

Ministère de l'Enseignement Supérieur
Université de Sfax
ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE SFAX

THESE

Pour obtenir le

DIPLOME de DOCTEUR

Spécialité : Mécanique

Préparer aux laboratoires

LASEM (Laboratoire des Systèmes ElectroMécaniques) [ENIS –US- Tunisie]
&
GILCO (Gestion Industrielle, Logistique et COncption) [ENSGI–INPG –France]
Dans le cadre d'une cotutelle de thèse

Présenté et soutenu publiquement par
Le ---Mars 2007

Maher AIDI

Assistant universitaire

Titre :

**VERS LA PLANIFICATION DES BUTS DE SIMULATION EN
CONCEPTION DANS UNE DEMARCHE D'INGENIERIE
SYSTEME**

Jury :

Rapporteurs : **Abdelmajid BENAMARA**
MICHEL CARRARD

Maître de Conférence, ENIM
CPIIP IUT CACHAN

Examineurs :

Aref . MAALEJ
Habib BENBACHA
Michel. TOLLENEARE
Franck. POURROY

Professeur, ENIS, SFAX
Maître de Conférence, ENIS, SFAX
Professeur, INPG, Grenoble
Maître de Conférence, Université J. Fourier, Grenoble

Remerciements

Je voudrais par cette page remercier l'ensemble des personnes qui ont, d'une manière ou d'une autre, contribué à ces travaux de thèse.

Je remercie vivement les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer ce travail et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail. Je les remercie également, pour le temps qu'ils ont consacré et les critiques constructives qu'ils ont su me faire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur Michel Tolleneare, mon directeur de thèse pour tous les enseignements que je tire de notre "travail d'équipe" d'un point de vue scientifique tout autant qu'humain et qui m'a apporté l'opportunité de réaliser cette thèse au sein du laboratoire GILCO de l'INPG, du côté français. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Franck Pourroy, co-directeur, pour toute sa confiance et ses nombreux encouragements tout au long de ces années et son

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à Monsieur Aref Maalej mon directeur de thèse et Monsieur Habib Ben bacha co-directeur qui m'ont soutenu et l'intérêt qu'ils ont montré à diriger ce travail au sein du laboratoire LASEM de l'ENIS du côté tunisien.

Merci également à monsieur Yanick frein, directeur du laboratoire GILCO, à Madame Jeanne duvalet et à monsieur Bernard Penz, qui ont pu entretenir cette ambiance de travail très chaleureuse au sein de l'équipe où chacun contribuant à cette bonne humeur et cela quel que soit son statut. Je remercie vivement madame Chantal Punch & Marinette carthède sans oublier Monsieur Christophe Billot pour leur aide et grand soutien tout au long de ma présence au laboratoire.

Je ne saurais bien sûr oublier tous les membres du laboratoire GILCO pour la richesse des échanges scientifiques et extra-scientifiques que j'ai pu avoir, dans différents bureaux, au café ou à l'occasion manifestations du laboratoire. Merci aussi pour tous les membres de l'équipe CI du laboratoire 3S pour leur accueil à l'occasion de mon passage chez Franck.

Je vais conclure en ayant une pensée pour tous mes parents qui m'ont toujours aidé et encouragé tout au long de ce travail. Merci à mon premier lecteur, mon épouse Habiba pour son attention particulière dans les années d'études et les sacrifices qu'elle a pu endurer ainsi à mes enfants Amin et Nourhène. Je leur dédie à tout ce travail.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	4
Introduction	5
Contexte des travaux.....	6
Le besoin industriel : Intégration de la simulation numérique	7
La valorisation par la recherche	9
Retombées pour les PME (françaises que tunisiennes)	13
Cadre du sujet de recherche	14
Approche de la problématique.....	15
La méthodologie de recherche en conception :	15
Cadre méthodologique	17
Une démarche adaptée à une situation industrielle.....	18
Construction de la méthodologie de recherche	20
PARTIE I Etat de l'art.....	22
Chapitre 1	
Les processus industriels et la conception intégrée de produits.....	24
1. l'excellence dans la conception	25
1.1 L'organisation de la conception.....	28
1.1.1 L'organisation du projet de conception	28
1-12 L'organisation de l'entreprise.....	29
2. Le processus de conception de produits techniques	30
2.1 Notions de produits et de marché.....	31
2.2 Evolution des outils de l'ingénierie.....	31
2.3 L'ingénierie simultanée.....	33
2.4 Vers un processus de conception intégrée.....	34
2.5 Evolution des méthodes de l'Ingénierie Système.	36
3. L'approche socio-technique des processus de conception	37
Chapitre 2	
L'intégration de la simulation numérique dans la conception.....	40
1. Rôle de la simulation dans le processus de conception.....	41
1.1 Bref historique de la simulation en mécanique	43
1.1.1 Période BC	43
1.1.2 Période AC : le démarrage de la simulation numérique.	44
1.2 La maîtrise des délais de mise en œuvre	45
1.3 Les acteurs et leurs limites	46
1.4 Maîtrise de la représentativité des modèles	47
1.5 Impact de la simulation sur les organisations.	48
2. L'intégration de la simulation numérique dans la conception	49
2.1 Etat de l'art du déploiement d'outils d'aide à la simulation en conception.....	50
2.2 Les différents objectifs de l'intégration de la simulation numérique dans la conception	59
2.3 Le développement d'environnements spécifiques.....	62
2.4 L'intégration du calcul dans la conception par la méthode SG3C	67
Chapitre 3	

Les apports d'une approche de type I.S.....	72
1. Contexte d'évolution des méthodes et outils de l'ingénierie	73
1.1 Définition de l'Ingénierie Système	73
1.2 Le système et sa définition	74
1.3 La démarche de conception en Ingénierie Système	76
1.4 La mise en œuvre de l'Ingénierie Système	78
1.5 Les enjeux de l'Ingénierie Système.....	79
1.6 Les processus de l'Ingénierie Système	81
1.7 L'évaluation en IS	81
1.7.1 Evaluation de la qualité technique : Vérification et validation	82
1.7.2 Evaluation des solutions alternatives en IS Analyse système.....	83
1.8 La modélisation systémique en I.S	84
1.9 Normes d'Ingénierie Système.....	86
1.9.1 Norme : IEEE 1220 "Standard for application and Management of the Systems Engineering Process"	87
1.9.2 Norme: EIA 632 " <i>Processes for Engineering a System</i> "	87
1.9.3 Norme: ISO 15288 " <i>Systems Engineering – System Life-Cycle Processes</i> "	88
2. STEP / AP 233.....	91
3.1 Historique du projet	91
3.2 Définition de l'ISO 10303.....	92
BILAN DE LA PARTIE I.....	93
Quels enjeux ?.....	93
Problématique.....	96
PARTIE II : LA PLANIFICATION DES BUTS DE SIMULATION EN CONCEPTION.....	100
Chapitre 4	
Une méthodologie supportée par l'expression et la gestion des exigences du cycle de vie produit.....	102
1. Structuration de l'expression du besoin	103
1.1 Le processus de conception.....	103
1.2 Le management de projet.....	108
1.3 La mise en œuvre des outils d'aide au concepteur	110
1.3.1 Les concepts de l'Analyse Fonctionnelle.....	111
1.3.2 Mise en usage des outils de la méthode AF	114
1.3.3 Les concepts du QFD	115
1.3.4 Les concepts de l'AMDEC.....	118
1.3.5 Intéropérativité de ces trois méthodes	119
2. La gestion des exigences du cycle de vie produit	122
2.1 Analyse des exigences du cycle de vie produit.....	124
2.1.1 Vers une définition consensuelle des exigences.....	125
2.1.2 Catégories et caractéristiques des exigences.....	126
2.2 La formulation des Exigences Fonctionnelles Quantifiées.....	131
2.2.1 La contribution potentielle des méthodes de conception à l'identification et la capture des exigences globales.	132
2.2.2 Les exigences testables.....	140
2.2.2 Mécanisme d'identification et de caractérisation des EFO.....	141
Chapitre 5	

Mécanisme de formulation des buts de simulation.....	146
1. Gestion des EFQ et expression des buts de simulation	147
1.1 Gestion des caractéristiques exigences	148
1.2 Attributs des exigences.....	149
1.2.2 Le lien avec les EFQ	155
1.2.3 Améliorer le dialogue externe	159
1.3 Formulation du but de simulation	160
1.4 Pilotage du processus de vérification et de validation.....	165
2. Une structure pour l'amélioration de la coopération	167
2.1 Une structure de formalisation des traces de l'activité de calcul par le but de simulation.....	168
2.2 Application de la méthodologie sur une étude de cas :.....	169
3. Conceptualisation du démonstrateur :	176
3.1 Objectifs du support informationnel.....	176
3.2 Structure du support informationnel.....	177
3.3 Description du support informationnel.....	178
3.3 Accès à l'information et navigation.....	185
3.4 Le lien avec les outils d'aide au concepteur	185
4. Transfert du métier calcul du spécialiste vers le concepteur	187
Bilan	190
1. Contribution à la formalisation du calcul mécanique	190
1.1 Le besoin pour une formalisation.....	191
1.2 Formalisation des démarches	192
1.3 Formalisation des connaissances.....	192
2. La méthodologie proposée: comme support de formation.....	193
3. Les connaissances d'interface et de coopération.....	193
Conclusion générale	196
Perspectives de recherches	198
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	199
[Alexander 03] , Alexander, Ian, <i>Requirements and Testing: Two Sides of the Same Coin</i> , IEEE Joint International, 2003.....	199
[Alexander,a 102] , Alexander, Ian and Richard Stevens, <i>Writing Better Requirements</i> , Addison-Wesley, 2002	199
ANNEXE 1	206
ANNEXE 2	209
ANNEXE 3	211
ANNEXE 4	224
Etude Analyse Fonctionnelle Interne « TDC Structure ».....	224
Analyse Fonctionnelle	224
Détail des Phases	224
Solution.....	225
Liste des solutions	225
Détail des solutions.....	225

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : La prévention est moins coûteuse que la correction [Corbel 97]	8
Figure 2 : Différence démarches de positionnement du chercheur	18
Figure 3 : L'organisation du projet de conception	29
Figure 4 : Des outils positionnés suivant la structuration des données du produit et la formalisation de l'action	32
Figure 5 : Positionnement de l'approche simultanée	33
Figure 6 : contexte d'évolution des méthodes et outils de l'ingénierie.....	36
Figure 7 : Le processus de conception vu comme une activité sociale entre des	38
acteurs de différents métiers.....	38
Figure 7 : Le processus de simulation et ses erreurs par Szabo [SZA96].....	56
Table 1 : Résumé des principaux travaux en fonction des objectifs et des critères d'analyse.....	61
Figure 8 : Un environnement de simulation pour supporter la conception de produit [Klaas & Shephard 01].....	65
Figure 9: Les étapes successives de la méthode KDD d'identification des connaissances [Shi & al. 02]	67
Figure 10: L'événementiel, un outil de description chronologique.....	69
Figure 11 : Démarche de l'ingénierie système.....	73
Figure 12 : Décomposition d'un système vu de L'IS.....	75
Figure 13 : Exemple de cycle de vie d'un système	76
Figure 14 : Schématisation de la démarche technique d'ingénierie	77
Figure 15 : Les activités des processus de développement	78
Figure 16 : Les composantes de la mise en œuvre « intégrée » du développement d'un système	79
Figure 17 : Avec l'IS le coût global du cycle de vie est anticipé très en amont source : Defense System Management College 9-1993).....	80
Figure 18 : Concepts de vérification et validation [Grady 97].	82
Figure 19 : Cycle en V de l'Ingénierie Système	84
Figure 20 : Typologie des modèles en IS.....	85
Figure 21 : Couverture respective des trois normes par rapport aux activités techniques sur le cycle de vie du système	86
Figure 22 : Les processus selon IEEE 1220.....	87
Figure 23 : Les processus de l'EIA 632	88
Figure 24 : Les processus de l'ISO 15288 selon [INCOSE 06]	89
Figure 25 : les concepts des standards	90
Figure 26 : Phases et étapes du processus de conception.....	103
Figure 27 Représentation synthétique de l'Analyse Fonctionnelle	113
Figure 28 : Modèle d'organisation des activités de conception proposé par la méthode AF	114
Figure 29 : Construction de la maison de la qualité. Méthode QFD.	116
Figure 30 – Déploiement de la fonction qualité à tous les services de l'entreprise....	117
Source : TI [E. LE COZ] AG 1 771.....	117
Figure 31 Méthode et outils de la sûreté de fonctionnement.....	118

Figure 32 : Intégration de l'AF, le QFD et l'AMDEC dans une démarche qualité (Djea 98).....	120
Figure 33 : Relation d'association entre les méthodes de conception,[Martin 98]	121
Tableau 2. Caractéristiques essentielles des exigences (Pradip K et a.l, 96)	130
Figure 34 : Démarche d'identification des exigences.....	133
Figure 35 : Identification des exigences globales	135
Figure 36. Schématisation d'une méthode de conception intégrant les outils	137
d'aides au concepteurs et l'ingénierie systèmes d'après [Laval 00]	137
Figure 37 : Fiche d'identification des exigences globales [AIDI 03],	138
Figure 38, L'intégration du QFD et d'autres outils [Mark & al 98]	139
Figure 39 : Structuration des outils méthodologiques [Cattan 04]	139
Figure 40 : Procédure d'identification des EFQ	142
Figure 41 : Caractérisation d'une exigence par les critères dans l'AF	142
Figure 42 : Caractérisation d'une exigence par les critères dans l'AF	143
Copie d'écran sur l'outil TDC Need	143
Figure 43 : Caractérisation d'une exigence par les critères dans l'AMDEC	143
Figure 44 : Critères d'une exigence dans l'AMDEC	143
Figure 45 : Itération des choix sur la caractérisation des exigences	149
Figure 46 : Critère de flexibilité sur une copie d'écran sur l'outil TDC Need (AF) ...	151
Figure 47 : Détermination de l'indice de satisfaction client dans le QFD	152
pour le produit « CAR DOOR »	152
Figure 48 : Les symboles standard utilisés par le QFD	152
Figure 49: la maison de la qualité pour le produit « Vidéo projecteur ».....	153
Figure 50 : Création des exigences utilisateurs par un web outil [Lang & al 01]	154
Figure 51 : Identification des conflits et des dépendances.....	156
Figure 52 : a) Le diagramme projet initial, b) Le diagramme projet modifié	157
Figure 53 : Paramétrage de la matrice « conflit et dépendance ».....	157
Figure 54 : Mise en œuvre de la corrélation des exigences	158
Figure 55 : Résultat de la corrélation affiché dans la maison de la qualité	158
Figure 56 : Déploiement du dialogue externe par l'attribut des exigences	160
Figure 57 Calcul d'aide au choix ou d'estimation.....	161
Figure 58 : Calcul de validation.....	162
Figure 59 : Calcul de vérification.....	163
Figure 60 : Illustration sur l'exemple du châssis le But de Simulation	164
Figure 61. Structuration du calcul en conception [Troussier et al, 98]	165
Figure 62. Processus de vérification et de validation	166
Figure 63. Système frein à disque hydraulique Hayes	169
Figure 64 : Propositions des solutions pour la conception du support d'étrier	170
Figure 65. Différents modèles du support frein étudié	173
Figure 66 : La coopération, un dispositif et deux objectifs.....	194
Figure 1 : La prévention est moins coûteuse que la correction [Corbel 97]	8
Figure 2 : Différence démarches de positionnement du chercheur	18
Figure 3 : L'organisation du projet de conception	29
Figure 4 : Des outils positionnés suivant la structuration des données du produit et la formalisation de l'action	32
Figure 5 : Positionnement de l'approche simultanée	33

