37).

$$Q_{DJD} = P_{DJD} \times (0,5 \times T_{DJD} + 0,5 \times T_{SR}) \quad (37)$$

Partie 1, τ_{cDef} : Pour le calcul du facteur conformité de la définition τ_{cDef} , la valeur du facteur à terminaison est le produit des 3 critères (équation (31)), car ils sont tous parents modifiants (cf. IV.2.3.1.) :

Par définition : $P_{Q_{Spec} \leftrightarrow Q_{Def} \leftrightarrow Q_{DJD}} = 1$

Partie 2, Q_{SProd} : Concernant la partie 2 du modèle, conformité du système à sa définition, il n'y a pas de parent modifiant, les poids des arcs sont dans les Tableau 29, Tableau 30 et Tableau 31.

Métriques		Poids
MRL	Manufacturing Readiness Level	0,25
T_{NI}	Taux de NI	0,31
T_{A-proc}	Taux de couverture AMDEC Process	0,18
Q_{DFC}	Qualité du DFC	0,26

Tableau 29 : Poids des arcs du critère « Qualité du Système de Production »

D'après l'équation (28), Q_{SProd} s'évalue par la relation (38).

$$Q_{SProd} = 0,25 \times MRL + 0,31 \times T_{NI} + 0,18 \times T_{A-proc} + 0,26 \times Q_{DFC} \quad (38)$$

Partie 2, $Q_{S.C.}$:

Métriques		Poids
T_{NE}	Taux de NE	0,42
T_{Derog}	Taux de dérogation	0,29
SCE	Maturité des fournisseurs	0,29

Tableau 30 : Poids des arcs du critère « Qualité de la Supply Chain »

D'après l'équation (29), $Q_{S.C.}$ s'évalue par la relation (39).

$$Q_{S.C.} = 0,42 \times T_{NE} + 0,29 \times T_{Derog} + 0,29 \times SCE \quad (39)$$

Partie 2, τ_{cProd} : Le facteur Conformité du système à sa définition n'a pas parent modifiant lui non plus. Les poids des arcs reliés au facteur sont dans le Tableau 31.

Critères		Poids
Q_{Sprod}	Qualité du Système de Production	0,46
$Q_{S.c.}$	Qualité de la Supply Chain	0,54

Tableau 31 : Poids des arcs du facteur « Conformité du système à sa Définition »
D'après l'équation (32), le facteur τ_{cProd} s'exprime par la relation (40).

$$\tau_{cProd} = 0,46 \times Q_{Sprod} + 0,54 \times Q_{S.c.} \quad (40)$$

Objectifs intermédiaires pour les métriques

Les objectifs intermédiaires sont agrégés suivant la méthode décrite dans le paragraphe IV.2.3.1. Les résultats de l'agrégation sont disponibles dans l'Annexe 5.

Le détail des réponses pour la métrique « maturité des spécifications des équipements » et son traitement est développé ci-dessous à titre d'exemple.

Pour cette métrique, 6 experts ont répondu lors de l'élicitation (Tableau 32). Au jalon J1, il est trop tôt pour évaluer cette métrique, il n'y a donc pas de niveau attendu. Les réponses pour les jalons J2 à J4 sont données dans le Tableau 32 ci-dessous. Au jalon J4, la maturité des spécifications doit être strictement de 100% pour être acceptable, car le système est qualifié à ce stade.

	M_{spec} : Maturité des spécifications des équipements %							
	J1	J2			J3			J4
		$m_k^* e$	$\min(m_k^*)_e$	$\max(m_k^*)_e$	$m_k^* e$	$\min(m_k^*)_e$	$\max(m_k^*)_e$	$m_k^* e = \min(m_k^*)_e = \max(m_k^*)_e$
Expert 1	N.A.	S.A.	S.A.	S.A.	100	100	100	100
Expert 2	N.A.	100	95	100	100	100	100	100
Expert 3	N.A.	S.A.	S.A.	S.A.	100	S.A.	100	100
Expert 4	N.A.	100	80	100	100	100	100	100
Expert 5	N.A.	60	50	100	100	95	100	100
Expert 6	N.A.	100	90	100	100	100	100	100
Agrégation	N.A.	92	50	100	100	95	100	100

Tableau 32 : Réponses des experts et agrégation des objectifs intermédiaires pour la métrique M_{spec}

N.A. : Non Applicable, S.A. : Sans Avis

L'agrégation de ces réponses (Tableau 32) se fait par la moyenne arithmétique pour le niveau attendu. Pour le minimum acceptable, c'est la plus petite borne donnée par les experts qui est conservée et pour le maximum possible, c'est la plus grande borne (cf. IV.2.3.1.).

Grâce à ces valeurs, les fonctions $D_{M_{spec}}$ permettant le calcul du niveau d'atteinte de l'objectif à terminaison à chacun des jalons peuvent être définies.

L'expression de $D_{M_{spec}}$ au jalon J2 est développée ci-dessous.

Définition de $D_{M_{spec}}(m_{spec})_e$ pour chacun des experts (cf. IV.2.3.1, équation (8)) :

Pour le jalon J2,

Expert 2 :

$$\forall m_{spec} \in [0; 0,95[, D_{M_{spec}}(m_{spec})_2 = \frac{m_{spec}}{0,95} \times 50\%$$

$$\forall m_{spec} \in [0,95; 1], D_{M_{spec}}(m_{spec})_2 = \left(\frac{m_{spec} - 0,95}{1 - 0,95} + 1\right) \times 50\%$$

Expert 4 :

$$\forall m_{spec} \in [0; 0,8[, D_{M_{spec}}(m_{spec})_4 = \frac{m_{spec}}{0,8} \times 50\%$$

$$\forall m_{spec} \in [0,8; 1], D_{M_{spec}}(m_{spec})_4 = \left(\frac{m_{spec} - 0,8}{1 - 0,8} + 1\right) \times 50\%$$

Expert 5 :

$$\forall m_{spec} \in [0; 0,5[, D_{M_{spec}}(m_{spec})_5 = \frac{m_{spec}}{0,5} \times 50\%$$

$$\forall m_{spec} \in [0,5; 0,6], D_{M_{spec}}(m_{spec})_5 = \left(\frac{m_{spec} - 0,5}{0,6 - 0,5} + 1\right) \times 50\%$$

$$\forall m_{spec} \in [0,6; 1], D_{M_{spec}}(m_{spec})_5 = \frac{m_{spec} - 0,6}{1 - 0,6} \times 50\% + 100\%$$

Expert 6 :

$$\forall m_{spec} \in [0; 0,9[, D_{M_{spec}}(m_{spec})_6 = \frac{m_{spec}}{0,9} \times 50\%$$

$$\forall m_{spec} \in [0,9; 1], D_{M_{spec}}(m_{spec})_6 = \left(\frac{m_{spec} - 0,9}{1 - 0,9} + 1\right) \times 50\%$$

Au jalon J2, la valeur $D_{M_{spec}}(m_{spec})$ est la moyenne arithmétique des valeurs données par les fonctions de chacun des experts sur les intervalles définis par leurs réponses : $[0; 0,5]$, $[0,5; 0,6]$, $[0,6; 0,8]$, $[0,8; 0,9]$, $[0,9; 0,95]$ et $[0,95; 1]$ (cf. IV.2.3.1, équation (8 bis)).

$$\forall m_{spec} \in [0; 100], D_{M_{spec}}(m_{spec}) = \frac{1}{4} \times \sum_{e=1}^4 D_{M_{spec}}(m_{spec})_e$$

Les équations aux autres jalons et pour les autres métriques sont obtenues en procédant de la même manière.

Tous les éléments nécessaires à l'utilisation du modèle sont ainsi déterminés, l'étape de validation peut débuter.

V.1.3.4. Validation du modèle de prévision de la Conformité

Chacun des éléments qui composent le modèle sont à valider :

- Les poids des arcs du modèle de prévision ;
- Les objectifs intermédiaires déterminés pour chacun des jalons du cycle de vie ;
- La cohérence des prévisions du modèle.

Concernant le poids des arcs du modèle et les objectifs intermédiaires, le principe, détaillé dans le chapitre IV, est de commencer par identifier les réponses qui sont incompatibles entre elles ainsi que les cas où il n'y a pas de consensus entre les réponses des personnes interrogées (cf. IV.2.4.).

Parmi les réponses utilisées pour le modèle de conformité, seules celles provenant d'un des experts étaient vraiment incompatibles avec les autres. Cette différence s'explique par le fait que le répondant se référait à une expérience de développement d'un système non représentative des déroulements habituels. Ces éléments ont donc été écartés pour la construction du modèle.

L'ensemble des personnes ayant participé à l'élicitation ont ensuite été réunies pour valider le modèle. La revue a consisté au rappel du principe de fonctionnement du modèle ainsi que de sa structure, afin que l'ensemble des participants ait bien en tête la dernière version du modèle de prévision. Il n'y avait pas d'autres divergences dans les réponses des personnes interrogées, les valeurs des poids des arcs sont donc restées celles calculées à partir des réponses issues de l'élicitation.

Puis, chacun des objectifs intermédiaires a été présenté, sous forme d'intervalles graphiques, et discuté. Quelques corrections ont été apportées à ces objectifs en fonction des remarques soulevées par les participants à la revue (cf. Annexe 5).

Enfin, la cohérence de l'ensemble du modèle a été revue. Pour cela, plusieurs scénarios de développement ont été conçus pour tester différentes combinaisons de métriques en entrée du modèle. Quatre scénarios ont été testés :

- Un dont toutes les métriques sont au niveau attendu ;
- Un dont toutes les métriques sont inférieures au niveau attendu ;
- Deux autres avec des niveaux de métriques situées dans les intervalles de valeurs attendues.

Pour chacun des scénarios, les résultats donnés par le modèle ont été analysés et discutés avec les participants à la revue. Aucun comportement suspect du modèle n'ayant été relevé, la cohérence du modèle a été validée.

Le modèle a également été testé avec des métriques provenant de trois développements réels. Cela a permis de comparer les résultats calculés avec le déroulement réel de ces développements. Ces applications sur des systèmes réels sont développées dans la partie suivante.

V.1.4. Utilisation opérationnelle du modèle de prévision de la Conformité

La partie 1 du modèle a été testée pour deux systèmes en cours de qualification, désignés comme le système A et le système B. La partie 2 a été testée pour un système C en cours de production. Ces systèmes ont été choisis pour leur niveau d'avancement dans le cycle de vie et la possibilité technique de calculer les valeurs des métriques pour chacun des jalons.

Les métriques du système A ont été calculées a posteriori pour les jalons J1, J2 et J3, c'est à dire du début de la conception jusqu'à l'entrée en qualification (cf. Figure 1 et Figure 22).

Pour le système B, les métriques ont été calculées, également a posteriori, pour les jalons J2 (début du développement) et J3.

V.1.4.1. Outil permettant l'utilisation des modèles Conformité

Nous avons conçu un outil de calcul et de suivi des niveaux de conformité tout au long du cycle de vie des systèmes, sous un tableur, pour utiliser le modèle de prévision de la conformité. Cet outil permet de calculer les niveaux de qualité des critères et du facteur pour chaque jalon du cycle de vie et de tracer leur évolution par rapport aux valeurs attendues. L'outil calcule également le degré d'atteinte des objectifs intermédiaires et à terminaison pour les métriques, critères et le facteur.

Note : Les représentations suivantes doivent encore évoluer dans leur forme pour être plus lisibles et faciles à interpréter par les utilisateurs du modèle de prévision.

L'outil comporte trois types d'onglets dédié à l'utilisation du modèle :

- Caractériser le Système
- Renseigner les valeurs des Métriques
- Lecture et interprétation des sorties du modèle

Caractériser le Système :

Les objectifs intermédiaires élicités lors de la construction du modèle sont adaptés au cas général de développement d'un système complexe au sein de MBDA. Cependant, le contexte de développement peut parfois être différent du cas général et certains paramètres du modèle doivent alors être ajustés en conséquence. Par exemple, dans le cas du modèle de prévision de la Conformité, ces éléments de contexte sont :

- La proportion d'équipements provenant de systèmes déjà existants, réutilisés pour le système en cours de développement ;
- La proportion d'équipements composant le système achetés à des fournisseurs extérieurs ;
- La proportion d'acquisition des exigences attendues à chaque jalon.

La première chose à faire avant de pouvoir utiliser ce modèle est donc de renseigner ces éléments de contexte dans l'outil (Figure 44) afin de recalibrer les objectifs intermédiaires par rapport à ces données (par exemple, considérer que les équipements réutilisés disposent déjà d'une STB mature en début de projet).

Caractéristiques du Système

	%
Proportion de re-use	0%
Proportions d'équipements achetés	50%

Proportion d'exigence à acquérir en fonction du PGE :

		J1	J2	J3	J4
Proportion prévue d'exigences à la justification acquise (%)	T_{DJD}	0%	10%	40%	100%

Figure 44 : Champs permettant la saisie des caractéristiques particulières du système en cours de développement

Sur la Figure 44, le champ « Proportion de re-use » permet de renseigner le pourcentage d'équipements provenant de développements précédents, le champ « Proportion d'équipements achetés » concerne le pourcentage d'équipements composants le système qui ne sont pas produits par MBDA et le tableau permet de renseigner la proportion d'exigences à la justification acquise prévue par le Plan Général d'Essais (PGE) à chacun des jalons.

Renseigner les valeurs des Métriques :

L'outil comporte un champ permettant de renseigner les valeurs des métriques, qui constituent les entrées du modèle, pour chacun des jalons du cycle de vie du système. Par exemple, pour le modèle concernant le facteur Conformité, deux tableaux récapitulatifs permettent de renseigner les valeurs des métriques pour les deux parties du modèle :

- La conformité de la définition au besoin du client (Figure 45) ;
- La conformité du système à sa définition (Figure 46).

Métriques pour la Conformité de la Définition

		J1	J2	J3	J4
Couverture du besoin du client	$T_{CBesoin}$	58%	58%	100%	
Taux d'évolution des STB Système	$T_{évolspec}$	0%	100%	0%	
Maturité des STB équipement	M_{Spec}	70%	70%	80%	
Taux de STB Publiées	T_{STBpub}	0%	100%	100%	
Taux de DE et AC	$T_{DE/AC}$	0%	100%	85%	
Taux d'actions bloquantes non clôturées	$T_{RevDesign}$	0%	0%	0%	
Taux de SA séries Publiées	T_{SA}	0%	0%	100%	
Taux d'exigences acquises	T_{DJD}		0%	31%	
Pertinence du DJD	P_{DJD}		100%	100%	
Taux de SR acquises	T_{SR}		0%	31%	

Figure 45 : Tableau récapitulatif des valeurs des métriques en entrée du modèle de prévision de la Conformité de la Définition du système par rapport aux exigences du client.

Métriques pour la Conformité du Système à sa Définition

		J3	J4			
Manufacturing Readiness Level	MRL					
Taux de NI	T_{NI}					
Taux d'AMDEc Process réalisées	T_{AProc}					
Qualité du DFC	Q_{DFC}					
Taux de NE	T_{NE}					
Taux de dérogation	T_{Derog}					
Note moyenne SCE	SCE					

Figure 46 : Tableau récapitulatif des valeurs des métriques en entrée du modèle de prévision de la Conformité du système par rapport à sa Définition

Lorsque les informations sont disponibles, les valeurs de ces métriques peuvent être complétées par extraction automatique de l'information des outils utilisés pour le développement, tels que des bases de données, des outils de gestion des non-conformités, de la configuration, des exigences, etc. Pour les applications présentées dans ce chapitre, l'extraction automatique des métriques n'avait pas été mise en œuvre.

Lecture et interprétation des sorties du modèle :

L'ensemble des résultats donnés par le modèle sont récapitulés sur un tableau de bord présenté sur la Figure 47. Les principaux composants de ce tableau de bord sont :

1. Le nom du système concerné et son stade dans le cycle de vie (système A, Jalon J3 dans l'exemple de la Figure 47, n°1) ;
2. Les différentes phases du cycle de vie ainsi que les principaux jalons (n°2) ;
3. Le niveau de qualité atteint par le facteur considéré, indiqué pour chacun des jalons (n°3) ;
4. L'évolution du niveau de qualité produit indiquée sur le graphe (n°4) qui reprend les domaines de valeurs acceptables, admissibles et insuffisantes.
5. Les niveaux de qualité atteints pour chacun des critères indiqués dans le tableau (n°5). La couleur des cases du tableau permet de voir dans quelle plage de valeurs se trouve le critère par un dégradé de couleur allant du vert au jaune pour les valeurs acceptables, du jaune à l'orange pour les valeurs admissibles et de l'orange au rouge pour les valeurs insuffisantes.

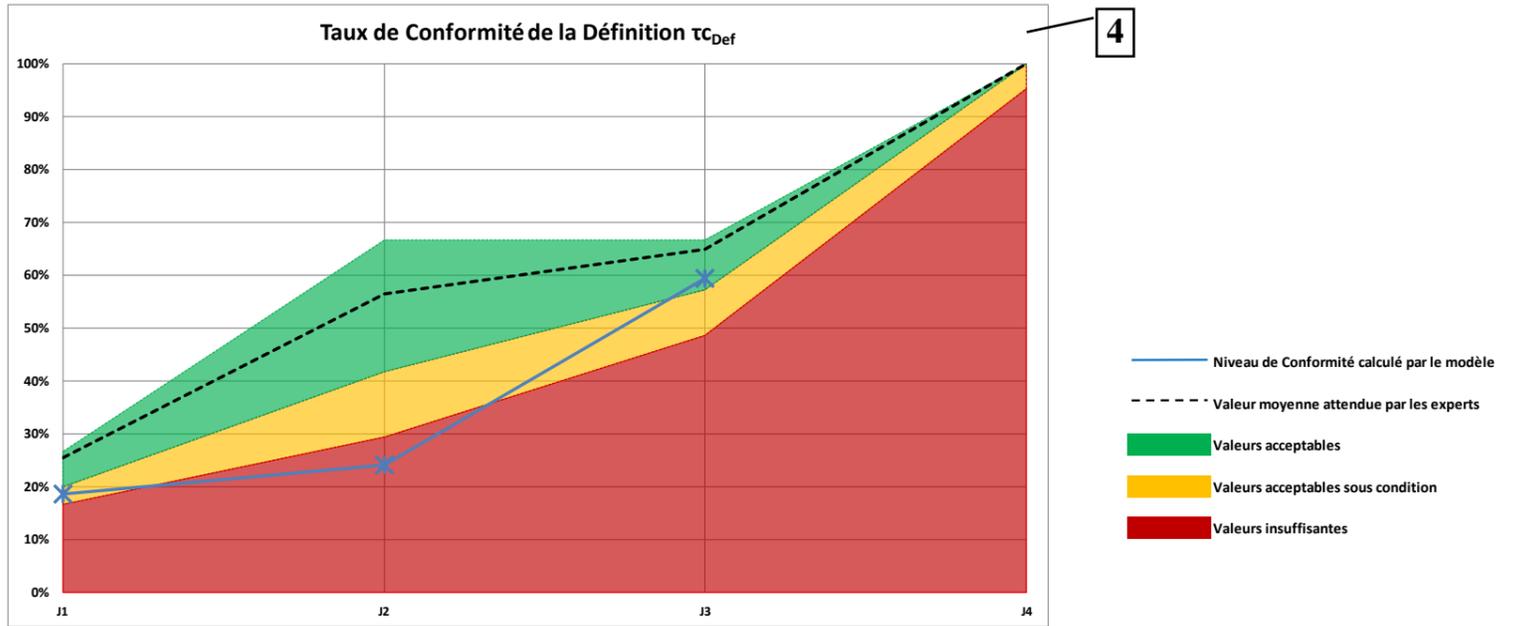
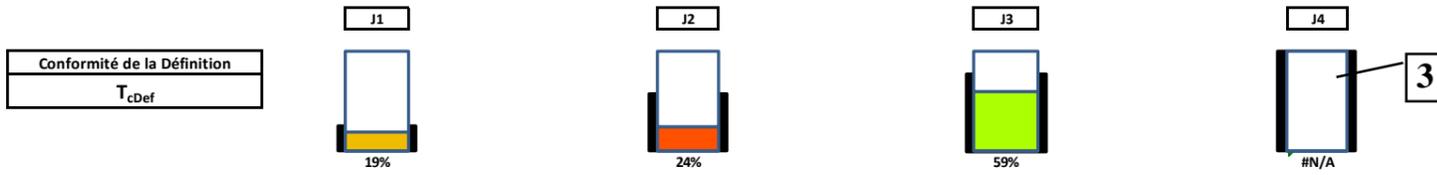
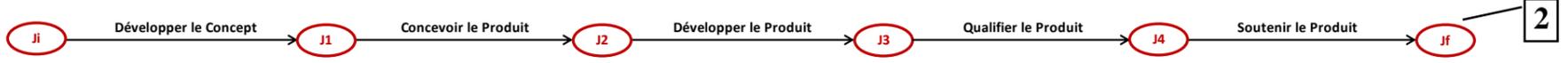
La deuxième partie du tableau de bord (Figure 47) permet d'afficher les prévisions de qualité à terminaison pour les critères et le facteur :

6. L'évolution des prévisions est donnée sur le graphe (n°6) où figurent les plages de valeurs acceptables, admissibles et insuffisantes ;
7. Les valeurs des prévisions à terminaison données par le modèle (degrés d'atteinte des objectifs qualité produit à terminaison) sont récapitulées dans le tableau (n°7). Le même code de couleur que celui utilisé pour le niveau de qualité atteint est conservé pour les prévisions à terminaison.

Modèle de Prédiction de la Conformité de la Définition

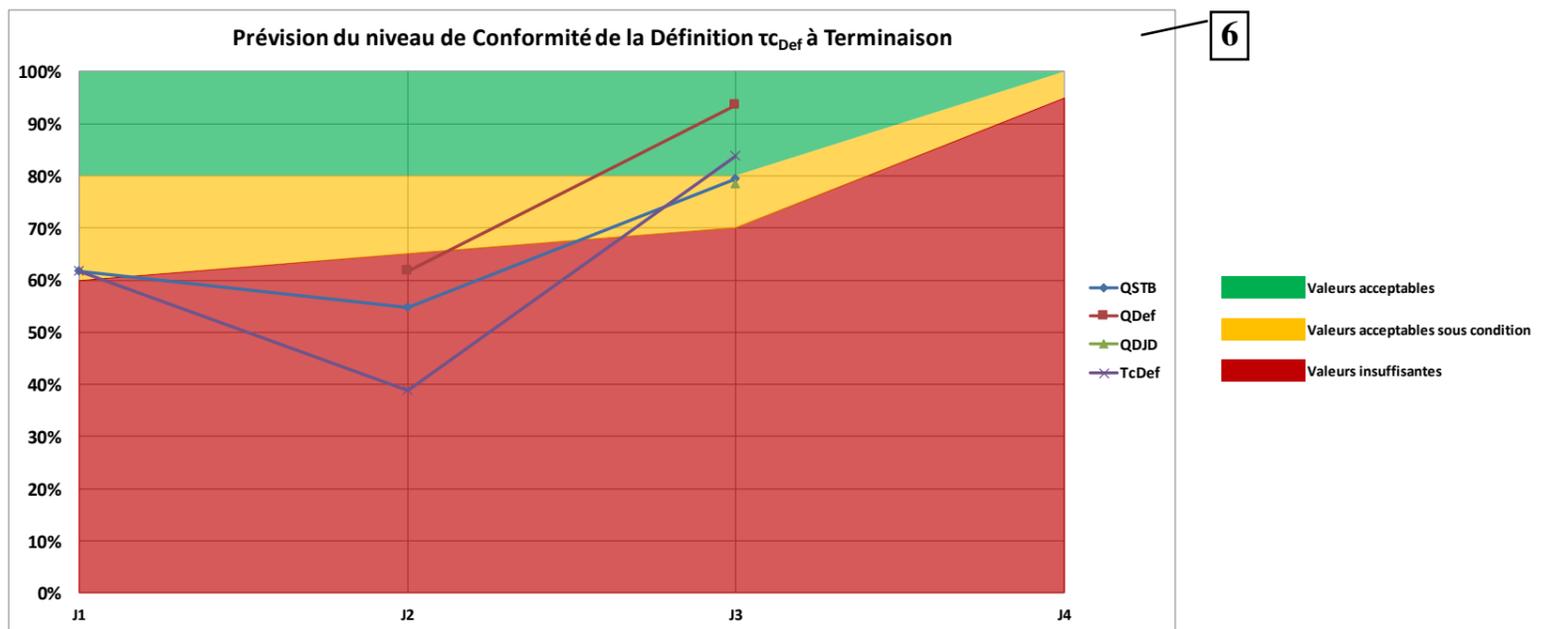
PROGRAMME	Systeme A	1
STADE DU DEVELOPPEMENT	J3	

Avancement de la Conformité de la Définition



	J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q _{STB} 56%	59%	95%	#N/A
Qualité de la Définition	Q _{Def}	62%	93%	#N/A
Qualité de la justification	Q _{DJD}	#N/A	59%	#N/A

Prédiction de la Conformité de la Définition à Terminaison



	J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q _{STB} 62%	55%	79%	#N/A
Qualité de la Définition	Q _{Def}	62%	93%	#N/A
Qualité de la justification	Q _{DJD}	#N/A	79%	#N/A
Conformité de la Définition	T _{cDef} 62%	39%	84%	#N/A

Figure 47 : Tableau de bord de l'outil permettant l'utilisation du modèle de prédiction de la conformité de la définition aux exigences du client

Enfin, le modèle est représenté sous forme de réseau avec pour chacun des nœuds une jauge permettant de voir le degré d'atteinte de l'objectif intermédiaire au jalon considéré (Figure 48). Cette représentation permet de remonter facilement aux éléments défaillants lorsque que le résultat affiché sur le tableau de bord principal (Figure 47) n'est pas satisfaisant. Toutes les jauges qui ne sont pas vertes correspondent à des métriques, critères et facteur qui ne sont pas au niveau attendu. Il est ainsi possible d'identifier les métriques en cause afin de s'entretenir ensuite avec les personnes responsables de ces éléments et trouver des solutions pour atteindre l'objectif voulu.

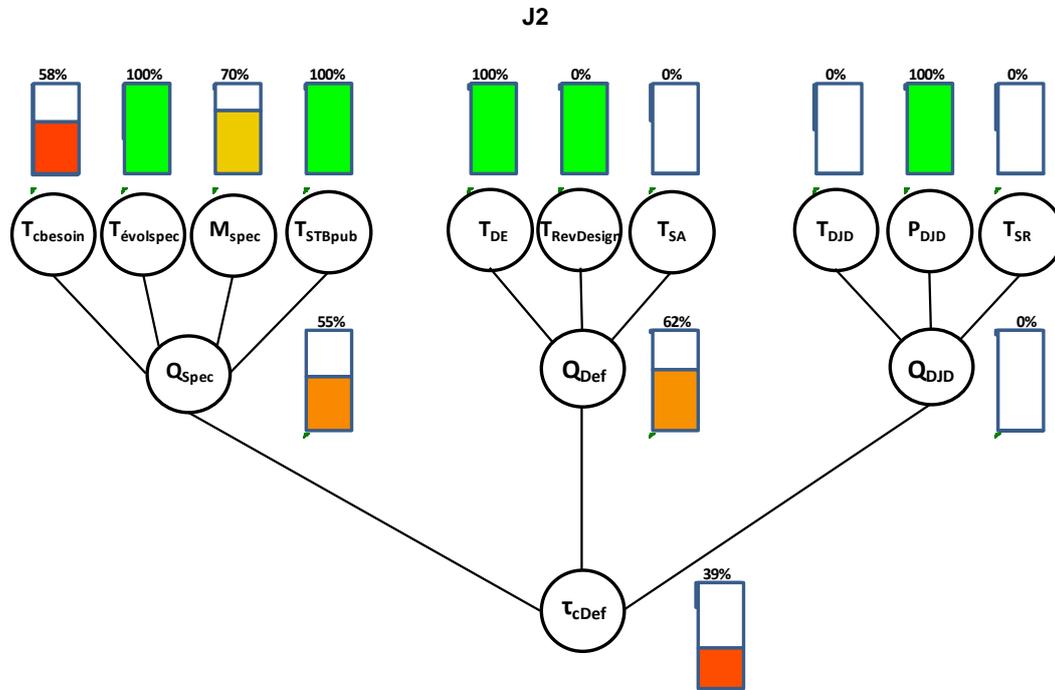


Figure 48 : Modèle de prévision sous forme de réseau avec degrés d'atteinte des objectifs qualité produit intermédiaires

Ces jauges sont accompagnées de graphes retraçant l'évolution des valeurs des métriques, critères et facteur tout au long du cycle de vie des systèmes, comme par exemple le graphe concernant la métrique « Taux de couverture du besoin » sur la Figure 49 où figure en J2 la valeur de 58% visible en Figure 48.