Figure 6 : contexte d'évolution des méthodes et outils de l'ingénierie.....	36
Figure 7 : Le processus de conception vu comme une activité sociale entre des38	38
acteurs de différents métiers.....	38
Figure 7 : Le processus de simulation et ses erreurs par Szabo [SZA96].....	56
Table 1 : Résumé des principaux travaux en fonction des objectifs et des critères	
d'analyse.....	61
Figure 8 : Un environnement de simulation pour supporter la conception de produit	
[Klaas & Shephard 01].....	65
Figure 9: Les étapes successives de la méthode KDD d'identification des	
connaissances [Shi & al. 02]	67
Figure 10: L'événementiel, un outil de description chronologique.....	69
Figure 11 : Démarche de l'ingénierie système.....	73
Figure 12 : Décomposition d'un système vu de L'IS.....	75
Figure 13 : Exemple de cycle de vie d'un système	76
Figure 14 : Schématisation de la démarche technique d'ingénierie	77
Figure 15 : Les activités des processus de développement	78
Figure 16 : Les composantes de la mise en œuvre « intégrée » du développement	
d'un système	79
Figure 17 : Avec l'IS le coût global du cycle de vie est anticipé très en amont source :	
Defense System Management College 9-1993).....	80
Figure 18 : Concepts de vérification et validation [Grady 97].	82
Figure 19 : Cycle en V de l'Ingénierie Système	84
Figure 20 : Typologie des modèles en IS.....	85
Figure 21 : Couverture respective des trois normes par rapport aux activités	
techniques sur le cycle de vie du système	86
Figure 22 : Les processus selon IEEE 1220.....	87
Figure 23 : Les processus de l'EIA 632	88
Figure 24 : Les processus de l'ISO 15288 selon [INCOSE 06]	89
Figure 25 : les concepts des standards	90
Figure 26 : Phases et étapes du processus de conception.....	103
Figure 27 Représentation synthétique de l'Analyse Fonctionnelle	113
Figure 28 : Modèle d'organisation des activités de conception proposé par la méthode	
AF.....	114
Figure 29 : Construction de la maison de la qualité. Méthode QFD.	116
Figure 30 – Déploiement de la fonction qualité à tous les services de l'entreprise....	117
Source : TI [E. LE COZ] AG 1 771.....	117
Figure 31 Méthode et outils de la sûreté de fonctionnement.....	118
Figure 32 : Intégration de l'AF, le QFD et l'AMDEC dans une démarche qualité (Djea	
98).....	120
Figure 33 : Relation d'association entre les méthodes de conception,[Martin 98]	121
Tableau 2. Caractéristiques essentielles des exigences (Pradip K et a.l, 96)	130
Figure 34 : Démarche d'identification des exigences.....	133
Figure 35 : Identification des exigences globales	135
Figure 36. Schématisation d'une méthode de conception intégrant les outils	137
d'aides au concepteurs et l'ingénierie systèmes d'après [Laval 00]	137
Figure 37 : Fiche d'identification des exigences globales [AIDI 03],	138

Figure 38, L'intégration du QFD et d'autres outils [Mark & al 98]139

Figure 39 : Structuration des outils méthodologiques [Cattan 04]139

Figure 40 : Procédure d'identification des EFQ142

Figure 41 : Caractérisation d'une exigence par les critères dans l'AF142

Figure 42 : Caractérisation d'une exigence par les critères dans l'AF143

Copie d'écran sur l'outil TDC Need143

Figure 43 : Caractérisation d'une exigence par les critères dans l'AMDEC143

Copie d'écran sur l'outil TDC FMEA.....143

Fct ?	Mode de défaillance	Effets	S	Classe	Causes de défaillance	Contrôle 0 Conception Prévention	Contrôle Conception Détection	D	IPF	Actions recommandées	Responsable
1	Fonctionnement irrégulier	CLIENT ASSEZ MECONTENT	8	YS	mode d'assemblage	6 Essai prototype	Détection lors de tests laboratoire	9	432	Expérience sur des produits comparables	
2	Cassure	GRAND MECONTENTEMENT	3	YS	Matière fragile	4 simulation numérique	Détection lors de tests de simulation	3	108	Calculs résistance des matériaux	

.....143

Figure 44 : Critères d'une exigence dans l'AMDEC143

Figure 45 : Itération des choix sur la caractérisation des exigences149

Figure 46 : Critère de flexibilité sur une copie d'écran sur l'outil TDC Need (AF) ...151

Figure 47 : Détermination de l'indice de satisfaction client dans le QFD.....152

pour le produit « CAR DOOR »152

Figure 48 : Les symboles standard utilisés par le QFD152

Figure 49: la maison de la qualité pour le produit « Vidéo projecteur ».....153

Figure 50 : Création des exigences utilisateurs par un web outil [Lang & al 01]154

Figure 51 : Identification des conflits et des dépendances.....156

Figure 52 : a) Le diagramme projet initial, b) Le diagramme projet modifié157

Figure 53 : Paramétrage de la matrice « conflit et dépendance ».....157

Figure 54 : Mise en œuvre de la corrélation des exigences158

Figure 55 : Résultat de la corrélation affiché dans la maison de la qualité158

Figure 56 : Déploiement du dialogue externe par l'attribut des exigences160

Figure 57 Calcul d'aide au choix ou d'estimation.....161

Figure 58 : Calcul de validation.....162

Figure 59 : Calcul de vérification.....163

Figure 60 : Illustration sur l'exemple du châssis le But de Simulation164

Figure 61. Structuration du calcul en conception [Troussier et al, 98]165

Figure 62. Processus de vérification et de validation166

Figure 63. Système frein à disque hydraulique Hayes169

Figure 64 : Propositions des solutions pour la conception du support d'étrier170

Figure 65. Différents modèles du support frein étudié173

Figure 66 : La coopération, un dispositif et deux objectifs.....194

Introduction générale

Introduction

Contexte des travaux

- Les enjeux industriels

- La valorisation par la recherche

- Retombées pour les PME (françaises et tunisiennes)

- Cadre du sujet de recherche

Approche de la problématique

- La méthodologie de recherche en conception :

- Cadre méthodologique

- Construction de la méthodologie de recherche

- Une démarche adaptée à une situation industrielle

Introduction

La simulation numérique est une technique en pleine croissance dans un environnement industriel où la réduction du coût et des délais de développement ainsi que la maîtrise de la qualité des produits et de leurs processus de conception et de fabrication constituent trois enjeux de compétitivité.

Cependant, la croissance de l'utilisation de la simulation de produits « virtuels » (qui n'existent pas physiquement) engendre la manipulation d'une multitude de modèles du produit tout au long du processus de conception. Quatre facteurs contribuent à la diversité et au nombre croissant de ces modèles.

Le premier facteur est relatif à la diversité des outils utilisés, qu'ils soient analytiques ou numériques (modeleurs géométriques, formulaires de calcul, tolérancement, logiciels de simulation du comportement...) et à l'évolution constante des versions de logiciels.

La diversité des modèles physiques du produit influe également sur le nombre de modèles générés au cours de la conception et sur leur diversité. Le comportement du produit est généralement relatif à différents domaines physiques. Une même partie de produit peut, par exemple, être considérée comme une structure dont le comportement est mécanique, thermique, magnétique... Ces comportements, lorsqu'ils sont découplés font appel à des modèles indépendants. Par contre, lorsqu'ils sont couplés, ils mettent en oeuvre des modèles spécifiques.

La diversité des situations d'usage du produit relative aux interactions du produit étudié avec son environnement engendre des modèles du produit différents. Le produit peut être considéré, du point de vue de l'analyse, de façon isolée ou comme un composant d'un système plus complexe. Dans le cadre de la mécanique par exemple, il peut être envisagé comme composant d'un mécanisme complet, étudié dans son ensemble, ou comme une structure isolée, étudiée comme un système mécanique complet.

Améliorer le dialogue externe entre les clients, l'entreprise, les circuits de distribution, les services après-vente, et le dialogue interne entre les différents services qui participent à la création du produit par l'utilisation de la simulation numérique est l'idée maîtresse de notre travail. Cela nécessite d'une part de savoir transcrire l'information pour la rendre accessible à tous, et d'autre part de savoir gérer le flot important d'informations ou appeler aussi connaissances de conception qui en résulte. Les informations relatives à toutes les phases du cycle de vie dépassent largement la seule représentation géométrique et les paramètres du processus de fabrication. On parle ainsi d'une gestion des connaissances du cycle de développement produit.

De plus la complexité croissante des systèmes ou produits impliquant leur approche selon de multiples points de vue, a conduit à des travaux sur le métier d'ingénierie système qui ont connu ces dernières années un essor important. L'ingénierie système propose donc une démarche qui permet de mieux maîtriser la complexité des problèmes à résoudre et des solutions à mettre en œuvre. Utilisée aussi pour le rétro ingénierie, cette démarche offre un cadre éprouvé pour le remplacement ou la mise à niveau de systèmes obsolètes ou mal documentés. En nous reposant sur le concept de l'ingénierie système et sur les travaux concernant les standards par exemple le projet KARE (*Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering*) nous étudions le couplage entre les outils d'ingénierie des exigences et des bases de connaissances permettant ainsi de faciliter le recueil et l'analyse des besoins clients et permettant ainsi de constituer des offres et des solutions en accord avec une ligne de produits.

D'autre part, les aspects de validation et de vérification ne doivent pas être écartés des activités couvertes par l'ingénierie des systèmes. Pour ce faire, les concepteurs font appel à des moteurs de simulation permettant d'animer des maquettes numériques préfigurant ce que sera le système final. Ici aussi, le besoin en échange de données apparaît clairement puisqu'il est intéressant de passer les données automatiquement entre les outils de conception et les moteurs de simulation. Notre étude de cas présente clairement cette alternative. On évite ainsi les problèmes d'interprétation des données de conception. De plus, le fait de disposer de ce type de fonctionnalité permet de raccourcir les temps de validation. En effet, il devient inutile de prévoir des projets de développements de maquettes numériques.

Les travaux de thèse présentés se positionnent donc autour de cette problématique générale de validation des exigences des produits en rapport avec le besoin client par l'identification et la formulation du but de simulation dans la phase de conception d'un produit technique.

Nous précisons au lecteur que tout au long du manuscrit les termes "simulation numérique" et "calcul" sont utilisés sans aucune distinction, puisque seulement appliqués au seul domaine du génie mécanique.

Mais avant de rentrer plus en détail dans la présentation de nos réflexions et travaux, il apparaît comme essentiel de préciser le contexte dans lequel s'inscrivent ce projet de recherche, ainsi que la démarche effectivement entreprise pour répondre aux attentes des individus à l'initiative de ce projet.

Contexte des travaux

Dans cette section, on se propose de mettre en évidence les enjeux industriels de ce travail de recherche en vue de situer notre problématique permettant ainsi de positionner notre orientation de recherche par rapport au besoin réel de l'environnement industriel aussi bien français que tunisien. Ceci explique le cadre de déroulement de cette thèse.

Nous commençons dans une première étape par décrire en général les enjeux industriels de ce travail où nous présentons les enjeux qui concernent notre thématique de recherche dans l'ensemble des thématiques des projets des laboratoires : GILCO, 3S et LASEM et nous achevons cette présentation par une analyse du cadre du projet de recherche. Dans la seconde étape nous détaillons notre approche de la problématique ainsi que la méthodologie de recherche utilisée.

Le besoin industriel : Intégration de la simulation numérique

La simulation numérique en Bureau d'Etude (BE) est aujourd'hui largement répandue chez PSA Peugeot Citroën, Schneider Electric, Renault, Ford, Fiat, comme chez d'autres industriels, tant au niveau des concepteurs que des spécialistes. Les outils sont légions et apportent tous des réponses de qualité tant sur le comportement (mécanique, thermique, magnétique etc.) des produits en cours de conception que sur leurs processus industriels de fabrication (usinage, rhéologie, assemblage, etc.). L'ergonomie de ces différents outils de simulations, même si elle est variable, permet, en tout état de cause, aux acteurs du BE de produire des informations et des connaissances enrichissant le modèle produit.

Dans un groupe industriel international comme Schneider Electric avec 60 000 personnes, 3 000 concepteurs dans 40 BE en Europe, USA et Asie la simulation est largement répandue. Concepteurs et Spécialistes réalisent des simulations numériques dans des domaines aussi variés que le calcul de structures (linéaires, non linéaires, statique et dynamique), les mécanismes, la thermique fluide, l'électrostatique, le magnétique et les phénomènes couplés. En outre, de nombreux essais sont encore réalisés en parallèle des simulations, même si celles-ci en réduisent le nombre par un meilleur ciblage des campagnes de tests. Ces acteurs travaillent évidemment chacun avec leurs niveaux de compétences propres et produisent un grand nombre d'informations et de connaissances avec une large variété d'outil: Pro/E pour la CAO et pour la simulation Pro/Mechanica, Ansys, SDS, IcePAK, Flux 2D et 3D, Moldflow, MPA, OI3C pour ne citer que les principaux.

Avec son projet « Ingenu » de développement numérique des véhicules, PSA n'est pas loin de partager les mêmes préoccupations; il souhaite en effet pouvoir réagir extrêmement rapidement à toute évolution imprévisible de la demande. Une option non spécifiée au cahier des charges doit ainsi pouvoir être ajoutée en cours de programme dans un délai serré. Le constructeur français s'était il est vrai fait remarquer auparavant pour son « time to market » étonnant en matière de séries spéciales.

Mais ces objectifs de réactivité doivent se combiner avec ceux de la contraction sensible des coûts et du nombre de prototypes, ainsi qu'avec une hausse importante des contraintes réglementaires, des performances et de la fiabilité.

Le futur moteur « *Powerstroke 4,6L turbo diesel common rail* » destiné aux « *trucks* » a par exemple été conçu pour garantir une durabilité de 250.000 miles.

D'après Y.Baizet dans [Baizet 04], le département de la DIEC¹ du constructeur automobile Renault, dont l'activité principale s'articule autour de la conception et la validation de l'ensemble des produits et prestations liés aux équipements de carrosserie d'un véhicule, doit s'assurer du bon comportement de ces éléments dans un contexte de fonctionnement nominal prédéfini dans le cahier des charges du véhicule. L'activité de chacun de ces services s'articule donc autour de la conception et de la validation d'une partie spécifique du périmètre technique de la DIEC. Les activités de validation sont implantées au sein des services de conception afin d'être directement intégrées dans les processus de développement de produits, synonyme de coopération efficace entre ces deux activités. Ces validations sont réalisées à partir de simulations physiques (les essais) et numériques (les calculs). Pour ce qui concerne les validations par essais, le périmètre technique restreint de chaque service les limite à des simulations partielles, réalisées sur des pièces seules ou des sous-systèmes réduits, plus ou moins représentatives de la réalité de fonctionnement.

Dans le même sens, Corbel dans [Corbel 97], illustre en figure 1 les résultats de l'étude systématique des dysfonctionnements rencontrés dans un projet de développement véhicule chez RENAULT S.A. et l'importance des enjeux économiques engagés tout au long de l'avancement du projet. Il explique ainsi que *"la cause principale des erreurs est le manque de savoir-faire des acteurs spécificateurs, bien que l'entreprise dans sa globalité maîtrise ces savoir-faire. En effet, suite à chaque problème avéré, il suffit de quelques semaines pour résoudre les difficultés grâce à des réunions d'experts. [...] La mise en oeuvre d'une expertise a un coût variable en fonction de la phase du projet. Pour un coût préventif unitaire en amont, il faudra multiplier ce coût par 10 s'il faut refaire des dessins, par 100 s'il faut modifier les outillages, par 300 si les problèmes à résoudre nécessitent de retarder le projet d'un mois. Les actions curatives coûtent 30 fois plus que les actions préventives"*

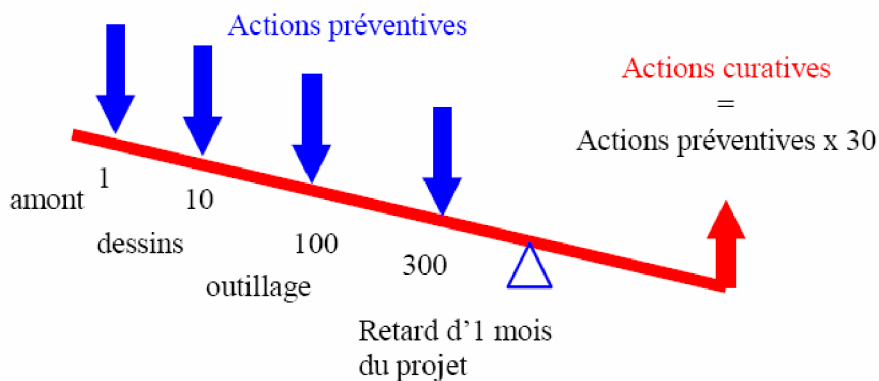


Figure 1 : La prévention est moins coûteuse que la correction [Corbel 97]

¹ DIEC pour Direction de l'Ingénierie des Equipements de Carrosserie.