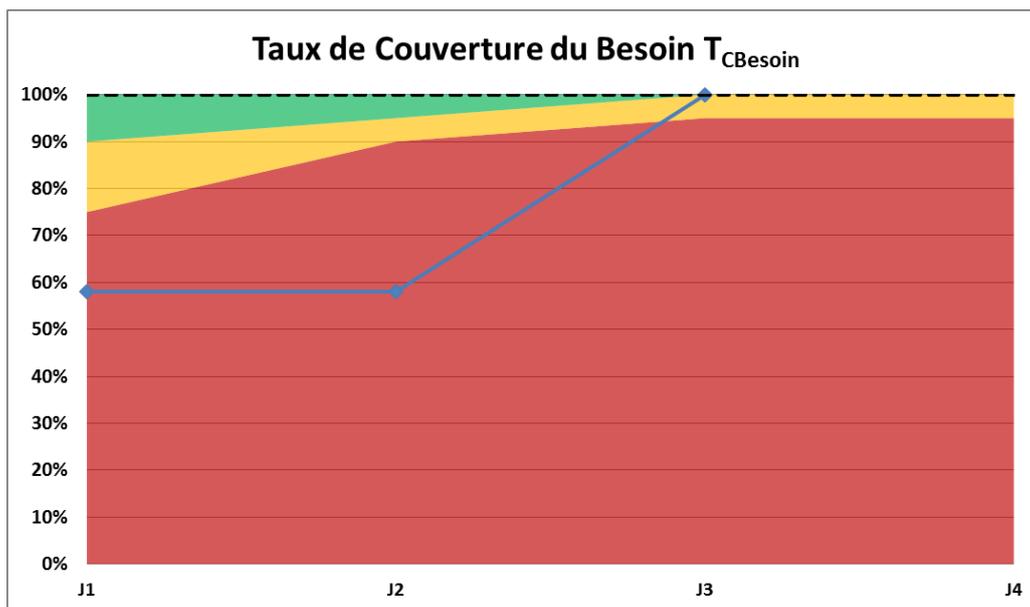


Figure 49 : Graphe d'évolution de la métrique Couverture du besoin

V.1.4.2. Partie 1 : Conformité de la définition du système par rapport aux exigences du client

Systeme A

Jalon J1 :

Le niveau de conformité de la définition du système A au jalon J1 est comparé aux valeurs attendues sur le graphe de la Figure 50.

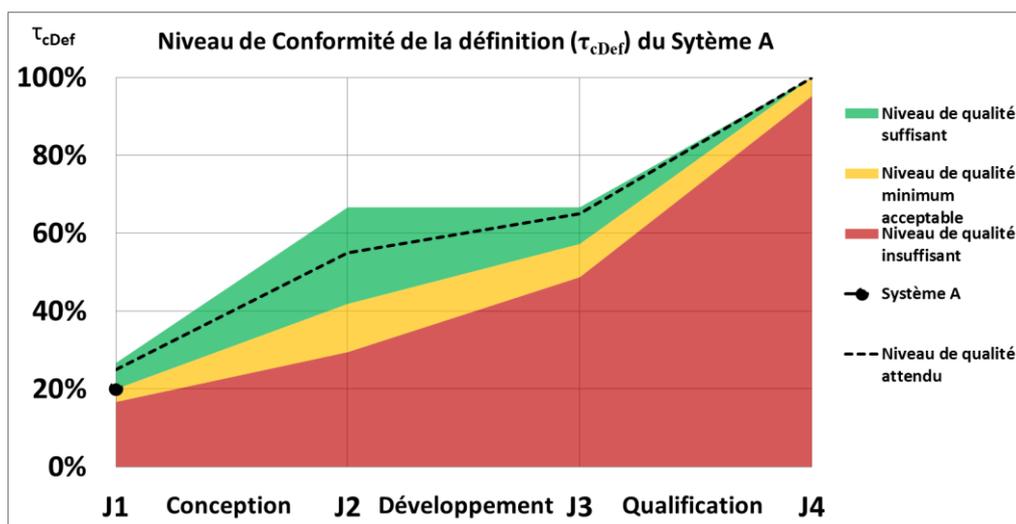


Figure 50 : Niveaux de Conformité calculés pour le système A au jalon J1, Facteur τ_{cDef}

Le niveau de conformité au jalon J1 apparaît comme limite par rapport aux valeurs attendues. Le critère qualité des spécifications, le seul calculable à ce stade, affiche un niveau de qualité de 56%, considéré comme étant dans la zone de minimum acceptable (Tableau 33). En conséquence, le niveau de qualité du critère, à 19%, est également dans la zone de minimum acceptable (Figure 50).

		Niveau de qualité mesuré			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	56%			
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.A.			
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.A.			
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	19%			

Tableau 33 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système A au jalon J1
N.A. : Non Applicable

Cela s'explique par la valeur des métriques du critère qualité des spécifications (Figure 51) :

- Couverture du besoin du client $T_{CBesoin}$: 58% alors que l'objectif attendu est de 100% et 70% au minimum acceptable ;
- Taux d'évolution des Spécifications Techniques du Besoin (STB) Système $T_{évolspec}$: 0% par définition au premier jalon ;
- Maturité des STB équipement M_{Spec} : 70%, ce qui est supérieur à l'attenu (0%) ;
- Taux de STB Publiées T_{STBpub} : 0%, ce qui est inférieur à l'acceptable (65%).

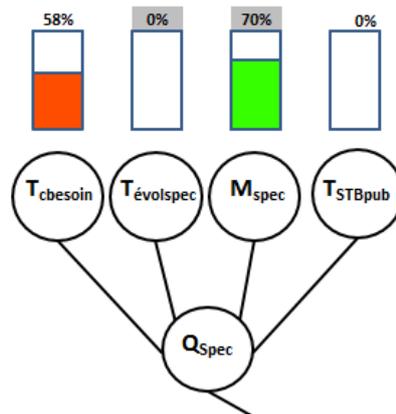


Figure 51 : Valeur des métriques calculables au jalon J1 pour le système A

L'avance prise sur la maturité des STB permet d'avoir un critère à un niveau acceptable minimum. Le degré d'atteinte de l'objectif à terminaison calculé via l'outil est de 62% pour le facteur ainsi que pour le critère Q_{STB} « Qualité des spécifications » (Tableau 34). C'est le seul critère calculable à ce stade du développement.

		Degré d'atteinte de l'objectif à terminaison			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	62%			
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.A.			
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.A.			
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	62%			

Tableau 34 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système A au jalon J1

Jalon J2 :

La progression entre les jalons J1 et J2 est trop faible et l'écart entre le niveau de conformité calculé et le niveau attendu augmente (Figure 52, 24% au lieu de 56% attendu).

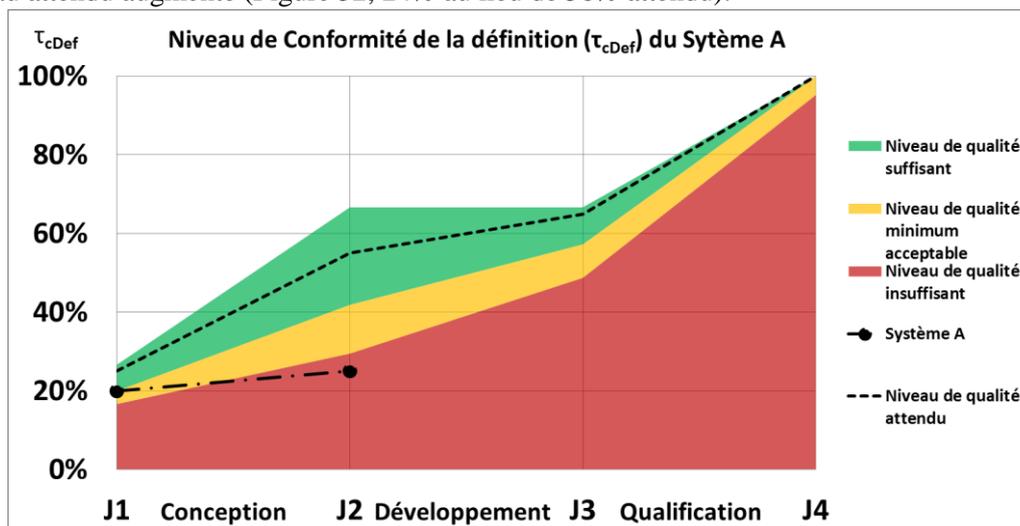


Figure 52 : Niveaux de Conformité calculés pour le système A jusqu'au jalon J2

Le niveau de conformité est trop faible pour atteindre l'objectif qualité produit à terminaison (zone rouge, Figure 52). Le modèle permet d'identifier les causes racines du problème par l'analyse des valeurs des critères. D'après les valeurs calculées via l'outil (Tableau 35), les critères Q_{STB} et Q_{Def} sont inférieurs aux niveaux attendus (respectivement 59% et 62%). Le critère Q_{DJD} n'est pas encore calculable à ce jalon.

		Niveau de qualité mesuré			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	56%	59%		
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.A.	62%		
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.A.	N.A.		
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	19%	24%		

Tableau 35 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système A jusqu'au jalon J2

Les degrés d'atteinte des objectifs qualité produit à terminaison pour les critères et le facteur sont donc faibles (Tableau 36).

		Degré d'atteinte de l'objectif à terminaison			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	62%	55%		
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.A.	62%		
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.A.	N.A.		
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	62%	39%		

Tableau 36 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système A jusqu'au jalon J2

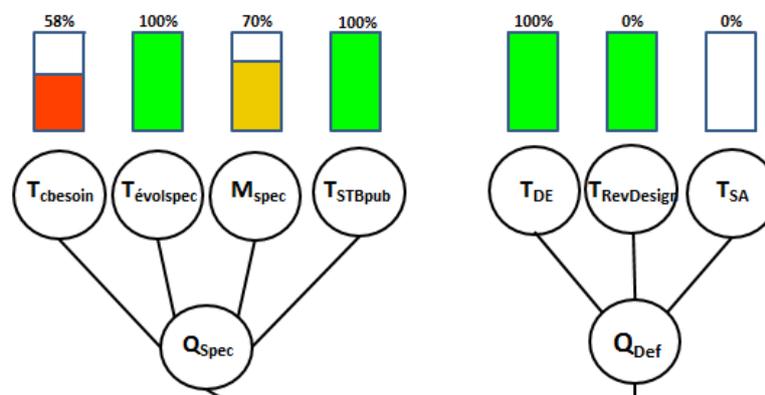


Figure 53 : Valeur des métriques calculables au jalon J2 pour le système A

En examinant les métriques associées à ces critères, l'écart s'explique par une faible couverture des exigences du client aux jalons J1 et J2 (métrique $T_{CBesoin}$) et un trop faible niveau de maturité des STB MBDA (métrique M_{spec}), qui n'a pas évoluée depuis le jalon J1, pour le critère Q_{STB} . Pour le critère Q_{Def} ,

les spécifications d'acceptation ont été publiées tardivement, ce qui explique une valeur faible de la métrique T_{SA} .

Jalon J3 :

Au jalon J3 une partie de l'écart du niveau de conformité par rapport à l'attendu est rattrapé (Figure 54). Cet écart est comblé entre les jalons J2 et J3 au prix d'un effort supplémentaire et un allongement des délais de conception et donc un jalon J3 passer plus tard qu'initialement prévu.

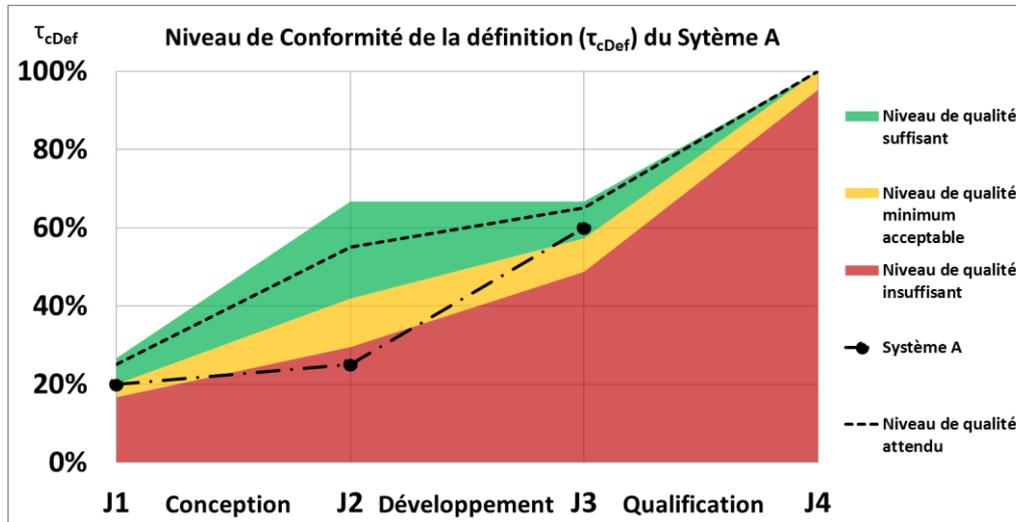


Figure 54 : Niveaux de Conformité calculés pour le système A jusqu'au jalon J3

Le niveau de conformité est suffisant pour atteindre l'objectif qualité produit à terminaison (Tableau 37).

		Niveau de qualité mesuré			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	56%	59%	95%	
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.A.	62%	93%	
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.A.	N.A.	31%	
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	19%	24%	59%	

Tableau 37 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système A jusqu'au jalon J3

Le niveau de qualité mesuré du critère Q_{DJD} n'est pas pris en compte car la proportion d'exigences qu'il est prévu d'acquérir à ce jalon est de 40 % (inférieur à 67%, cf. V.1.3.1), mais il est tout de même possible de calculer son degré d'atteinte de l'objectif à terminaison grâce aux valeurs de ses métriques (Figure 55).

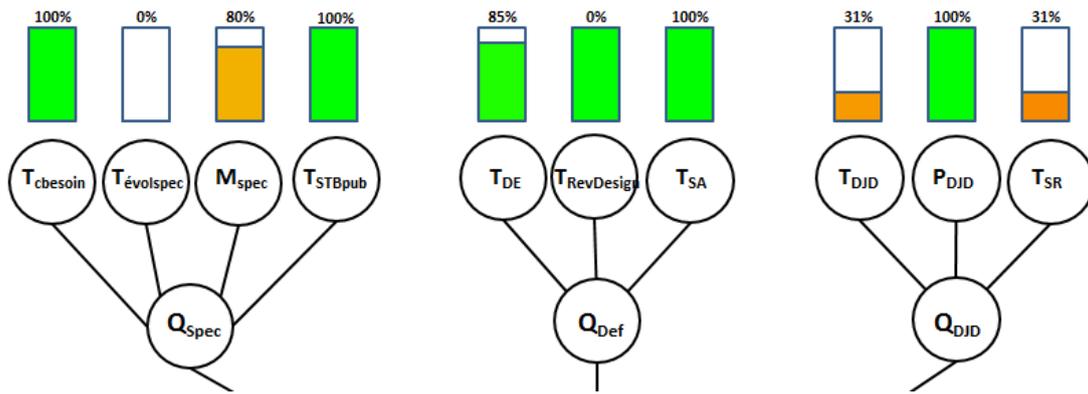


Figure 55 : Valeur des métriques calculables au jalon J3 pour le système A

Les degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur sont compris entre 79% et 93% (Tableau 38).

		Degré d'atteinte de l'objectif à terminaison			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	62%	55%	79%	
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.A.	62%	93%	
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.A.	N.A.	79%	
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	62%	39%	84%	

Tableau 38 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système A au jalon J3

Remarque :

L'utilisation du modèle de prévision dès le début du projet aurait permis d'identifier les lacunes au niveau du critère Q_{STB} et ainsi de les corriger plus facilement avant le jalon J2. Une préparation du jalon J2 en utilisant le modèle de prévision aurait également permis d'améliorer le niveau de qualité du critère Q_{DJD} afin de passer ce jalon avec un niveau de conformité plus élevé. Le jalon J3 aurait alors pu être passé à une date plus proche de celle initialement prévue.

Système B

Concernant le système B, les métriques au jalon J1 n'ont pas été calculées a posteriori les données n'étant plus accessibles dû à leur ancienneté. Cependant, le modèle tel que construit ne nécessite pas de disposer des valeurs des métriques aux jalons précédents pour être utilisé.

Jalon J2 :

Pour le système B, l'écart entre le niveau de qualité attendu et le niveau calculé est plus faible que celui calculé pour le système A au jalon J2 (Figure 56). Le système B a donc, à ce stade, une probabilité plus forte que le système A d'atteindre l'objectif de conformité de la définition à terminaison.

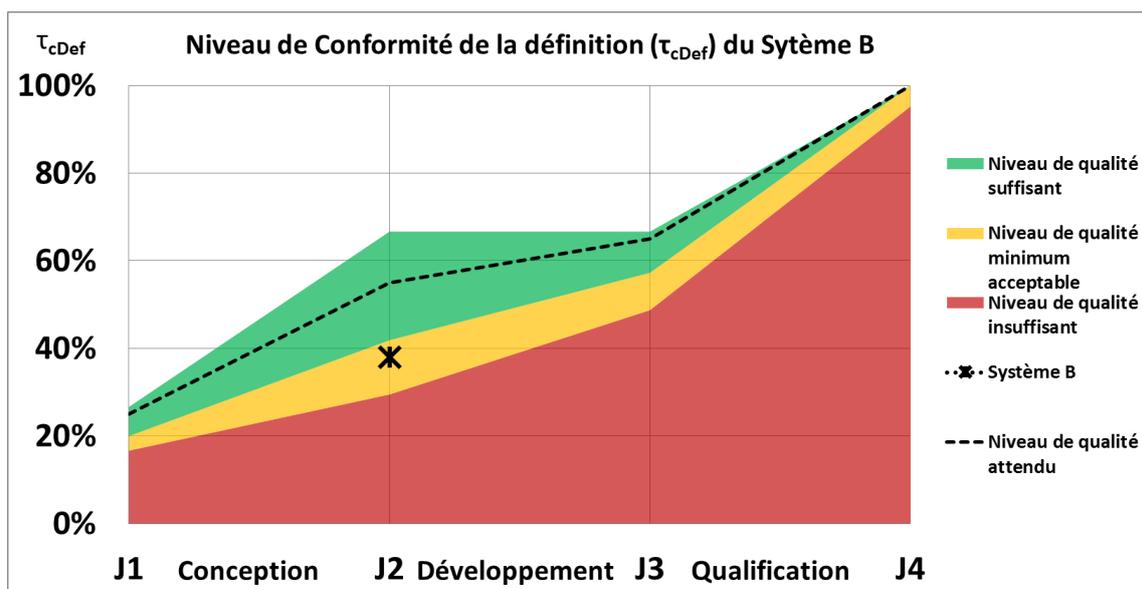


Figure 56 : Niveau de Conformité calculé pour le système B au jalon J2

Le niveau de qualité mesuré est bon pour le critère qualité des spécifications (93%) mais il est à un niveau non acceptable pour la qualité de la définition (62%), cela conduit à un niveau de qualité de 38%, acceptable sous condition pour le facteur (Tableau 39). Le niveau de qualité mesuré du critère Q_{DJD} n'est pas pris en compte car la proportion d'exigences acquise à ce jalon est trop faible (inférieure à 10%).

		Niveau de qualité mesuré			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	N.D.	93%		
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.D.	62%		
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.D.	N.A.		
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	N.D.	38%		

Tableau 39 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système B au jalon J2
N.D. : Non Disponible

L'écart par rapport au niveau attendu s'explique par la valeur de la métrique T_{SA} qui est nulle (Figure 57).

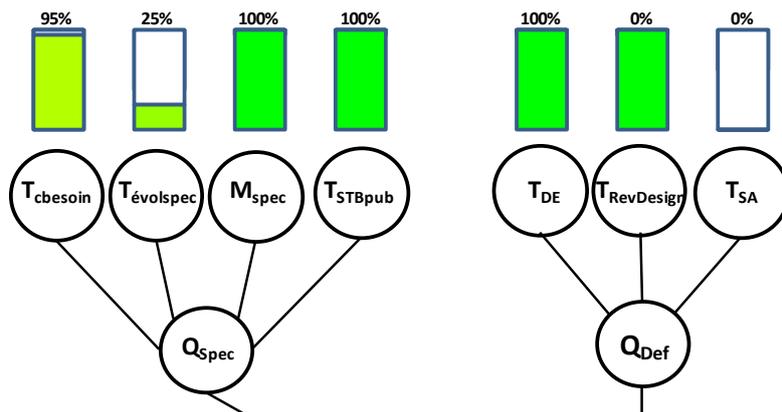


Figure 57 : Valeur des métriques calculables au jalon J2 pour le système B

La qualité des spécifications peut également être améliorée mais dans une moindre mesure, son degré d'atteinte de l'objectif à terminaison est de 89% au jalon J2 (Tableau 40).

		Degré d'atteinte de l'objectif à terminaison			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	N.D.	89%		
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.D.	62%		
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.D.	N.A.		
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	N.D.	50%		

Tableau 40 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système B aux jalons J2

Jalon J3 :

L'objectif intermédiaire est atteint au jalon J3 (Tableau 41).

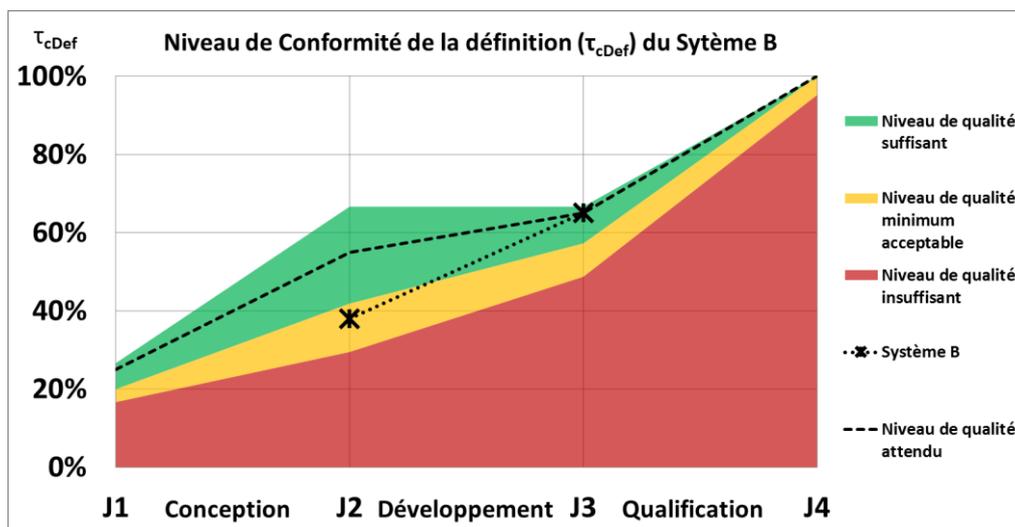


Figure 58 : Niveaux de Conformité calculés pour le système B jusqu'au jalon J3

Cependant, le graphe (Figure 58) permet d'illustrer la charge de travail restante pour atteindre l'objectif à terminaison. En effet au jalon J3 65% de l'objectif conformité à terminaison (J4) est réalisé (Tableau 41). Le niveau de qualité mesuré du critère Q_{DJD} n'est pas pris en compte car la proportion d'exigences qu'il est prévu d'acquérir à ce jalon est de 40 % (inférieur à 67%, cf. V.1.3.1), le degré d'atteinte de l'objectif à terminaison est tout de même calculable.

		Niveau de qualité mesuré			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	N.D.	93%	98%	
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.D.	62%	99%	
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.D.	N.A.	41%	
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	N.D.	38%	65%	

Tableau 41 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur du système B jusqu'au jalon J3

Toutes les métriques sont donc dans la plage de valeurs attendues (Figure 59).

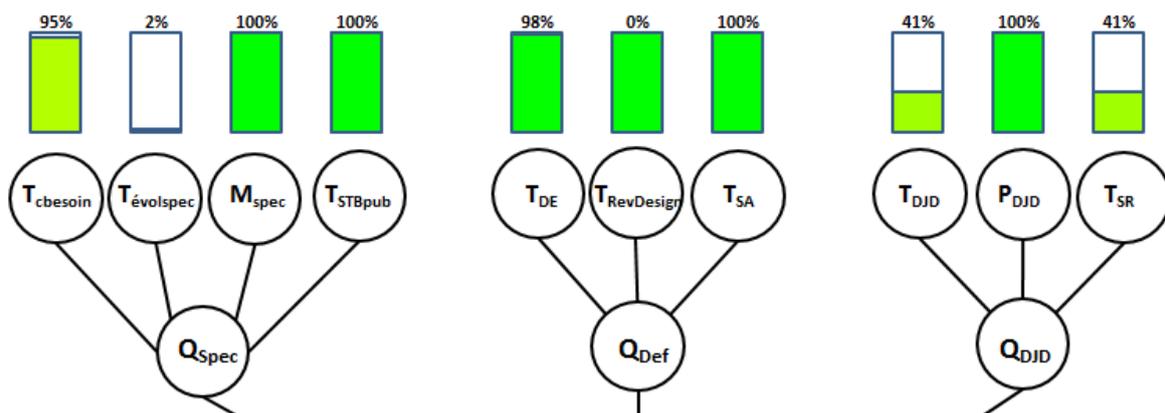


Figure 59 : Valeur des métriques calculables au jalon J3 pour le système B

Les objectifs intermédiaires étant atteints à un niveau proche de 100%, les degrés d'atteinte des objectifs à terminaison sont également très élevés (Tableau 42).

		Degré d'atteinte de l'objectif à terminaison			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des Spécifications	Q_{STB}	N.D.	89%	98%	
Qualité de la Définition	Q_{Def}	N.D.	62%	99%	
Qualité de la justification	Q_{DJD}	N.D.	N.A.	100%	
Conformité de la Définition	τ_{cDef}	N.D.	50%	99%	

Tableau 42 : Degrés d'atteinte des objectifs à terminaison des critères et du facteur pour le système B jusqu'au jalon J3

V.1.4.3. Partie 2 : Conformité du système fabriqué par rapport à sa définition

La partie 2 du modèle, conformité du système à sa définition, a été testée avec le système C en phase de production série. Les valeurs des métriques ont pu être mesurées a posteriori à deux dates au cours de la production série à un an d'écart (Figure 60). Cet intervalle d'un an a été choisi pour qu'il y ait une quantité de systèmes produits suffisante pour impacter les métriques.

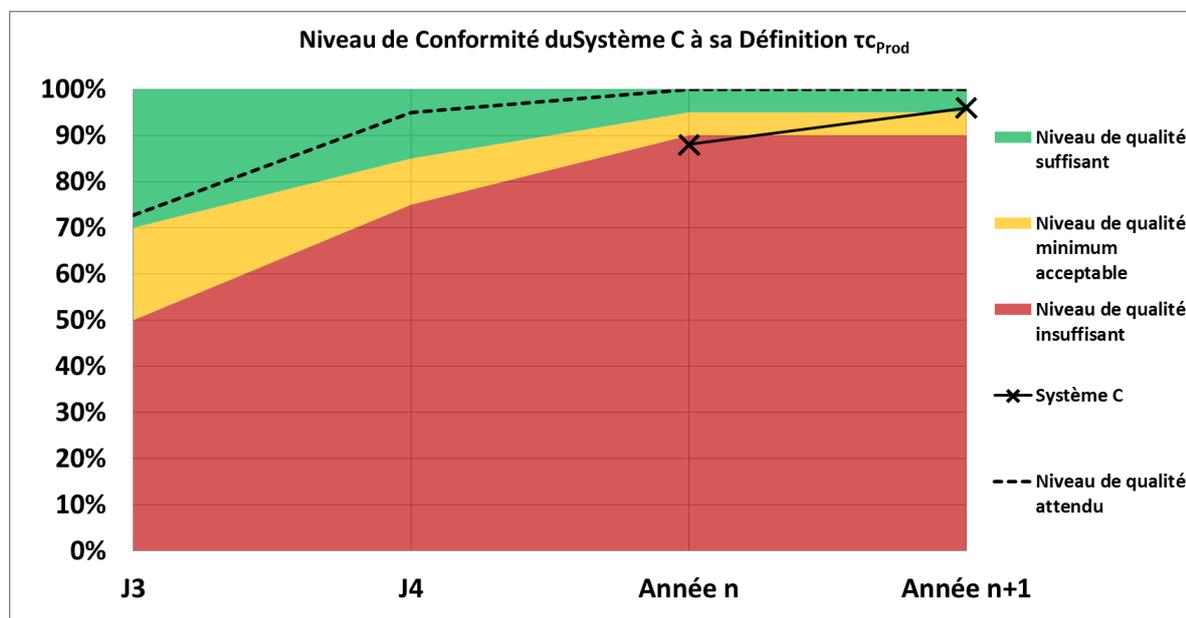


Figure 60 : Niveaux de qualité mesurés pour le système C en production série

Le système C étant déjà en phase de production série, après J4, le niveau de qualité mesuré par le modèle l'est par définition à terminaison et se trouve donc être strictement équivalent au degré d'atteinte de l'objectif qualité à terminaison.

		Niveau de qualité mesuré	
		Année n	Année n+1
Qualité du Système de Production	Q_{sprod}	98%	99%
Qualité de la Supply chain	Q_{sc}	79%	92%
Conformité du Produit à sa Définition	τ_{cProd}	88%	96%

Tableau 43 : Niveaux de qualité mesurés pour les critères et le facteur pour le système C en phase de production série

Pour la première mesure, le niveau de qualité du facteur τ_{cProd} n'est pas satisfaisant car il est à 88% de l'objectif (Tableau 43). Cela s'explique par un niveau du critère « qualité de la supply chain » trop faible, due à un nombre de non-conformités externes trop élevé et à quelques dérogations (Figure 61).

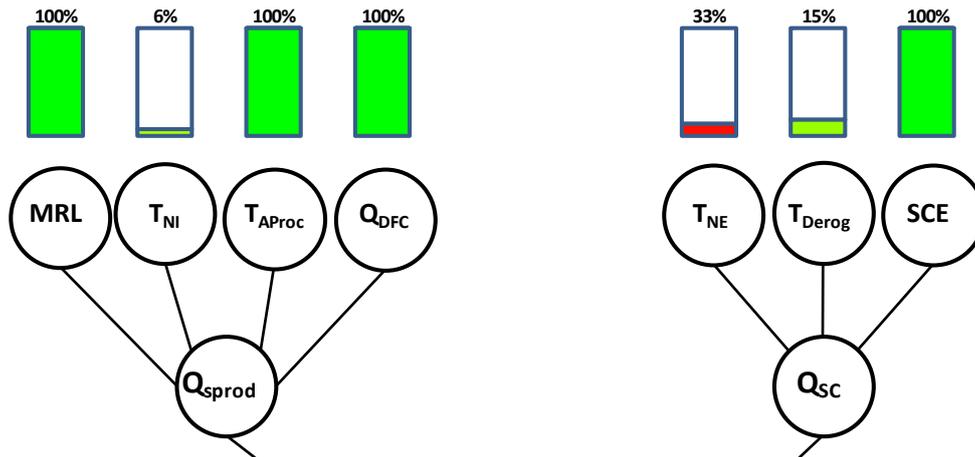


Figure 61 : Valeur des métriques calculables pour le système C au moment de la mesure 1

Au moment de la seconde mesure, la plupart des non-conformités ont été traitées et aucune autre n'est apparue entre temps (Figure 62). Le niveau de qualité du critère Q_{S.C.} est donc redevenu acceptable (92% de l'objectif). Le niveau de qualité du facteur τ_{cProd} est alors acceptable (96%).

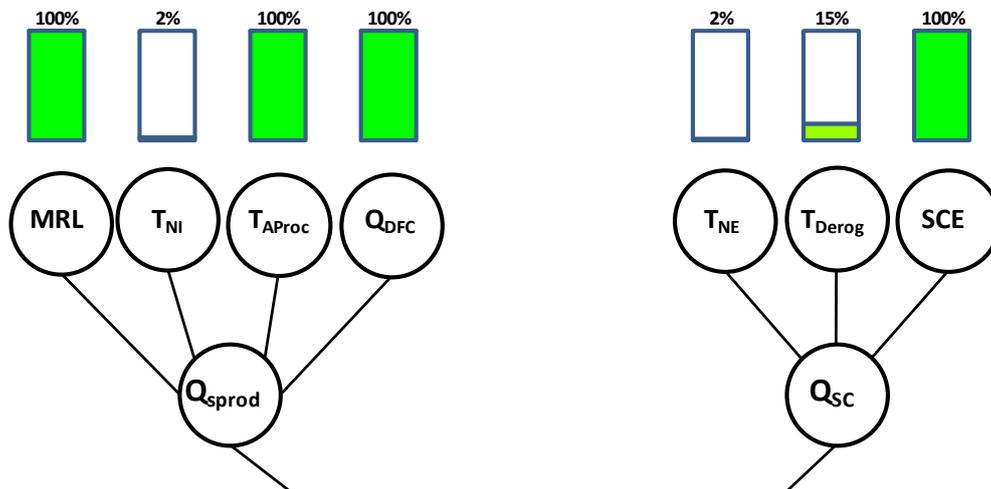


Figure 62 : Valeur des métriques calculables pour le système C au moment de la mesure 2

V.1.4.4. Conclusion

Ces résultats obtenus a posteriori ont été comparés à l'analyse des ingénieurs qualité de ces développements. Les évaluations données par le modèle sont cohérentes avec l'analyse des ingénieurs qualité. Évaluer la conformité dès le jalon J1 aurait aidé à corriger l'écart en conformité pour les deux systèmes A et B avant d'arriver au jalon J2 et permis d'anticiper le retard pris dans le développement du système A.

Dans le cas du système B, le modèle permet de mettre en évidence l'absence de spécification d'acceptation au jalon J2 et son impact sur la conformité.

De même, pour le système C, il y a une alerte sur un taux de non-conformités externes relativement élevé, qui risque de nuire au niveau de conformité des systèmes.

Ce modèle permet donc de mettre en évidence de façon précoce un niveau de qualité sur le facteur conformité insuffisant, d'aider à en identifier les causes pour mettre en œuvre des actions correctives. En agissant ainsi au plus vite, les actions correctives sont plus efficaces et le processus de développement se poursuit sur des bases plus saines.

Le modèle permet également une vue macroscopique de la conformité tout au long du développement et de la phase de production. Grâce à sa structure Facteur/Critères/Métriques, il autorise une analyse des causes d'un retard dans la maturité des systèmes en remontant aux métriques à l'origine d'un niveau de qualité trop faible. Le niveau de qualité au niveau du facteur conformité est évalué par ses deux sous-facteurs. Le système sera conforme si sa définition qualifiée est conforme aux exigences du client et si le système fabriqué est conforme à sa définition.

Le degré d'atteinte de l'objectif à terminaison propose une projection du niveau de qualité atteint par le facteur dans l'avenir, au moment où le système sera en service. Cet indicateur renseigne sur le niveau de confiance avec lequel le développement atteindra ses objectifs en terme de qualité et de mettre en œuvre des actions correctives ou préventives si nécessaires.

L'enregistrement de l'évolution jalon par jalon des niveaux de qualité autorise également les analyses a posteriori. Il est par exemple possible de comparer différentes méthodes et outils de travail ou développements entre eux.

V.2. Construction Phase 2 et Utilisation du modèle de prévision du facteur Fiabilité

Cette seconde application de la Phase 2 de la méthodologie vise à construire un modèle de prévision adapté au facteur Fiabilité.

Nous allons retrouver les mêmes étapes de construction que celles suivies pour élaborer le modèle de prévision de la conformité développé précédemment dans ce chapitre (cf. V.1.).

Cependant, le facteur Fiabilité présente certaines particularités dans le contexte du développement de systèmes complexes et dans celui de MBDA.

En effet, des prévisions de fiabilité du système en service sont habituellement réalisées tout au long du développement par les entreprises qui conçoivent des systèmes complexes.

MBDA dispose donc de modèles adaptés à la prévision de la fiabilité à terminaison. Cependant, la confiance qu'il est possible d'accorder à ces prévisions est difficile à estimer.

Nous proposons donc de construire un modèle permettant **de déterminer la qualité à terminaison des prévisions de fiabilité des systèmes en cours de développement.**

Cette application débute avec l'explication des particularités propres au facteur Fiabilité. La construction du modèle de prévision est explicitée suivant les étapes de la méthodologie précédemment développée (cf. III) :

- Structuration du modèle de prévision ;
- Paramétrage du modèle de prévision ;
- Validation.

Deux applications a posteriori de ce modèle sont ensuite développées, afin de pouvoir reconstituer l'évolution des métriques et des prévisions qui en sont issues pour plusieurs jalons.

Cette seconde moitié du chapitre (V.2.) est l'application de la Phase 2 de la méthodologie au facteur Fiabilité. Elle présente les mêmes étapes que la première moitié du chapitre mais appliqué au facteur Fiabilité :

- Les particularités du traitement de la Fiabilité au sein de MBDA (V.2.1.) ;
- La structuration du modèle de prévision de la Fiabilité (V.2.2.) ;
- Le paramétrage du modèle de prévision (V.2.3.) ;
- L'utilisation du modèle construit pour deux systèmes développés par MBDA (V.2.4.).

Cette partie concernant le facteur fiabilité (V.2.) porte en priorité sur les particularités de traitement du facteur fiabilité : il existe déjà des calculs permettant d'établir la fiabilité prévisionnelle des systèmes développés par MBDA. Le modèle construit évalue la qualité de cette prévision de fiabilité. Les aspects communs avec le modèle conformité seront moins détaillés.

Notations et hypothèses de travail

La fiabilité est caractérisée par le taux de défaillance (λ) exprimé en nombre de défaillances par heure calendaire.

$\lambda_{\text{prév}}$:	Taux de défaillance prévisionnel
λ_{obs} :	Taux de défaillance observé
λ_{spec} :	Taux de défaillance spécifié
$\lambda_{\text{eq-spec}}$:	Taux de défaillance spécifié équivalent associé au profil de vie réel
$\Delta\lambda_{\text{prév}}$:	Écart entre le taux de défaillance prévisionnel et le taux de défaillance spécifié
$\Delta\lambda_{\text{obs}}$:	Écart entre le taux de défaillance opérationnel et le taux de défaillance spécifié
$\Delta\lambda_{@c}$:	Notation du facteur Fiabilité : écart entre le taux de défaillance prévisionnel et le taux de défaillance spécifié à terminaison.
P_T :	Poids fiabilité total du système $P_T = \sum_i P_i$ (P_i Poids fiabilité de l'élément i)

Métriques

T_c :	Taux de couverture de l'étude de Fiabilité
$T_{A\text{-prod}}$:	Couverture des AMDEC Produit
T_{AQDef} :	Niveau d'Avis Qualité (AQ) portant sur la définition
$T_{A\text{-proc}}$:	Couverture des AMDEC Process
T_{AQFab} :	Niveau d'Avis Qualité (AQ) portant sur la fabrication
T_T :	Taux de couverture des tests

Critères

Q_{sdF} :	Qualité des études de Fiabilité
Q_{Def} :	Qualité de la Définition
Q_{Fab} :	Qualité de la Fabrication
$Q_{\Delta\lambda_{\text{prév}}}$:	Qualité de la prévision de fiabilité

Le taux de défaillance observé λ_{obs} est calculé en décomptant le nombre de faits techniques imputables à un problème de fiabilité divisé par la durée de vie totale des produits.

$$\lambda_{\text{obs}} = \frac{\text{Nombre de pannes observées}}{\text{Durée de vie du parc}}$$

Le parc désigne l'ensemble des systèmes en service pris en compte pour le calcul.

L'hypothèse est faite que les produits qui entrent en service ont un taux de défaillance constant λ . La période de déverminage est inexistante et les systèmes sont retirés du service avant la période de vieillissement.

V.2.1. Particularités de la Fiabilité

Au sein de l'entreprise MBDA, lorsqu'un système est développé, son niveau de fiabilité est caractérisé par son taux de défaillance. Les exigences du client sont ainsi traduites en un taux de défaillance maximum, pour des conditions de vie données, que le système ne devra pas dépasser une fois en service.

La fiabilité est donc abordée par MBDA suivant plusieurs aspects tout au long du cycle de vie du système (Figure 63).

1. Le besoin du client est traduit en une spécification λ_{spec} (taux de défaillance par heure) qui sera utilisée tout au long du développement (jalons J1 à J4). Une fois le système entré en service, un taux de défaillance équivalent au spécifié $\lambda_{eq-spec}$ est recalculé en fonction de l'utilisation réelle du système.
2. Les ingénieurs en fiabilité réalisent des prévisions du taux de défaillance du système en service $\lambda_{prév}$ à chacun des jalons du développement pour comparaison avec la spécification λ_{spec} .
3. Une fois le système entré en service, soit à terminaison, il est possible de calculer un taux de défaillance observé λ_{obs} en fonction du nombre de défaillances constatées.
4. Le modèle proposé qui concerne la prévision du niveau de qualité produit à terminaison pour le facteur Fiabilité noté $\lambda_{@c}$.

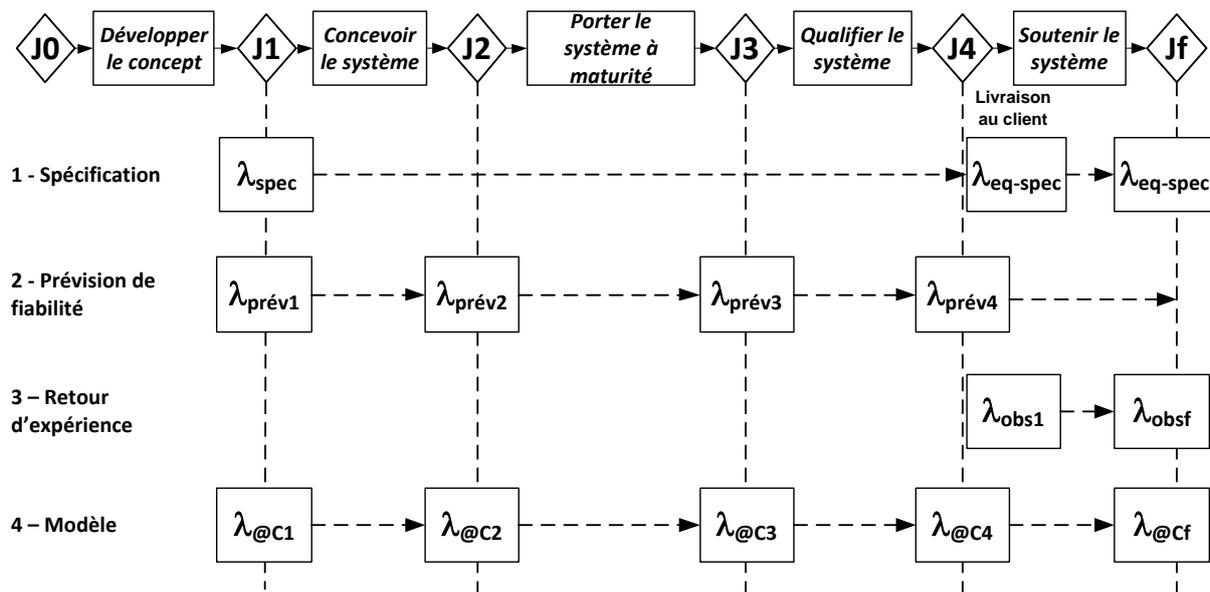


Figure 63 : Prise en compte de la fiabilité tout au long du cycle de vie du système

Pour des raisons de confidentialité des données, ce ne sont pas les valeurs absolues qui sont traitées dans le modèle mais des valeurs relatives comparées à un taux de défaillance de référence, par exemple le taux de défaillance spécifié λ_{spec} ou équivalent au spécifié $\lambda_{eq-spec}$, en fonction du stade du cycle de vie du système. Ces valeurs relatives sont notées $\Delta\lambda_{prév}$, $\Delta\lambda_{obs}$, $\Delta\lambda_{@c}$ (voir V.2.2.1.).

Au cours du développement d'un système, un taux de défaillance prévisionnel est calculé, dès que possible, par la méthode la plus adéquate ([MIL-HDBK-217, 1991] ou [FIDES, 2009] pour les composants électroniques par exemple). Ensuite, le taux de défaillance est mis à jour au fur et à mesure

que le développement du système progresse et que la conception du produit et ses futures conditions de vie se précisent (Figure 63, « 2 - Prévision de fiabilité »).

Le choix de la méthode de prévision de la fiabilité à utiliser, est conditionné par la nature des composants du système (électronique, mécanique, pyrotechnique...), les technologies utilisées, et les connaissances disponibles sur les mécanismes de défaillance et de vieillissement au moment du développement. Les méthodes de prévision de la fiabilité à utiliser sont définies par les experts en fiabilité de l'entreprise pour l'ensemble des systèmes développés, en fonction de leur pertinence et de leur champ d'application et évoluent en fonction de l'état des connaissances dans le domaine et du changement des technologies employées au sein des systèmes.

Ces méthodes sont complexes et longues à développer puis à valider, de ce fait, le choix des méthodes utilisées n'est pas remis en cause en cours de développement. Le modèle d'évaluation de la qualité des prévisions de fiabilité que nous proposons ne s'intéresse donc pas aux limites des méthodes utilisées pour prévoir la fiabilité mais à leur bonne utilisation.

La qualité d'une prévision du taux de défaillance dépend de plusieurs paramètres (Blischke, 2011) dont :

- Le respect du périmètre d'application et des limites de la méthode de prévision de la fiabilité ;
- La bonne mise en œuvre des méthodes de prévision ;
- La prise en compte de l'ensemble des composants du système ayant un impact sur la fiabilité et la qualité des processus de l'entreprise.

Ces éléments évoluent tout au long du développement d'un système complexe. De plus, ces prévisions de fiabilité peuvent souffrir d'une étude très partielle du système, comme cela peut être le cas en début de développement (Houben, 2010), ou bien de la subjectivité de l'auteur de l'étude selon son niveau de connaissance et d'expertise. Ceci rend difficile l'évaluation de la qualité de cette prévision et par conséquent, augmente le risque de ne pas satisfaire l'objectif de fiabilité du système en service. L'absence d'indicateur de la qualité des prévisions de fiabilité complique également les comparaisons entre des études prévisionnelles réalisées pour différents systèmes et ne permet pas de tirer les leçons du retour d'expérience.

Il est donc nécessaire de disposer d'un modèle permettant d'évaluer, sur des bases les plus objectives possibles, la qualité des prévisions de fiabilité, noté $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$, tout au long d'un développement.

Ainsi, la prévision du niveau de qualité produit à terminaison $\lambda_{@C}$ pour le facteur Fiabilité, dépend de deux éléments :

- Du niveau de la fiabilité prévisionnelle **relatif** du système par rapport aux spécifications $\Delta\lambda_{prév}$;
- De la qualité de la prévision de fiabilité du système par rapport aux spécifications $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$.

Le taux de défaillance prévisionnel **relatif** $\Delta\lambda_{prév}$ permet de savoir où se situe le niveau de fiabilité du système par rapport à l'objectif à terminaison. Le niveau de qualité de la prévision de fiabilité $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$ offre un indicateur simple pour évaluer la confiance qu'il est possible d'accorder à cette prévision.

La prévision de fiabilité étant déjà une donnée disponible au sein de MBDA (via le taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{prév}$) elle est donc considérée par la suite comme une entrée du modèle de prévision que nous proposons. Comme toute entrée du modèle, elle est définie comme une métrique en valeur relative comparée au taux de défaillance spécifié relatif et notée $\Delta\lambda_{prév}$ (définition dans le paragraphe V.2.2.3.). Toutefois, contrairement aux autres métriques, elle n'est pas en lien avec un critère mais est directement reliée au facteur qualité de la prévision de la fiabilité avec lequel elle doit être interprétée.

Les autres métriques du modèle sont dédiées à la mesure et à la prévision à terminaison de la qualité de la prévision de fiabilité $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$. Le niveau de qualité produit à terminaison pour le facteur Fiabilité $\lambda_{@C}$, qui résulte donc du taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{prév}$ et de la qualité de cette prévision $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$

est laissé à l'appréciation des utilisateurs du modèle en fonction du fait que les valeurs prises par $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ et $Q_{\Delta\lambda_{\text{prév}}}$ soient acceptables ou non d'après le modèle.

En effet, la prévision le taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ étant calculée au plus proche de la réalité en fonction de ce que permettent les méthodes de prévision de la fiabilité, cette prévision de la fiabilité est une valeur sans intervalle d'incertitudes connu. Il est donc aujourd'hui impossible d'évaluer de façon numérique un intervalle d'incertitude corrigé de cette prévision de fiabilité en fonction de sa qualité $Q_{\Delta\lambda_{\text{prév}}}$. Cette limitation est contournée dans l'utilisation du modèle en interprétant les valeurs du taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ et de qualité de cette prévision $Q_{\Delta\lambda_{\text{prév}}}$ ensemble et en fonction du contexte du projet.

L'interprétation des résultats du modèle est illustrée par les applications sur des systèmes réels développés par MBDA dans la partie V.2.4.

V.2.2. Définition de la structure du modèle Fiabilité

V.2.2.1. 1^{ère} étape : Définition de l'objectif Fiabilité

Afin d'exprimer l'écart entre la fiabilité spécifiée et la fiabilité opérationnelle, il est nécessaire de choisir une mesure permettant de la caractériser notée $\Delta\lambda_{@c}$ (cf. IV.1.1.).

La mesure couramment choisie est le taux de défaillance λ exprimé en défaillances par heure calendaire [h^{-1}]. Une mesure dérivée telle que le MTBF peut également être utilisée.

Comme expliqué précédemment, les valeurs absolues ne sont pas traitées directement dans le modèle pour des raisons de confidentialité. La prévision porte donc sur la mesure de l'écart relatif entre le taux de défaillance opérationnel (observé) λ_{obs} et le taux de défaillance spécifié et à profils de vie équivalents $\lambda_{eq-spec}$ (Figure 64).

Nous définissons $\Delta\lambda_{obs}$ l'écart entre le taux de défaillance opérationnel et le taux de défaillance spécifié équivalent :

$$\Delta\lambda_{obs} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{eq-spec}}{\lambda_{eq-spec}} \times 100 \quad (41)$$

Avec, λ_{obs} : Taux de défaillance observé et $\lambda_{eq-spec}$: Taux de défaillance spécifié équivalent associé au profil de vie réel.

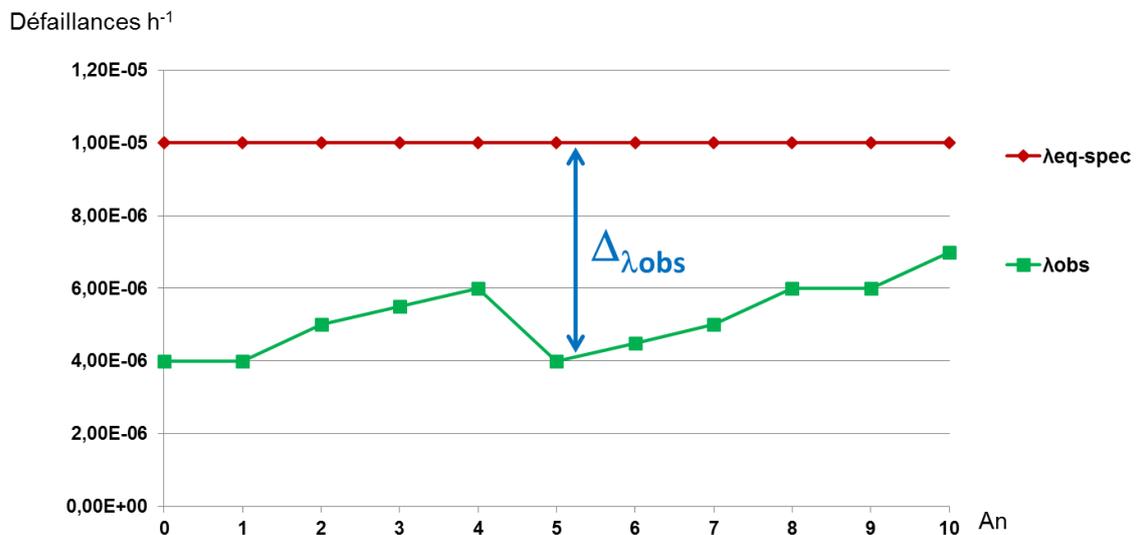


Figure 64 : Mesure de $\Delta\lambda_{obs}$

L'objectif qualité produit à terminaison pour le facteur fiabilité sera atteint si $\Delta\lambda_{obs} \leq 0$.

V.2.2.2. 2^{ème} étape : Définition des critères Fiabilité

La définition des critères qui permettent de caractériser la qualité des prévisions de fiabilité se base sur l'état de l'art du domaine et des échanges avec les experts fiabilité de l'entreprise.

La fiabilité prévisionnelle, calculée en cours de développement, permet de produire une prévision de ce que sera la fiabilité du système une fois entré en service. Le modèle de prévision du facteur Fiabilité doit permettre d'estimer pour chaque jalon la probabilité que la fiabilité prévisionnelle du système en cours de développement $\lambda_{prév}$ soit proche de la fiabilité observée à terminaison (en service) λ_{obs} , autrement dit que $\Delta\lambda_{prév} = \frac{\lambda_{prév} - \lambda_{obs}}{\lambda_{obs}}$ soit proche de zéro.

Il faut donc identifier les sources d'écart entre le prévisionnel et le constaté pour les prendre en compte dans le modèle par les critères. Différents paramètres peuvent expliquer l'écart entre la fiabilité prévisionnelle et celle observée en service. Ces principaux paramètres sont :

- La pertinence des méthodes employées :

L'analyse de la fiabilité des composants électroniques se fait aujourd'hui, au sein de l'entreprise, principalement par la méthode FIDES. Quelle que soit la méthode utilisée, elle ne donne pas d'intervalle d'incertitudes sur la prévision. Cependant, FIDES est plus précis que les méthodes précédemment utilisées qui étaient plus pessimistes sur le taux de défaillance prévu.

Les éléments mécaniques sont étudiés par des AMDEC, des analyses d'experts, des études sur les chaînes de reprise d'effort et par la méthode contrainte-résistance pour les éléments rigides. Les éléments mécaniques ont un impact sur la fiabilité beaucoup plus faible que l'électronique dans les systèmes développés par MBDA. Le retour d'expérience est considéré comme bien maîtrisé pour les éléments mécaniques.

Les éléments pyrotechniques font également l'objet d'AMDEC et d'un calcul de probabilité de bon fonctionnement appuyé sur des avis d'experts.

Il reste aujourd'hui encore beaucoup d'incertitudes sur le vieillissement des composants électroniques et pyrotechniques. Des défauts de jeunesse peuvent apparaître, causés par des éléments plus fragiles, un rodage insuffisant, un manque de déverminage. Les mécanismes de vieillissement ne sont pas totalement maîtrisés. En l'absence de modèle fiable, le vieillissement est estimé sur la base du retour d'expérience, et des données des fournisseurs. Il faut s'assurer que les composants ont une durée de vie supérieure à celle du produit ou prévoir des opérations de maintenance pour leur remplacement.

Comme expliqué précédemment, l'emploi de ces méthodes n'est pas remis en cause par le modèle.

- L'application des méthodes (FIDES, AMDEC...) :

Une mauvaise application des méthodes d'évaluation de la fiabilité peut conduire à une estimation erronée. Des guides d'application et des notes internes définissent comment mettre en œuvre les méthodes de prévision et réaliser une bonne étude de fiabilité. Il faut donc s'assurer que ces consignes soient respectées.

- **L'incertitude sur la fiabilité opérationnelle :**

L'exploitation du retour d'expérience en vue d'identifier les causes racines d'une défaillance électronique est ardue. En effet, il peut être difficile de distinguer les pannes constatées en service entre celles imputables au système lui-même de celles dues à des éléments extérieurs. L'origine des pannes n'est pas toujours identifiée avec précision. De plus, toutes les pannes rencontrées en opération ne sont pas communiquées à MBDA.

L'évolution des méthodes de prévision du taux de défaillance entre le moment de la conception du système et le retour d'expérience opérationnelle, qui peut avoir lieu plusieurs décennies plus tard, complique également l'exploitation de ce retour d'expérience.

- **La qualité des données d'entrée :**

La définition du produit, sa nomenclature et les paramètres technologiques sont des données d'entrée pour les analyses de fiabilité.

Leur justesse et leur exhaustivité aura une influence sur la prévision réalisée. L'estimation peut être faussée par des entrées incomplètes ou fausses. En début de projet (entre J_1 et J_2), il est nécessaire de travailler à partir de conditions d'utilisation limites (contraintes limites), puis d'affiner ensuite l'étude. La maturité de la définition joue aussi un rôle. Les contraintes en fonctionnement et le stress subi peuvent être sous-évalués ou mal pris en compte pendant la conception du produit. Seule une bonne collaboration entre les services de conception électronique et sûreté de fonctionnement permet une transmission et une interprétation efficace des données dimensionnant le système.

La méthode FIDES, par exemple, est très sensible au profil de vie. Le taux de défaillance peut varier d'un facteur 10 en fonction du profil choisi. Une incertitude sur le profil de vie réelle du système en service peut donc induire des écarts importants entre la fiabilité prévisionnelle et la fiabilité opérationnelle.

Critères :

Pour déterminer les critères du modèle permettant de prévoir le facteur Fiabilité, il faut rendre compte des mécanismes qui conduisent aux défaillances imputables à la fiabilité des produits. En effet, c'est par l'intermédiaire des mécanismes de défaillance que la qualité des produits en termes de fiabilité se traduit en pannes lors de l'utilisation.

Pour rappel, le taux de défaillance observé est calculé en décomptant le nombre de pannes imputables à un problème de fiabilité divisé par la durée de vie totale des produits.

Les pannes constatées sont classées selon leur cause afin de séparer celles impactant la fiabilité de celles ayant des origines différentes (mauvaises manipulations, utilisation inappropriée...).

La classification décrite par la méthode FIDES et utilisée par MBDA pour l'ensemble des défaillances (électroniques, mécaniques et pyrotechniques) des systèmes est présentée dans le Tableau 44.