C'est dans ce cadre d'amélioration des processus de développement des véhicules qu'est né le besoin d'intégrer le métier de la simulation numérique au sein des phases de conception. Ainsi, Mer précise bien dans [Mer 98] cette problématique d'intégration des métiers au sein d'un même projet, à travers la notion de "monde", défini comme un ensemble cohérent et structuré composé d'outils, d'objets et d'acteurs qui développent des mêmes logiques d'actions, relèvent des mêmes échelles de grandeur et partagent des connaissances collectives. Cet état de fait rend la coopération entre acteurs de mondes différents complexe et souvent peu efficace pour les projets.

L'évolution constante et croissante de l'activité de simulation numérique dans les bureaux d'études et son intégration récente dans les processus de développement de produits a entraîné l'émergence de difficultés en terme d'organisation, de suivi et de traçabilité des activités de simulation, réalisation de calculs identiques, répétition d'erreurs..., difficultés qu'il est possible de regrouper sous une problématique générale de gestion et de management des activités de simulation numérique et des connaissances relatives à ces activités.

Il faut également ajouter les phénomènes de mobilité importante des acteurs de la simulation numérique au sein des organisations industrielles, la tendance croissante des entreprises à externaliser leurs activités de simulation numérique, à travers une délocalisation partielle de certains services, une utilisation de prestataires de services ou une mise en sous-traitance de tout ou une partie des activités.

Les entreprises ont ainsi pris conscience ces dernières années de la problématique majeure posée par l'intégration de la simulation numérique dans les processus de conception, et l'intérêt essentiel apporté par la gestion et le management de leur capital de connaissances. Il apparaît alors prioritaire de mettre en place des solutions pour organiser, réutiliser, valoriser et transmettre les connaissances et savoir-faire du métier de la simulation numérique.

La valorisation par la recherche

Les travaux de recherches autour de la simulation, issus de la collaboration initiale entre Le pôle CI² du laboratoire 3S³, le laboratoire, GILCO⁴ et les sociétés Schneider Electric et PSA Peugeot Citroën, ont conduit à l'émergence d'idées et de concepts à la fois simples et originaux qui sont à la base des thématiques du projet OSCAR « Organisation des Simulations en Conception par la CApitalisation et la Réutilisation » soutenu et financé par la région Rhône-Alpes sur la période 2000-2003, avec pour objectifs d'apporter un certain nombre de réponses très concrètes à ces besoins industriels exprimés à la fois en termes d'organisations d'entreprises, de méthodes de travail et d'outils associés.

La coopération entre les laboratoires 3S, GILCO et LASEM⁵ Tunisie s'articule autour des activités de l'identification, l'analyse et la prise en compte des contraintes des différents métiers dans la conception et le développement des systèmes mécaniques, ainsi qu'autour du développement de modèles, méthodes et outils pour la conception intégrée dans un contexte d'ingénierie simultanée. Ces thématiques générales ont conduit le laboratoire GILCO à mener un programme de recherche destiné d'une part à valoriser et diffuser ces travaux vers le monde académique et celui des entreprises, d'autre part à surmonter un certain nombre de verrous sur des sujets centrés autour des méthodes et outils de gestion des connaissances mis en oeuvre dans les processus de conception, et plus particulièrement sur l'organisation et l'utilisation des connaissances autour du métier de la simulation numérique.

Nous citons, ici les axes de ce programme, dans le but de situer la position de notre thématique de recherche qui est centrée sur l'organisation et l'utilisation des connaissances autour du métier de la simulation numérique.

1 : L'usage des simulations numériques et maîtrise des concepts, analyse des acteurs, formation, accompagnement, sensibilisation des responsables industriels

Dans un contexte industriel de réduction des coûts et de délais qui va de pair avec une maîtrise de la qualité, le processus de développement industriel a beaucoup évolué ces trente dernières années vers la conduite de projet, le travail collaboratif, etc.

De nouveaux types d'outils informatiques sont donc nécessaires pour :

- § modéliser et simuler le comportement des produits développés dès le début de la conception,
- § supporter des méthodologies de développement collaboratif de façon à permettre à l'ensemble des acteurs, de compétences diverses, d'accéder aux informations nécessaires à leur activité et de suivre l'évolution du projet,
- § tracer et capitaliser les connaissances relatives au produit en développement
- § et à son processus de développement, qui pourront être réutilisées.

En d'autres termes, ces outils informatiques ont pour vocation d'aider à la prise de décision et constituent en ce sens des outils d'Ingénierie Assistée par Ordinateur.

2 CI pour Conception Intégrée.

3 Laboratoire 3S pour laboratoire Sols, Solides, Structures, de Grenoble.

4 GILCO pour Gestion Industriel Logistique & Conception

5 LASEM pour Laboratoire des Systèmes Electro-Mécanique

2 : La formulation des buts de simulation en cohérence avec les analyses fonctionnelles et le cycle de vie produit.

Les processus de conception de produits techniques s'appuient sur l'analyse fonctionnelle dont la pratique est maintenant systématique dans les bureaux d'études. Malheureusement, il existe une rupture entre la phase d'analyse fonctionnelle et la conception détaillée. En effet, les outils CAO sont eux très orientés vers les définitions structurelles des produits. La thèse de Damien Constant [CON 96] a jeté les bases de ce que devrait être une CAO orientée métier et s'intégrant à l'analyse fonctionnelle. La modélisation explicite des cycles de vie, des situations de vie et des fonctions associées est une étape incontournable de cette intégration.

3 : La formalisation des modèles mécaniques en cohérence avec les buts recherchés

Le besoin d'intégration du calcul mécanique dans la conception s'est fait ressentir très tôt, mais les chercheurs et les développeurs ont rapidement buté sur un certain nombre d'écueils. L'un de ces écueils est dû à la nature avant tout cognitive de l'activité de modélisation du système à étudier, étape fondamentale du processus de simulation. Dès que les techniques de calcul sont utilisées par des non spécialistes, le contrôle et le cadrage du processus de création du modèle mécanique apparaissent donc comme une nécessité. Ceci semble d'autant plus évident à l'heure où les logiciels d'IAO "intégrés" tendent à automatiser le passage du modèle géométrique de conception au modèle géométrique pour le calcul, conduisant souvent à l'inefficacité de l'approche calcul, mais aussi parfois à des résultats erronés et potentiellement dangereux. Il est important de noter que ce contrôle et ce cadrage des tâches de modélisation concernent également les spécialistes du métier (les ingénieurs calcul) à partir du moment où l'on va chercher à adresser des problématiques de traçabilité, de capitalisation et de réutilisation. Il faut souligner également le lien très fort qui existe entre l'étape de génération du modèle de calcul et l'expression des buts de simulation, que ce soit du point de vue fonctionnel ou du point de vue du cycle de vie du produit.

4 : Raisonnement à base de cas sur les modèles industriels utilisés

L'usage du médium informatique comme support de coopération dans les activités de l'entreprise s'impose logiquement compte tenu du nombre croissant d'activités exploitant ses capacités de calcul, de communication ou de mémorisation. Dans le domaine de la conception coopérative d'artefacts complexes exigeant l'intervention de plusieurs équipes se rattachant à plusieurs métiers, l'informatique devient le vecteur même de la coopération grâce au potentiel offert d'explicitation, de partage et de capitalisation à fin de réutilisation des connaissances mobilisées.

L'organisation sociale du processus de conception prend maintenant en compte cette dimension en cherchant à « mettre en relation » les différents maillons de la chaîne de personnes utilisant des outils informatiques spécialisés, fournissant des modèles de coopération qui spécifient eux-mêmes des formes d'organisation des hommes et du système d'information.

Les outils utilisés par les différentes composantes sont relativement indépendants techniquement les uns des autres, mais les tâches qu'ils participent à réaliser sont en relation selon des modèles plus ou moins explicites.

5 : L'intégration des simulations numériques dans les processus de gestion des informations techniques

Dans le contexte actuel de diversification et de complexité de l'offre produit allant de pair avec l'extension du périmètre de l'entreprise et la multitude d'acteurs intervenant sur le produit de sites différents, une gestion cohérente de l'ensemble du système d'information du produit s'impose. Deux principaux systèmes d'information de l'entreprise concourent à la gestion des produits :

- § Les systèmes d'information techniques ou encore Systèmes d'Information Produit (SIP) gérant l'ensemble des données techniques. Il faut entendre par données techniques les données de définition du produit et des processus, utilisés lors du développement du produit et de l'exécution de ses modifications. Il s'agit des données spécifiques aux études, à l'ingénierie, à la fabrication, la gestion de projets, la gestion de la qualité, la génération des notices, le soutien logistique. Ces SIP sont conçus pour supporter les processus de création de l'offre (définition de nouveaux produits) et de son évolution. Ils sont supportés par des outils connus sous le nom générique de Systèmes de Gestion de Données Techniques (SGDT) ou encore PDM (Product Data Management)
- § Les Systèmes d'Information de Gestion gérant l'ensemble des données de gestion, c'est-à-dire pratiquement toutes les données qui ne sont pas qualifiées de "techniques" (gestion du personnel, paye, comptabilité et gestion financière, bureautique). Ces SIG sont conçus pour supporter les processus liés au traitement des commandes. Ils sont supportés par des outils connus sous le nom générique d'Entreprise Resource Planning (ERP).

Les SIP interviennent fortement donc dans le processus de conception (et re-conception) des produits lors de la définition de l'offre ou de son évolution. Ils constituent le noyau central dans la gestion des données techniques liés au produit durant ces phases. Le développement d'organisations supports aux simulations en conception ne saurait se passer des SIP.

6 : L'intégration des services "essais" dans les processus de conception / simulation

La simulation numérique regroupe un ensemble de techniques relativement récentes qui permettent d'acquérir de la connaissance sur le comportement des produits et des systèmes. Jusqu'à ces toutes dernières années, ce rôle était entièrement dévolu aux techniques expérimentales qui représentaient le seul moyen raisonnable d'orienter, d'expliquer ou de valider des solutions de conception. La simulation numérique a tout d'abord été introduite dans les entreprises avec l'intention plus ou moins affichée de se substituer aux essais souvent jugés trop coûteux, peu flexibles, et mal adaptés aux situations qui nécessitent des réponses rapides. Avec un peu plus de recul, il est apparu que les techniques de simulation pouvaient présenter elles aussi un certain nombre d'inconvénients, et si leurs objectifs sont très voisins, la mise en œuvre de

calculs ou d'essais est maintenant davantage à voir en termes de complémentarité qu'en termes de concurrence. Les services essais sont donc toujours d'une grande importance pour les PME comme pour les grands groupes industriels, et dans un contexte d'ingénierie concurrente, l'intégration de leur activité dans les processus de conception est un sujet tout à fait d'actualité.

Dans ce cadre, des travaux ont été réalisés avec pour objectifs d'apporter un certain nombre de réponses très concrètes aux besoins industriels exprimés à la fois en termes d'organisations d'entreprises, de méthodes de travail et d'outils associés : les travaux de thèse relatifs à la définition d'un module d'analyse de structures mécaniques pour la conception intégrée [REM95] en sont un exemple concret. Ces dernières années, la collaboration avec une grande entreprise a permis de dégager une méthode et un outil support pour favoriser la gestion des multiples calculs générés lors du développement de nouveaux produits techniques ([Pourroy & al. 02], [Troussier 99], [Troussier & al. 99]). De façon plus large, ces travaux ont amené les premières réflexions sur l'intégration des simulations numériques dans les processus de conception. Un dispositif est ainsi proposé pour améliorer la coopération entre les analystes qui réalisent les simulations et les concepteurs, dans un contexte d'ingénierie simultanée et distribuée. La méthode développée et son outil associé fournissent également un support à la traçabilité et à la réutilisation des modèles et des démarches mises en place lors des simulations numériques. Parmi les concepts proposés, celui de cas d'école pour la modélisation et pour la conception, constitue un des éléments clés de l'identification et de la capitalisation des connaissances.

Retombées pour les PME (françaises que tunisiennes)

Le contexte d'une PME est aujourd'hui très concurrentiel, tout comme le grand groupe industriel dont elle est souvent sous-traitante. D'un autre côté, certaines contraintes des grands groupes industriels sont de même nature avec simplement des ordres de grandeur différents: concurrence, réduction des temps de mise sur le marché, rentabilité économique et financière. Dans ces conditions, le temps et le coût de développement des produits, liés aux impératifs de qualité imposés par le marché deviennent des facteurs critiques pour chaque acteur.

Pour ces raisons, de nombreux grands groupes industriels optent pour une politique de partenariat avec leurs sous-traitants appartenant très souvent au tissu des PME (locale ou internationale). Cette politique devient une brique de la stratégie industrielle de ces acteurs majeurs. En effet, il est de plus en plus commun aujourd'hui de voir des grands acteurs d'un secteur se recentrer exclusivement sur leur corps de métier. La conséquence est la délocalisation d'un savoir-faire qui n'est pas dans le cœur de métier vers les partenaires PME sous-traitantes, ce qui entraîne une nouvelle typologie de contrats entre PME et Grands Groupes. Les échanges de type maître esclave laissent place à l'intelligence répartie d'une ingénierie collaborative autour des fonctions du produit à mettre sur le marché au meilleur du triptyque coûts/qualité/délais.

On voit ainsi apparaître une montée en compétences de la PME à laquelle échoit la responsabilité et la conception de fonctions entières sur le produit. Le partage d'information produits et de connaissances sur les processus associés devient alors un vecteur fondamental pour cette collaboration au sein même de la conception. Ce partenariat amène de nombreux grands groupes industriels à partager leurs connaissances et savoir-faire avec ces PME partenaires ciblées. Ces dernières sont ainsi au centre des stratégies de maquette numérique des grands acteurs industriels. Seules les PME aptes à franchir ce pas en termes de technologies et de ressources humaines font parties des partenaires de ces grands acteurs majeurs de l'industrie mondiale.

La création d'emplois à haute valeur ajoutée dans le tissu des PME est étroitement liée à cette forte croissance technologique autour de l'ingénierie collaborative. Une petite PME située dans n'importe quelle région avec une équipe de quelques ingénieurs familiers avec ces technologies, peut ainsi travailler sur des projets internationaux majeurs et partager des connaissances métiers avec les experts de grands groupes industriels. Notre thématique de recherche traite directement de ces aspects d'ingénierie collaborative par partage de connaissances en simulations dans le processus de conception. La mise en œuvre en contexte industriel ainsi que la méthodologie associée ont montrée leur portée pour le dialogue entre concepteurs et spécialistes au sein d'un BE. Au même titre que ce dialogue facilite le déploiement de la simulation dans le BE, il favorise l'appropriation de ces technologies par les PME. L'emploi sur des métiers associés à forte valeur ajoutée s'en trouve directement impacté. Les PME tunisiennes peuvent directement bénéficier de ces apports et ainsi dynamiser leurs capacités d'échanges avec des partenaires de taille mondiale.

Cadre du sujet de recherche

C'est à partir du contexte industriel relatif au besoin d'intégration de la simulation numérique dans la conception que la nécessité de développer des thématiques conduites par la gestion et le management des connaissances autour des activités de simulation numérique est justifiée. Sur la base des compétences développées dans les laboratoires 3S, GILCO et LASEM sur les processus de conception, qu'est née l'idée d'un travail collaboratif entre ces entités. Suite à une première expérience dans le cadre d'un DEA, sur la même thématique qui présente la contribution des outils d'aide au concepteur à la formulation des exigences fonctionnelles quantifiées « EFQ » dans l'activité de simulation, ce travail a été publié dans l'ICSMC de l'IEEE [Aidi O2].

Une coopération plus étroite a été mise en place au travers d'une convention de cotutelle de thèse entre les deux universités dont les présents travaux en sont l'aboutissement. La problématique de recherche initiale étant ciblée sur le troisième axe du projet OSCAR, celui de la formulation des buts de simulation en cohérence avec les analyses fonctionnelles et le cycle de vie produit. Notre terrain privilégié de travail a porté sur l'ensemble des activités du bureau

d'étude et plus particulièrement les phases d'analyse fonctionnelle, de conception détaillée du produit et la phase de simulation numérique et par conséquent sur les individus impliqués dans ces activités.

De plus, notre implication dans le projet OSCAR, dont la thématique débordait du seul cadre de nos travaux, nous a permis d'avoir une vision plus large. De plus, la contribution de plusieurs laboratoires à des thématiques variées a amené une multitude de compétences complémentaires dont les bénéfices tirés par chacun ont été conséquents.

Approche de la problématique

Dans la perspective de positionner nos travaux en termes d'objet et de démarche, nous commençons par détailler les méthodologies développées pour approcher et élaborer une recherche dans le domaine de l'ingénierie de conception. Cette étude nous permet de définir une démarche de travail, à la fois logique et chronologique, servant de guide pour définir une réponse adéquate aux besoins et aux attentes industrielles. Cette étape de construction de la démarche de travail conditionne la pertinence d'un travail de recherche.

Dans une seconde étape nous détaillons le cadre méthodologique de nos travaux et la position de celle-ci par rapport aux différentes démarches expérimentales que scientifiques développées dans ce contexte. Cette mise en situation, nous permet de construire notre méthodologie de recherche pour répondre à notre problématique.

La méthodologie de recherche en conception :

Les méthodologies pour approcher et élaborer une recherche dans le domaine de l'ingénierie de conception, dans une préoccupation croissantes concernant l'efficacité de la recherche de conception et l'efficacité de ses résultats, doivent développer et valider systématiquement des connaissances. De plus, les objectifs de la recherche en conception sont la formulation et la validation des modèles et les théories au sujet du phénomène de la conception, comme le développement et la validation des connaissances, des méthodes et des outils - fondés sur ces théories - pour améliorer le processus de conception. La recherche en conception doit être scientifique afin que les résultats doivent avoir une validité dans un certain sens générique et pratique.

Le but général de la recherche dans l'ingénierie de conception est de soutenir l'industrie en améliorant notre compréhension dans ce domaine, en développant la connaissance, sous forme de directives, les méthodes et les outils qui peuvent améliorer les chances de produire un produit réussi.

Ce but soulève un certain nombre de questions importantes qui forment la base pour l'activité de recherches en conception :

- Que voulons-nous dire par un produit réussi ?
- Comment est-ce qu'un produit réussi est créé ?
- Comment améliorons-nous les chances que le produit soit réussi ?

La première question mène aux issues telles que : Quels critères devraient être employés pour juger le succès, car ceux-ci peuvent être employés comme des indicateurs de mesure de la réussite de notre recherche. La deuxième question mène aux issues telles que l'identification des influences sur le succès, comment ces influences agissent l'un sur l'autre et comment elles peuvent être mesurées. L'investigation de ces issues augmentera notre compréhension de la conception, qui est nécessaire pour améliorer le processus de conception. La troisième question provoque des issues liées à la façon dont cette compréhension peut être employée pour développer des directives, des méthodes et des outils de conception et à la façon dont cet appui de conception peut être évalué. L'évaluation est nécessaire pour déterminer si l'application de cet appui mène en effet à des produits plus réussis conformément aux critères.

Pour aborder ces questions d'une manière intégrée et systématique, une méthodologie de recherches est nécessaire. Une telle méthodologie devrait aider, en identifiant des secteurs et des projets de recherches et en choisissant des méthodes appropriées de recherches, pour aborder les problématiques de la réalité industrielle. Nous observons qu'une caractéristique typique de la recherche en conception est qu'elle vise non seulement à comprendre le phénomène de la conception, mais également à employer cette compréhension afin de changer la situation actuelle. Ce dernier exige plus qu'un modèle (théorique) de ce qui existe ; il exige également un modèle de ce qui serait souhaitable et de la façon dont la situation existante pourrait être changée.

La recherche en conception présente deux axes dont le premier s'intéresse à améliorer la compréhension et le deuxième touche les aspects de développement (élaboration des directives et des méthodes). Ces axes de recherche qui exigent des méthodes et des approches différentes n'ont pas vraiment fusionnées : ceux qui se concentrent sur la maîtrise de notre compréhension de la phase de conception et ceux qui se sont focalisés sur le développement des supports d'aide aux concepteurs.

Une deuxième caractéristique qui a comme conséquence un besoin de variété de méthodes, est la complexité de la conception, faisant participer des objets, des personnes, des outils, des processus, des organismes, le marché et la société.

Chacun de ces aspects est traité dans une discipline spécifique, par exemple la science de l'ingénierie avec les objets, les sciences cognitives et sociales avec les personnes (acteurs), la science informatique avec des outils informatiques, etc...Chaque discipline a ses méthodes spécifiques de recherches et, paradigmes et prétentions également importants et fondamentaux.

Une troisième caractéristique qui se résume dans la multiplicité des facteurs influençant liés au chacun des aspects [Hales, 87] et à l'interconnexions entre

ces derniers [Frankenberger et Badke-Schaub 98]. La séparation des groupes de facteurs pour des objectifs de recherche est extrêmement difficile et des méthodes multiples de recherches doivent être employées.

Cadre méthodologique

La méthode de recherche caractérisée par une démarche expérimentale, présentée à gauche de la figure 2, où le chercheur définit le problème, pose les hypothèses et construit le modèle en dehors du contexte de l'objet de ses recherches. La confrontation à cet objet se fait en termes de validation et d'ajustement des hypothèses initialement posées.

Il existe aussi la méthode de l'observation participante présentée à droite de la figure 2, adoptée par des chercheurs qui s'intègrent sur le terrain industriel pour à la fois construire la problématique et interroger, valider ou modifier des hypothèses de recherche. Les intérêts de cette démarche, qui se caractérise par une approche de terrain, concernent alors à la fois la construction d'une problématique précise et la caractérisation du contexte de conception. L'un des postulats forts de l'observation participante est que le sens de l'action sociale est produit au cours de l'action elle-même. Il est donc dans ce cas nécessaire d'observer les interactions quotidiennes afin de comprendre leur sens et leurs enjeux. Seulement, et comme le souligne Blanco dans [BLA98], une des critiques souvent faites aux approches de terrain est que le chercheur perturbe l'objet qu'il étudie. Cette perturbation est commune avec la démarche expérimentale classique où les instruments de mesures perturbent la réponse du système étudié. Il en est de même pour le chercheur en situation d'observation participante où l'instrument de mesure perturbateur est le chercheur lui-même par son interaction avec les acteurs industriels qu'il observe. Le chercheur est donc confronté à une difficulté de positionnement par rapport au terrain, plus ou moins facile à gérer suivant le type d'intervention industrielle négociée initialement et le statut du chercheur vis-à-vis des industriels. Il est à noter que la réussite d'une telle démarche est fortement conditionnée par la réussite de l'intégration du chercheur dans l'équipe industrielle.

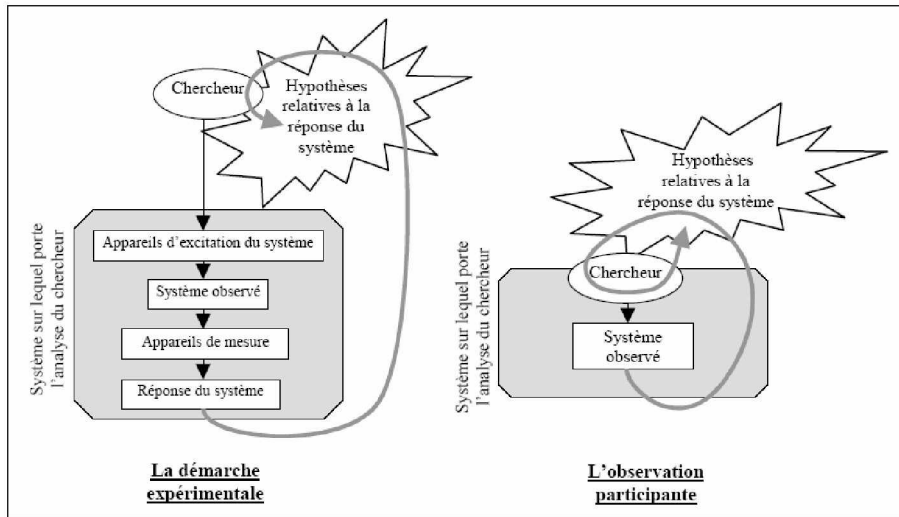


Figure 2 : Différence des démarches de positionnement du chercheur

Notre méthode de recherche adoptée est caractérisée par une démarche expérimentale afin de comprendre l'activité de conception et de définir le besoin en termes d'utilisation du calcul mécanique en conception et de réutilisation de connaissances générées par le calcul. Les intérêts de cette démarche concernent alors à la fois la construction d'une problématique précise et la caractérisation du contexte de conception. Seulement il faut bien noter que la construction de nos hypothèses s'est basée sur d'autres travaux de recherches dont la méthodologie a été supportée par une approche participative. Ceci permet de préciser la situation réelle de fonctionnement des activités et d'identifier, selon un point de vue industriel, les points essentiels sur lesquels nous concentrer. Nous citons par exemple l'étude réalisée au moyen d'un brainstorming par [Baizet 04] dans Le département de la DIEC du constructeur automobile Renault sur les problèmes quotidiens dont les acteurs de la simulation numérique sont confrontés.

Une démarche adaptée à une situation industrielle

Depuis quelques années déjà, de nombreux travaux divers et variés ont été réalisés dans le domaine de la gestion et du management des connaissances dans le processus de conception. Reprendre et analyser en profondeur les travaux développés dans le but d'en faire ressortir les diverses méthodes et les démarches utilisées est capital. Construire une vision globale sur des approches mises en oeuvre dans la thématique de recherche ne permet que de renforcer les propositions méthodologiques adéquates de gestion des connaissances. De cette première étude bibliographique, sont ressorties différentes démarches pour la construction d'une gestion des connaissances, réparties en deux ensembles distincts : d'une part, les quelques démarches provenant d'expériences industrielles, et d'autre part, celles provenant de travaux scientifiques.

Grundstein, dans [Grundstein 95] et [Grundstein 00], fort de son expérience industrielle dans le développement de systèmes de gestion de connaissances au sein du groupe Framatome depuis 1984, propose au travers de son cadre directeur GAMETH⁶ une approche qui est caractérisée par le fait qu'elle est dirigée par les problèmes et non par les solutions : *"on repère les problèmes, on clarifie les besoins en connaissances qu'ils nécessitent pour être résolus en fonction des situations qui les génèrent, on caractérise ces connaissances puis on détermine les solutions les plus adaptées aux situations génératrices des problèmes"*. D'un point de vue opérationnel, la démarche présentée consiste en une étude d'opportunité, déclinée selon un processus en trois étapes : déterminer les processus sensibles, distinguer les problèmes déterminants, cerner les connaissances stratégiques du processus.

Cette démarche de travail permet alors de dresser la cartographie des connaissances cruciales dont la gestion est nécessaire. Les domaines de connaissances, leurs localisations, leurs caractéristiques, leurs influences sur le fonctionnement de l'entreprise et ses orientations stratégiques sont ainsi précisées. Les éléments réunis suite à cette étude d'opportunité permettent d'entreprendre l'étude de faisabilité des solutions possibles pour la gestion des connaissances stratégiques.

Cette démarche de travail permet alors de dresser la cartographie des connaissances cruciales dont la gestion est nécessaire. Les domaines de connaissances, leurs localisations, leurs caractéristiques, leurs influences sur le fonctionnement de l'entreprise et ses orientations stratégiques sont ainsi précisées. Les éléments réunis suite à cette étude d'opportunité permettent d'entreprendre l'étude de faisabilité des solutions possibles pour la gestion des connaissances stratégiques.

Y baizet dans [Baizet 04] propose au travers de son cadre directeur de la DIEC du constructeur automobile RENAULT une approche dont les concepts sont regroupés en cinq étapes. Il commence par étudier les problèmes réels rencontrés par les acteurs de la simulation et de la conception dans leurs tâches quotidiennes, Cette étude réalisée au moyen d'un brainstorming servira alors à cerner les enjeux industriels et scientifiques d'un tel projet de gestion des connaissances chez Renault. Par la suite et à partir du diagnostic de la situation, à analyser plus spécifiquement les besoins relatifs à la gestion des connaissances de simulation numérique à la DIEC. Dans une troisième étape, il s'agit de définir et mettre en forme le formalisme de capitalisation, de partage et de réutilisation des connaissances stratégiques identifiées. La quatrième étape consiste en la validation de la méthode de gestion des connaissances construite dans l'étape précédente. Il s'agit pour cela de mettre en usage cette méthode au sein d'un ou plusieurs métiers ou services pilotes, et d'étudier et analyser les

⁶ GAMETH pour Global Analysis METHodology.

retours d'expérience sur l'adaptation de cette méthode en regard des besoins des utilisateurs et de l'utilisation des outils associés. En fin mettre en usage la méthode de gestion des connaissances au sein de la DIEC.

Nadège Troussier dans [TRO96], qui s'appuie sur l'observation des pratiques du processus de conception et de son organisation par une approche participative dans les BE de Schneider Electric, propose une méthodologie d'utilisation de la simulation numérique dans un contexte de conception afin de favoriser l'intégration conception/simulation. Par une étude bibliographique, elle commence à analyser les travaux menés sur les processus de conception, préciser la vision portée sur ces processus et étudier l'approche socio-technique qui caractérise ces processus. Dans une seconde étape elle affine la problématique du travail par une description de l'utilisation actuelle de la simulation d'un point de vue industriel qui justifie et souligne le besoin méthodologique du cadre travail de recherche.

Dans une seconde étape et suite à la proposition méthodologique de structuration des informations manipulées pour effectuer du calcul mécanique dans le cadre de la conception fonctionnelle et à partir d'un exemple emprunté à Schneider Electric, ce travail illustre les concepts de la mise en place d'une maquette numérique qui supporte la méthodologie proposée. Dans la troisième étape, un positionnement par rapport aux travaux académiques mesure la contribution du travail à l'évolution des pratiques industrielles. Dans cette étape la mise en œuvre de la méthodologie proposée à travers les différents usages qui lui sont relatifs permet de valider le besoin des utilisateurs.

Construction de la méthodologie de recherche

L'analyse de ces différentes expériences et préconisations sur la méthodologie à adopter pour mener à son terme notre objectif nous permet maintenant de construire une démarche chronologique et successive suffisamment détaillée pour nous garantir une approche globale du problème et satisfaire aux besoins et au contexte industriel.

Pour cela, nous avons dans un premier temps analysé les propositions méthodologiques, issues des travaux de recherches, en essayant de faire ressortir et de hiérarchiser chronologiquement pour chacune d'elles, les principaux concepts définis, en associant les mots clé auxquels ils font référence. La mise en commun et le croisement de ces concepts et de leurs idées respectives nous a ensuite amené à esquisser la structure et la forme générale de cette démarche. De plus notre étude bibliographique a alors permis de finaliser la construction de cette démarche méthodologique, dont les idées et les concepts sont regroupés en quatre étapes :

- *Etudes des processus industriels et la conception intégrée de produits* : Il s'agit dans cette étape initiale de présenter le contexte dans lequel se place ce travail et de positionner notre travail. Elle vise donc à préciser ce que l'on entend par processus industriel et l'approche dans laquelle

s'inscrit la réflexion menée. Dans ces concepts nous détaillons les réflexions conduisant à l'amélioration de la conception tant par son organisation propre que par les moyens et les hommes à mobiliser autour ainsi nous évoquons les évolutions des processus de conception de produits techniques ainsi des modèles des processus de conception. Finalement nous discutons La prise en compte de L'approche socio - technique des processus de conception.

- *Identification des objectifs de la simulation dans le processus de conception* : Dans cette étape nous définissons, en premier lieu, le concepts de simulation (essais sur des prototypes, ou des calculs), par la suite, nous analysons le rôle de la simulation comme outil de maîtrise des risques du développement produits ainsi la façon d'assurer des résultats de simulation représentatifs de l'objectif visé.