	Classification	Définition
Fait technique imputable au matériel	C	Défaillance aléatoire composant
	E	Étude incomplète (conception)
	F	Fabrication hors standard
	V	Vieillessement lié à une usure prématurée du matériel
Fait technique non imputable au matériel	W	Autre type de vieillissement
	X	Utilisation hors spécification
	Y	Défaut non reproduit sur l'équipement en cause
	M	Manipulation trop sévère
	H	Conséquence d'une autre défaillance
	0	Fait technique sur matériel non suivi

Tableau 44 : Classification des défaillances FIDES

Cette classification des types de défaillance est représentative de l'ensemble des modes de défaillance possibles qui peuvent impacter la fiabilité.

Les critères associés à la fiabilité des produits doivent donc tenir compte de ces 4 types de défaillances (C, E, F et V) imputables à la fiabilité du produit.

Les hypothèses choisies pour construire le modèle sont les suivantes :

- Les niveaux de défaillance aléatoire composant (C) et vieillissement (V) sont prévus par les modèles (type FIDES), ils dépendent donc de la qualité des études de fiabilité;
- La quantité de défauts de conception (étude incomplète E) dépend principalement de la qualité de la définition du produit ;
- La quantité de défauts de fabrication (fabrication hors standard F) dépend principalement de la qualité de la production (fabrication, intégration) du produit.

Le modèle qualité choisi (FCM) repose sur la définition de critères qui permettent de rendre compte des actions mises en œuvre pour atteindre l'objectif de fiabilité.

Trois critères sont donc retenus pour correspondre à ces trois hypothèses (Tableau 45) :

- La **Qualité des études de Fiabilité Q_{Saf}** : permet de rendre compte du risque d'avoir des défaillances en nombre supérieur à celui prévu.
- La **Qualité de la Définition Q_{Def}** : permet de rendre compte du risque d'avoir des défaillances causées par des défauts de conception.
- La **Qualité de Fabrication Q_{Fab}** : permet de rendre compte du risque d'avoir des défaillances causées par des défauts de production.

Ainsi, les causes des écarts entre le taux de défaillance prévisionnel et le taux de défaillance constaté en opération sont couvertes par ces critères.

Type de cause	Critère Influent
C : Défaillance aléatoire composant	Qualité des études de Fiabilité Q_{SdF}
V : Vieillessement	
E : Étude incomplète	Qualité de la Définition Q_{Def}
F : Fabrication hors standard	Qualité de Fabrication Q_{Fab}

Tableau 45 : Correspondance causes de défaillance - critères de fiabilité

V.2.2.3. 3^{ème} étape : Définition des métriques Fiabilité

L'identification des métriques est réalisée suivant le même principe que pour la construction du modèle de Conformité. Une série d'interviews ciblées est menée au sein de l'entreprise. Au total, neuf experts sont interrogés :

- Six ingénieurs expérimentés travaillant à la réalisation des études de fiabilité des systèmes développés au sein de l'entreprise ;
- Trois experts travaillant à la sélection de composants électronique et à leur validation.

Ces personnes sont rencontrées en entretiens individuels semi dirigés d'une heure trente au cours desquels elles sont interrogées sur les métriques à incorporer au modèle Fiabilité.

Les métriques doivent permettre de couvrir les causes d'écarts entre le taux de défaillance prévisionnel $\lambda_{prév}$ et le taux de défaillance observé à terminaison λ_{obs} .

- $\Delta_{\lambda_{prév}}$: **Marge de fiabilité prévisionnelle**

La marge de fiabilité prévisionnelle, notée $\Delta_{\lambda_{prév}}$, permet de rendre compte de l'écart relatif entre le taux de défaillance prévisionnel et l'objectif cible qui est le taux de défaillance spécifié.

$$\Delta_{\lambda_{prév}} = \frac{\lambda_{prév} - \lambda_{spec}}{\lambda_{spec}} \times 100 \quad (42)$$

Avec :

- $\lambda_{prév}$: Taux de défaillance prévisionnel ;
- λ_{spec} : Taux de défaillance spécifié.

En début de conception (J1), le taux de défaillance du système est fixé comme égal au taux de défaillance spécifié. $\Delta_{\lambda_{prév}}$ est donc alors égal à zéro.

L'étude permettant le calcul du taux de défaillance prévisionnel est habituellement quasi complète dès le jalon suivant (J2).

Si $\Delta_{\lambda_{prév}}$ est satisfaisant (inférieur à ou égal à zéro), en général cette prévision n'évolue pas beaucoup par la suite.

Si le taux de défaillance prévisionnel est insatisfaisant ($\Delta_{\lambda_{prév}}$ supérieur à zéro) sur certains sous-ensembles, soit il est tout de même bon au niveau du système complet (car plus faible que prévu sur d'autres sous-ensembles), soit des modifications sont effectuées au niveau de la conception.

Il arrive aussi que les conditions d'utilisation prévues du futur système évoluent en cours de projet ce qui peut modifier le taux de défaillance prévisionnel. Cela s'explique par certaines exigences des clients qui peuvent comporter de nombreuses inconnues. Dans ce cas, plusieurs profils de vie sont utilisés pour le développement. Le profil le plus contraignant, ou le plus dimensionnant est à retenir pour le calcul de la métrique. Une fois le système en service, il faut remplacer le taux de défaillance prévisionnel par le dernier taux de défaillance connu dans l'équation (42).

Le taux de défaillance associé à la qualité de la prévision de fiabilité $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$ issue du modèle permet de se prononcer sur l'atteinte de l'objectif fiabilité à terminaison.

Critère Q_{SdF} : Qualité des études de fiabilité

- T_c : Taux de couverture de l'étude de Fiabilité

Il permet de rendre compte de l'avancement de l'étude de fiabilité.

$$T_c = \frac{\sum_i P_{ei}}{P_T} \times 100 \quad (43)$$

Avec :

- T_c : Taux de couverture de l'étude de Fiabilité,
- P_{ei} : Poids Fiabilité de l'élément i étudié
- P_T : Poids Fiabilité total du système

Les poids de fiabilité sont déterminés par les ingénieurs fiabilité en début de développement grâce au retour d'expérience puis sont calculés à partir des méthodes de prévision du taux de défaillance. Le poids de fiabilité d'un équipement est égal au rapport entre le taux de défaillance de cet équipement et le taux de défaillance du système complet. Ces poids permettent d'affecter une proportion de défaillance à chacun des équipements du système. La somme des poids de fiabilité des équipements du système est égale au poids du système complet, elle est égale à 1.

Le taux de couverture de l'étude de fiabilité doit être égal à 100% lors de la qualification du système. Le taux de couverture progresse rapidement au cours de l'étude de fiabilité et peut être proche des 100% pour la partie électronique dès le jalon J2. Il est donc nécessaire de distinguer le niveau de détails des études réalisées. Pour cela, seuls les sous-ensembles étudiés au niveau de détail de chacun des composants (et non au niveau fonctionnel) sont à prendre en compte dans le calcul du taux de couverture.

- P_E : Coefficient de pertinence de l'étude de fiabilité

Le taux de couverture de l'étude de fiabilité ne permet pas de rendre compte du niveau de détail de cette étude ni de la pertinence des hypothèses choisies.

Le coefficient P_E permet de pondérer le taux de couverture par la vérification de différents critères de pertinence. Son évaluation consiste à répondre à un questionnaire portant sur la prise en compte des conditions d'utilisation du système, la fiabilité électronique, la fiabilité mécanique et pyrotechnique. Pour chacune des questions, 4 niveaux de pertinence différents sont définis. En fonction des niveaux choisis, un pourcentage P_E est calculé, 0% correspond à une pertinence nulle et 100% à une pertinence maximale. Le coefficient pondère directement l'influence de la métrique de couverture de l'étude de fiabilité. Cette métrique peut être utilisée en auto-évaluation, par l'ingénieur qui réalise l'étude de fiabilité ou par des pairs.

Le questionnaire a été établi pour les besoins de cette métrique par les ingénieurs fiabilité qui participent à la construction du modèle. Il figure dans l'Annexe 6.

Critère Q_{Def} : Qualité de la définition

- T_{A-prod} : Taux de couverture des AMDEC Produit

Les AMDEC produit permettent d'analyser une conception et d'émettre des recommandations sur les composants ou l'architecture choisis pour éviter certaines défaillances. Ces analyses participent donc à l'amélioration de la conception des systèmes en apportant un regard critique extérieur et en diminuant ainsi le risque de défaillance.

Leur niveau de détail dépend de l'équipement considéré. Ces analyses sont réalisées à minima au niveau fonctionnel des cartes électroniques ou au niveau des composants de ces cartes. Les AMDEC produit sont un bon moyen de mesure, mais uniquement si la définition du système utilisée est complète et à jour.

Elles sont habituellement réalisées avant le jalon J2 et finalisées pour le jalon J3. Il faut donc s'assurer que ces AMDEC produit soient exécutées au bon moment et qu'elles couvrent l'ensemble du système, l'objectif est une couverture de 100%.

La métrique de taux de couverture permet de rendre compte de l'avancement de la réalisation des AMDEC produit.

$$T_{A-prod} = \frac{\sum_i P_{Ci}}{P_T} \times 100 \quad (44)$$

Avec :

- P_{Ci} : Poids Fiabilité l'élément i étudié par AMDEC produit,
- P_T : Poids fiabilité total du système

- P_A : Coefficient de pertinence de la réalisation des AMDEC produit

Vérifier que les AMDEC produit ont été réalisées ne suffit pas. En effet, il peut également y avoir une variabilité importante dans leur réalisation. La qualité des AMDEC dépend des personnes qui travaillent à leur réalisation et de la bonne coopération entre services. Il faut correctement évaluer les défaillances possibles pour chacun des composants, traiter le cas particulier des composants pris sur étagère (ou COTS) qui sont étudiés au niveau fonctionnel, etc.

Les AMDEC sont réalisées sur tous les systèmes conçus par MBDA mais une vigilance doit être apportée sur leur mise à jour en fonction des évolutions de conception.

Une métrique de pertinence de réalisation des AMDEC P_A est donc intégrée au modèle.

Son principe d'élaboration est le même que celui de la métrique P_E : Coefficient de pertinence de l'étude de fiabilité.

Le coefficient P_A permet de pondérer le taux de couverture des AMDEC produit T_{A-prod} , par la vérification de différents points de pertinence grâce à un questionnaire créé à cette occasion par les experts participants à la construction du modèle (Annexe 7). Pour chacune des questions, 4 niveaux de

pertinence différents sont proposés pour évaluer l'ensemble des AMDEC produit. En fonction des niveaux choisis, un pourcentage P_A est calculé par combinaison linéaire des réponses, 0% correspond à une pertinence nulle et 100% à une pertinence maximale. Le coefficient pondère directement la métrique de couverture des AMDEC produit.

- **T_{QDef} : Niveau de Qualité de la définition**

Cette métrique permet d'évaluer la maturité de la définition du système lors des revues de définition. Ces revues sont conduites tout au long du développement, elles permettent d'apporter un regard critique sur la conception du système.

Il est choisi d'évaluer la métrique sur une échelle à 4 niveaux, (un nombre pair pour éviter une réponse médiane). Le niveau de qualité de la définition qualifié de :

- Non Satisfaisant a pour valeur 0%
- Plutôt non Satisfaisant a pour valeur 33%
- Plutôt Satisfaisant a pour valeur 66%
- Satisfaisant a pour valeur 100%

Cette note est évaluée de façon collégiale lors des revues de définition en prenant en compte les remarques soulevées par les participants. Elle vient compléter le compte rendu de la revue.

Une évaluation subjective a été choisie pour sa simplicité de mise en place par rapport à l'importance de la métrique. Une métrique plus objective mais aussi plus sophistiquée et longue à calculer pourra ensuite être développée lors d'une évolution du modèle de prévision si celle-ci ne convient pas à l'usage.

Critère Q_{Fab} : Qualité de fabrication

- **T_{A-proc} : Couverture des AMDEC Process**

Ce taux de couverture permet de rendre compte de l'avancement de la réalisation des AMDEC process. Ces AMDEC permettent d'analyser les nouveaux procédés de fabrication jugés à risque lors des revues de préparation à l'industrialisation.

$$T_{A-proc} = \frac{\text{Nombre AMDEC process réalisées}}{\text{Nombre de nouveaux process jugés à risque}} \quad (45)$$

Des évolutions de process pendant la vie du produit peuvent dégrader la fiabilité. Par exemple, la réglementation REACH impose de réaliser des soudures électroniques sans plomb, cela augmente le risque de « wisker » (court-circuit entre les soudures). Il faut donc continuer à actualiser ces métriques en fonction de ces évolutions.

- **T_{AQFab} : Niveau d'Avis Qualité portant sur la fabrication**

Cette métrique permet de rendre compte de la maturité de la fabrication à travers l'évolution de la quantité d'Avis Qualité (AQ) ouverts. Les avis qualité sont les enregistrements qui correspondent aux non-conformités de toute nature constatées sur les systèmes.

Pour le calcul de cette métrique, sont prises en compte les AQ constatés lors des opérations de fabrication et qui n'ont pas encore été traités (statut ouvert). L'ingénieur qualité responsable du suivi du système évalue la quantité de ces AQ.

La métrique est évaluée sur une échelle à 4 niveaux :

- Non Satisfaisant : 0%
- Plutôt non Satisfaisant : 33%
- Plutôt Satisfaisant : 66%
- Satisfaisant : 100%

Pour définir le niveau, l'évolution du nombre de non-conformités ayant pour cause un des 5M, Méthodes, Milieu, Matière (composant/sous-ensemble), Main d'œuvre et Moyens (par rapport aux quantités produites), est tracée en fonction des phases du cycle de vie du produit grâce aux outils informatiques de gestion des AQ. La quantité d'AQ, leur criticité et leur temps de traitement sont les critères à étudier par les ingénieurs qualité pour se prononcer.

Une métrique subjective a été choisie pour les mêmes raisons que pour la métrique T_{QDef} .

Le Tableau 46 synthétise les métriques qui ont été définies pour le modèle de qualité des prévisions de fiabilité ainsi que leurs caractéristiques (mesure, objectif à terminaison).

Critère	Métrique	Mesure	Objectif à terminaison
N.A.	$\Delta_{\lambda_{prév}}$: Marge de fiabilité prévisionnelle	$\Delta_{\lambda_{prév}} = \frac{\lambda_{prév} - \lambda_{spec}}{\lambda_{spec}} \times 100$	≤ 0
Qualité des études de Fiabilité Q_{Sdf}	T_c : Taux de couverture de l'étude de Fiabilité	$T_c = \frac{\sum_i P_{ei}}{P_T} \times 100$	100%
	P_E : Coefficient de pertinence de l'étude de fiabilité	Questionnaire d'évaluation de la pertinence des études de fiabilité (Annexe 6).	100%
Qualité de la Définition Q_{Def}	T_{A-prod} : Taux de couverture des AMDEC Produit	$T_{A-prod} = \frac{\sum_i P_{Ci}}{P_T} \times 100$	100%
	P_A : Coefficient de pertinence de la réalisation des AMDEC produit	Questionnaire d'évaluation de la pertinence de réalisation des AMDEC (Annexe 7).	100%
	T_{QDef} : Niveau de Qualité de la définition	<ul style="list-style-type: none"> - Non Satisfaisant : 0% - Plutôt non Satisfaisant : 33% - Plutôt Satisfaisant : 66% - Satisfaisant : 100% 	100%
Qualité de la Fabrication Q_{Fab}	T_{A-proc} : Couverture des AMDEC Process	$T_{A-proc} = \frac{\text{Nombre AMDEC process réalisées}}{\text{Nombre de nouveaux process jugés à risque}}$	100%
	T_{AQFab} : Niveau d'Avis Qualité portant sur la fabrication	<ul style="list-style-type: none"> - Non Satisfaisant : 0% - Plutôt non Satisfaisant : 33% - Plutôt Satisfaisant : 66% - Satisfaisant : 100% 	100%

Tableau 46 : Métriques du modèle Fiabilité et leurs caractéristiques

V.2.2.4. 4^{ème} étape : Structuration du modèle Fiabilité

Une fois les critères et métriques déterminés, le modèle est structuré sous forme de réseau (Figure 65).

Les métriques parents modifiants sont :

- La métrique de pertinence des études de fiabilité P_E associée au taux de couverture des études de fiabilité T_C ;
- La métrique de pertinence des AMDEC produit P_A associé au taux de couverture des AMDEC produit T_{A-prod} .

En effet, les métriques P_E et P_A sont conçues pour pondérer l'influence des métriques de taux de couverture.

Les trois critères, Q_{SdF} , Q_{Def} et Q_{Fab} sont parents modifiants associés les uns aux autres car les études de fiabilité sont réalisées pour une définition et un niveau de qualité donné, et leur évolution dans le temps entraîne une divergence par rapport à la prévision initiale.

Un nœud intermédiaire entre les critères et le facteur est ajouté au réseau pour figurer la qualité de la prévision de fiabilité $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$.

Le nœud du facteur Fiabilité $\Delta\lambda_{@C}$ permet la synthèse de la prévision de fiabilité $\Delta\lambda_{prév}$ et de la qualité de cette prévision $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$.

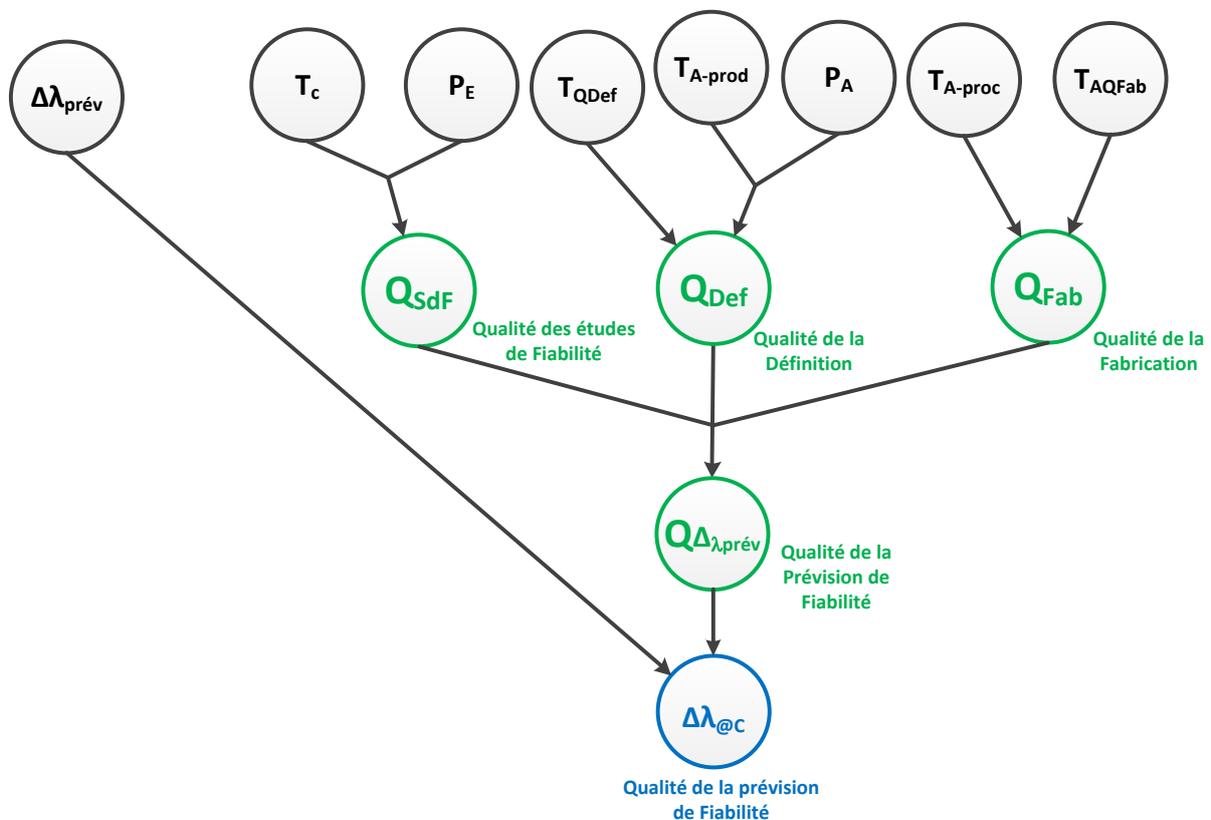


Figure 65 : Modèle fiabilité structuré

V.2.3. Paramétrage du modèle Fiabilité

V.2.3.1. 1^{ère} étape : Détermination des relations internes au modèle Fiabilité

De la même façon que pour la construction du modèle de conformité (cf. V.1.3.1.), en fonction des poids des arcs et de la présence de parents modifiants ou non, les relations entre métriques et critères, et entre critères et facteur peuvent être déterminées.

Les critères Q_{SdF} et Q_{Def} sont liés à des métriques parents modifiants (cf. V.2.2.4.). Concernant le critère Q_{SdF} les valeurs de ses deux métriques parents sont multipliées pour obtenir le niveau de qualité du critère (cf. IV.2.1.). Pour le critère Q_{Def} , ce sont les métriques T_{A-prod} et P_A qui sont parents modifiants associés et donc facteur l'une de l'autre.

Le critère Q_{Fab} ne possède pas de parents modifiants, son équation associée est de la forme de l'équation (3) (cf. IV.2.1.)

Les équations associées à chacun de ces critères sont résumées dans le Tableau 47.

Critère	Equation associée
Qualité des études de Fiabilité Q_{SdF}	$Q_{SdF} = T_C \times P_E$ (46)
Qualité de la Définition Q_{Def}	$Q_{Def} = p_{T_{QDef}, Q_{Def}} T_{QDef} + p_{T_{A-prod} \leftrightarrow P_A, Q_{Def}} T_{A-prod} \times P_A$ (47)
Qualité de la Fabrication Q_{Fab}	$Q_{Fab} = p_{T_{A-proc}, Q_{Fab}} T_{A-proc} + p_{T_{AQFab}, Q_{Fab}} T_{AQFab}$ (48)

Tableau 47 : Relations en critères sans parent modifiant et métriques Conformité

Le facteur fiabilité s'évalue via la qualité de la prévision de fiabilité $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$. Les trois critères sont parents modifiants associés donc, ce niveau de qualité s'évalue par l'équation (49) comme un produit des trois critères.

$$Q_{\Delta\lambda_{prév}} = Q_{SdF} \times Q_{Def} \times Q_{Fab} \quad (49)$$

Lorsque qu'un critère n'est pas encore calculable, il est supprimé de l'équation (49) pour que $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$ puisse être évalué. Au jalon J1, seul le critère Q_{SdF} est calculable, les études de fiabilité démarrant dès le début d'un projet (Figure 63). Au jalon J2, seuls Q_{SdF} et Q_{Def} le sont, les éléments concernant la fabrication du système arrivant plus tard. Ensuite, les trois facteurs entrent en compte.

Pour rappel, le niveau de qualité produit à terminaison pour le facteur Fiabilité $\lambda_{@C}$, ne se calcule pas mais est laissé à l'appréciation des utilisateurs du modèle en fonction du fait que les valeurs prise par $\Delta\lambda_{prév}$ et $Q_{\Delta\lambda_{prév}}$ soient acceptables ou non d'après le modèle. L'interprétation des résultats du modèle est illustrée par les applications sur des systèmes réels développés par MBDA dans la partie V.2.4.

V.2.3.2. 2^{ème} étape : Détermination des paramètres du modèle Fiabilité par élicitation des avis d'experts

Le paramétrage du modèle, qui consiste en l'identification des relations internes du modèle pour le rendre fonctionnel, repose ici encore sur l'élicitation du savoir des experts de l'entreprise.

En effet, il n'y a pas d'historique suffisant pour déduire ces relations par une analyse statistique des expériences passées en termes de prévision de la fiabilité des systèmes. Il faut donc se reposer en grande partie sur le savoir des experts en fiabilité et leur propre expérience des projets. Une procédure d'élicitation a été conçue pour permettre à la fois de déterminer quelles sont les valeurs normalement attendues pour chacune des métriques d'entrée du modèle et aussi la pondération de ces métriques (les poids des arcs) pour le calcul des critères et du facteur.

L'élicitation est conduite sur le même modèle et les mêmes principes que ceux utilisés pour le paramétrage du modèle de prévision de la conformité (cf. V.1.3.2.), en respectant les recommandations développée dans le paragraphe IV.2.2.

L'élicitation a été menée auprès de 5 experts en fiabilité et sûreté de fonctionnement, choisis parmi ceux déjà interrogés pour définir les métriques (cf. V.2.2.3.), via des entretiens dirigés d'une heure trente à deux heures. La trame suivie pour ces entretiens d'élicitation est disponible dans l'Annexe 8.

V.2.3.3. 3^{ème} étape : Agrégation des avis d'experts pour le modèle Fiabilité

Les valeurs des objectifs intermédiaires issus de l'élicitations des avis d'experts sont agrégées suivant la méthode décrite dans le paragraphe IV.2.3.1. Les résultats de l'agrégation sont disponibles dans l'Annexe 9.

Concernant les poids des arcs, le critère Q_{SdF} et le facteur sont associé uniquement à des nœuds parents modifiants. Il n'y a donc pas de poids à déterminer dans leurs cas.

Pour le critère Q_{Def} , en l'absence d'information pour les départager et en concertation avec les experts interrogés, la métrique T_{QDef} et le couple de métriques parents modifiants $T_{A-prod} - P_A$ sont considérées de poids égaux par les experts. D'après l'équation (47), l'expression de la relation entre ce critère et ses métriques est la suivante :

$$Q_{Def} = 0,5 \times T_{QDef} + 0,5 \times T_{A-prod} \times P_A \quad (50)$$

De même, le niveau de qualité de la fabrication est défini en prenant en compte les métrique T_{A-proc} et T_{AQFab} à poids égaux dans l'équation (48) :

$$Q_{Fab} = 0,5 \times T_{A-proc} + 0,5 \times T_{AQFab} \quad (51)$$

V.2.3.4. Validation du modèle de prévision de la Fiabilité

La validation du modèle de prévision de la fiabilité ne comporte pas de particularité. La méthodologie définie au paragraphe IV.2.4. a été appliquée avec les experts en fiabilité et sûreté de fonctionnement

ayant participé au moins à la définition des critères et métriques ou à l'élicitation des paramètres du modèle (6 personnes).

Parmi les réponses utilisées pour le modèle de fiabilité, il n'y avait pas d'incohérence particulière, ce qui conforte la pertinence des réponses. Tous les objectifs intermédiaires ont été présentés et discutés. Quelques corrections ont été apportées à ces objectifs en fonction des remarques soulevées par les participants à la revue (cf. Annexe 9).

Enfin, la cohérence de l'ensemble du modèle a été revue à travers plusieurs scénarios. Pour chacun des scénarios, les résultats donnés par le modèle ont été analysés et discutés avec les participants à la revue sans qu'aucune incohérence n'ait été relevée. La cohérence du modèle a été validée.

V.2.4. Utilisation opérationnelle du modèle de prévision de la Fiabilité

Le modèle Fiabilité a également été testé avec des métriques provenant de développements réels. Cela a permis de comparer les résultats calculés au déroulement réel de ces développements.

Le modèle a été testé pour 2 systèmes D et E, sur l'ensemble des jalons du développement (J1 à J4) pour le système D et au jalon J4 (issue de la validation) pour le système E, avec des métriques mesurées a posteriori.

Comme pour le modèle Conformité, un outil a été conçu pour calculer et suivre les valeurs des critères et des métriques tout au long du cycle de vie des systèmes. L'outil permet également de calculer le degré d'atteinte des objectifs intermédiaires.

V.2.4.1. Outil permettant l'utilisation du modèle Fiabilité

Nous avons construit un outil sur un tableur afin d'utiliser le modèle de qualité des prévisions de Fiabilité. Il se présente et fonctionne de façon similaire à celui développé pour la prévision de la Conformité (cf. V.1.4.1.) tout en incorporant les spécificités du modèle Fiabilité.

Cet outil propose également un tableau de bord (Figure 66) similaire à celui pour la Conformité des systèmes (cf. V.1.4.1.), adapté aux particularités de la Fiabilité.

Ces principaux composants sont (Figure 66) :

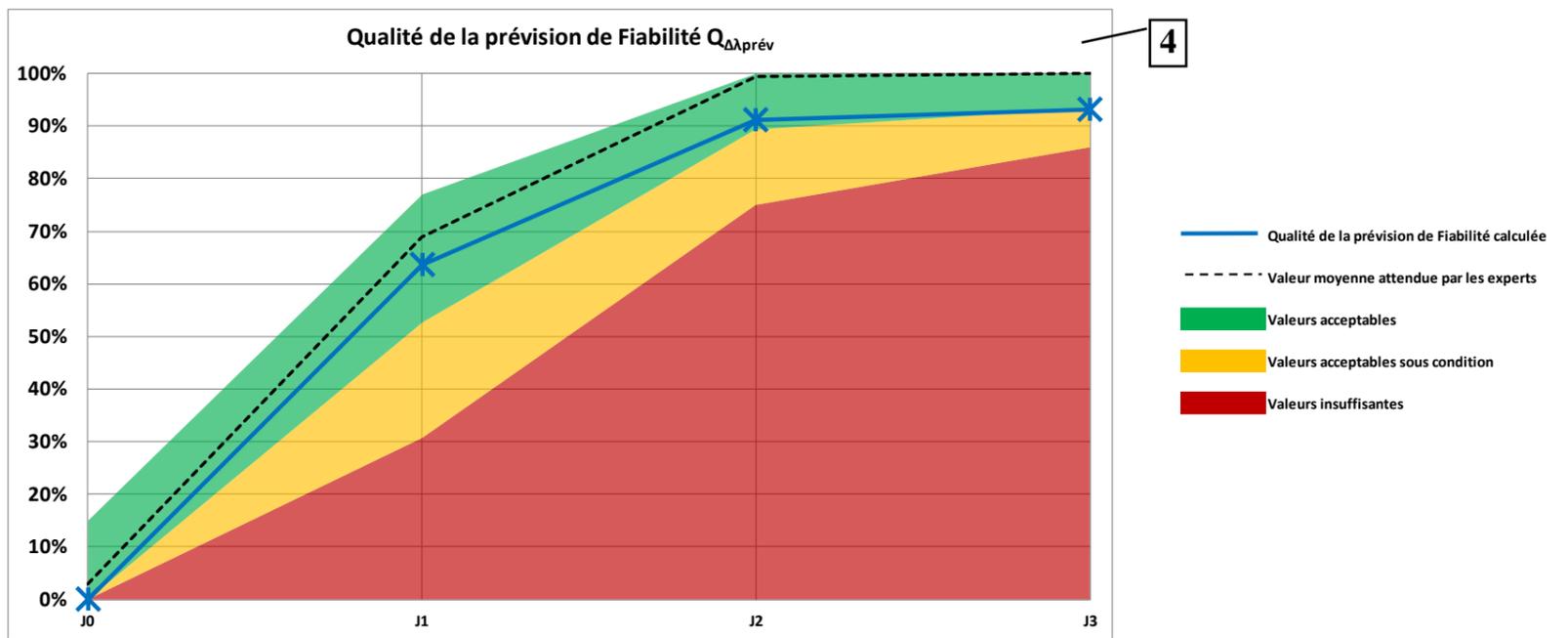
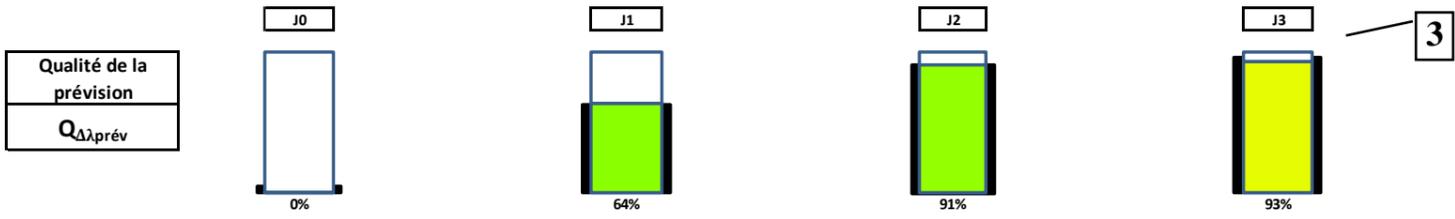
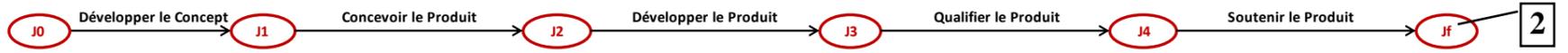
1. Le nom du système concerné et son stade dans le cycle de vie ;
2. Les différentes phases du cycle de vie ainsi que les principaux jalons ;
3. Les niveaux de qualité atteints par les prévisions de fiabilité à chacun des jalons ;
4. Le graphe qui reprend les niveaux de qualité atteints et les domaines de valeurs acceptables, admissibles et insuffisantes ;
5. Le tableau des niveaux de qualités atteints pour chacun des critères à chaque jalon ;
6. Le graphe des prévisions de fiabilité comparée au taux de défaillance spécifié, pour chaque jalon.

Les autres composants du modèle, permettant de saisir les valeurs des métriques et de les comparer aux objectifs intermédiaires, sont identiques à ceux de l'outil pour le facteur conformité (cf. V.1.4.1.).

Modèle de Qualité de la Prédiction de Fiabilité

PROGRAMME	Systeme D	1
STADE DU DEVELOPPEMENT	J4	

Avancement de la Qualité de la Prédiction de Fiabilité



		PG0	PG1	PG2	PG3
Qualité des études de Fiabilité	Q_{Sdf}	0%	89%	100%	100%
Qualité de la Définition	Q_{Def}		52%	83%	83%
Qualité de la Fabrication	Q_{Fab}			73%	83%

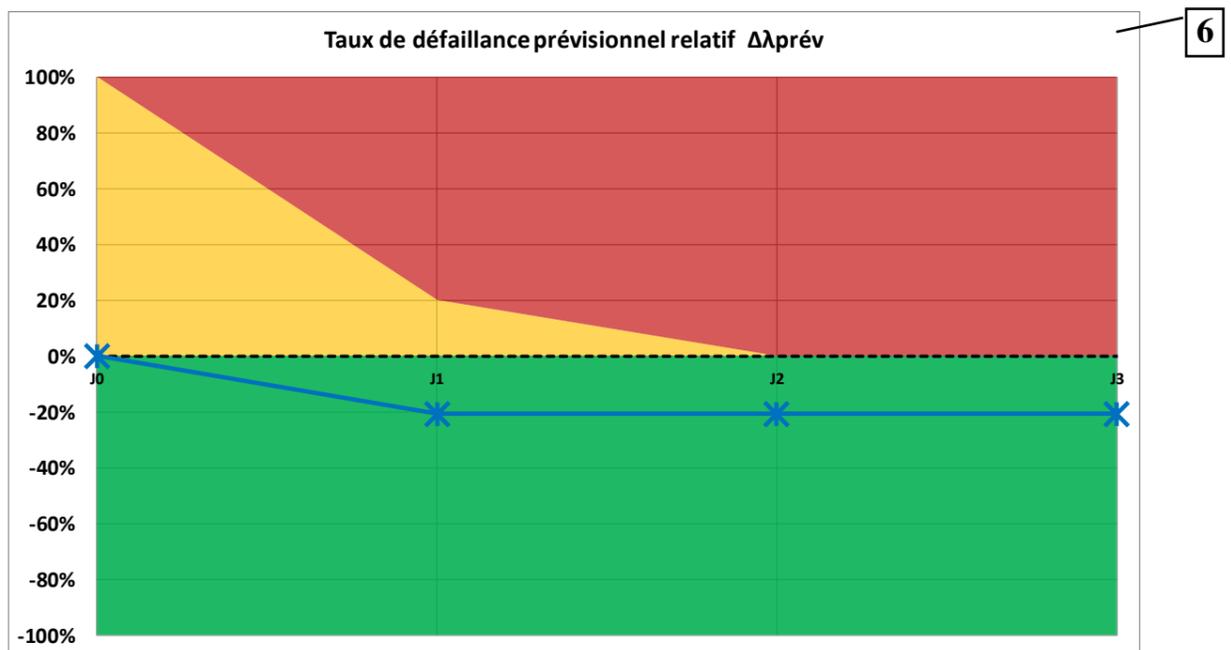


Figure 66 : Tableau de bord de l'outil permettant l'utilisation du modèle de qualité des prévisions de fiabilité

V.2.4.2. Utilisation du modèle Fiabilité

Système D

Le modèle de prévision de la qualité des études de Fiabilité à terminaison a été utilisé a posteriori pour le système D, du jalon J1 jusqu'au Jalon J4.

Les niveaux de qualité calculés pour le système D figurent sur le graphe de la Figure 67.

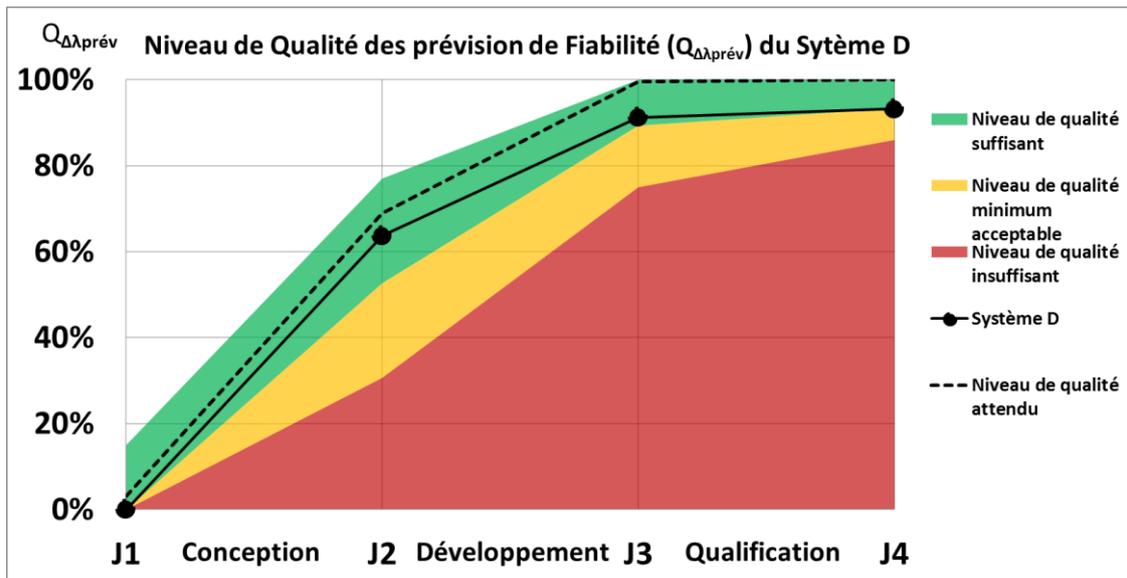


Figure 67 : Niveaux de qualité des prévisions de Fiabilité calculés pour le système D aux jalons J1 à J4

Dans le cas du développement du système D, les premiers résultats des études de fiabilité ont été produits après le jalon J1, ce qui explique un niveau de qualité des prévisions nul au premier jalon (ce qui est un résultat acceptable à ce stade). Le niveau de qualité est ensuite proche de l'attendu au jalon J2, puis en limite de ce qui est suffisant pour atteindre l'objectif à terminaison, au jalon J3 et J4 (Figure 31).

L'examen des degrés d'atteinte des objectifs intermédiaires pour les critères permet de comprendre pourquoi ces valeurs sont à leur limite (Tableau 48).

		Degré d'atteinte de l'objectif à terminaison			
		J1	J2	J3	J4
Qualité des études de Fiabilité	Q _{SdF}	0%	89%	100%	100%
Qualité de la Définition	Q _{Def}		57%	95%	95%
Qualité de la Fabrication	Q _{Fab}			92%	95%

Tableau 48 : Degré d'atteinte des objectifs à terminaison des critères pour le système D aux jalons J1 à J4

Au jalon J3, c'est le critère qualité de la fabrication qui est en-dessous du niveau suffisant. Cela s'explique par des avis qualité restant à traiter, ce qui est courant pour un début de production et est habituellement rapidement corrigé.

Ensuite, au jalon J4, la qualité de fabrication s'améliore mais reste limitée car des avis qualité subsistent et devront être corrigés lors du démarrage de la production en série. La qualité de la définition n'est pas à 100% non plus car la phase de qualification a nécessité de prévoir quelques modifications sur le système qui devront être appliquées pour la production série.

Plus la qualité de la prévision de fiabilité est élevée, plus la probabilité que le taux de défaillance observé soit égal au taux de défaillance prévisionnel est grande. Mais pour s'assurer de la satisfaction de l'exigence du client en termes de fiabilité, il faut également vérifier que le taux de défaillance prévisionnel soit bien inférieur ou égal à l'objectif fixé. L'évolution du taux de défaillance prévisionnel $\Delta\lambda_{\text{prév}}$, jalon après jalon est donc également suivie en parallèle de l'évolution de la qualité de ces prévisions (Figure 68).

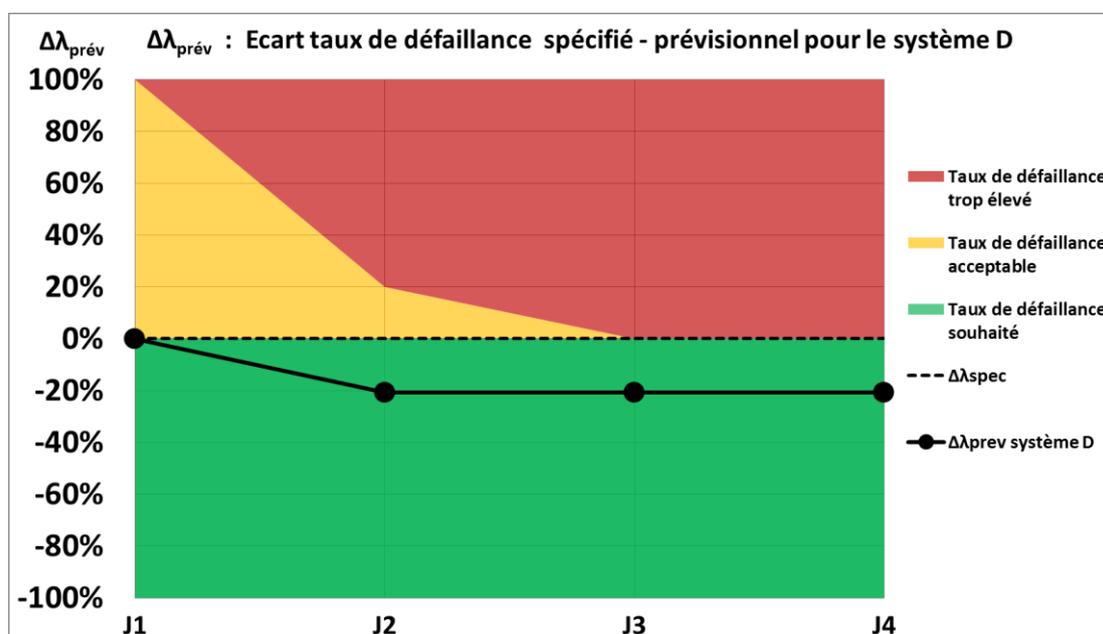


Figure 68 : Taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ pour le système D

Le taux de défaillance prévisionnel au jalon J1 est égal au taux de défaillance spécifié car c'est l'hypothèse habituellement choisie pour débiter les études de fiabilité. Au jalon J2, les études de fiabilité

était déjà complétées à 90%. Le taux de défaillance prévisionnel relatif est alors de -20%, soit une marge par rapport à l'objectif à terminaison qui augmente la probabilité d'atteindre l'objectif à terminaison.

Au jalon J3, les études de fiabilité sont menées à 100% et la marge reste de 20%. Ce chiffre n'évolue pas entre les jalons J3 et J4. L'objectif à terminaison est donc tenu avec une marge de 20% et un niveau de qualité de cette prévision de la fiabilité à 95%. L'usage du modèle de prévision au Jalon J3 aurait permis d'identifier clairement que le critère qualité de la fabrication Q_{Fab} était à un niveau insuffisant et d'éventuellement obtenir un niveau plus élevé au jalon J4. Cela aurait permis de conserver une marge de fiabilité plus importante pour la qualification et pour les premiers systèmes à livrer au client.

Systeme E

Pour le système E, les métriques ont été calculées pour le jalon J4, soit à terminaison (Figure 69)

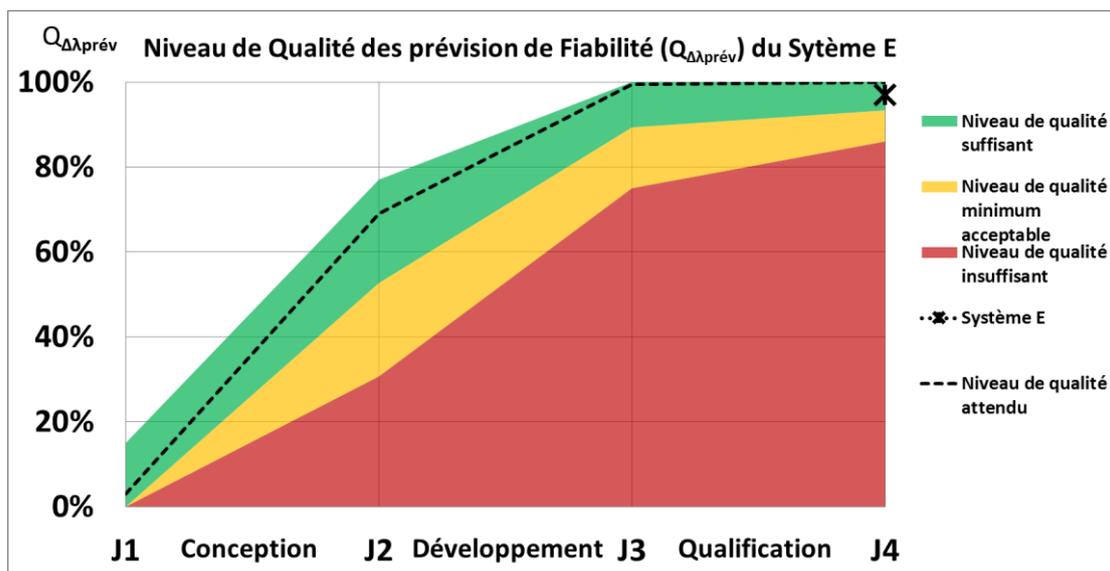


Figure 69 : Niveaux de qualité des prévisions de Fiabilité calculés pour le système E aux jalons J1 à J4

Le niveau de qualité de la prévision de fiabilité au jalon J4, à 97%, est suffisant pour maximiser la probabilité que le futur taux de défaillance en service soit proche du taux prévisionnel. Le taux de défaillance prévisionnel relatif a également été calculé (Figure 70).

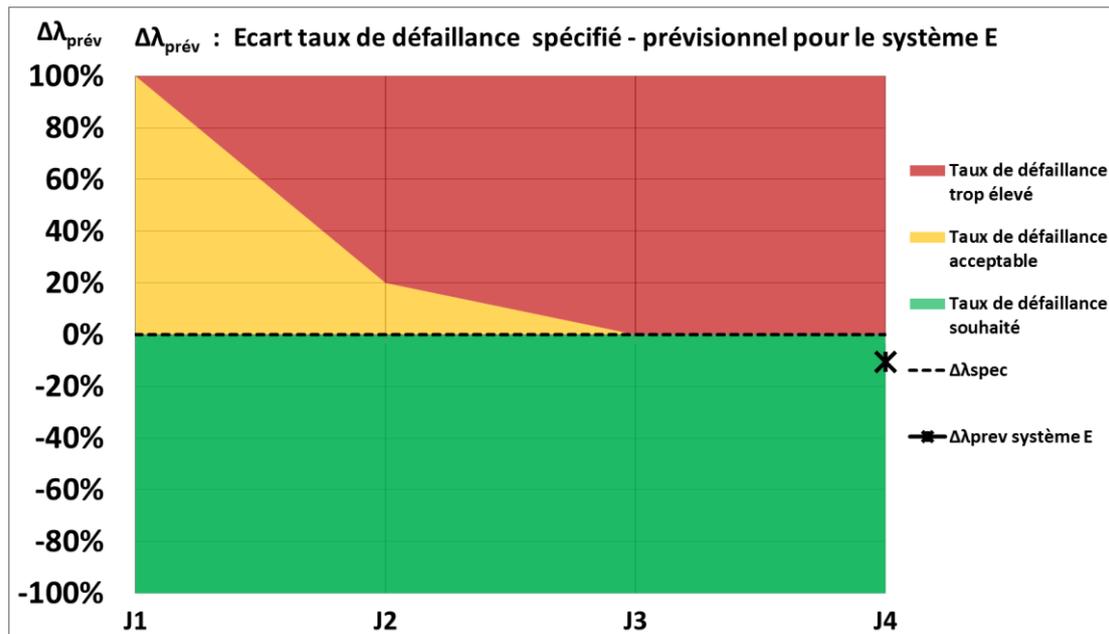


Figure 70 : Taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ pour le système E

Le taux de défaillance prévisionnel relatif du système E est de -11% au jalon J4. Le système respecte donc la spécification du client en terme de fiabilité avec une marge de 11% et un niveau de qualité de la prévision de 97%.

Ces deux applications permettent d'illustrer la capacité du modèle à contextualiser les taux de défaillance prévisionnels en fonction de la phase du cycle de vie du système considéré. Le taux de défaillance prévisionnel relatif $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ permet de savoir où se situe le niveau de fiabilité du système par rapport à l'objectif à terminaison. Le niveau de qualité de la prévision de fiabilité $Q_{\Delta\lambda_{\text{prév}}}$ offre un indicateur simple pour évaluer la confiance qu'il est possible d'accorder à cette prévision.

V.3. Conclusion

Dans ce chapitre, l'application, dans le contexte du groupe MBDA, de la méthodologie proposée pour construire des modèles de prévision de la qualité à terminaison a été décrite.

La première phase de la méthodologie, développée dans le Chapitre III, a permis de définir des facteurs qualité produit adaptés aux systèmes développés par l'entreprise. À l'issue de cette phase, 11 facteurs qualité ont été retenus pour MBDA, dont neuf peuvent être modélisés par la méthodologie proposée et deux autres qui ne sont pas dans son périmètre d'application (la sécurité et la légalité).

La seconde phase de la méthodologie a été appliquée à deux de ces facteurs dans le Chapitre V : la Conformité et la Fiabilité. Ce sont les deux facteurs qui ont été choisis pour être traités en priorité car ils sont indispensables, valables pour tous les systèmes de l'entreprise et difficiles à maîtriser. Ainsi, deux modèles de prévision de la qualité à terminaison ont été structurés et paramétrés (un pour la conformité, divisé en deux parties, et un autre pour la qualité des prévisions de fiabilité).

Ces modèles ont été revus et validés avec les experts ayant participé à leur élaboration pour s'assurer qu'ils reflètent bien les connaissances des personnes interrogées. Cette étape permet de vérifier que le suivi de la méthodologie proposée abouti à un modèle synthétisant de façon satisfaisante l'expérience et le jugement des experts au sein de l'entreprise. La revue de chacun des paramètres des modèles individuellement puis des sorties des modèles sur divers scénarios est vérifié par consensus des personnes ayant participé à la construction du modèle. La méthodologie a permis d'obtenir un résultat satisfaisant pour les facteurs qualité produit Conformité et Fiabilité. Il sera nécessaire de répéter l'opération pour d'autres facteurs et d'autres contextes pour valider complètement la méthodologie. Une étude de sensibilité sur la méthode de paramétrage des modèles pourrait être menée afin de tester la robustesse. Cependant, l'intérêt d'une telle analyse reste limité puisqu'il ne sera pas possible de réduire les incertitudes au moment de la construction des modèles s'il n'y a pas de sources d'information supplémentaire. Seule une utilisation opérationnelle des modèles peut permettre d'obtenir les informations nécessaires à la réduction des incertitudes.

Les modèles ont également été testés avec plusieurs systèmes arrivés en fin de développement. Bien que les prévisions aient été faites a posteriori afin de balayer une période de temps couvrant plusieurs jalons du cycle de vie des systèmes (soit plusieurs années), ces modèles ont démontré leur pertinence et leur intérêt en proposant une représentation synthétique de l'information, facilitant la compréhension de l'état réel et futur de la qualité d'un système pour un facteur donné et en permettant d'alerter au plus tôt d'une dérive de la qualité. Deux outils graphiques, pour chacun des deux modèles, permettant la saisie des valeurs des métriques et le suivi des résultats du modèle tout au long du cycle de vie ont également été proposés et testés. La construction du modèle pour le facteur conformité a été traitée spécifiquement dans un article présenté lors de la conférence internationale JCM 2016 [Gitto et al. 2016b]. La construction du modèle pour le facteur fiabilité a été présentée lors du congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement 2017 [Gitto et al., 2017].

Les évaluations de la qualité produit et les prévisions à terminaison fournies par ces modèles sur les cinq cas d'application se sont révélées conformes aux analyses réalisées à postériori par les ingénieurs qualité et sûreté de fonctionnement. Les objectifs de ses modèles sont donc remplis et cela confirme que la méthodologie proposée permet bien de capitaliser le savoir des experts au sein de l'entreprise et de le traduire en modèles d'évaluation et de prévision de la qualité produit utilisable tout au long du cycle de vie.

Cependant, la méthodologie proposée n'a pas été testée dans un contexte autre que MBDA. Le caractère général de la méthodologie devra encore être éprouvé dans d'autres contextes de développement de systèmes complexes.

De plus, il est difficile de valider la pertinence de ce type de modèle, construits sur la base d'avis d'experts, en l'absence de nombreuses données concernant les développements passés sur lesquelles évaluer les performances du modèle. Ce type d'évaluation ne peut se faire qu'à l'usage.

Ces modèles devront dorénavant être évalués en utilisation réelle, au cours de développement et de production de nouveaux systèmes. Ces évaluations permettront de tester et d'améliorer les outils permettant de les utiliser, les méthodes de mesure des métriques et les représentations des résultats pour leur communication au sein des équipes de développement, de production et de soutien.

Conclusion et Perspectives

L'objet des travaux de recherche développés dans ce mémoire est le développement de modèle de prévision de la qualité produit à terminaison pour des systèmes complexes.

En effet, une entreprise qui développe et produit des systèmes complexes doit mettre en place un système de management de la qualité afin de répondre au besoin du client tout en maîtrisant ses coûts. Des évaluations de la qualité des systèmes tout au long de leur cycle de vie, et en particulier pendant les phases de développement sont nécessaires afin de guider la prise de décisions. S'il existe des indicateurs prédictifs de coût et de délais utilisés couramment en entreprise, la qualité produit est habituellement évaluée a posteriori. Les méthodes permettant de manager la qualité concernent les processus de l'entreprise à un haut niveau et ne permettent pas l'évaluation directe de la qualité produit. Des outils spécifiques permettent également d'évaluer et de prévoir certaines caractéristiques des systèmes mais ceux-ci ne peuvent pas offrir une vue d'ensemble de la qualité tout au long du cycle de vie.

C'est pourquoi notre proposition consiste en une méthodologie adaptée aux entreprises qui conçoivent des systèmes complexes, de construction de modèles de prévision de la qualité produit à terminaison. Ce travail a été accompli dans le cadre d'un contrat CIFRE avec l'entreprise MBDA qui conçoit et produit des systèmes d'armes.

La problématique sur laquelle porte cette thèse est définie suivant deux axes (cf. Chapitre I) :

Axe 1 : Comment définir et caractériser la qualité produit à terminaison d'un système complexe du point de vue du client ?

Axe 2 : Comment prévoir la qualité produit à terminaison d'un système complexe, du point de vue du client, au cours de son développement ?

Les méthodes et outils se rapportant à la maîtrise de la qualité en entreprise et à sa prévision ont été revus dans le Chapitre II. Les démarches de management de la qualité ont pour principale limite de ne pas formaliser suffisamment les relations entre les différents niveaux de déploiement en entreprise, les différentes phases du cycle de vie des systèmes et entre les composantes de ces démarches. Cela est d'autant plus problématique dans le cadre du développement de systèmes complexes car ils nécessitent de longues périodes de développement, de nombreux intervenants et des domaines d'ingénierie variés (cf. I.1.).

Concernant les outils de prévision, seules certaines caractéristiques du produit sont prises en compte, ne permettant pas de considérer l'ensemble de la qualité produit d'un système. Chaque phase du cycle de vie ayant ses propres spécificités, ces outils sont le plus souvent conçus et utilisés pour une seule de ces phases. Pour assurer le suivi de la qualité produit sur l'ensemble du cycle de vie, il faut donc combiner l'utilisation de plusieurs méthodes et outils, sans que la cohérence de l'ensemble soit garantie.

Nous proposons donc une méthodologie pour construire des modèles permettant de définir la qualité produit des systèmes complexes, d'évaluer et piloter leur qualité tout au long du cycle de vie (cf. Chapitre III et Chapitre IV). Cette méthodologie repose sur l'approche FCM (Facteurs, Critères, Métriques) pour la définition des éléments du modèle qualité produit et l'utilisation du formalisme des

réseaux bayésiens pour leur structure en réseau claire et adaptée aux modèles de prévision. La construction des modèles utilise l'élicitation d'avis d'experts comme source principale de données.

La méthodologie que nous proposons sur cette base possède les avantages suivants par rapport aux outils existants :

- Couvre l'ensemble des caractéristiques qualité d'un système complexe ;
- S'adapte au contexte de l'entreprise qui la met en œuvre ;
- Couvre l'ensemble du cycle de vie d'un système complexe ;
- S'appuie sur les connaissances d'experts et ne nécessitent pas d'importantes bases de données ;
- Permet de réaliser des prévisions au cours de la phase de développement sur la qualité à terminaison des systèmes complexes.

Les modèles ainsi construits permettent d'apporter une réponse aux limitations des démarches et outils de la qualité existants pour les entreprises qui développent des systèmes complexes.