- *Etat de l'art sur l'intégration du calcul mécanique dans la conception*. Il s'agit dans cette étape d'étudier les problèmes réels rencontrés par les individus dans leurs tâches quotidiennes, c'est-à-dire les problèmes qui apparaissent en action. Cette étude servira alors à identifier les processus sensibles, essentiels au fonctionnement de la simulation et d'en distinguer les problèmes associés. Il est également nécessaire de bien cerner les enjeux industriels et scientifiques d'un tel projet. Cela signifie notamment de bien faire le point sur les méthodes actuelles d'intégration de la simulation dans le processus de conception et d'en faire une analyse critique face aux besoins spécifiques des industriels. Les quelques questions qu'il est possible d'associer à cette étape sont : quels sont les problèmes réels rencontrés ? Quel est le besoin à l'origine ? Qui travaille sur le sujet ? Quel est l'environnement de travail ?....

- *Analyse de la démarche d'ingénierie système*. Nous achevons l'étude bibliographique par le dernier concept, celui de l'analyse de la démarche d'IS. En effet cette voie de progrès indiscutable sur le plan méthodologique est largement déployée dans l'aéronautique et commence à l'être dans l'automobile. La simulation y tient une place importante. Cette discipline, qui permet de maîtriser la conception et la réalisation d'ensembles complexes, prenant en compte tout le cycle de vie, depuis la détection des besoins jusqu'à l'achèvement du retrait de service, nous semble importante pour positionner notre problématique de recherche.

PARTIE I

Etat de l'art

-
- § Les processus industriels et la conception intégrée de produits
 - § L'intégration de la simulation numérique dans la conception
 - § L'étude des processus de conception dans l'Ingénierie système
-

Cette première partie est consacrée à la définition de la problématique des présents travaux. Celle-ci se perçoit, d'une part, au travers des concepts de l'évolution des méthodes de conception et des enjeux industriels liés au métier de la simulation numérique dans la conception, et d'autre part, au travers des intérêts scientifiques que industriels portés sur les nouvelles démarche de l'ingénierie système.

Pour présenter ces enjeux, les deux premiers chapitres sont consacrés à l'analyse et la synthèse de l'état de l'art des deux domaines qui nous intéressent. Si le premier chapitre propose une synthèse des travaux réalisés autour du processus de la conception, le second s'intéresse aux travaux réalisés dans le domaine de l'intégration de la simulation numérique dans la conception pour faire ressortir les problèmes réels rencontrés par les acteurs durant leurs activités quotidiennes. Ces deux chapitres sont utiles pour définir les principaux concepts associés à ces deux disciplines, et permettent de dresser un état des lieux complet des activités scientifiques. Un troisième chapitre tente quant à lui de faire le point sur l'évolution générale des méthodes et outils de l'ingénierie. Cette évolution montre une convergence des méthodes autour de "l'ingénierie système" et le concoure des outils vers le support du produit virtuel et de l'usine numérique Enfin une conclusion de cette première partie reprend les principaux points étudiés dans ces trois chapitres et met en avant les enjeux tout autant scientifiques qu'industriels de l'organisation de la phase de simulation numérique en conception de produit technique, permettant ainsi de définir la problématique générale de nos travaux.

Chapitre 1

Les processus industriels et la conception intégrée de produits

L'objectif de ce chapitre est de présenter une analyse des méthodologies développées pour approcher et élaborer une recherche dans le domaine de l'ingénierie de conception et positionne nos travaux en termes d'objet et de démarche dans le cadre général d'étude des processus industriels et d'amélioration de leurs performances. Ce chapitre se décompose en trois volets dont le premier vise à préciser ce que l'on entend par processus industriel et l'approche dans laquelle s'inscrit les réflexions menées. Il propose des pistes de réflexions conduisant à l'amélioration de la conception tant par son organisation propre que par les moyens et les hommes à mobiliser dans un contexte purement industriel pour maîtriser l'activité de conception dans les bureaux d'études. Le second volet présente une description de l'évolution des processus de conception de produits techniques ainsi des modèles des processus de conception, qui sont en constante évolution et souligne quelques aspects de la complexité du processus de conception. Finalement et pour cadrer l'approche dans laquelle s'inscrit la réflexion de ce travail, le troisième volet discute La prise en compte de l'approche socio-technique des processus de conception.

1. l'excellence dans la conception

La notion de conception est à l'évidence complexe à définir. La difficulté vient en partie du lien étroit qui unit la conception à l'innovation, à la R&D, ainsi qu'au « design ». Bien souvent, l'importance attribuée, à juste titre, à l'innovation et à la R&D, éclipse la conception.

A contrario, il n'existe pas de données chiffrées tangibles et facilement accessibles relatives à la conception permettant de l'analyser, de la commenter et de la communiquer. De fait, les rares communications sur la conception sont des articles portant sur des aspects spécifiques : délais de mise sur le marché de plus en plus réduits, reportages sur les plateaux de conception dans l'automobile... sans que l'on ait une vue d'ensemble de ce qu'elle représente.

La difficulté d'analyse de la conception provient également de son dimensionnement physique et temporel dans la chaîne de valeur de l'entreprise. Elle se situe dans un périmètre difficile à cerner, entre l'idée de mettre un produit sur le marché et sa fabrication. Ce sont cependant les premières phases d'élaboration d'un produit qui posent le plus de questions : est-ce de l'innovation, de la conception, de la R&D... ? La réponse à ces questions n'est pas évidente.

Dans l'objectif de proposer des pistes de réflexions conduisant à l'amélioration de la conception tant par son organisation propre que par les moyens et les hommes à mobiliser dans un contexte purement industriel et pour comprendre l'activité de conception dans les bureaux d'études, nous avons vu l'intérêt d'identifier le concept de l'excellence en conception. Ce concept permet de présenter une description de l'organisation de l'activité de conception. Selon une étude qui a été réalisée par le Cabinet Bird-Consulting en collaboration avec la Direction Générale de l'Industrie, des Technologies de L'information et des Postes-DIGITIP nous proposons de définir l'excellence en conception ainsi les éléments de maîtrise de l'excellence. Il faut noter que cette étude a été menée par des groupes de travail composés de professionnels travaillant sur la conception au quotidien de différents secteurs d'activité afin de conduire une réflexion hors de tout particularisme de métier, ce qui explique l'intérêt que nous avons accordé à cette étude.

Définir l'excellence dans la conception comme " une quête de la création de valeur » pour les clients et pour l'entreprise. L'optimisation de cette « double » valeur permet à l'entreprise de se différencier de la concurrence. Peut-on parler cependant de "gagnant/gagnant" pour toutes les parties intéressées? Ce serait probablement exagéré, voire naïf; mais il faut alors, pour le moins, pouvoir justifier ses choix.

D'après [Perrin 01], l'excellence dans la conception, c'est donc aussi l'art de n'oublier aucune partie intéressée, en identifiant les risques lors des choix et en

les maîtrisant dans une approche forcément systémique. La maîtrise des risques est une discipline transverse à laquelle la normalisation apporte de plus en plus sa contribution. Ce triptyque (qualité, coût, délai), très médiatisé, n'est pas nouveau, mais il se révisé sans cesse.

► Maîtriser la qualité

Dans ce contexte, elle a plutôt le sens de l'assurance de la qualité et signifie que :

- au bout des études de conception, les fonctionnalités du produit seront bien celles qui correspondent au cahier des charges (exemple : vitesse de rotation d'un robot de cuisine).
- les fonctionnalités vont perdurer tout au long de l'utilisation du produit. Cela relève de l'assurance qualité du produit, car si l'assurance de la qualité d'un produit se réalise dans la fabrication, elle se construit dans la conception.
- le bien d'équipement livré n'aura pas besoin d'un « déverminage » long et coûteux avant sa mise en service réelle.

Qualité et cahier des charges fonctionnel : Peut-on parler de qualité à propos de la rédaction du cahier des charges ? C'est-à-dire de la définition des fonctionnalités du futur produit. On préfère attribuer sa réussite à une analyse fonctionnelle réussie, sachant que la tendance est à l'individualisation du produit (concepts de "customisation", "one to one"). Cette individualisation sera d'autant plus réussie que l'entreprise aura réussie à "faire entrer le client dans l'entreprise"...et ceci relève de la qualité au sens où l'entend la norme ISO 9001 : 2000 qui prône l'écoute du client et donne des indications pour y parvenir [OIN 99].

Ce double sens de la qualité : assurance de la qualité et mobilisation des énergies pour l'écoute du client, ne doit pas éclipser d'autres concepts ou techniques d'analyse, celles des "outils de la valeur" (Analyse Fonctionnelle - normes de la série NF X50) en particulier.

A propos du cahier des charges, on peut évoquer un autre débat : sa rédaction fait-elle partie de la conception, ou se situe-t-elle dans une phase plus amont du projet, car généralement le commanditaire (le maître d'ouvrage) ne donne son feu vert qu'à son issue ? Dans le BTP, c'est le maître d'ouvrage qui rédige le cahier des charges sur la base duquel il choisit le maître d'oeuvre c'est-à-dire l'artisan de la conception. Dans l'industrie, les "transitions" sont plus souples mais aussi plus complexes comme on le verra dans la partie II.

► Optimiser les coûts

La référence au coût global : Les coûts sont relatifs à la marge que doit faire l'entreprise sur le produit, et à la valeur exigée par le client. Les raisonnements se font de plus en plus en coût global : coût global de possession pour le client et coût de revient global pour l'entreprise ; pour ce dernier, les provisions pour

coûts environnementaux (fin d'usage des véhicules, emballages...) sont de plus en plus significatives.

L'ingéniosité de la conception entre en ligne de compte, mais la réduction des coûts résulte aussi - et parfois surtout- des efforts de productivité de l'entreprise et de ses partenaires. Il ne faut cependant pas confondre la réduction des coûts liée au produit et à sa fabrication, et la réduction des coûts liée au processus de conception lui-même, qui sont deux choses différentes. L'excellence en conception sera autant « l'excellence du processus » que « l'excellence du résultat » du processus. Les deux requièrent des « outils » différents qu'il importe de bien différencier, faute de quoi on risque des incompréhensions.

Il ne faut surtout pas minimiser l'influence de la conception sur le coût. En période de difficultés économiques, comme c'est le cas aujourd'hui, il est plus facile pour un donneur d'ordres d'obtenir des réductions de prix par une pression commerciale qu'en établissant un partenariat avec son fournisseur pour parvenir à une réduction de coût en agissant au niveau de la conception, stade qui permet de prévoir une juste marge pour le fournisseur qui a su "concevoir ce gain"...

Un partenariat à long terme fondé sur la conception permet des gisements de valeurs renouvelables ce que les gains commerciaux ne permettent pas : [Dardy et al 93].

► Réduire les délais

La course contre le temps : Trois produits sur cinq qui se trouvent aujourd'hui dans le commerce n'existeront plus dans les dix ans à venir et cette rotation de l'éphémère ne cesse de s'accélérer. La réduction des délais a pour but de mettre sur le marché des produits innovants et ingénieux avant le concurrent. La notion de délais veut tout d'abord dire « avant la concurrence ».

La réduction des délais permet d'agir directement sur la "jeunesse" d'un produit. Or, il existe un lien très fort entre ce paramètre et son chiffre d'affaires; d'où l'intérêt de raccourcir les délais des études de conception, en respectant toutefois la "qualité" au sens décrit ci-dessus. Dans d'autres domaines, comme la sous-traitance et de l'ingénierie, le respect des délais permet d'éviter de se voir infliger des pénalités.

Dans cette course contre le temps, les nouvelles technologies constituent un outil essentiel de réduction des délais et peuvent être perçues comme un élément différenciant envers la concurrence : disposer d'une longueur d'avance sur les NTIC constitue un avantage concurrentiel fort.

Il existe plusieurs voies pour réduire les délais et les coûts dus au fonctionnement d'un processus :

- la chasse aux gaspillages par suppression des tâches qui n'ont pas de valeur ajoutée et en particulier la chasse aux actions qui conduisent à reprendre ou refaire des travaux déjà exécutés ;
- l'analyse et le traitement des dysfonctionnements connus ou potentiels ;
- la mise en œuvre de méthodes et d'outils permettant de travailler mieux et plus rapidement ;
- le travail en parallèle qui nécessite une organisation et un mode de management tout à fait particuliers pour fonctionner efficacement.

D'après [Morley 98], si tous les concepteurs considèrent que le coût du produit représente un enjeu important, il n'en est pas toujours de même s'agissant des délais de mise sur le marché. Même si la contrainte de délai doit systématiquement être prise en compte, l'enjeu encouru dépend pour beaucoup de paramètres tels que la demande du marché et le niveau de concurrence.

Ceci étant, le concepteur maîtrise en général sa marge de manœuvre en matière de délais et il n'hésite pas à en jouer. Il faut par exemple de fortes pressions pour qu'un organisme en situation de monopole ou de quasi-monopole se sente véritablement contraint par des délais de conception et développement.

Dans le cadre d'un marché concurrentiel, un organisme qui n'aurait pas pris la mesure de ces enjeux se mettrait rapidement dans une situation difficile.

- Il ne suffit pas de dresser une liste de ces enjeux pour estimer avoir traité le problème, ni même d'apporter des réponses réputées pertinentes pour chacun d'entre eux. Il faut aussi tenir compte des liens qui peuvent exister entre ces enjeux. Ainsi, coûts et délais ne sont pas indépendants. De même, la qualité est un paramètre qui a des liens avec pratiquement tous les autres paramètres à prendre en compte.

Les enjeux de conception sont rarement les mêmes d'un organisme à un autre. En effet, un enjeu n'a de signification que par rapport à une situation et un contexte bien déterminés. De nombreux paramètres sont à prendre en compte : marché, concurrence, évolution des techniques et des technologies... mais aussi culture d'entreprise, situation de l'organisme en termes économiques et techniques, ou encore contexte social par exemple. Cela n'aurait pas beaucoup d'intérêt de passer ici en revue tous ces paramètres.

1.1 L'organisation de la conception

La conception repose sur deux éléments d'organisation fondamentaux, selon [AFITEP 99] :

- L'organisation du projet : la structuration et la formalisation du processus de conception, ainsi que le management projet qui lui est associé
- L'organisation de l'entreprise, comme facilitateur de la coordination et de la communication entre les acteurs de la conception, de la capitalisation des connaissances et de la pérennisation au-delà des projets.

1.1.1 L'organisation du projet de conception

Pour comprendre la manière dont s'organise un projet de conception, il est nécessaire de distinguer le processus de conception et le management du projet, comme l'illustre la figure 3. On retiendra dans un premier temps que :

- Le processus de conception est la représentation schématique de la conception applicable à toutes les entreprises. Le processus de conception permet de figer le « Quoi ? » et le « Comment ? » d'un projet. Il comporte les grandes étapes successives (au nombre de 5) figure X permettant de parcourir le chemin entre l'identification du besoin et le passage en production de sa solution produit.

- Le management de projet est l'application concrète du processus au cas particulier d'un projet de conception. Il est donc spécifique à chaque projet ce qui rend une modélisation « standard » impossible. Le management de projet organise dans le temps le quotidien de l'entreprise en prévoyant et en pilotant les tâches à réaliser par chacune des parties intéressées au projet conception considéré. Le management de projet concerne donc le « Qui ? » et le « Quand ? » du projet.

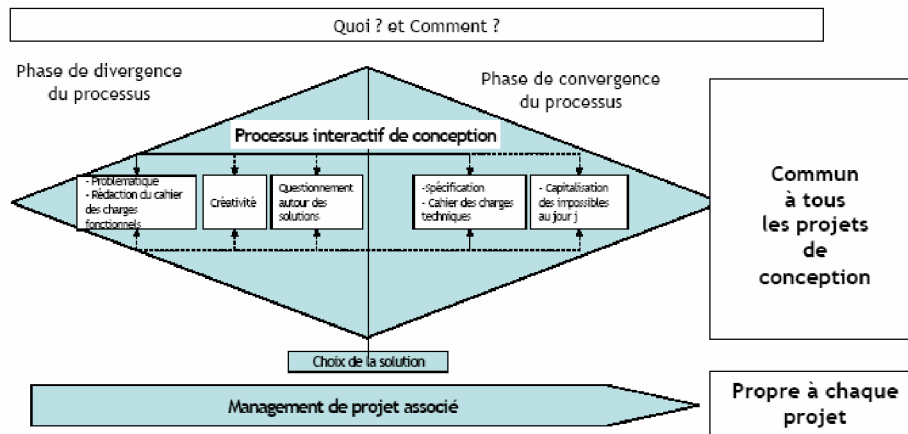


Figure 3 : L'organisation du projet de conception

1-12 L'organisation de l'entreprise

L'organisation de l'entreprise autour de la conception peut faciliter l'obtention de l'excellence, en fait l'organisation de l'entreprise pour favoriser la conception repose sur quatre grands axes :

- Le choix et la mise en place de l'organisation matricielle

Deux grandes évolutions ces dix dernières années ont modifié de façon substantielle la manière d'organiser les équipes de conception : L'arrivée des méthodes de management en « mode projet » qui ont eu pour conséquence d'introduire des organisations que l'on peut qualifier de matricielles (organisation par métier superposée à une organisation par projet) et le déploiement rapide des NTIC qui deviennent un support technique pour rendre opérationnel ces méthodes de management.