La première phase de la méthodologie proposée a été mise en application au sein de l'entreprise MBDA (cf. Chapitre III) pour identifier et définir la qualité des systèmes développés par l'entreprise à travers différents facteurs. Parmi les 11 facteurs qualité produit retenus, deux ont été sélectionnés, selon les besoins de l'entreprise, pour faire l'objet de modèles de prévision de la qualité à terminaison. Cette première phase de la méthodologie a fait l'objet d'une présentation lors du congrès international IFAC 2016 [Gitto et al., 2016a].

Le premier facteur est la conformité du système au besoin du client. Il a été traité, pour la seconde phase de la méthodologie proposée, en deux parties correspondant à l'organisation des processus au sein de l'entreprise, l'une consacrée à la conformité de la définition des systèmes au besoin du client et l'autre à la conformité du système fabriqué à sa définition. Le traitement du facteur conformité est traité spécifiquement dans un article présenté lors de la conférence internationale JCM 2016 [Gitto et al. 2016b].

Le second facteur est la fiabilité des systèmes. La construction du modèle concernant le facteur fiabilité a été détaillée dans ce mémoire car la fiabilité présentait la particularité de déjà faire l'objet de modèles de prévision au sein de l'entreprise. Le travail a donc consisté à construire un modèle qui permette d'évaluer et de prévoir la qualité des prévisions de fiabilité tout au long du cycle de vie. La construction du modèle pour le facteur fiabilité a été présentée lors du congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement en 2017 [Gitto et al., 2017].

Ces deux modèles ont été construits sur la base d'élicitation d'avis d'experts pour alimenter les différentes étapes de la méthodologie. Plusieurs étapes de validation ont été menées pour confirmer que les modèles construits correspondaient bien aux éléments issus de l'élicitation des connaissances des experts, et s'assurer de la cohérence des évaluations et des prévisions de la qualité issues des modèles.

Deux outils permettant l'utilisation de ces deux modèles de prévision ont été conçus et utilisés sur plusieurs systèmes en cours de développement ou récemment développés par MBDA. Le modèle de prévision de la conformité de la définition des systèmes a ainsi été testé pour deux systèmes en cours de développement et le modèle de prévision de la conformité du système fabriqué à sa définition testé sur un système en production. Le modèle de prévision de la qualité des prévisions de fiabilité a également été testé dans le cas de deux systèmes arrivés en fin de développement afin de couvrir l'ensemble des jalons du cycle de vie des systèmes.

Ces tests ont permis de vérifier l'utilisabilité de ces modèles et des outils conçus pour en représenter les sorties. Les évaluations et prévisions de la qualité à terminaison ont été analysées par les experts en sûreté de fonctionnement et ingénieurs qualité au sein de l'entreprise. La pertinence des sorties des modèles a ainsi pu être vérifiée, démontrant l'intérêt de cet outil pour détecter au plus tôt de potentiels problèmes qualité et guider la prise de décisions tout au long du cycle de vie des systèmes. L'utilisation de différents modèles de prévision de la qualité produit pour plusieurs facteurs sur un même système permettra une meilleure vue d'ensemble d'un projet, une meilleure prise de décisions lors des revues de conception, de production et de passage de jalon. Ainsi l'entreprise bénéficiera d'une meilleure maîtrise de la qualité produit tout au long du développement et des activités de production.

Plusieurs contraintes et limites conditionnent toutefois l'emploi de la méthodologie que nous proposons :

- **La disponibilité des experts :** La construction des modèles de prévisions s'appuie principalement sur l'élicitation des connaissances des experts au sein de l'entreprise. Il est donc nécessaire qu'il y ait un nombre suffisant d'experts à interroger pour structurer et paramétrer les modèles. Ces experts doivent être disponibles pour répondre aux différents questionnaires puis pour valider la transposition de leur réponses dans le modèle et enfin analyser la pertinence des sorties du modèle lors des tests. Ce travail est chronophage et peut nécessiter plusieurs allers-retours entre différentes phases de la méthodologie lorsqu'il faut corriger certains éléments du modèle en cours de construction.
- **La cohérence des données issues de l'élicitation des avis d'experts :** La méthodologie proposée est pertinente dans le cas où la majorité des réponses des experts ne se contredisent pas entre elles ou, lorsque qu'un consensus entre experts est possible. Les situations de fortes contradictions dans les réponses demandent un travail supplémentaire pour comprendre l'origine de ces divergences et identifier des éléments permettant de trancher raisonnablement sur ces cas.
- **Possibilités de validation :** Les modèles construits grâce à la méthodologie que nous proposons reposent sur les connaissances des experts. Le contexte des systèmes complexes produits en petite série et avec des cycles de vie de 30 ans et plus limite beaucoup les possibilités de validation de ces modèles, les cas d'application étant très peu nombreux. La méthodologie proposée permet de s'assurer que les modèles traduisent bien les connaissances des experts et que les modèles construits fournissent des évaluations et des prévisions de la qualité produit cohérentes et pertinentes par rapport aux évaluations des ingénieurs qualité expérimentés. L'usage des modèles permettra ensuite d'accumuler plus d'expériences et de les ajuster en modifiant les paramètres si nécessaire.

La méthodologie de construction des modèles de prévision de la qualité produit pourrait également être complétée en y intégrant un moyen d'identifier les incertitudes en fonction de leur nature. En l'état actuel, il est difficile de faire la part des choses entre l'incertain aléatoire, intrinsèque aux variables du modèle, et l'incertain épistémique, qu'il sera possible de réduire en acquérant des connaissances supplémentaires. Plusieurs cadres de modélisation de l'incertain, tels que la théorie des possibilités [Zadeh, 1977] (extension de la théorie de la logique floue [Zadeh, 1965]) ou la théorie de l'évidence [Dempster, 1967] et [Shafer, 1976], pourraient être associés à notre méthodologie. Les difficultés principales sont de conserver la bonne lisibilité des modèles et de pouvoir identifier clairement les sources d'incertitude.

Une autre possibilité d'amélioration de la méthodologie serait d'utiliser les possibilités offertes par le formalisme bayésien des modèles de prévision pour traduire les relations internes de ces modèles dans des tables de probabilités conditionnelles. Les modèles de prévision pourraient ainsi être utilisés comme des réseaux bayésiens classiques, via les outils informatiques déjà existants pour gérer ce type de modèle. Les sorties des modèles pourraient alors être fixées suivant divers scénarios que l'entreprise souhaiterait tester, pour en déduire les entrées du modèle correspondantes. Bien que cette possibilité ne fait pas partie du besoin initial de MBDA et n'ait pas été développée dans le cadre de travaux précédemment exposés, cela permettrait aux utilisateurs de mieux comprendre les interactions entre les éléments qui influencent la qualité produit tout au long du cycle de vie des systèmes. Pour cet usage, il sera au préalable nécessaire de discrétiser les variables des modèles en définissant les différents états des facteurs, critères et métriques. Il faudra pour cela rester vigilant à ne pas introduire d'effet de seuil dans les modèles et donc tester leur sensibilité.

La procédure d'élicitation pourrait également encore être améliorée afin d'optimiser les questionnaires. L'élicitation d'avis d'experts est la phase qui prend le plus de temps dans la construction des modèles et faciliter son déroulement permet d'améliorer tous les processus de construction. Des critères d'évaluation de l'expérience des experts et de la pertinence de leurs réponses pourraient également être utiles pour le traitement des connaissances issues de l'élicitation. Les réponses des experts pourraient ainsi être pondérées grâce à ces éléments et il serait plus facile de traiter les situations en cas de désaccord. Mais cela suppose de pouvoir trouver des critères d'expérience et de pertinence adéquats et vérifiés. Il faut également s'assurer dans ce cas de ne pas influencer les experts interrogés en mettant en doute leurs capacités.

Plusieurs améliorations sont également possibles du côté opérationnel de ces modèles. En effet, ceux-ci n'ont été testés, jusqu'à présent, que dans le contexte de l'entreprise MBDA. Il serait intéressant de les tester dans d'autres entreprises développant des systèmes complexes afin de s'assurer que la méthodologie est bien adaptée à ce type de produit.

Les outils informatiques permettant de faciliter la construction et l'utilisation du modèle doivent également être développés. L'outil déjà proposé pour utiliser les modèles peut par exemple être amélioré en l'interfaçant avec les principaux systèmes de gestion de l'information en entreprise. Ainsi, le calcul de nombreuses métriques pourrait être automatisé et les entrées du modèle facilement renseignées. Un travail pour faciliter le calcul de métriques issues du système de gestion des non-conformités qualité est d'ailleurs en cours au sein de MBDA.

Bibliographie

- Akao, Y. (1990). *Quality Function Deployment*, Productivity Press. Cambridge MA
- Alpaydin, E. (2010). *Introduction to Machine Learning*. MIT Press.
- Anderson, P., (1999). *Complexity Theory and Organization Science*. *Organization Science*, 10(3), pp.216–232.
- Avrillon, L. (2005). *Démarche de résolution de problèmes qualité dans le cadre de produits nouveaux de haute technologie*. Thèse de doctorat, Université de Savoie.
- Ayyub, B. M. (2001). *Elicitation of expert opinions for uncertainty and risk*. *International Journal of Forecasting* (Vol. 20). CRC Press.
- Basili, V., Caldiera, G., & Rombach, H. D. (1994). *The Goal Question Metric approach*. Institute for Advanced Computer Studies Department of Computer Science University Of Maryland
- Benzecri, J.-P. (1992). *Correspondence analysis handbook*. Marcel Dekker.
- Beugnard, A. (1998). *Introduction au génie logiciel : Qualité*. ENST Bretagne
- Bousslama, R. (2012). *Vers un système d'aide à la décision pour la conception en génie logiciel : une approche basée sur les connaissances*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal.
- Brans, J. P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). *How to select and how to rank projects: The Promethee method*. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238.
- Brown, B. B. (1968). *DELPHI Process: A Methodology Used for the Elicitation of Opinions of Experts*. Rand Document, (No. P-3925).
- Brown, T. A. (2015). *Confirmatory factor analysis for applied research*.
- Buckley, J. (2005). *Fuzzy probabilities: new approach and applications*. Springer
- Buzzell, R. & Gale, B., 1987. *The PIMS Principles: Linking Strategy to Performance*. The Free Press, New York, NY.
- Cain, J. (2001). *Planning improvements in natural resources management Guidelines for using Bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond*. (CEH Wallingford, Ed.) (Vol. 44). Centre for Ecology & Hydrology.
- CEN. (2008). Expert Group 13 Life Cycle (Project) Management. Workshop 10 – *European Handbook for Defence Procurement*, Final report
- Cherfi Z. (2002). *La qualité : démarches méthodes et outils*. Edition Hermes
- Comrey, A. L., & Lee, H. B. (2013). *A First Course in Factor Analysis*. Taylor and Francis.
- Cooke, R. (1991). *Experts in uncertainty: opinion and subjective probability in science*. Oxford University Press.
- Cooke, R. M., & Goossens, L. H. J. (2000). *Procedures Guide for Structural Expert Judgement in Accident Consequence Modelling*. *Radiation Protection Dosimetry*, 90(3), 303–309.
- Crosby, P.B., (1979). *Quality is Free: the Art of Making Quality Certain*. Mentor, New York, NY.
- Dale, B.G. & R. McQuater (1998). *Managing Business Improvement & Quality: Implementing Key Tools and Techniques*. Blackwell Business, Oxford, UK
- Deeb, S. (2008). *Contribution méthodologique à la maîtrise conjointe de la qualité d'un produit et de ses processus de production par une modélisation des concepts qualité*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I – Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL).
- Dezert, J., & Smarandache, F. (2004). *Presentation of DSmT*. American Research Press, 3–35.
- Dezert, J., & Smarandache, F. (2009). *An introduction to DsmT*.

- Dodge, H. F., & Romig, H. G. (1929). *A Method of Sampling Inspection*. Bell System Technical Journal, 8(4), 613–631.
- Droguett, E. L., & Mosleh, A. (2012). *Integrated treatment of model and parameter uncertainties through a Bayesian approach*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability.
- Dubois, D., & Prade, H. (1985). *Evidence measures based on fuzzy information*. Automatica, 21(5), 547–562.
- Escofier, B. (1979). *Traitement simultané de variables qualitatives et quantitatives en analyse factorielle*. Les Cahiers de L'analyse Des Données, 4(2), 137–146.
- Fallet-Fidry, G. (2012). *Contribution à la modélisation et au traitement de l'incertain dans les analyses de risques multidisciplinaires de systèmes industriels*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Fellows, R., & Liu, A. M. M. (2012). *Managing organizational interfaces in engineering construction projects: addressing fragmentation and boundary issues across multiple interfaces*. Construction Management and Economics, 30(8), 653–671.
- Ferreboeuf, C. (2000). *Coût d'obtention de la qualité*. Techniques de L'ingénieur, AG1900V1, 1–17.
- Ferson, S., Kreinovich, V., Ginzburg, L., Myers, D. S., & Sentz, K. (2003). *Constructing Probability Boxes and Dempster-Shafer Structures*. Sandia National Laboratories.
- FIDES. (2009). *Guide FIDES Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques (2009 A)*.
- Fiegenwald, V. (2012). *Controlling non-conformity propagation in low volume manufacturing*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.
- Fox, M. J. (1993). *Quality Assurance Management*. Boston, MA: Springer US
- Garvin, D.A., (1984). *What does "product quality" really mean?* Sloan Management Review 26 (1), 25–43.
- Gautier, R., (1995). *Qualité en Conception de Produits Nouveaux : proposition d'une méthode de fiabilisation du processus de management de l'information*. Thèse de doctorat, ENSAM.
- Gentil, M. H., Y. Duco & G. Doumeingts (2001). *La méthodologie GRAI pour concevoir ou améliorer un système de management de la qualité*. Qualita 2001, Annecy, France
- Gigerenzer, G. (1991). *How to Make Cognitive Illusions Disappear: Beyond "Heuristics and Biases."* European Review of Social Psychology (Vol. 2).
- Gigerenzer, G. (2016a). *Taking Heuristics Seriously*. Behavioral Economic Guide.
- Gigerenzer, G. (2016b). *Towards a Rational Theory of Heuristics*. In Minds, Models and Milieux (pp. 34–59).
- Giordano, J.-L. (2006). *L'approche qualité perçue*. Eyrolles.
- Goetsch, D. L., & Davis, S. (2013). *Quality management for organizational excellence: introduction to total quality*. Pearson.
- Gogue, J. M. (2000). *Traité de la qualité*. Economica, Paris
- Golder, P. N., Mitra, D., & Moorman, C. (2012). *What Is Quality? An Integrative Framework of Processes and States*. Journal of Marketing, 76(4), 1–23.
- Goossens, L. H. J., Cooke, R. M., Hale, A. R., & Rodić-Wiersma, L. (2008). *Fifteen years of expert judgement at TUDelft*. Safety Science, 46(2)
- Gitto, J., Bosch-Mauchand, M., Durupt, A. P., Cherfi, Z., & Guivarch, I. (2016a). *A Methodology for Complex System Quality Model Construction – First level*. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 319–324.
- Gitto, J., Bosch-Mauchand, M., Ponchet Durupt, A., Guivarch, I., & Cherfi, Z. (2016b). *Qualité d'une prévision de fiabilité d'un système complexe*. In Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement (pp. 1–8). IMdR.
- Gitto, J., Bosch-Mauchand, M., Ponchet Durupt, A., Cherfi, Z., & Guivarch, I. (2017). *Prevision of Complex System's Compliance during System Lifecycle*. In International Joint Conference on

- Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing (JCM 2016) (pp. 101–109). Springer International Publishing.
- Grubisic, V. V. F., Ogliari, A., & Gidel, T. (2008). *Recommendations for risk identification method selection according to product design and project management maturity, product innovation degree and project team*.
- Gürler & Kaya (2002). *A maintenance policy for a system with multi-state components approximate solution*. Reliability Engineering and System Safet. 76: 117-127.
- Hair, J. (2009). *Multivariate Data Analysis*. Faculty Publications
- Hall, R. (2003). *Managing knowledge associated with innovation*. Journal of Business Research, 287
- Hellsten, U. & B. Klefsjö (2000). *TQM as a management system consisting of values, techniques and tools*. The TQM magazine, 12(4): pp. 238-244
- Helmer, O. (1967). *Analysis of the Future: The Delphi Method*. RAND-P-3558.
- Herrmann, J.W., (2015). *Engineering Decision Making and Risk Management John Wiley & Sons*.
- ISO 25012:2008 *Data quality model*
- ISO 31000:2009 *Risk Management - Principles and Guidelines*
- ISO/IEC 25010:2011 *System and Software engineering – SquaRE – System and software quality models*
- Juan, J.T. & Vicente, S., (2004). *Quality tools and techniques: Are they necessary for quality management*. International journal of Production Economics, 92(3), pp.267–280.
- Kahneman, D. (2003). *A perspective on judgment and choice - Mapping bounded rationality*. American Psychologist, 58(9), 697–720.
- Kitchenham, B., & Pickard, L. M. (1987). *Towards a constructive quality model. Part 2: Statistical techniques for modelling software quality in the ESPRIT REQUEST project*. Software Engineering Journal, 2(4), 114–126.
- Koskinen, K. U., Pihlanto, P., & Vanharanta, H. (2003). *Tacit knowledge acquisition and sharing in a project work context*. International Journal of Project Management, 21(4), 281–290.
- Lead, C.M. et al., (2010). *Systems Engineering Measurement Primer A Basic Introduction to Measurement Concepts and Use for Systems Engineering*, San Diego: INCOSE.
- Léger, A., Weber, P., Levrat, E., Duval, C., Farret, R., & Jung, B. (2009). *Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability.
- Lérat-Pytlak, J. (2002). *Le passage d'une certification ISO 9001 à un management par la qualité totale*. Thèse de doctorat, Université des Sciences Sociales - Toulouse I.
- Long A. (2012). *Proposed Unified « ility » Definition Framework*. KTSi
- Marcotte, F. (1995). *Contribution à la modélisation des systèmes de production : extension du modèle GRAI*. Thèse de doctorat, Université bordeaux 1, France
- Martin, A., & Osswald, C. (2007). *Une nouvelle règle de combinaison répartissant le conflit – Applications en imagerie Sonar et classification Radar*. Traitement Du Signal, 24
- McCall, J. A., Richards, P. K., & Walters, G. F. (1977). *Factors in Software Quality Concept and Definitions of Software Quality*. Rome air development center, Griffiss Air Force Base
- Mendling, J., Reijers, H. A., & van der Aalst, W. M. P. (2010). *Seven process modeling guidelines (7PMG)*. Information and Software Technology, 52(2), 127–136.
- MIL-HDBK-2017 (1991). *Military handbook electronic reliability design handbook*.
- Montgomery, D.C. (2009). *Design and analysis of experiments*, 7th edition. Wiley, Hoboken.
- Moore, R. E., Kearfott, R. B., & Cloud, M. J. (1966). *Introduction to Interval Analysis (siam)*. Philadelphia.
- Naïm, P., Wuillemin, P., Leray, P., Pourret, O., & Becker, A. (2007). *Réseaux bayésiens*. Eyrolles
- Neth, H., & Gigerenzer, G. (2015). *Heuristics: Tools for an Uncertain World*. In Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences (pp. 1–18). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons

- Nonaka, I., Toyama, R., & Konno, N. (2000). *SECI, Ba and Leadership: a United Model of Dynamic Knowledge Creation*. *Leadership*, 33, 5-34.
- Oakland, J. S. (2014). *Total quality management and operational excellence: text with cases*. Routledge.
- Pearl, J. (1986). *Fusion, Propagation, and Structuring in Belief Networks*. *Artificial Intelligence*, 29(1986), 241–288.
- Pearson, K. (1901). *Principal components analysis*. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal*, 6(2), 566.
- Pitchumani, V. (2005). *Design for manufacturability*. In *Proceedings of the ASP-DAC 2005. Asia and South Pacific Design Automation Conference, 2005*. (Vol. 1, p. T-1). IEEE.
- Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension*. The University of Chicago Press
- Prajogo, D. & Sohal, A.S., (2001). *TQM and innovation: a literature review and research framework*. *Technovation*, 21(9), pp.539–558.
- Preyssl, C., & Cooke, R. (1989). *Expert judgement in subjective and objective data for risk analysis of spaceflight systems*. In *International Meeting on Probability, Reliability, and Safety Assessment* (pp. 603–612).
- Pujo, P. & M. Pillet (2002). *Control by quality: proposition of a typology*. *Quality Assurance*, Vol 9(2), pp. 99-125
- Reichenbächer, M., & Einax, J. W. (2011). *Challenges in analytical quality assurance*. *Challenges in Analytical Quality Assurance*.
- ReVelle, J., Moran, J., & Cox, C. (1998). *The QFD handbook*. John Wiley & Sons Inc.
- Ribeiro, R. A. (1996). *Fuzzy multiple attribute decision making: A review and new preference elicitation techniques*. *Fuzzy Sets and Systems*.
- Roy, B. (1968). *Classement et choix en présence de points de vue multiples*. *RAIRO - Operations Research - Recherche Opérationnelle*, 2(V1), 57–75.
- Rungtusanatham, M. (1999). *The Quality and Motivational Effects of Statistical Process Control*. *Journal of Quality Management*, 4(2), 243–264.
- Saaty, T. L. (1990). *How to make a decision: The analytic hierarchy process*. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26.
- Samet, A. (2014). *Théorie des fonctions de croyance : application des outils de data mining pour le traitement de données imparfaites*. UTM-FST UA-LGI2A.
- Segrestin, D. (1996). *La normalisation de la qualité et l'évolution de la relation de production*. *Revue d'économie Industrielle*, 75(1), 291–307.
- Simon, C., Weber, P., & Evsukoff, A. (2008). *Bayesian networks inference algorithm to implement Dempster Shafer theory in reliability analysis*. *Reliability Engineering and System Safety*, 93, 950–963.
- Smarandache, F., & Dezert, J. (2004). *Advances and Applications of DSmT*. (A. R. Press, Ed.). Rehoboth.
- Smets, P. (1989). *Constructing the pignistic probability function in a context of uncertainty*, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, 5: 29- 39.
- Toret J-B (2014). *Traitement ordinal de l'information d'expertise pour le risque en génie civil*. Thèse de doctorat Paris I – Panthéon Sorbonne.
- Trentin, A., Perin, E., & Forza, C. (2012). *Product configurator impact on product quality*. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 850–859.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1975). *Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases*. In *Utility, Probability, and Human Decision Making* (Vol. 185, pp. 141–162). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Verron, S. (2007). *Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens*. Thèse de doctorat, LSQO Anger
- Villeneuve, E., Beler, C., & Peres, F. (2011). *Couplage des réseaux bayésiens et des fonctions de croyance pour l'évaluation du risque*. Application à la déconstruction d'avion. In Congrès Qualita (pp. 23–25).
- Villeneuve, É. (2012). *Hybridation des retours d'expérience statistique et cognitif pour l'évaluation des risques : Application à la déconstruction des aéronefs*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- Wilbur, A., Towers, G., Sherman, T., Yasukawa, D., & Shreve, S. (1995). *Metrics Guidebook for Integrated Systems and Product Development*. (INCOSE, Ed.) (Vol. 1). Seattle.
- Walley, P. (1991). *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities*. London: Chapman & Hall.
- Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets*. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- Zadeh, L. A. (1977). *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*. *Fuzzy Sets and Systems*, 100, 9–34.
- Zadeh, L. a. (1986). *Simple View of the Dempster-Shafer Theory of Evidence and Its Implication for the Rule of Combination*. *AI Magazine*, 7(2), 85–90.
- Zemouri, R. (2004). *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance*. Thèse de doctorat, UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté

Glossaire

Adaptabilité

Capacité du système à fournir des fonctions de plus grande ampleur. Degré auquel un produit ou un système peut efficacement être adapté pour un matériel différent ou en évolution, à d'autres logiciels, d'autres environnements d'exploitation ou d'utilisation. [ISO/IEC 25010 :2011]

Auto-descriptif

Capacité du logiciel à fournir une explication sur l'implémentation d'une fonction [MacCall, 1977].

Autonomie du système logiciel

Caractérise la dépendance du logiciel par rapport à son environnement (systèmes d'opération, utilitaires, routines etc.) [MacCall, 1977].

Autonomie machine

Caractérise la dépendance du logiciel à un système matériel donné.

Cohérence

Conception, intégration, et documentation uniformes.

Communicatif

Capacité à fournir des entrées et sorties utiles qui peuvent être assimilées [MacCall, 1977].

Conformité

Facteur qualité produit

Caractéristique évaluée par le nombre et la nature des erreurs relevées pendant le développement [Kitchenham, 1987]. Degré de couverture des besoins utilisateurs. [ISO/IEC 25010 :2011]

Concision

Caractérise la capacité à l'implémentation d'une fonction avec un minimum de code [MacCall, 1977].

Contrôle des accès

Capacité à contrôler les accès au logiciel et données [MacCall, 1977].

Critères de qualité

« Caractéristiques du processus de production du logiciel ou caractéristiques du logiciel par lesquelles les facteurs qualité peuvent être jugés et définis. Les règles suivantes ont été appliquées pour la détermination des critères:

- Les attributs des produits logiciels ou progiciels du processus de développement, c'est à dire, les critères, sont orientés logiciel alors que les facteurs sont orienté vers l'utilisateur,
- on peut afficher une relation hiérarchique avec des sous-critères,
- on peut affecter plus d'un facteur. »

[MacCall, 1977].

Les critères qualité conditionnent les facteurs qualité. Ils portent sur le produit lui-même ou sur son processus de développement ou de production et représentent le point de vue du concepteur. Sur la base des critères qualité est possible de définir et d'évaluer les facteurs qualité.

Données communes

Capacité du logiciel à fournir et utiliser des données sous une représentation standardisée [MacCall, 1977], ou plus largement compatible avec d'autres produits.

Efficacité

Caractérise le niveau de ressources nécessaire à un système pour réaliser une fonction.

Efficacité de stockage

Capacité que peu fournir le logiciel pour un minimum d'espace de stockage requis en cours d'opération [MacCall, 1977].

Efficacité d'exécution

Caractérise ce que peut fournir le logiciel en un minimum de temps de traitement [MacCall, 1977].

Efficiences :

Facteur qualité produit

Caractérise le niveau de ressources nécessaire à un produit pour réaliser une fonction

Exhaustivité

Implantation complète de toutes les fonctions nécessaires

Exploitabilité

Attribut qui détermine les opérations et les procédures concernés par le fonctionnement du logiciel [MacCall, 1977].

Évolutivité

Facteur qualité produit

Possibilité d'être modifié, d'évoluer de manière continue, d'améliorer les performances.

Facteur de la qualité

« Un état ou une caractéristique qui contribue activement à la qualité du logiciel. Pour des fins de normalisation, tous les facteurs seront liés à un coût normalisé correspondant soit à l'exercice de l'activité caractérisé par le facteur soit au fonctionnement avec ce degré de qualité.

Par exemple, la maintenabilité est l'effort nécessaire pour localiser et corriger une erreur dans un programme opérationnel. Cet effort requis peut être exprimée en unités telles que le temps, l'argent ou la main-d'œuvre. Les règles suivantes ont été utilisées pour déterminer l'ensemble des facteurs de qualité :

- Une condition ou une caractéristique qui contribue à la qualité des logiciels,
- Une caractéristique associée à l'utilisateur,
- Soit lié à un coût pour effectuer l'activité caractérisé par la fonction ou pour fonctionner avec le degré de qualité,

- Caractéristique relative entre logiciel »

[MacCall, 1977].

Un facteur est défini comme une caractéristique du produit qui contribue activement à sa qualité du point de vue utilisateur [Beugnard, 1998]. Il peut être relié à un coût par l'intermédiaire des activités qu'il engendre [McCall, 1977].

Fiabilité

Facteur qualité produit

Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée. (X 60-500; IEC 60300-1:2003 Annex A)

Flexibilité

Caractérise l'effort nécessaire pour modifier un système opérationnel

Formation

Capacité à fournir un moyen de familiariser l'utilisateur à l'emploi du système.

Instrumentation

Caractérise la possibilité de mesurer les usages ou d'identifier des défaillances.

Intégrité

Dans quelle mesure les accès peuvent être contrôlés [MacCall, 1977]. Capacité à éviter tout dommage intentionnel ou accidentel. (USA ISRAD)

Intelligibilité

Caractérise la facilité de compréhension de l'utilisation du système et la lisibilité de la documentation.

Interopérabilité

Facteur qualité produit

Caractérise l'effort nécessaire pour relier un système à un autre [Kitchenham, 1987].

Légalité

Facteur qualité produit

Respect de la réglementation.

Livrabilité :

Facteur qualité produit

Capacité à fournir, et donc à fabriquer, le produit en quantité suffisante dans les délais demandés.

Maintenabilité

Facteur qualité produit

Caractérise l'effort nécessaire à maintenir le système en état de fonctionnement ainsi que son niveau de performance à moindre coût.

Modularité

Caractérise une structure composée de modules indépendants les uns des autres.

Niveau de performance

Caractérise le niveau de capacité opérationnel du produit

Portabilité

Effort nécessaire pour transférer un programme d'un matériel à un autre et/ou d'un environnement logiciel à un autre. [Kitchenham, 1987]

Précision

Aptitude à produire des informations et actions avec le niveau d'incertitude requis.

Qualité perçue

Facteur qualité produit

« Les perceptions immédiates rationnelles et subjectives, du tout comme du détail, que le client a vis-à-vis d'un produit. Elle ne prend pas en compte les prestations à l'usage ni le vieillissement, et se limite souvent au premier contact que le client peut avoir. » [Giordano, 2006]

Résilience

Capacité d'un système à tolérer le bruit, des pannes, à fonctionner dans un mode dégradé en milieu hostile.

Réutilisabilité

Caractérise dans quelle mesure un programme peut être utilisé pour d'autres applications [Kitchenham, 1987].

Sécurité

Facteur qualité produit

Caractérise la capacité à minimiser et prévenir les risques matériels et humains.

Simplicité

Caractérise la capacité à mettre en œuvre une fonction de la manière la plus compréhensible, en évitant les pratiques qui augmentent la complexité.

Standards de communication

Capacité du logiciel à utiliser des protocoles standards et des routines d'interface [MacCall, 1977].

Testabilité

Caractérise l'effort nécessaire pour tester un système pour s'assurer qu'il effectue la fonction prévue.

Traçabilité

Suivi des exigences de leur spécification jusqu'à la validation.

Tolérance à l'erreur

Capacité du système à assurer son fonctionnement dans des conditions non nominales.

Utilisabilité

Facteur qualité produit

Caractérise l'effort nécessaire à l'utilisation et au contrôle du système. [ISO/IEC 25010 :2011]

Annexes

Tables des annexes

Annexe 1 : Définition des Facteur et Critères Qualité logiciels selon McCall.....	216
Annexe 2 : Méthode mathématique d'analyse multicritère et établissement des poids	217
Annexe 3 : Questionnaire d'évaluation de la pertinence des facteurs qualité potentiels pour MBDA	219
Annexe 4 : Trame d'entretien d'élicitation des paramètres du modèle de prévision de la Conformité	227
Annexe 5 : Objectifs intermédiaires pour les métriques du modèle de prévision de la Conformité	231
Annexe 6 : Questionnaire d'évaluation de la métrique P_E Coefficient de pertinence des études de fiabilité	233
Annexe 7 : Questionnaire d'évaluation de la métrique P_A Coefficient de pertinence des AMDEC produit	236
Annexe 8 : Trame d'entretien d'élicitation des paramètres du modèle de prévision de la qualité des prévisions de Fiabilité	237
Annexe 9 : Objectifs intermédiaires pour les métriques du modèle de qualité des prévisions de Fiabilité.....	239
Annexe 10 : Résultats du Benchmark Qualité Produit.....	240

Annexe 1 : Définition des Facteur et Critères Qualité logiciels selon McCall

Correctness	Extent to which a program satisfies its specifications and fulfills the user's mission objectives.
Reliability	Extent to which a program can be expected to perform its intended function with required precision.
Efficiency	The amount of computing resources and code required by a program to perform a function.
Integrity	Extent to which access to software or data by unauthorized persons can be controlled.
Usability	Effort required to learn, operate, prepare input, and interpret output of a program.
Maintainability	Effort required to locate and fix an error in an operational program.
Testability	Effort required to test a program to insure it performs its intended function.
Flexibility	Effort required to modify an operational program.
Portability	Effort required to transfer a program from one hardware configuration and/or software system environment to another.
Reusability	Extent to which a program can be used in other applications related to the packaging and scope of the functions that programs perform
Interoperability	Effort required to couple one system with another.

Annexe 2 : Méthode mathématique d'analyse multicritère et établissement des poids

Les méthodes d'aide à la décision multicritère sont des méthodes de calcul destinées à la solution optimale parmi un ensemble de possibilités. Ces méthodes ont été développées dans le cadre des sciences de la décision, nées dans les années 1960 [Toret, 2014]. Les travaux fondateurs sont ceux sur la méthode ELECTRE de [Roy, 1968] ou PROMETHEE [Brans, 1986] du côté européen et ceux de [Saaty, 1990] sur l'Analytic Hierarchy Process (AHP) côté américain.

Ces méthodes permettent de choisir la meilleure solution parmi d'autres, y compris dans des situations imprécises ou incertaines. Les applications de ces méthodes sont diverses (investissements financiers, choix d'une implantation industrielle, configuration de produits...).

Les méthodes d'aide à la décision multicritère peuvent reposer sur deux principes :

- L'agrégation de critères a priori en un critère unique ;
- Le sur-classement (classement préférentiel).

Le principe d'agrégation de critères en un critère unique est intéressant vis-à-vis du cadre de définition de la qualité choisi, le formalisme Facteur, Critère, Métrique (FCM). En effet, la méthodologie FCM consiste à définir les facteurs comme des agrégations de critères et les critères comme agrégation de métriques. Les principes et outils des méthodes de l'analyse multicritère sont donc susceptibles de s'appliquer à la construction de modèle de type FCM.

Le principe de base pour l'agrégation de critères est de définir un poids pour chacun d'eux et de les combiner avec une somme pondérée. Il est possible de choisir d'autres types de fonction de combinaison que la somme pondérée, pour, par exemple tenir compte de facteurs qui ne seraient pas strictement indépendants. L'AHP permet cela.

D'après la méthodologie développée par Saaty [1990], il est possible de déterminer le poids de chacun des critères en les comparant deux à deux. Cette façon de procéder peut être utilisée pour évaluer l'importance des métriques et critères d'un modèle FCM et faire le lien entre les différents niveaux du modèle.

La méthode comporte quatre étapes :

- 1- Etablir la hiérarchie : les différents éléments à comparer doivent être hiérarchisés en différents niveaux. Les comparaisons ne se font qu'entre éléments d'un même niveau, rattachés au même élément de niveau supérieur. Dans notre cas, les différents niveaux hiérarchiques sont les Facteurs, les Critères et les Métriques.
- 2- Comparer chacun des éléments. Pour cela, chaque élément dont il faut déterminer le poids est comparé avec les autres éléments de son niveau. Pour cela, une échelle de comparaison peut être utilisée, comme celle-ci par exemple :
 - Importance égale entre les deux éléments = 1
 - Faible importance d'un élément par rapport à un autre = 3
 - Importance moyenne d'un élément par rapport à un autre = 4
 - Importance forte d'un élément par rapport à un autre = 5
 - Importance attestée d'un élément par rapport à un autre = 7
 - Importance absolue d'un élément par rapport à un autre = 9

Les résultats sont ensuite reportés dans une matrice de comparaison binaire de cette forme (pour trois éléments comparés) :

Eléments	E1	E2	E3
E1	1	4	9
E2	0,25	1	2
E3	0,11	0,5	1

- 3- Etablir les poids de chacun des éléments : pour cela, les colonnes de la matrice de comparaison doivent être normalisées (la somme de chaque colonne doit valoir 1). Le poids d'un élément est donné par la formule suivante :

$$\text{Poids de l'élément} = \frac{\text{Somme ligne}}{\text{Nombre d'éléments}}$$

- 4- Vérification de la cohérence : il faut s'assurer que les réponses ne soient pas contradictoires, comme par exemple E1 quatre fois plus important qu'E2, E2 deux fois plus important qu'E1 et dans le même temps, E3 qui serait cinq fois plus important qu'E1.

Pour cela, il faut calculer la cohérence de chaque élément en multipliant chaque valeur de la matrice de comparaison par le poids de l'élément en colonne le poids du critère associé puis en faisant somme pour chaque ligne divisée par le poids de l'élément en ligne. Il est alors possible de calculer la cohérence moyenne en faisant la somme des cohérences des éléments divisée par le nombre d'élément.

L'indice de cohérence se calcule par l'équation suivante :

$$\text{Indice de cohérence} = \frac{\text{Cohérence moyenne} - \text{nombre d'éléments}}{\text{Nombre d'éléments} - 1}$$

Le ratio de cohérence est ensuite obtenu en divisant l'indice de cohérence par la cohérence aléatoire :

$$\text{Ratio de cohérence} = \frac{\text{Indice de cohérence}}{\text{Cohérence aléatoire}}$$

La cohérence aléatoire est donnée par le tableau suivant :

Nombre d'éléments	2	3	4	5	6	7	8	9
Cohérence aléatoire	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Si le ratio de cohérence est inférieur ou égal à 0,1, alors l'évaluation est jugée cohérente. Sinon, il faut recommencer l'évaluation.

Annexe 3 : Questionnaire d'évaluation de la pertinence des facteurs qualité potentiels pour MBDA

Evaluation des Facteurs Qualité

Prénom :

Nom :

**Sur quelles phases du cycle de vie du produit (PLC) travaillez-vous ?
(Plusieurs réponses sont possibles)**

- Futurs systèmes (avant J0)
- Développement concept (J0 - J1)
- Conception (J1 – J4)
- Production (J3 – Jf)
- Maintient en service (J4 – Jf)

Quel est votre rôle, métier ?

Comment définiriez-vous la qualité d'un système du point de vue du client ?

À partir d'une étude bibliographique, nous avons établi une première liste de facteurs permettant de définir la qualité d'un système du point de vue du client.

Facteurs Qualité	Vis-à-vis du produit final tel que livré au client, ce facteur est :	
Conformité (au besoin exprimé par le client)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Fiabilité (aptitude du produit à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Efficacité (niveau d'obtention des résultats escomptés)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Efficienc (caractérise le niveau de ressources nécessaire à un produit pour réaliser une fonction)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Légalité (respect de la réglementation)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Utilisabilité (caractérise l'effort nécessaire à l'utilisation du produit)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion

Maintenabilité (caractérise l'effort nécessaire à maintenir le produit en état de fonctionnement ainsi que son niveau de performance à moindre coût.)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Testabilité (caractérise l'effort nécessaire pour tester un produit pour s'assurer qu'il effectue la fonction prévue.)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Flexibilité (pouvoir faire évoluer le produit facilement)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Portabilité (pouvoir transférer le produit facilement d'un environnement à un autre)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Réutilisabilité (caractérise dans quelle mesure un produit peut être utilisé pour d'autres applications)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Interopérabilité (Caractérise l'effort nécessaire pour relier un produit à un autre)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Intelligibilité (facilité de compréhension de l'utilisation du produit et de la documentation associée)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion

Sécurité (capacité à minimiser et prévenir les risques matériels et humains)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Résilience (capacité d'un produit à tolérer le bruit, des pannes, à fonctionner dans un mode dégradé en milieu hostile.)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Qualité perçue (perceptions immédiates rationnelles et subjectives, du tout comme du détail, que le client a vis-à-vis d'un produit)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion
Disponibilité (produit facile à approvisionner, capacité à fournir, et donc à produire, le produit en quantité suffisante dans les délais demandés)		Indispensable
		Important
		Utile
		Inadapté, sans objet
		Sans opinion

Une telle définition de la qualité à travers différents facteurs vous semble-t-elle pertinente ?

Oui Non

Commentaires :

Quels autres facteurs manqueraient-ils ?

Version anglaise du questionnaire :

Quality Factors assessment

First
Name:

Last
Name:

On which phase of the product life cycle (PLC) are you working? (Several answers are possible)

- Future systems (before J0)
- Development of concept (J0 – J1)
- Design (J1 – J4)
- Production (J3 – Jf)
- Sustainment (J4 – Jf)

What is your job, your role?

How would you describe the quality of the système from a customer perspective?

We have established an initial list of factors, from a literature review, that define the quality of a system as seen by customers:

Product Quality Factors	For customers, this quality factor is:	
Compliance Conformity to the need expressed by the customer		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Reliability: Ability of a product to perform a required function under given conditions for a given time interval		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Effectiveness: Extent to which planned results are achieved		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Efficiency: Relationship between the result achieved and the resources used		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Legality: Compliance with regulations		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Usability: Effort required to use the product		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion

Maintainability: Under given conditions of use and maintenance, ability of a device or system to be maintained or restored to a state in which it can perform its intended function.		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Testability: Effort required to test a product to ensure it performs its intended function.		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Flexibility: Effort required to modify a product		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Portability: Effort required when transferring a product from one environment to another.		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Reusability: Extent to which a product can be used in other applications.		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Interoperability: Effort required to couple one system with another		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Intelligibility: Ease of understanding of the use of the product and associated documentation		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion

Safety: Ability to minimize and prevent human and material risks		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Resilience: Ability of a product to tolerate noise, breakdowns, to operate in a degraded mode in hostile environments		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Perceived quality : Immediate rational and subjective perceptions by the customer of the whole product and details		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion
Deliverability: Capacity to produce, and supply in sufficient quantities as requested		Essential
		Important
		Useful
		Inappropriate, irrelevant
		No opinion

Do you find this definition of product quality using these factors relevant?

Yes

No

Comments:

What other factors are missing?

Annexe 4 : Trame d'entretien d'élicitation des paramètres du modèle de prévision de la Conformité

Partie I : Conformité de la définition par rapport au besoin exprimé par le client

Qualité des spécifications :

Les spécifications techniques du besoin (STB) MBDA, traduisent-elle correctement le besoin du client ?

Sont-elles correctement formulées ?

T_{besoin} : Couverture du besoin

L'ensemble du besoin du client est-il couvert par les spécifications techniques MBDA ? Un taux de couverture est défini sur les matrices de couverture besoin client / spécifications MBDA :

$$T_{\text{besoin}} = \frac{\text{nbr besoins client couverts par la STB MBDA}}{\text{nbr besoins clients}} \times 100$$

Valeur de T_{besoin}	J1	J2	J3	J4
T_{besoin} attendu				
T_{besoin} maximum				
T_{besoin} minimum souhaitable				

$T_{\text{évolspec}}$: Évolution des spécifications

$$T_{\text{évolspec}} = \frac{\text{nbr spécifications nouvelles ou modifiées entre 2 jalons}}{\text{nbr spécifications MBDA total}} \times 100$$

Valeur de $T_{\text{évolspec}}$	J1	J2	J3	J4
$T_{\text{évolspec}}$ attendu				
$T_{\text{évolspec}}$ maximum				
$T_{\text{évolspec}}$ minimum				

M_{spec} : Maturité des spécifications

Des revues des spécifications techniques sont régulièrement menées pour juger de la qualité et de la maturité des spécifications. La maturité des STB est évaluée grâce à l'outil MBDA (matrice d'évaluation STB)

M_{spec} = note globale STB par matrice d'évaluation

Valeur de M_{spec}	J1	J2	J3	J4
M_{spec} attendu				
M_{spec} maximum				
M_{spec} minimum souhaitable				

T_{STBpub} : Taux de STB MBDA publiées

Proportion de STB MBDA publiées par rapport au nombre attendu.

$$T_{c\text{besoin}} = \frac{\text{nbr besoins client couverts par la STB MBDA}}{\text{nbr besoins clients}} \times 100$$

Valeur de T_{STBpub}	J1	J2	J3	J4
T_{STBpub} attendu				
T_{STBpub} maximum				
T_{STBpub} minimum souhaitable				

	T_{CBesoin}	T_{évolspec}	M_{Spec}	T_{STBpub}
Poids (%)				

Qualité de la définition :

T_{DE,AC} : Taux de DE et d'AC

$$T_{DE} = \frac{\text{nbr de DE créés depuis le dernier jalon}}{\text{nbr total de DE au jalon en cours}} \times 100$$

$$T_{AC} = \frac{\text{nbr d'AC créés depuis le dernier jalon}}{\text{nbr total d'AC au jalon en cours}} \times 100$$

Les deux ratios sont pris en compte à part égale :

$$T_{DE,AC} = \frac{T_{DE} + T_{AC}}{2}$$

T_{re redesign} : Taux de revues de design passées

Proportion de revues de design passées dans les temps.

$$T_{re redesign} = \frac{\text{nbr de revue de design passées}}{\text{nbr de revue de design prévues}} \times 100$$

T_{SA} : Taux de Spécification d'Acceptation (SA)

Nombre de spécifications d'acceptation par rapport aux nombre de STB MBDA.

$$T_{SA} = \frac{\text{nbr de SA publiées}}{\text{nbr de STB MBDA publiées}} \times 100$$

Influence relative des métriques sur la qualité de la définition :

	T _{DE,AC}	T _{re redesign}	T _{SA}
T _{DE,AC}	1		
T _{re redesign}		1	
T _{SA}			1

Ou

	T _{OE/AQ}	T _{re redesign}	T _{SA}
Poids (%)			

Influence relative des critères sur l'obtention de la conformité de la définition

	Q _{spec}	Q _{Def}	Q _{DJD}
Q _{spec}	1		
Q _{Def}		1	
Q _{DJD}			1

Ou

	Q _{spec}	Q _{Def}	Q _{DJD}
Poids (%)			

Partie II : Conformité du produit par rapport à sa définition

Qualité du système de production :

Influence relative des métriques sur la qualité du système de production :

	MRL	T _{NI}	T _{Aproc}	Q _{DFC}
MRL	1			
T _{NI}		1		
T _{Aproc}			1	
Q _{DFC}				1

Ou

	MRL	T _{NI}	T _{Aproc}	Q _{DFC}
Poids (%)				

Qualité de la Supply Chain :

Influence relative des critères sur la conformité du produit :

	T _{NE}	T _{Derog}	SCE
T _{NE}	1		
T _{Derog}		1	
SCE			1

Ou

	T _{NE}	T _{Derog}	SCE
Poids (%)			

Influence des critères sur l'obtention de la conformité du produit par rapport à sa définition :

	Q _{SProd}	Q _{s.c}
Poids (%)		

Annexe 5 : Objectifs intermédiaires pour les métriques du modèle de prévision de la Conformité

Variable	Borne	J1	J2	J3	J4
T_{cbesoin}	max(max(m _k [*]) _e)	100%	100%	100%	100%
	min(min(m _k [*]) _e)	75%	90%	95%	95%
	moyenne(m _k [*]) _e)	100%	100%	100%	100%
	min(m _k [*]) _e)	90%	95%	100%	100%
T_{évolspec}	max(max(m _k [*]) _e)	0%	60%	10%	10%
	min(min(m _k [*]) _e)	0%	0%	0%	0%
	moyenne(m _k [*]) _e)	0%	50%	5%	0%
	min(m _k [*]) _e)	0%	40%	5%	0%
M_{spec}	max(max(m _k [*]) _e)	0%	100%	100%	100%
	min(min(m _k [*]) _e)	0%	60%	75%	95%
	moyenne(m _k [*]) _e)	0%	94%	94%	100%
	min(m _k [*]) _e)	0%	75%	85%	100%
T_{STBpub}	max(max(m _k [*]) _e)	100%	100%	100%	100%
	min(min(m _k [*]) _e)	65%	65%	95%	100%
	moyenne(m _k [*]) _e)	100%	100%	100%	100%
	min(m _k [*]) _e)	80%	100%	100%	100%
T_{DE,AC}	max(max(m _k [*]) _e)	N.A.	0%	0%	0%
	min(min(m _k [*]) _e)	N.A.	20%	20%	10%
	moyenne(m _k [*]) _e)	N.A.	0%	0%	0%
	min(m _k [*]) _e)	N.A.	10%	10%	5%
T_{revdesign}	max(max(m _k [*]) _e)	N.A.	0%	0%	0%
	min(min(m _k [*]) _e)	N.A.	20%	20%	0%
	moyenne(m _k [*]) _e)	N.A.	0%	0%	0%
	min(m _k [*]) _e)	N.A.	10%	10%	0%
T_{SA}	max(max(m _k [*]) _e)	N.A.	100%	100%	100%
	min(min(m _k [*]) _e)	N.A.	30%	60%	95%
	moyenne(m _k [*]) _e)	N.A.	90%	100%	100%
	min(m _k [*]) _e)	N.A.	50%	80%	100%
T_{DJD}	max(max(m _k [*]) _e)	N.A.	80%	90%	100%
	min(min(m _k [*]) _e)	N.A.	40%	50%	95%
	moyenne(m _k [*]) _e)	N.A.	70%	80%	100%
	min(m _k [*]) _e)	N.A.	50%	60%	100%
T_{SR}	max(max(m _k [*]) _e)	N.A.	80%	90%	100%
	min(min(m _k [*]) _e)	N.A.	40%	50%	100%
	moyenne(m _k [*]) _e)	N.A.	70%	80%	100%
	min(m _k [*]) _e)	N.A.	50%	60%	100%

Variable	Borne	J1	J2	J3	J4
Q_{Spec}	$\max(\max(m_k^*)_e)$	80%	100%	100%	100%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	50%	79%	91%	97%
	moyenne($m_k^*_e$)	77%	88%	97%	100%
	$\min(m_k^*_e)$	60%	84%	95%	100%
Q_{Def}	$\max(\max(m_k^*)_e)$	N.A.	100%	100%	100%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	N.A.	61%	72%	94%
	moyenne($m_k^*_e$)	N.A.	96%	100%	100%
	$\min(m_k^*_e)$	N.A.	75%	86%	98%
Q_{DJD}	$\max(\max(m_k^*)_e)$	N.A.	80%	90%	100%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	N.A.	40%	50%	98%
	moyenne($m_k^*_e$)	N.A.	70%	80%	100%
	$\min(m_k^*_e)$	N.A.	50%	60%	100%
T_{CDef}	$\max(\max(m_k^*)_e)$	28%	80%	90%	100%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	16%	30%	47%	95%
	moyenne($m_k^*_e$)	26%	59%	78%	100%
	$\min(m_k^*_e)$	20%	57%	76%	100%

La partie 2 du modèle, conformité du système par rapport à sa définition, est évaluable à partir du moment où le système de production commence à être mis en place. Les métriques sont donc calculées à partir de J3, et leur objectif est de 100% pour celles qui doivent être maximisées et de 0% pour les autres (cf. V.1.2.3.).

Annexe 6 : Questionnaire d'évaluation de la métrique P_E Coefficient de pertinence des études de fiabilité

Domaine	ID	Question	Description	Niveau de maturité			
				0	1	2	3
Profil de Vie	PdV1	Comment est construit le profil et le profil de vie est-il validé ? Si oui, par qui ?	Le profil de vie, élément décrivant l'utilisation future supposée du produit, doit être spécifié. Il est possible que les éléments fournis par le client permettent l'établissement du profil ou qu'il faille que l'industriel le construise à partir de son expérience. Dans tous les cas, l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle du produit ainsi que sa politique de maintenance en dépendant, ce profil doit être validé par les deux parties.	Le profil de vie n'est pas défini.	Le profil de vie n'est pas fourni dans le cahier des charges, mais a été défini complètement ou partiellement par l'industriel sans validation du donneur d'ordre.	Le profil de vie a été fourni dans le cahier des charges (contrat) ou a été défini complètement par l'industriel et validé formellement par le donneur d'ordre	Le profil de vie a été fourni dans le cahier des charges (contrat) ou a été défini complètement par l'industriel et validé formellement par le donneur d'ordre et les opérationnels (les futurs utilisateurs) : le profil de vie repose sur une démarche visant à recueillir la démarche opérationnelle associée au produit.
	PdV2	Quelle est la pertinence du profil de vie FIDES retenu ?	Que le profil de vie original soit entériné avec le client et conçu en adéquation de l'utilisation opérationnelle retenue pour le produit n'est pas le gage d'un profil de vie FIDES pertinent. La construction d'un profil de vie pertinent au titre de la méthodologie FIDES est un impératif afin que l'évaluation de fiabilité prévisionnelle reste pertinente.	La question ne s'est pas posée. Un profil de vie fiabilité, c'est déjà bien.	Le profil de vie fiabilité est documenté, sa construction auditable et justifiée.	Le profil de vie a été construit / revu avec une personne ayant l'expérience de la création des profils fiabilité et des lois de la physique des défaillances sous-jacentes. Le profil de vie est documenté. Une note trace les hypothèses et la construction du profil.	Cette note est validée par une personne ayant une bonne expérience, pratique et théorique de la méthodologie.
	PdV3	La variabilité du profil de vie est-elle prise en compte dans le taux de défaillance prévisionnel ?	Le profil de vie, au titre de la méthodologie FIDES, est un profil de vie moyen. Cependant, certaines données utilisées pour sa construction sont soumises à des aléas potentiels. Afin d'avoir une bonne confiance dans la représentativité du résultat, il convient d'avoir analysé la sensibilité du résultat aux éléments potentiellement variables.	Aucune sensibilité n'a été analysée.	L'expérience permet d'apporter des éléments de sensibilité connus.	Quelques éléments variables ont été pris en compte et testés afin de voir leur influence. Cela permet entre autre d'apporter des éléments de discours à tenir face au client (recommandation de stockage, etc...) Une note trace l'analyse de la sensibilité.	Une étude de sensibilité a été conduite et documentée. Cette note est validée par une personne ayant une bonne expérience, pratique et théorique de la méthodologie.

Domaine	ID	Question	Description	Niveau de maturité			
				0	1	2	3
Fiabilité	Fiab1	La méthodologie et la méthode d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle retenue est-elle adaptée au design étudié ?	Il est possible qu'un concepteur, fortement sensibilisé (formé) à la SdF soit impartial dans la réalisation d'une étude de fiabilité prévisionnelle mais cela reste exceptionnel. Il conçoit le produit pour qu'il fonctionne avec des stress qu'il maîtrise pour les savoir appliqués à son design. Une vision extérieure est nécessaire afin de réaliser un balayage de ces stress et vérifier qu'aucun problème majeur n'a échappé au concepteur. La SdF se doit de réaliser (ou de valider) l'étude de fiabilité prévisionnelle et de conserver un regard critique sur les designs, même si un outil automatique analyse le produit pour déterminer les données nécessaires à l'étude de fiabilité (caractéristiques technologiques, stress des composants...).	La question ne s'est pas posée. La méthode est utilisée car spécifiée ou seule connue.	La méthodologie appliquée est connue comme étant obsolète ou inadaptée à l'application mais des coefficients et des hypothèses sont utilisés pour recalculer la méthodologie.	- La méthode utilisée est la meilleure approche reconnue à ce jour (RETEX, norme adaptée à la techno...) - Si la méthodologie appliquée est reconnue comme étant obsolète ou inadaptée à l'application, alors des coefficients et des hypothèses sont utilisés pour recalculer la méthodologie. Ces hypothèses et coefficients sont documentés et leur pertinence justifiée par le retour d'expérience sur des projets similaires ou antérieurs.	NA

Domaine	ID	Question	Description	Niveau de maturité			
				0	1	2	3
Fiabilité électronique	FiabE3	La méthodologie et la méthode d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle retenue est-elle adaptée au design étudié ?	La pertinence d'une méthodologie est acquise par rapport aux composants sur laquelle elle a été élaborée, que ce soit en terme d'environnement, de technologie, de stress. Ainsi, la MIL HDBK 217, en fonction de son indice (par exemple ici, la F) est pertinente pour des designs des années 80 et militaires. La méthode RDF est quant à elle plus adaptée à des matériels des années 90 à 2000 pour des environnements bénins. etc...	La question ne s'est pas posée. La méthode est utilisée car spécifiée ou seule connue.	La méthodologie appliquée est connue comme étant obsolète ou inadaptée à l'application mais des coefficients et des hypothèses sont utilisés pour recalculer la méthodologie.	- La méthode utilisée est la meilleure approche reconnue à ce jour (RETEX, norme adaptée à la techno...) - Si la méthodologie appliquée est reconnue comme étant obsolète ou inadaptée à l'application, alors des coefficients et des hypothèses sont utilisés pour recalculer la méthodologie. Ces hypothèses et coefficients sont documentés et leur pertinence justifiée par le retour d'expérience sur des projets similaires ou antérieurs.	NA
	FiabE4	Quelle utilisation est faite de la MIL HDBK 217 ?	La 217, si elle est utilisée, doit être recalculée efficacement et ce recalcul doit être documenté, argumenté et appuyé par du retour d'expérience.	La méthodologie est utilisée brute, sans adaptation.	La méthodologie est recalculée sans justification argumentée ou sans justification crédible.	La méthodologie appliquée est recalculée avec justification par le retour d'expérience.	NA
	FiabE5	La méthodologie FIDES est-elle correctement utilisée ?	FIDES est une méthodologie innovante et disposant de nombreux paramètres. Ils se doivent d'être correctement évalués pour la pertinence de l'évaluation.	L'utilisation de la méthodologie est jugée inadaptée.	La méthodologie FIDES est correctement utilisée mais avec les coefficients par défaut du Guide (Pi Process, Pi Lead Free, Pi Part Manufacturing, Pi Durcissement).	La méthodologie FIDES est correctement utilisée et les valeurs par défaut "société" (Pi Process, Pi Lead Free, Pi Part Manufacturing, Pi Durcissement), documentées, ont été utilisées.	La méthodologie FIDES est correctement utilisée et les valeurs (Pi Process, Pi Lead Free, Pi Part Manufacturing, Pi Durcissement) ont toutes fait l'objet d'une analyse documentée. Les audits ont été réalisés et des plans d'action, tracés et suivis ont été élaborés.
	FiabE6	L'outil utilisé a-t-il été validé ?	Ses erreurs éventuelles sont-elles connues et ont-elles été corrigées ? Les sorties élaborées permettent-elles les analyses attendues dans le cadre d'une étude de fiabilité ?	L'outil n'est pas validé.	L'outil a été évalué et comprend des écarts par rapport aux modèles. L'outil est utilisé sans correction.	L'outil est validé et permet l'exploitation pleine et entière de la méthodologie (ou les écarts connus sont corrigés).	NA

Domaine	ID	Question	Description	Niveau de maturité			
				0	1	2	3
Fiabilité mécanique	FiabM1	L'approche utilisée pour l'évaluation de la fiabilité mécanique est-elle adaptée ?	Plusieurs approches sont possibles pour le traitement de la fiabilité mécanique. Certaines sont plus adaptées que d'autres (plus pertinentes), même si elles restent difficile d'application compte tenu des efforts nécessaires à leur mise en œuvre.	La méthodologie utilisée repose exclusivement sur une évaluation de la fiabilité mécanique forfaitaire ou à partir de recueil de fiabilité type NPRD.	L'analyse de fiabilité mécanique repose sur une analyse de type AMDEC visant à identifier les fragilités du produit ainsi qu'à proposer une amélioration pour le design suivant. Cette analyse qualitative est complétée par une analyse semi-quantitative de type avis d'expert.	L'analyse de fiabilité mécanique repose sur une analyse de type AMDEC visant à identifier les fragilités du produit ainsi qu'à proposer une amélioration pour le design suivant. Cette analyse qualitative est complétée par une analyse quantitative de type évaluation de la fiabilité mécanique par méthode résistance-contraainte des chaînes de reprise d'efforts ou sur l'exploitation d'études par éléments finis si pertinent.	L'analyse de fiabilité mécanique repose sur une analyse de type AMDEC visant à identifier les fragilités du produit ainsi qu'à proposer une amélioration pour le design suivant. Cette analyse qualitative est complétée par une analyse semi-quantitative de type avis d'expert et par une analyse quantitative de type évaluation de la fiabilité mécanique par méthode résistance-contraainte des chaînes de reprise d'efforts ou sur l'exploitation d'études par éléments finis si pertinent. Cette démarche prévisionnelle est corrélée par l'analyse du retour d'expérience sur des systèmes existants similaires.