- L'ouverture sur les autres services de l'entreprise et sur son environnement.

Les équipes de conception doivent apprendre à « transformer leurs citadelles en réseaux de communication » pour resserrer les liens avec les autres fonctions de l'entreprise et avec les partenaires commerciaux. Pour parvenir à ce résultat, des nouveaux modes de travail sont mis en place, visant au décroisement des fonctions dans l'entreprise, à la communication et au rapprochement entre partenaires commerciaux, stratégiques et d'innovation.

- Le coût global et la création de la valeur.

Les entreprises spécialisées dans la conception ont le plus souvent à piloter, non pas un seul projet, mais un portefeuille sur lequel il est nécessaire d'avoir une

vue d'ensemble afin de mesurer le respect des budgets et le degré d'avancement.

Pour parvenir à cet objectif, deux méthodes sont généralement utilisées :

- des indicateurs de suivi du portefeuille de projets,
- des méthodes de calcul de la création de valeur de chaque projet et de la contribution de chaque acteur.
- La capitalisation des connaissances.

La capitalisation et la transmission des connaissances sont un problème essentiel à résoudre pour des activités où le savoir-faire est un élément prédominant. Le degré de difficulté est en partie lié à la culture de l'entreprise. Certaines entreprises, notamment celles ayant obtenu la certification ISO 9001, ont pris l'habitude de retranscrire sur le papier ce qu'elles font. La majorité, à l'inverse, reste dans une tradition orale et la rédaction du savoir-faire n'existe que fort peu. Ce sont ces dernières entreprises qui se trouvent les plus vulnérables face au problème de la capitalisation et de la transmission du savoir.

La capitalisation des connaissances doit porter sur trois points,

- Capitaliser sur les solutions trouvées pour un projet,
- Capitaliser sur les réussites et les échecs,
- Simplifier les procédures de capitalisation.

Dans la perspective de positionner nos travaux en termes d'objet et de démarche, une première description du processus de conception ainsi que l'organisation du projet de conception a été proposée. Seulement la description des modèles des processus de conception, qui sont en constante évolution, permet de cadrer l'approche dans laquelle s'inscrit la réflexion de ce travail. Pour cela, nous nous intéressons ici à l'évolution des processus de conception de produits techniques.

2. Le processus de conception de produits techniques

Le monde industriel de ces vingt dernières années se voit bombardé de sigles et de mode comme le CAD/CAM (computer aided design/computer aided manufacturing) ou la CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur), ou encore le CIM (Computer Integrated Manufacturing) précurseur de notre productique. De plus nous pouvons citer aussi les méthodes Kanban ou Taguchi et l'une des dernières modes de racines nipponnes à envahir le marché industriel porte le nom de concurrent engineering ou ingénierie simultanée. On lui associe souvent le CALS (Computer Aided acquisition and Logistic Support) qui est, quant à lui, un produit purement américain.

2.1 Notions de produits et de marché

Pour satisfaire l'expression de la triple contrainte coût/délais/qualité, nombreuses sont les méthodes et outils développés. Mais à notre sens, le pourquoi de ces méthodes et outils tient dans l'examen des forces en présence. Deux satellites principaux gravitent autour de l'entreprise : le produit et le marché. Le produit correspond à la matérialisation d'un besoin et résulte d'une réalisation industrielle. Avant d'aboutir à son aspect final, il a fallu passer par un certain nombre d'étapes, de la conception à l'industrialisation en intégrant un savoir-faire acquis au fil des années. C'est pourquoi le produit se veut stable et durable. Stable en ce sens qu'il entend demeurer le même tout au long de son cycle de vie, qui sera le plus long possible afin d'amortir à terme les investissements importants qu'il a nécessités. Les marchés, eux, ne sont pas matériels et correspondent à différents besoins momentanés. Différents facteurs, qu'ils soient économiques, politiques ou historiques leur confèrent ce caractère d'instabilité. Cet antagonisme entre un marché sans cesse fluctuant et un produit quasi constant de par sa conception, nous démontre l'importance qu'il faut attribuer au développement d'un produit en satisfaisant les trois objectifs coût, délais et qualité [PETIT 90].

2.2 Evolution des outils de l'ingénierie

L'ensemble de ces travaux montre que la conception est une activité aux multiples facettes ; elle recouvre un grand nombre de métiers qui interviennent simultanément sur la définition du produit et du processus associé. Plusieurs modes de coordination entre ces métiers sont proposés, mais la difficulté se situe au niveau du caractère non prévisible (on peut même dire chaotique) du processus de conception. Cette caractéristique est une des causes principales des difficultés rencontrées pour la représentation des processus de conception. Il est donc nécessaire de tenir compte de cette caractéristique principale sans entrer dans une description trop figée du processus de conception.

Cette caractéristique de déterminisme évolue avec l'avancement des projets de conception. En début de conception, les outils utilisés sont indépendant de la structure géométrique du produit alors que plus loin dans le processus de conception, des outils basés sur la décomposition structurelle ou géométrique du produit sont impliqués. De même, l'identification des connaissances et des informations qu'ils portent influent sur les outils qui peuvent être utilisés. Lorsque les connaissances et les usages de l'outil sont bien identifiés et formalisés, des outils prescriptifs, formalisant et structurant l'action du concepteur, peuvent être mis en place. Ce n'est absolument pas le cas lorsque les connaissances sont implicites.

Cette évolution des outils relativement à l'avancement du projet et à la formalisation des connaissances est illustrée en figure 4. Cette figure propose un positionnement relatif d'un nombre (non exhaustif) d'outils utilisés dans le cadre de la conception de produits techniques selon deux axes. Le premier

concerne le niveau de structuration des données relatives au produit et le second la trace qu'ils laissent de la structure de l'action.

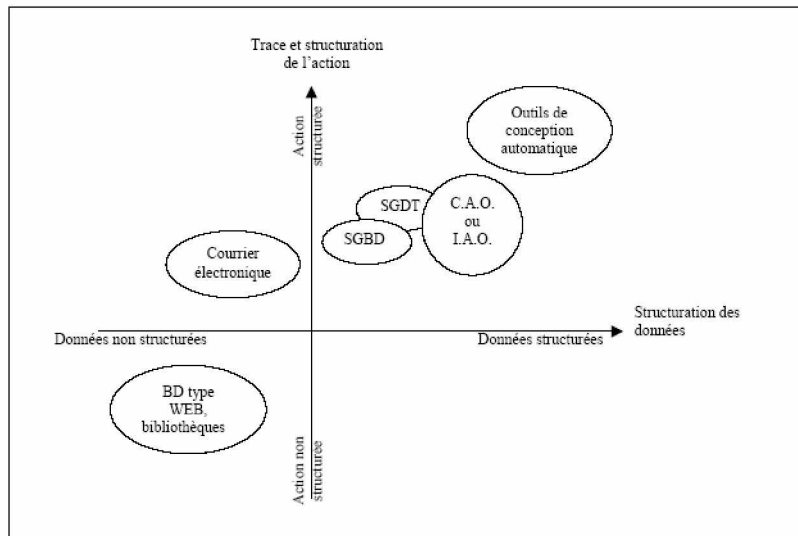


Figure 4 : Des outils positionnés suivant la structuration des données du produit et la formalisation de l'action

Les outils positionnés dans la figure 4 sont, pour aller des moins spécifiques à l'activité de conception aux plus spécifiques, le courrier électronique et les bases de données documentaires (bibliothèques ou World Wide Web) d'une part et les Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD), les Systèmes de Gestion de Données Techniques (SGDT), les outils de modélisation géométriques, couramment appelés outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), évoluant vers des outils d'Ingénierie Assistée par Ordinateur (IAO) mettant en oeuvre des applications métiers d'autre part. Enfin, des outils de conception automatique (TROPIC [LAT77], SERF [ING87], ABS-SMECI [MON87], etc.) sont quelquefois rencontrés, où des modèles de représentation du produit et du processus de conception sont associés à des techniques d'intelligence artificielle pour des problèmes de conception routinière et paramétrique d'après la classification des problèmes de conception précédemment évoquée et issue de Brown [BRO96].

En avançant dans le processus de conception, il est possible de mettre en oeuvre des outils de plus en plus structurés par rapport à leur représentation interne des données relatives au produit et par rapport à l'usage qui en est fait, caractérisé par l'action [TOL98]. Ceci permet d'effectuer une catégorisation des outils qui prend toute son importance pour proposer des outils méthodologiques que le concepteur puisse utiliser tout au long d'un projet de conception et qui servent de support à la réutilisation pour d'autres projets.

Pour ce travail de thèse, nous nous sommes placés dans le cadre de l'approche des processus de conception développée au laboratoire GILCO et du pôle

Conception Intégrée du laboratoire Sols, Solides, Structures. L'objet de la section suivante est donc de préciser la vision portée sur les processus de conception et l'approche socio-technique des processus de conception qui caractérise l'originalité des travaux menés sur ces processus.

2.3 L'ingénierie simultanée

La définition de l'ingénierie simultanée qui est en fait une méthode de développement d'un produit consistant à prendre en compte, dès la phase initiale de conception, tous les éléments du cycle de vie de ce produit, de l'analyse de besoin à la fabrication et au soutien en utilisation [CHANCHEVIER 93]. Globalement, elle se concrétise par un chevauchement des étapes de vie et une prise en compte de toutes les disciplines dès la phase de démarrage du projet (figure 5).

Bien entendu, on ne peut pas passer à une organisation qui soit entièrement parallèle à moins qu'aucune phase de développement ne dépende d'une phase antérieure ! Cependant, on peut s'orienter vers un parallélisme partiel en enclenchant une phase avant que celle dont elle dépend ne soit entièrement achevée. Pour cela, il faut déterminer le moment exact à partir duquel on dispose de données partielles suffisantes pour ébaucher une solution. C'est pourquoi il faut développer des structures organisationnelles qui privilégient le projet ; la logique des projets devient la logique de l'entreprise [NAVARRE 92].

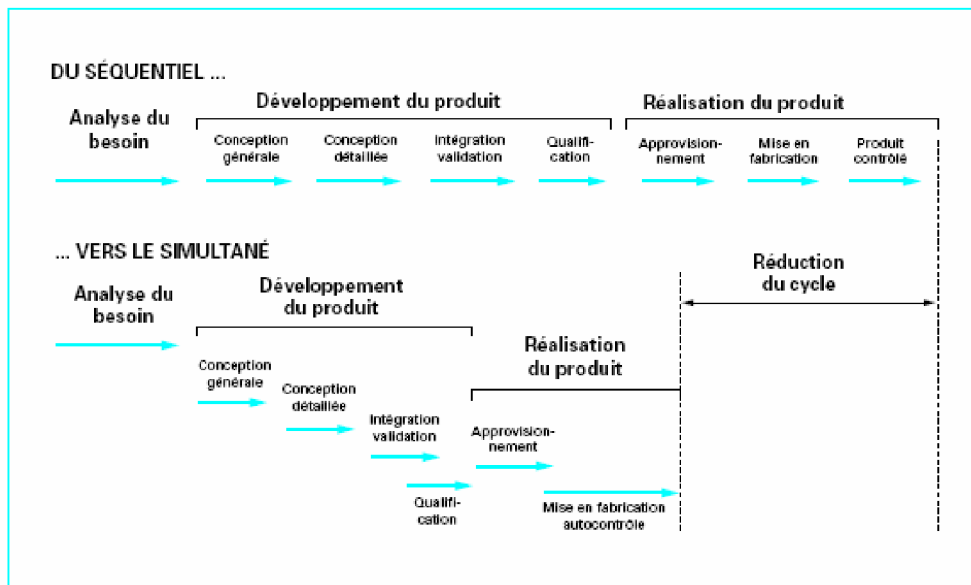


Figure 5 : Positionnement de l'approche simultanée

L'ingénierie simultanée renvoie à la représentation couplée du produit et de son processus de conception. Harani définit dans [HAR97] le modèle de produit comme la description des différentes facettes du produit à concevoir, à

différents niveaux d'abstraction et le modèle de processus de conception comme la description du processus de conception à différents niveaux de détail retraçant le pourquoi, le comment et le par qui ou pour quoi relatifs à chaque étape de la conception. De nombreux modèles de produits sont proposés ([VAR95], [HAR97], [EYN99] ...) mais ces modèles supposent une connaissance de l'architecture du produit et du déroulement du processus de conception. Ces modèles permettent l'analyse et la traçabilité des processus de conception de produits techniques. Nous discuterons cette architecture du produit dans le chapitre 4 qui s'intéresse à la description des exigences dans une conception fonctionnelle.

2.4 Vers un processus de conception intégrée

La conception se définit de façon générale comme "la formation d'un concept, d'une idée générale dans l'esprit humain". Dans un cadre plus industriel, la conception recouvre des sens différents suivant le domaine d'activité, l'organisation, la structuration, l'histoire et les employés de l'entreprise. Il est généralement reconnu que la conception est un processus¹, ses limites sont en fait très mal identifiées.

On peut par exemple identifier la conception à l'activité du concepteur, « homme créatif, transformant le cahier des charges d'un produit en une proposition sous forme de dessin technique » [TIC94]. Blanco, dans [BLA98], définit les concepteurs dans une action de « coopération » avec des spécialistes de différents métiers pour « la création mentale d'un nouveau produit ». Dans ce cas, la conception correspond à cette transformation. Dans ce manuscrit, nous identifions effectivement la conception à l'activité du concepteur où le concepteur est une personne qui effectue des choix techniques pour faire évoluer la définition du produit. Des outils méthodologiques issues de l'analyse de la valeur permettent de formaliser le besoin auquel le produit conçu doit répondre (diagramme pieuvre, méthode SADT, diagramme FAST...). Des modèles sont proposés pour supporter le passage de la représentation fonctionnelle à la représentation structurelle du produit. En particulier, le modèle de Constant [CON96] utilise les SATT (Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement) et la théorie des groupes de déplacements, ainsi que des concepts issus des Bond-Graphs pour proposer un modèle de produit permettant le passage d'une représentation purement fonctionnelle à une définition structurelle minimale d'une solution possible.

Dans [TIC94], Tichkiewitch décrit l'évolution de la conception, de l'ingénierie simultanée (apparue à la fin des années 80, début des années 90), vers la conception intégrée. Il définit alors plusieurs sens au terme intégration. Le premier sens consiste en la prise en compte de tout le cycle de vie du produit (sa fabrication, sa mise en route, son usage, sa destruction) dès sa conception. L'intégration peut être également vue comme la possibilité d'imaginer des solutions en fonction du contexte dans lequel doit évoluer le produit. En d'autres termes, cette intégration est liée à la prise en compte de

L'environnement de développement du produit (différent de son environnement d'usage). Enfin, l'intégration doit aussi être vue sous l'aspect participatif des différents corps de métiers au moment de la conception.

Le terme intégration regroupe donc ces trois sens :

- § Intégration du cycle de vie dès la conception,
- § Intégration de l'environnement de développement
- § Intégration des différents métiers.

L'illustration la plus courante de la mise en place de la notion d'intégration dans la conception de produits est donnée par les plateaux projets mis en place, par exemple, dans l'industrie automobile [MID93]. Les objectifs de ces plateaux projets sont bien de faire travailler ensemble toutes les personnes intervenant dans le cycle de vie du produit afin d'intégrer à la fois le cycle de vie, l'environnement de développement et les différents métiers dès les premiers stades de la conception.