Annexe 7 : Questionnaire d'évaluation de la métrique P_A Coefficient de pertinence des AMDEC produit

Domaine	ID	Question	Description	Niveau de maturité			
				0	1	2	3
AMDEC Produit	AP1	Qui réalise l'AMDEC et comment est-elle validée ?	Il est possible qu'un concepteur, fortement sensibilisé (formé) à la SdF soit impartial dans la réalisation d'une AMDEC mais cela reste exceptionnel. Il conçoit la carte pour qu'elle fonctionne, sans s'attarder à analyser les défaillances potentielles. C'est la raison pour laquelle le département SdF est indépendant du département électronique ou mécanique.	L'étude AMDEC est confiée au concepteur. Même si l'architecture est préparée par la SdF, les effets sont renseignés par le concepteur sur son propre design. OU L'étude AMDEC est réalisée par la SdF, sans validation par le concepteur.	L'étude AMDEC est réalisée par la SdF, par une personne compétente dans le domaine traité ou s'appuyant partiellement sur des interviews orientées du concepteur.	L'étude AMDEC est réalisée par la SdF, par une personne compétente dans le domaine traité ou s'appuyant sur des interviews orientées du concepteur, et validée par le concepteur.	L'étude AMDEC est réalisée par la SdF, par une personne compétente dans le domaine traité ou s'appuyant, en cas de doute, sur des interviews orientées du concepteur. Une revue officielle, à laquelle est convié le concepteur et le responsable projet / architecte système, clôt l'activité.
	AP2	Quelle pertinence accorder à l'AMDEC ?	D'avis immédiat de spécialiste indépendant du projet, à la présentation de l'AMDEC, les informations et le traitement de l'AMDEC sont-ils conformes à l'état de l'art ?	Informations et traitement de l'AMDEC non conformes à l'état de l'art	Des éléments manquent mais l'essentiel y est	Bonnes pratiques appliquées et résultat jugé pertinent.	NA
AMDEC Produit Electronique	AP3	Quel est le catalogue de mode de panne utilisé ?	Le catalogue de mode de panne ainsi que le ratio entre les modes de panne sont importants, non pas tant en terme de contribution chiffré dans les analyses SdF qu'afin de garantir qu'aucun mode de panne dont l'effet puisse conduire à un évènement indésirable n'ait été omis dans l'analyse.	Le catalogue de mode de panne utilisé est issu d'un standard.	Le catalogue de mode de panne est celui générique, proposé, par le département SdF	Le catalogue de mode de panne est celui générique, proposé par le département SdF et amendé si besoin pour certains composants à la pertinence de l'étude (par exemple sécuritaire / non sécuritaire).	NA
	AP4	L'identification de l'effet d'une défaillance en "sans effet" est-il pertinent ?	Plus la proportion des lignes d'AMDEC dont l'effet identifié est "sans effet" (au-delà de 10% des lignes "sans effet"), plus il est évident que le fonctionnement de la carte n'est pas maîtrisé. Une perte de protection (ou augmentation de la sensibilité à tel ou tel environnement) ; un effet en test, une impossibilité de programmer une carte, etc... ne sont pas des pannes sans effet. Elles n'ont pas d'effet opérationnel, certes, mais leur effet se doit d'être identifié.	L'effet des défaillances "Sans effet" n'est pas justifié Exemple : Les composants non utilisés ne sont pas traités ou sont classés "sans effet" (sans justification tangible)	L'effet des défaillances "sans effet" est partiellement traité et justifié le cas échéant.	L'effet des défaillances "sans effet" est correctement traité et justifié le cas échéant.	NA

Annexe 8 : Trame d'entretien d'élicitation des paramètres du modèle de prévision de la qualité des prévisions de Fiabilité

Quelle est l'influence des paramètres sur la qualité des études de fiabilité ?

Métriques se rapportant à Q_{Saf} :

- $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ Marge de fiabilité prévisionnelle : Permet de rendre compte de l'écart entre la fiabilité prévisionnelle et l'objectif cible (fiabilité spécifiée)
- T_c Taux de couverture de l'étude de Fiabilité : Permet de rendre compte de l'avancement de l'étude de fiabilité
- P_E : Pertinence des études de fiabilité
- Q_{Saf} Qualité des études de fiabilité : Permet de rendre compte de la qualité des études de fiabilité et de la marge de fiabilité disponible

À J_i ($i \in \{1; 2; 3; 4\}$) :

- Quel est le niveau de T_c attendu ?
- Quel serait le niveau de T_c maximum atteignable ?
- Quel serait le niveau de T_c minimum souhaitable ?

Valeur de T_c	J1	J2	J3	J4
T_c attendu				
T_c maximum				
T_c minimum souhaitable				

- Quel est le niveau de $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ attendu ?
- Quel serait le niveau de $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ maximum atteignable ?
- Quel serait le niveau de $\Delta\lambda_{\text{prév}}$ minimum souhaitable ?

Valeur de $\Delta\lambda_{\text{prév}}$	J1	J2	J3	J4
$\Delta\lambda_{\text{prév}}$ attendu				
$\Delta\lambda_{\text{prév}}$ maximum				
$\Delta\lambda_{\text{prév}}$ minimum				

Métriques se rapportant à Q_{Def} :

- Q_{Def} : Qualité de la définition : Permet de rendre compte du risque d'avoir des défaillances causées par des défauts de conceptions.
- $T_{A\text{-prod}}$: Couverture des AMDEC Produit
- P_A : Pertinence des AMDEC Produit
- $T_{Q_{\text{Def}}}$: Niveau de qualité de la conception

À J_i ($i \in \{1; 2; 3; 4\}$) :

- Quel est le niveau de $T_{A\text{-prod}}$ attendu ?
- Quel serait le niveau de $T_{A\text{-prod}}$ maximum atteignable ?
- Quel serait le niveau de $T_{A\text{-prod}}$ minimum souhaitable ?

Valeur de $T_{A\text{-prod}}$	J1	J2	J3	J4
$T_{A\text{-prod}}$ attendu				
$T_{A\text{-prod}}$ maximum				
$T_{A\text{-prod}}$ minimum souhaitable				

À J_i ($i \in \{1; 2; 3; 4\}$) :

- Quel est le niveau de $T_{Q\text{Def}}$ attendu ?
- Quel serait le niveau de $T_{Q\text{Def}}$ maximum atteignable ?
- Quel serait le niveau de $T_{Q\text{Def}}$ minimum souhaitable ?

Valeur de $T_{Q\text{Def}}$	J1	J2	J3	J4
$T_{Q\text{Def}}$ attendu				
$T_{Q\text{Def}}$ maximum				
$T_{Q\text{Def}}$ minimum souhaitable				

À J_i ($i \in \{1; 2; 3; 4\}$) :

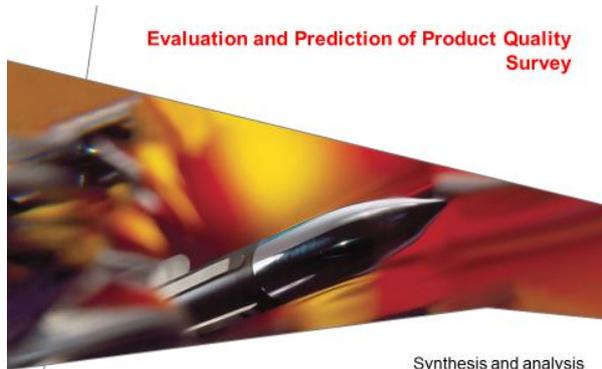
Le paramètre $T_{AQ\text{Def}}$ étant dans le cas le plus favorable et P_A à 100%, quelle serait la valeur de Q_{Def} pour :

Valeur de $T_{A\text{-prod}}$	J1 Valeur de Q_{Def}	J2 Valeur de Q_{Def}	J3 Valeur de Q_{Def}	J4 Valeur de Q_{Def}
$T_{A\text{-prod}}$ attendu				
$T_{A\text{-prod}}$ maximum				
$T_{A\text{-prod}}$ minimum souhaitable				

Annexe 9 : Objectifs intermédiaires pour les métriques du modèle de qualité des prévisions de Fiabilité

Variable	Borne	J1	J2	J3	J4
TC	$\max(\max(m_k^*)_e)$	20%	100%	100%	100%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	0%	40%	80%	95%
	$\text{moyenne}(m_k^*)_e$	5%	100%	100%	100%
	$\min(m_k^*)_e$	0%	70%	95%	100%
$\Delta\lambda_{\text{prév}}$	$\max(\max(m_k^*)_e)$	0%	100%	30%	20%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	0%	-100%	-100%	-100%
	$\text{moyenne}(m_k^*)_e$	0%	20%	0%	0%
	$\min(m_k^*)_e$	0%	-50%	-50%	-50%
$T_{A\text{-prod}}$	$\max(\max(m_k^*)_e)$	0%	100%	100%	100%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	0%	0%	40%	90%
	$\text{moyenne}(m_k^*)_e$	0%	70%	100%	100%
	$\min(m_k^*)_e$	0%	40%	90%	100%
Q_{SdF}	$\max(\max(m_k^*)_e)$	0%	40%	85%	95%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	5%	90%	100%	100%
	$\text{moyenne}(m_k^*)_e$	25%	100%	100%	100%
	$\min(m_k^*)_e$	0%	70%	95%	100%
Q_{Def}	$\max(\max(m_k^*)_e)$	0%	33%	53%	78%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	0%	75%	98%	100%
	$\text{moyenne}(m_k^*)_e$	0%	85%	100%	100%
	$\min(m_k^*)_e$	0%	53%	78%	83%
Q_{Fab}	$\max(\max(m_k^*)_e)$	0%	0%	67%	67%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	0%	0%	100%	100%
	$\text{moyenne}(m_k^*)_e$	0%	0%	100%	100%
	$\min(m_k^*)_e$	0%	0%	83%	83%
$Q_{\Delta\lambda_{\text{prév}}}$	$\max(\max(m_k^*)_e)$	0%	31%	75%	86%
	$\min(\min(m_k^*)_e)$	3%	69%	100%	100%
	$\text{moyenne}(m_k^*)_e$	15%	77%	100%	100%
	$\min(m_k^*)_e$	0%	53%	89%	93%

Annexe 10 : Résultats du Benchmark Qualité Produit



Evaluation and Prediction of Product Quality Survey

Synthesis and analysis



Evaluation and prediction of product quality

This survey was initiated with companies in France, UK and Italy. It is intended to understand what exists within the industry today to evaluate and forecast product quality and to share this information with interested participating parties.

20 Respondents

3 COUNTRIES
France
Italy
UK

This document, at your disposal, is a synthesis of the results of this survey.

The survey was performed by MBDA and took place between March and June 2013.

Réf. - Page 1 -



Participating Companies

- **Aerospace & Defence**
 - Airbus
 - Agustawestland Limited
 - Alenia Aermacchi
 - Eaton SAS
 - Eurocopter
 - MBDA
 - Rolls-Royce Defence
 - Snecma
- **Automotive**
 - Edscha
 - Sonceboz SA
 - Valeo
- **Railways**
 - Ansaldo STS S.p.A.
 - Faiveley Transport
- **Electric & Electronic**
 - Legrand
 - Schneider electric
- **Chemical, Pharmaceutical, Services & Other Manufacturing Industries**
 - Air liquide
 - Calor
 - Becton Dickinson
 - La Poste
 - Oxyrane



Réf. - Page 3 -



Summary

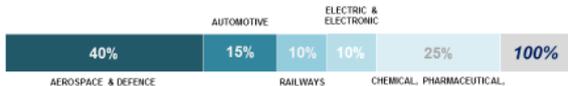
1. Profiles of participating companies
2. Structure and operation of the quality system
3. Evaluation of product quality
 - Preliminary concept phase
 - Design, Development phase
 - Production / Manufacturing phase
 - Use, consumption of the product
4. Forecasting product quality
5. Use of forecasting methods

Réf. - Page 4 -



Profiles of Participating Companies

Breakdown of the respondents per industry:



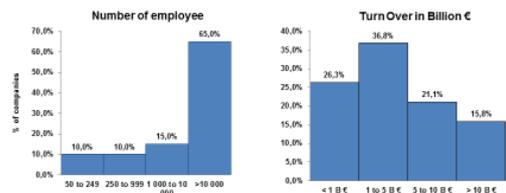
Total answers : 20

- Most of the companies that responded to the questionnaire are from defence and aeronautics sectors and transport. Several other industries are also represented.
- Three-quarters are located throughout the world, and one-quarter spread across Europe.

Réf. - Page 5 -



Profiles of Participating Companies



Total answers : 20

Total answers : 19

- Among the respondents, 80% of companies have more than 1000 employees.
- The same proportion of respondents has a turnover of more than a billion euros per year.

Réf. - Page 6 -





Profiles of Participating Companies

Comments

Companies participating in this survey are of great size and are located in several countries.

We have chosen to contact large companies rather than a representative sample of the entire industrial sector. Indeed, the purpose is to identify existing practices for comparison. Large companies are more likely to have developed the means to implement an effective quality management system.

More responses have been received from aerospace and defence companies



Summary

1. Profiles of participating companies
2. Structure and operation of the quality system
3. Evaluation of product quality
 - Preliminary concept phase
 - Design, Development phase
 - Production / Manufacturing phase
 - Use, consumption of the product
4. Forecasting product quality
5. Use of forecasting methods

Ref : Page 7 -

Structure and operation of the quality system

Organization Type	Percentage
Multi site with a common core to the whole group	83.3%
Single site	8.3%
Multi site, fully integrated	8.3%

Ref : Page 8 -

Structure and operation of the quality system

Certification	Percentage
ISO 9001	77%
ISO 14001	62%
EN 9100	54%
CMMI	15%
Other	15%
ISO TS 16949	8%

Total answers : 12; questions asked at the end of survey, few people have responded

- All companies with multiple locations operate with a common quality system for the entire group.
- ISO 9001 and 14001 certifications are most prevalent among firms, except for those working for retailers to the general public .

Ref : Page 9 -

Structure and operation of the quality system

Area	Percentage
Lean 6 sigma	90%
EFQM	30%
Readiness Level (TRL...)	25%
Product line / Re-use	20%
Other	10%
AGILE methods	10%
ITIL / PMBOOK / PRINCE2	5%

several answers were possible

- The lean and/or six sigma approach is the most common and used in almost all companies ahead of other approaches. This can be explained by the nature of the respondent company (big companies, automotive, aerospace and electric), and by the desire to reduce costs. Agile methods are not widely used (however this indicator may be due to a low survey responses).

Ref : Page 10 -

Total answers : 12; questions asked at the end of survey, few people have responded



Structure and operation of the quality system

Comments

Organization of quality system seems to be similar in respondents companies. Most are large industrial groups, a quality system common to all the company was established.

EN 9100 and TS16949 are respectively for the aerospace and automotive industries, so we found it in the proportions of respondent of these sectors.

The lean six sigma method is widely used, 90% of respondents said they apply it.



Summary

1. Profiles of participating companies
2. Structure and operation of the quality system
3. Evaluation of product quality
 - Preliminary concept phase
 - Design, Development phase
 - Production / Manufacturing phase
 - Use, consumption of the product
4. Forecasting product quality
5. Use of forecasting methods

Ref : Page 11 -

Evaluation of Product Quality

Measurement Method	Percentage
By company indicators	95%
By evaluation of customers satisfaction survey	75%
Through interviews with the client	75%
By the treatment of spontaneous customer feedback	60%
Other	30%

Ref : Page 12 -

Preliminary concept Phase

Criteria	Percentage
Control of need (market research, innovation...)	50%
Economic viability of the product	30%
Positioning in relation to the competition, management of product portfolio / catalog (modernization, retrofit, ...)	25%
Demonstration of an operational capacity	20%
Demonstration of technological maturity	15%

several answers were possible

- Companies use two different ways to assess customer satisfaction, using specific indicators and customer feedback reviews. The priority is to take into account the voice of customers.

Ref : Page 13 -

Total answers : 20; several answers were possible

Ref : Page 14 -

Main assessment methods used

Method	Percentage
Coverage of market studies	45%
Analysis of Customer's needs and expectations	40%
Modelling, simulation	30%
Analysis of Customer's needs and expectations	25%
Consistency with business strategy	20%
Modelling, simulation	15%
Tests	10%
Readiness Level	5%

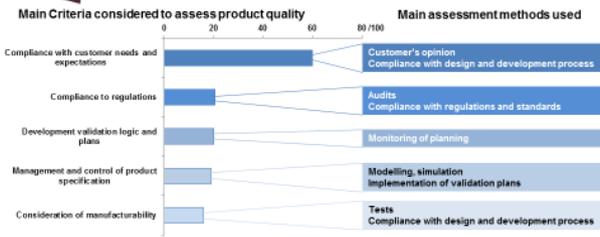
Ref : Page 15 -

Total answers : 11; Rating on a scale of 100

- Priority during the preliminary design phase is the validation of needs and demonstration of the feasibility and viability of the project. It is difficult to answer this question.
- The means used for this are diverse and concerned both technical, economic and commercial aspects. This identifies the need to have a global vision of the future project.



Design, Development Phase



Total answers : 15, Rating on a scale of 100

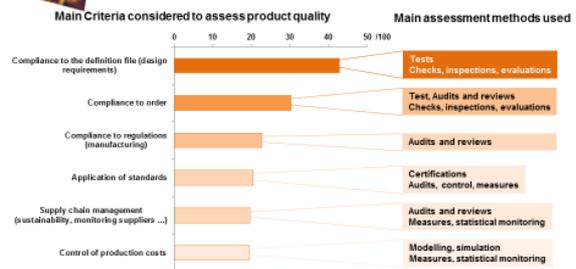
- The main criterion considered during design and development phase is the compliance with customer needs and expectations. Consideration of supportability and transition to production are not cited as a priority.
- Assessment methods mentioned are classical.

Ret. - Page 15 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS



Production / Manufacturing Phase



Total answers : 17, Rating on a scale of 100

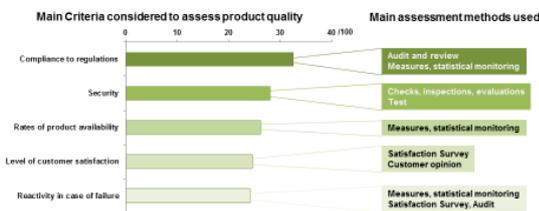
- During production phases, the priority is that the product complies with the requirements, order and regulations. Little evidence of the 'Production System' being used as an assessment criteria.
- Audits, reviews and inspection are the main assessment methods.

Ret. - Page 16 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS



Use, consumption of the product



Total answers : 20, Rating on a scale of 100

- The main mentioned criteria are almost at the same level. Regulation and security are leading. The number of recalled product is the last mentioned criterion.
- The evaluation of product quality during use is mainly based on statistical monitoring and evaluation of the customer's opinion.

Ret. - Page 17 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS



Evaluation of Product Quality

Comments

Companies assess customer satisfaction by various internal indicators and interact with customers (surveys, interviews ...), throughout the product life cycle (PLC).

Performance criteria are leading for the first phases with regulations and standards taking priority during latter phases of the PLC, which is late.

The means and methods used throughout the PLC to assess its quality are many and varied, especially during the design and development phase of the product.

Nevertheless, statistical methods are not often used on early phases of the PLC, but are used during the production phases.

Ret. - Page 18 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS



Summary

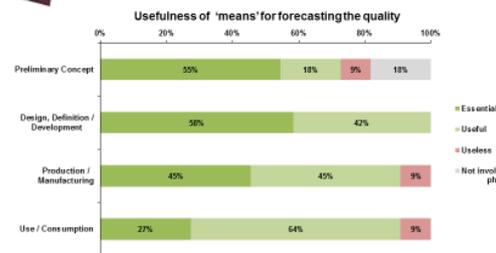
- Profiles of participating companies
- Structure and operation of the quality system
- Evaluation of product quality
 - Preliminary concept phase
 - Design, Development phase
 - Production / Manufacturing phase
 - Use, consumption of the product
- Forecasting product quality
- Use of forecasting methods

Ret. - Page 19 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS



Forecasting product quality



Total answers : 12

- Ability to predict product quality is perceived as useful for all companies surveyed, especially during the design and development phase.
- The preliminary phase is atypical. It may be too early and too complex to make forecasts for some companies. Yet it is here that there is greater value added.

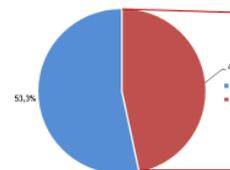
Ret. - Page 20 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS

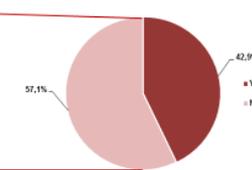


Forecasting product quality

Does the company have the means to forecast product quality?



Is the development of the means to forecast the product quality planned?



Total answers : 15

- Among the respondents, about 75% have means (methods/tools/models) to forecast quality or have planned to develop one.

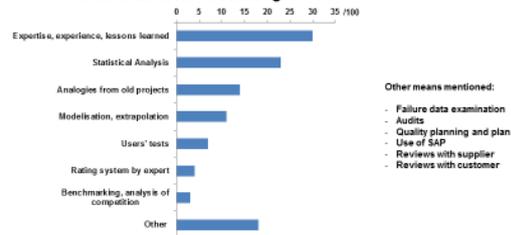
Ret. - Page 21 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS



Forecasting product quality

'Means' used for forecasting



Other means mentioned:

- Failure data examination
- Audits
- Quality planning and plan
- Use of SAP
- Reviews with supplier
- Reviews with customer

Total answers : 14

- Forecasting methods are mainly empirical and based on data and experience analysis with experts.
- Various other methods are mentioned by respondents.

Ret. - Page 22 -

MBDA
MILITEA SYSTEMS



Forecasting product quality

Main forecasted elements

Preliminary Concept

- Reuse of existing technologies and products
- Technology's maturity
- Coverage of Customer's needs and expectations
- Application of standards (internal, external)
- Product performance level

Design, Definition, Development

- Rate of product availability (MTBF...)
- Holding the unit cost objective (LPC Unit Product Cost)
- Compliance with Customer's needs
- Consideration of production and supportability constraints
- Lead time

Production, Manufacturing

- Lead time
- Reactivity in case of failure
- Number of recalled product
- Availability rate of the production chain / system
- Cost of non-quality

Use, Consumption

- Rate of Customer's satisfaction
- Reactivity in case of failure
- Number of recalled product
- Product performance level

Total answers : 14

- Most forecasted elements are from the design and development phase.
- For each PLC phase, elements forecasted are different. The early stages logically focus on product characteristics, cost and performance while final stages focus on in service customer's satisfaction and support efficiency.

Rét. - Page 23 -

MBDA



Forecasting product quality

Comments

Companies see an interest in forecasting quality throughout the PLC. Most of them (75%) have already developed ways to forecast, or plan to do so soon.

The items subject prediction are often those at their current phase of the PLC. It seems difficult to undertake middle-term or long term forecasting.

Although prediction quality is widely considered as useful, even essential, the first obstacles to the development of such methods is the lack of resources, the complexity of the supply chain and the difficulty to identify determinants factors. Only one respondent mentions the low added value as an obstacle to develop forecasting methods. This reflects the interest in the topic.

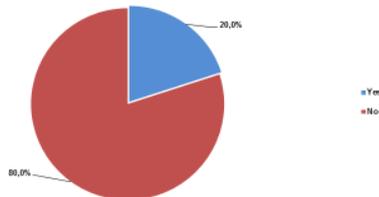
Rét. - Page 25 -

MBDA



Use of Forecasting methods

Do you have any experience to feedback from prediction methods?



Total answers : 5

- Forecasting means seem to be new and very few companies already have experience to feedback, only one replied positively.

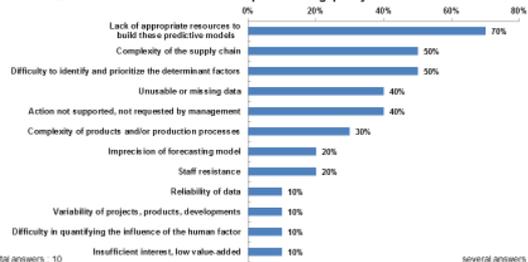
Rét. - Page 27 -

MBDA



Forecasting product quality

Main barriers to develop forecasting quality methods



Total answers : 10

several answers were possible

- The first obstacle is the lack of resources to develop forecasting methods.
- The complexity of the supply chain and the difficulty to identify determinants factors are the 2nd barrier.
- The development of means to forecast quality has to be initiated to meet the lowest 5 points mentioned.

Rét. - Page 24 -

MBDA



Summary

1. Profiles of participating companies
2. Structure and operation of the quality system
3. Evaluation of product quality
 - Preliminary concept phase
 - Design, Development phase
 - Production / Manufacturing phase
 - Use, consumption of the product
4. Forecasting product quality
5. Use of forecasting methods

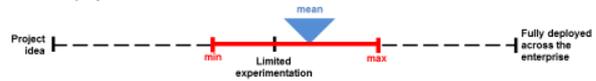
Rét. - Page 30 -

MBDA

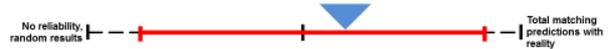


Use of Forecasting methods

What is the stage of deployment of these means (methods, tools, models) to predict product quality in the company?



What is the reliability of these forecasts?



Total answers : 5

- Forecasting methods are rarely deployed in companies; little experience.
- The reliability of such methods varies a lot from one application to another.

Rét. - Page 28 -

MBDA

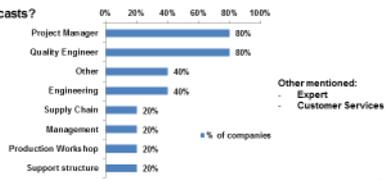


Use of Forecasting methods

How useful are those forecasts in the management of product quality?



Who use these forecasts?



Total answers : 5

several answers were possible

- Even if the reliability of the forecasts need to be improved, it is judged useful to manage product quality.
- Results are used by project engineer and quality engineer, people who have a general overview of the project.

RfT : Page 29 -



Conclusion

Different aspects of product quality are taken into account throughout the life cycle of the product. The closer you get to the finished product, the more you can use different criteria and real data and the more you can apply statistical methods and data processing to assess the product quality.

The need to forecast quality of product throughout the PLC is common for all. The majority of surveyed companies are working on the issue and some already have operational tools.

The regulations and safety are very important, as reflected in the main criteria. This reflects the willingness of companies to not take risks.

There is no continuity of quality criteria taken into account throughout the PLC. The priorities are not the same at the beginning and at the end of the project while the customer and the general need are unchanged all along the PLC.

It is not easy to define criteria for product quality and this issue has yet to be worked in the future.

RfT : Page 31 -



Use of Forecasting methods

Comments

Forecasting methods already established in industry are recently introduced. They are poorly developed and there is little feedback of experience.

Although their reliability is considered very variable, they are considered on the whole very helpful. Project management and quality management have been the first to benefit from the results of applying these tools.

RfT : Page 30 -