De façon générale, la conception intégrée fait appel à une approche fonctionnelle. En d'autres termes, le processus de conception se base sur une définition fonctionnelle du produit. Cette définition fonctionnelle est relativement mal formulée en début de conception.

Ensuite, l'analyse de marché et les premières études techniques permettent de formaliser un premier Cahier des Charges. Une analyse fonctionnelle motivée par une démarche d'analyse de la valeur permet de formaliser les besoins dans un Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF). Des fonctions exprimées dans ce CdCF sont tirés un ensemble de critères techniques permettant l'évaluation du produit en cours de conception. Comme nous l'avons vu précédemment, Constant dans [CON96] propose également un modèle de représentation fonctionnel du produit supportant le passage à la définition structurelle minimale d'une solution. Ainsi les choix effectués entre différentes alternatives de conception, tout comme l'optimisation de certaines parties du produit, sont réalisés par rapport à ces critères traduisant les fonctions à respecter. On parle alors de Conception Fonctionnelle.

Le concepteur agit dans la conception et effectue des choix concernant la définition géométrique et technologique du produit relativement aux spécifications fonctionnelles, afin de les satisfaire globalement au mieux, tout en respectant les délais qui lui sont imposés.

Il est à noter que si les choix réalisés tout au long de la conception sont effectués relativement aux aspects fonctionnels, ceci ne signifie en aucun cas que les fonctions du Cahier des Charges Fonctionnel n'évoluent pas en cours de conception. Bien au contraire, les fonctions peuvent être (et sont couramment) modifiées en cours de conception. Par modification, il faut ici entendre à la fois évolution du contenu mais aussi de l'existence (une fonction peut disparaître et / ou apparaître pendant l'étude). Cette dynamique d'évolution des fonctions correspond à la construction conjointe du problème et de la solution à ce

problème, qui caractérise la conception mécanique comme le souligne à plusieurs reprises Blanco dans sa thèse [BLA98]. Cette dynamique des fonctions est replacée dans un contexte industriel plus global au chapitre 3 de cette thèse afin de souligner quelques aspects de la complexité du processus de conception.

2.5 Evolution des méthodes de l'Ingénierie Système.

En préalable au corps de cette étude, il nous faut positionner notre problématique dans l'évolution générale des méthodes et outils de l'ingénierie. La figure 1 récapitule et resitue les évolutions principales de ces dernières années. Cette évolution montre une convergence des méthodes autour de "l'ingénierie système" et une convergence des outils vers le support du produit virtuel et de l'usine numérique. Ce lot de travaux se propose d'étudier les interactions entre ingénierie système et produit virtuel.

Méthodes organisationnelles	Bureau d'études Bureau de méthodes Industrialisation	Ingénierie concurrente Plateau projet	Intégration des fournisseurs et équipementiers	Ingénierie partagée (shared engineering) Best practices
Méthodes de conception	Pahl et Beitz Over the wall design	Analyse fonctionnelle Analyse de la valeur	QFD Conception intégrée	Ingénierie système, KBE
Outils de simulation	Linéaire	Non Linéaire,	Intégré à la CAO	} Produit virtuel Usine virtuelle
CFAO	2D et surfacique	3D volumique et surfacique	Paramétrique, variationnel, maquette numérique	
SGDT/PLM	Nomenclature et GPAO	Nomenclatures Documents Gestion des droits d'accès	Support des processus Gestion de configuration Gestion de la diversité	
	1950	1980	1990	2000

Figure 6 : contexte d'évolution des méthodes et outils de l'ingénierie

Les travaux sur le métier d'ingénierie système ont connu ces dernières années un essor important sous l'impulsion de grands maîtres d'ouvrages tels que les organismes de défense, suivis par leurs principaux maîtres d'œuvre et relayés par des associations telles que l'INCOSE aux USA. Il s'est ainsi accumulé un corpus de savoir-faire concernant les processus à mettre en œuvre en cours de formalisation dans des normes. Les premiers secteurs concernés furent le spatial, l'aéronautique, le militaire, et les autres secteurs ont emboîté le pas : l'énergie, les transports, l'automobile,...

En effet, les pratiques industrielles dans le domaine de la conception sont en permanente évolution : ces évolutions se traduisent notamment par une très forte diversité commerciale, de fortes contraintes sur les coûts et la prise en compte de l'aspect collaboratif des réseaux d'entreprises ou de partenaires autour d'un objectif projet. De la même façon, les techniques de production modernes s'appuient sur une coordination des activités dans un contexte de chaîne logistique globale.

Dans les bureaux d'études où le rythme de développement s'accélère fortement, où la conception est de plus en plus simultanée et où les tests sur prototypes se raréfient, il faut en effet tout faire pour adopter une démarche cadrée et rigoureuse, capable par exemple de sonder puis de « déminer » au plus tôt le terrain en évitant erreurs et pièges de conception. Car en matière de coûts, il est bien connu qu'une modification tardive reviendra vite très chère, et ce d'autant plus qu'elle peut nécessiter de revenir à une phase de test-validation si le problème initial a été mal cerné. Les délais s'envolent alors et la qualité court de gros risques. C'est dans cette approche que nous discutons dans le **chapitre 3** les démarches méthodologiques de conception en ingénierie système, celle-ci englobe les activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes. Ceci nous permettra de positionner notre apport méthodologique par rapport à l'évolution des concepts dans la vie industrielle.

3. L'approche socio-technique des processus de conception

Dans la perspective de promouvoir l'intégration, des équipes de recherche en conception intégrée ont proposés dans le cadre de leurs travaux des outils, des connaissances et des méthodes permettant de prendre en compte les trois sens du terme intégration dans la conception ; Nous citons par exemple l'équipe conception intégrée du laboratoire 3S et celui du laboratoire GILCO

Les outils, connaissances et méthodes à développer sont relatifs à la fois aux métiers qui interviennent dans la conception, mais aussi au processus de conception lui-même. En d'autres termes, des recherches doivent être menées au carrefour entre des vues métier portées sur le produit et à faire « coopérer » pour faire évoluer la définition du produit et converger vers une solution répondant au mieux au besoin exprimé. Ces recherches doivent alors fournir des connaissances relatives au processus de conception, nécessaires pour la définition de méthodologie pour l'intégration des vues métiers dans la conception du produit. Ces nouvelles méthodologies proposées pour favoriser l'intégration servent alors de support d'élaboration de nouveaux outils d'aide à la conception. Ces objectifs de recherche exprimés en termes de nouvelles connaissances et méthodologies ainsi que de nouveaux outils relatifs au processus de conception situés au carrefour de différents métiers sont illustrés à la figure 7. La recherche suppose alors l'activité de conception comme une activité sociale entre des acteurs de différents métiers.

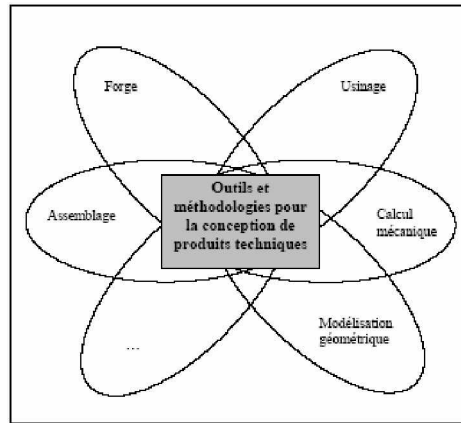


Figure 7 : Le processus de conception vu comme une activité sociale entre des acteurs de différents métiers

D'une part, il est nécessaire de faire avancer chaque métier indépendamment dans les connaissances qui lui sont relatives, mais en tenant compte de leur usage dans un contexte global de conception. Ceci conduit à fournir de nouveaux modèles pour des outils logiciels ou méthodologiques de chaque métier. Par exemple, en forgeage, des outils de simulation basés sur la méthode des éléments finis (MEF) sont difficiles à mettre en oeuvre et visent à valider une conception plutôt qu'à guider le concepteur dans ses choix. Le forgeron a donc besoin d'un outil de simulation rapide de l'estampage, basé sur des modèles simples et heuristiques, qui permettent de connaître rapidement le type de machine à utiliser, le nombre de formes intermédiaires, l'énergie nécessaire à la mise en forme d'un brut pour obtenir une pièce donnée. Ces informations permettent alors d'établir un devis dès le début de la conception. Si la forge semble le moyen de mise en forme le plus adapté, la conception doit alors tenir compte des connaissances qui lui sont relatives [MAR95].

Cet exemple illustre bien la nécessité de prendre en compte l'usage pour définir l'outil. Le contexte de la conception doit être considéré en termes de temps, de coût dépensé par l'outil par rapport à la pertinence des informations qu'il délivre relativement au besoin du concepteur.

D'autre part, la communication entre les différents métiers doit être favorisée. Cependant, une compréhension et une connaissance fine des processus de conception sont nécessaires pour modéliser les interactions entre métiers. Cette approche sociotechnique des processus de conception, a conduit à plusieurs travaux. Mer [MER98] et Blanco [BLA98] ont étudié les processus de conception pour à la fois caractériser le processus de conception et la naissance du produit. Mer [MER98] propose le concept de monde comme grille d'analyse du processus de conception, où un monde est caractérisé par des connaissances, des logiques d'action et des échelles de grandeur particulières. Blanco caractérise l'émergence du produit dans la conception distribuée et la modélise à travers les notions de critères, évaluation, registre de référence, conjecture et

contrainte. *Laureillard* propose dans [LAU97] d'analyser l'intégration de la filière forge dans le processus de conception à partir de travaux sur le terrain industriel (chez un constructeur automobile). L'ensemble de ces travaux souligne la nécessité d'instrumenter la coordination entre les différents acteurs de la conception à l'aide d'outils logiciels ou méthodologiques spécifiques.

Ces deux axes de recherche ne doivent cependant pas être indépendants. Les outils, informatiques ou méthodologiques, pour la conception doivent être conçus en tenant compte de l'organisation de la conception [BOU96]. Les outils doivent alors être élaborés en tenant compte des besoins du monde (au sens de Mer) auquel ils sont relatifs. Ce monde doit être également envisagé à travers ses relations avec les autres mondes. L'outil conçu doit donc être adapté à un utilisateur et son environnement. Le rôle qu'on lui donne va dépendre de la place qu'il tient dans le processus de conception.

Chapitre 2

L'intégration de la simulation numérique dans la conception

L'apparition de l'informatique et des ordinateurs, qui a ouvert la voie à la CAO, et a permis à la simulation numérique de connaître un fort développement, a profondément changé les méthodes de travail et le processus de développement dans l'industrie. La nature des essais effectués a évolué : il y a des essais que l'on faisait et que l'on ne fait plus, parce que la simulation numérique répond au même besoin, et à moindre coût. Réciproquement, de nouveaux essais, plus quantitatifs et mieux instrumentés sont nécessaires pour fournir les données nécessaires à la simulation numérique.

La simulation numérique devient donc un outil d'analyse qui s'intègre de plus en plus dans les entreprises. C'est à partir de ce constat qu'est apparue la problématique d'intégration de la simulation numérique en conception, problématique à laquelle ce chapitre tente d'apporter des réponses à travers l'étude des nombreuses recherches réalisées dans ce domaine depuis plusieurs années.

Ce chapitre se propose pour cela de définir le rôle de la simulation numérique dans un processus industriel et d'étudier et d'analyser les travaux selon un double point de vue : un premier dédié au développement d'outils spécifiques au métier de la simulation ; un deuxième centré sur la construction d'environnements élargis support d'une coopération entre les activités de calcul et de conception.

1. Rôle de la simulation dans le processus de conception

Avant de pouvoir lancer la fabrication d'un produit industriel, une phase de *développement* est nécessaire. Celle-ci comporte une phase de conception au cours de laquelle on définit de façon détaillée le produit à fabriquer, et une phase *d'industrialisation* consistant à concevoir, fabriquer et mettre en place les moyens de production associés.

Le produit en question doit répondre à des spécifications précises établies à la suite d'une analyse du marché : celles-ci comportent des objectifs de performances, de qualité, de prix de revient et de délais de mise sur le marché, des concepts que nous avons développés dans le chapitre I. Seulement ces objectifs sont à chaque fois plus ambitieux et pour les atteindre, les ingénieurs de développement ne peuvent se contenter de faire appel à l'expérience qu'ils ont accumulée au cours des projets précédents, surtout si le produit à développer intègre des innovations. Ils ne peuvent pas non plus attendre la phase de réalisation pour constater que les premiers produits fabriqués ne répondent pas aux spécifications attendues. Ils doivent faire appel à la simulation.

Simulation est à comprendre ici au sens large : il peut s'agir d'essais sur des prototypes, ou de calculs (auquel cas on parlera de simulation numérique), ou bien de la combinaison des deux. On sait que les constructeurs automobiles ne lancent pas un nouveau véhicule sur le marché sans l'avoir soumis à une série bien définie d'essais, chacun destiné à vérifier la performance du nouveau produit en freinage, en choc, en acoustique, en consommation, en dépollution,... On peut dire que chacun de ces essais répond à une question bien précise. Si ces essais sont effectués sur les premiers véhicules de série, on ne peut certainement pas parler de simulation. Mais à ce stade, il est évidemment un peu tard pour remédier à des insuffisances éventuelles.

Pour tester un nouveau châssis, ou le comportement du bloc avant en choc, il n'est pas nécessaire d'attendre que le véhicule soit complètement défini. Des essais peuvent être faits sur un prototype dont la représentativité dépendra du phénomène étudié. On pourra donc parler de simulation, d'autant plus si au lieu d'être faits sur route ou sur piste, les essais sont effectués au banc d'essai. On imagine aisément que le processus de développement d'un nouveau véhicule va être jalonné par de multiples vérifications de complexité et de représentativité croissante, et les constructeurs automobiles ont effectivement mis toute leur expérience et tout leur savoir-faire dans la définition de ces jalons. On pourrait généraliser à d'autres industries : les constructeurs aéronautiques notamment sont dans la même situation. Cependant, on constate que le recours à la simulation numérique n'est pas aussi systématique qu'il

pourrait l'être et que les outils disponibles ne sont pas utilisés à leur plein rendement. Les explications sont à notre avis d'origines diverses.

En premier lieu, il peut y avoir un problème de culture ; celle des ingénieurs de l'automobile, est très centrée sur les essais, que certains considèrent comme le juge indiscutable. D'un côté, ils ont tort, dans la mesure où l'essai n'est pas toujours représentatif de la situation de vie envisagée. Par ailleurs le prototype qui a été testé peut ne pas être en conformité avec celui qui était spécifié. Mais, d'un autre côté, si l'essai et le prototype sont représentatifs, il est vrai qu'ils constituent un moyen de vérification précieux, et un contrôle pertinent de la qualité des simulations effectuées antérieurement. Contrôler la qualité des simulations (calcul et/ou CAO), n'est en effet pas un problème complètement résolu aujourd'hui.

Si un ingénieur a des doutes sur les résultats d'essais qui lui sont présentés, il peut toujours aller jeter un coup d'œil au banc d'essai ou au prototype sur lequel l'essai a été effectué. Il faudrait qu'il puisse faire la même chose au niveau des calculs. Une véritable gestion de configuration devrait ainsi être mise en œuvre de façon à pouvoir retrouver toutes les caractéristiques des modèles de calcul qui ont été mis en œuvre. Des techniques d'assurance qualité doivent donner la garantie que les méthodologies prévues ont bien été employées, comme pour les essais. Il faut donc développer soigneusement les méthodologies de simulation, c'est à dire la modélisation.

Les modélisateurs doivent s'attacher à bien poser le problème, c'est à dire la question à laquelle la simulation numérique est censée apporter une réponse, et à bien définir la succession des opérations à mettre en œuvre au préalable. On ne peut pas se satisfaire de la situation actuelle où, trop fréquemment, deux équipes qui ont pourtant le même outil, obtiennent deux résultats différents. Une telle situation génère des essais de vérification qui sont de simples garde-fous. Plus généralement, il faut arriver à mettre en place une "filiale numérique" robuste et maîtrisée. Si nous prenons l'exemple de la maquette numérique du projet, qui est un élément essentiel de la filiale numérique, comment garantir que toutes les pièces sont bien définies en CAO, qu'elles sont bien reliées à la structure du véhicule par les supports nécessaires, et qu'elles sont bien montables ? Là aussi, le montage d'un prototype est un garde-fou contre les anomalies éventuelles qui pourraient autrement persister pendant des mois dans la maquette numérique, sans que personne ne les détecte.

Une autre explication du recours insuffisamment systématique à la simulation est que le processus de conception ne tient pas encore suffisamment compte de l'existence de la simulation numérique. Le processus principal est encore aujourd'hui jalonné par des tranches prototypes, de moins en moins nombreuses il est vrai. La simulation numérique fait actuellement partie d'un processus secondaire qui se raccroche au processus principal par quelques points de rendez-vous (jalons). La pression sur les délais ("time to market"), de même que l'arrivée, parmi les décideurs, d'ingénieurs ayant démarré leur carrière dans les équipes calcul, contribue à un changement progressif de cet état de fait.

Au cours du bref historique qui va suivre, nous exposons un panorama de la simulation en mécanique d'après R. Maria-Sube & B. Mercier [Sube 00 & al], plus particulièrement axé sur l'automobile, qui mettra en évidence les principales avancées et les principales lacunes, qui sont d'ordre méthodologique. Il s'agit d'optimiser le processus de développement tout en laissant une large place à la simulation.

1.1 Bref historique de la simulation en mécanique

Il est intéressant de noter que la simulation s'est développée en priorité là où il y avait des questions de sécurité, ce qui explique les efforts consacrés au développement de la simulation numérique en mécanique des structures dans l'automobile, pour le dimensionnement des pièces de sécurité, et dans l'aéronautique pour la structure de l'avion. On comprend également les efforts déployés pour maîtriser l'aérodynamique en aéronautique, car celle-ci conditionne la stabilité de l'avion et les qualités de vol.

Même si la simulation numérique intervient, en automobile, dans de nombreux autres disciplines (comme par exemple l'électromagnétisme), nous nous limiterons dans cette partie à la simulation en mécanique.

En ce qui concerne la simulation, les anglo-saxons distinguent deux périodes : BC ("Before Computer") et AC ("After Computer"). Rappelons que le premier ordinateur a été mis au point à Los Alamos en 1948.

1.1.1 Période BC

Comment faisait-on avant les ordinateurs ?

Les ingénieurs faisaient appel à la RDM (Résistance Des Matériaux) pour dimensionner leurs structures, puis le cas échéant à un essai de validation après une phase de dessin et de prototypage. Il est intéressant de noter que la RDM est ce que l'on peut faire de mieux quand on dispose de la modélisation physique (" suis-je en domaine élastique ou plastique ? y a-t-il un risque de fatigue ou de fluage ? ") et de la modélisation mathématique (" voilà les équations aux dérivées partielles intervenant dans le modèle ") mais pas de la modélisation numérique. La RDM donne un catalogue d'exemples où la solution du modèle mathématique est calculable à la main, et l'art de l'ingénieur consiste à choisir dans ce catalogue l'exemple le plus adéquat.

Ce n'est pas parce qu'il n'y a pas d'ordinateurs que l'on ne fait pas de calculs (la génération actuelle l'a sans doute oublié). On calcule par exemple les profils de came à utiliser pour obtenir telle ou telle loi de levée des soupapes, la forme des dents des engrenages de boîte de vitesse, ou bien le débattement du train de suspension. On utilise beaucoup les abaques. Un exemple typique sont les épures de train, qui sont des abaques, fournies par un calcul de cinématique et donnant notamment les deux angles de pince et de carrossage du plan de roue en fonction du débattement du train. A ce stade, calcul et expérimentation sont très proches, le lien étant assuré par des connaissances approfondies en Mécanique et en Physique de la part des acteurs de ces 2 activités ; on apporte beaucoup de soins à bien poser les problèmes, à s'assurer de l'adéquation du

modèle à la question posée ; la méthodologie prime sur la mise en oeuvre des outils [TIMO 54] et [PRANDTL 52].

L'expérimentation de son côté suit des règles strictes :

- Bien poser le problème (il ne peut y avoir de modèle pertinent sans l'intelligence globale et complète de la question posée),
- Puis construire un modèle représentatif juste nécessaire,
- Eventuellement démarche itérative entre la définition du problème et la construction du modèle, pour trouver le bon compromis entre l'état de l'art et la mise en forme de la question)
- Maîtriser la reproductibilité des résultats,
- Maîtriser la sensibilité les relations de cause à effet entre résultats et paramètres d'entrée, etc...

1.1.2 Période AC : le démarrage de la simulation numérique.

Puis vient l'essor de l'informatique, de l'analyse numérique ; avec l'avènement des éléments finis, calcul et expérimentation se distancient. L'attention accordée à bien poser le problème se poursuit cependant et même s'amplifie lorsque les mathématiciens s'attachent à démontrer l'existence et l'unicité des solutions qu'ils recherchent.

Le développement de la simulation numérique dans les laboratoires de recherches fait l'objet de nombreuses publications. Parallèlement, celle-ci apparaît dans l'industrie. Les bureaux de calcul se multiplient dans les industries de la Mécanique : l'aéronautique, d'abord, puis le nucléaire, le génie civil, les constructeurs automobiles, le ferroviaire, etc...

Mais les premiers logiciels sont difficiles à utiliser et demandent un grand effort de formation et d'apprentissage. Les ingénieurs en modélisation deviennent essentiellement des numériciens, œuvre des experts de la modélisation numérique. Peut-être y a-t-il aussi chez certains l'idée que le calcul va supplanter l'expérimentation ? *Toujours est-il que les équipes de calcul se séparent des expérimentateurs, accentuant ainsi le fossé entre deux métiers qui ne devraient constituer qu'un, unis par la même démarche, car les principes de base sont les mêmes.* La conséquence de cette séparation est une mise en concurrence.

Au lieu de mettre en place une démarche combinant calculs et essais, qui permettrait de tirer de chacun ce qu'il peut apporter de meilleur, on assiste souvent au lancement de deux démarches en parallèle : " que le meilleur gagne !".

On voit ainsi tel ou tel responsable de bureau d'études affirmer qu'il ne fera confiance au calcul que lorsque celui-ci aura réussi à reproduire l'essai. Il faut dire que les délais de mise en œuvre du calcul sur des pièces complexes comme

la culasse, ou bien sur des assemblages comme une caisse automobile ou un bloc avant sont prohibitifs.

Nous sommes dans les années quatre-vingts, et le calcul aux éléments finis réussit à s'imposer dans le dimensionnement des pièces mécaniques comme les bielles, les triangles de suspension, les vilebrequins. En mécanique des fluides, la simulation numérique 1D du système d'admission permet d'obtenir une évaluation du remplissage du moteur ; la question est : "Quelle est la masse des gaz frais admise à chaque cycle moteur, en fonction du régime ? ". Le modèle mathématique utilisé est le modèle d'EULER compressible. La mise en œuvre de ce modèle nécessite de connaître la perméabilité des soupapes, que l'on doit évaluer expérimentalement, ce qui est gênant : ou bien on utilise les perméabilités du moteur précédent, ou bien on doit attendre d'avoir fabriqué une maquette et d'avoir procédé à des mesures de perte de charge.

1.2 La maîtrise des délais de mise en œuvre

Un élément très important du développement de la simulation numérique a été l'accroissement de la puissance des ordinateurs combinée avec la baisse des prix. Un tel accroissement a conduit au développement prodigieux de l'informatique, des réseaux, des logiciels, et des bases de données.

En ce qui concerne la simulation numérique, cet accroissement de puissance a ouvert la voie à des calculs plus finement maillés et donc plus précis. Le développement des écrans graphiques avec une capacité d'affichage de plus en plus rapide a permis de développer non seulement la CAO mais aussi de nombreux outils logiciels de pré et post-traitements des calculs. Pré-traitement pour mailler la géométrie CAO et définir en mode graphique les conditions aux limites du calcul et post traitement pour visualiser les résultats, avec animation le cas échéant.

L'ensemble de ces outils a permis de mettre en place des environnements de calcul efficaces et de réduire de façon considérable les délais de mise en œuvre des calculs. C'était très important car il ne sert à rien de lancer des simulations numériques sophistiquées pour choisir entre deux conceptions possibles si le résultat de ces simulations arrive après la prise de décision. En 90-92, le délai pour obtenir le maillage d'une caisse automobile, qui n'est pas une pièce, mais un assemblage complexe d'une centaine de pièces embouties, était de l'ordre de 12 mois, ce délai étant compté à partir du moment où le modèle CAO 3D de la caisse était disponible. Le délai de maillage d'une culasse était à peu près du même ordre. Ces délais ont été divisés par 4 en quelques années grâce aux progrès des logiciels mais aussi des méthodologies de mise en œuvre.

On a constaté par exemple qu'il n'était pas nécessaire de reproduire dans la géométrie de calcul tous les détails (congés, bossages,...) de la géométrie qui va être fabriquée, et que pour être efficace le maillage devait soigneusement les ignorer. On a également constaté que le niveau de détail à intégrer dans la

simulation n'était pas le même en phase d'avant-projet ou en phase de conception détaillée.

Le gain étant que dans l'évolution des processus de développement de produit, ce qui a permis d'éliminer les itérations sur les étapes fabrication et essai qui sont les plus coûteuses. Mais, pour parler d'un processus " bon du premier coup ", le problème persiste toujours au niveau des itérations sur les modèles virtuels.

Encore aujourd'hui, et restant toujours dans l'industrie automobile par exemple, le dimensionnement de la ligne d'échappement est trop rarement " bon du premier coup ". La liste des résultats obtenus est malgré tout impressionnante. La simulation numérique a été mise en œuvre avec succès pour le dimensionnement mécanique de la caisse, des pièces du train, du moteur et de la boîte de vitesse, pour l'analyse modale de la caisse (évaluation des premiers modes propres de torsion, flexion,...) et du groupe moto-propulseur. Dans le domaine aérodynamique aussi, on sait aujourd'hui mettre en œuvre efficacement le calcul pour évaluer les pertes de charge des différents conduits d'aération habitacle ou d'admission moteur, voire les perméabilités des soupapes, ou le remplissage du moteur. De beaux succès, fortement médiatisés, ont été obtenus dans le domaine du crash.

1.3 Les acteurs et leurs limites

Malgré les progrès indubitables des ordinateurs, des logiciels et des méthodologies, force est de constater que tous ces outils permettant de mettre en œuvre la simulation numérique sont, comme nous l'avons déjà dit plus haut, loin d'être utilisés à leur plein rendement. Il y a d'abord un problème de qualification : le calcul peut-il être mis en œuvre par des techniciens ? Ou bien doit-il l'être par des ingénieurs ? Les ingénieurs eux-mêmes sont-ils qualifiés ?

Le choix entre technicien ou ingénieur dépend du type de calcul, et de la facilité d'interprétation de ses résultats. Ainsi, l'analyse élastique en statique linéaire peut facilement être mise en œuvre par des techniciens, de même que les calculs d'aérodynamique stationnaire. Les techniciens peuvent également prendre en charge les calculs de modes propres, et même les calculs de crash. Dans ce dernier cas, les résultats sont assez visuels et intuitifs, mais il s'agit de calculs dynamiques non linéaires assez délicats, dont l'interprétation est du ressort d'un ingénieur mécanicien de haut niveau.

Plus généralement, pour les situations réclamant au niveau de l'interprétation une bonne connaissance fine de la mécanique ou de la physique :

- situations faisant intervenir des mouvements de rotation (ex : simulation du comportement routier), des forces d'inertie (exemple calcul de la déformation du vilebrequin en rotation) ou bien des variables complexes (amplitude et phase en acoustique ou en électromagnétisme),
- situations où la simulation s'appuie sur une démarche combinée calculs-essais, la mise en œuvre de la simulation numérique s'adresse plutôt à des ingénieurs. En tout état de cause, la prise en main du

calcul par un technicien nécessite la disponibilité d'un guide méthodologique bien fait avec des catalogues d'exemples bien décortiqués.

Dans beaucoup d'autres situations (par exemple les calculs de bruit de roulement ou de trépidations, la simulation des démarrages brutaux, les calculs de tenue mécanique de la culasse : on pourrait citer des dizaines d'autres exemples) la maturité de la simulation numérique est loin d'être acquise. Des méthodologies ont pu être mises au point et même mises en œuvre par des ingénieurs, nous citons par exemple [Mellon 00]. Mais le manque de guides méthodologiques fait que celles-ci ne survivent pas toujours à la mobilité des hommes qui les ont développées.

Au stade actuel, le besoin des méthodologies pour organiser et gérer le processus de simulation en conception est prépondérant, la formation de l'acteur de simulation et les outils dont il dispose lui permettent-ils de raisonner à un niveau suffisamment macroscopique ? Quelles sont les fonctions assurées par cette pièce ? Quelle forme générale doit-elle avoir ? N'est-il pas plutôt conduit à travailler au niveau du détail ? Saura-t-il gérer simultanément les relations avec son homologue du bureau des méthodes et le lien avec un modèle de CAO simple adapté au calcul ? Ce n'est en tous cas pas le cas aujourd'hui.

1.4 Maîtrise de la représentativité des modèles

Un autre élément à prendre en compte est qu'il faut limiter la complexité des modèles au juste nécessaire. Il va sans dire qu'un modèle complexe est lourd à mettre en œuvre : le nombre de paramètres à identifier au préalable est en général élevé, ce qui fait que le temps de préparation du calcul est élevé, voire le temps de calcul lui-même. Comme pour les essais, il faudrait adapter la simulation numérique à la question posée : par exemple en aérodynamique interne moteur, le modèle à utiliser n'est pas le même selon que l'on veut :

- évaluer la masse des gaz frais admis à chaque cycle moteur,
- évaluer la perméabilité des soupapes
- déterminer le mouvement de tourbillon des gaz dans la chambre au cours de l'admission.

Mais l'amélioration de la performance des matériels informatiques ouvre largement la voie à des modèles de plus en plus complexes et la qualité des représentations graphiques des résultats le font paraître plus vrais que nature. La confiance dans les résultats obtenus augmente, mais parfois de façon non justifiée, car dans certains cas on reste dans le qualitatif.

R. Maria-Sube & B. Mercier précisent à la Journée d'étude SIA-AFM sur « La Simulation, outil de Maîtrise des risques du Développement » que les

simulations multidimensionnelles effectuées pouvaient tout au plus donner des résultats locaux et qualitatifs permettant par exemple de comprendre ce qui se passe dans telle ou telle phase ou d'analyser les paramètres qui peuvent influencer sur la composition des produits de combustion. Si les acteurs de la simulation numérique attachent toujours autant d'importance à bien poser le problème, celui-ci ne correspond pas toujours au vrai problème. Mais où définit-on le vrai problème ? Au bureau d'étude où la perception du produit est la plus globale ? Aux essais où la perception de la physique est plus concrète ? Dans les services après-vente qui reçoivent les plaintes remontées des clients ?

Un autre exemple est le comportement routier : beaucoup d'énergie a été dépensée au développement de modèles sophistiqués permettant de prendre en compte l'élasticité des pièces. On voulait en effet retrouver par le calcul un certain nombre de phénomènes bien connus des essayeurs comme l'influence de la déformation du bras de suspension dans les essieux à bras tirés. Mais qu'attendait-on de ce type de calcul ? Un élément de choix entre un essieu à bras tiré et un essieu multi-bras ? S'il s'agissait d'optimiser la loi de commande du système d'antiblocage de roues, ou bien du contrôle de stabilité, ne suffisait-il pas de supposer que les pièces étaient rigides ?

On ne saurait trop insister sur

- la nécessité de bien poser la question précise à laquelle la simulation est censée apporter une réponse
- l'importance d'ajuster la représentativité du modèle à la question posée en sachant que les modèles plus simples sont évidemment plus faciles à mettre en œuvre.

1.5 Impact de la simulation sur les organisations.

Au niveau organisationnel, justement, où faut-il placer la simulation numérique ? Avec le développement de la CAO et l'apparition du dogme de l'intégration CAO-calcul. On parle alors de "calcul transparent" : il faudrait que le calcul se fasse en lançant une commande la plus simple possible. On veut que le maillage soit complètement automatique ("c'est une opération sans valeur ajoutée !" disent certains), et même cacher le maillage. Ceci est peut-être possible lorsque le calcul est complètement normalisé, par exemple lorsque l'on calcule des contraintes en élastique linéaire, mais dans les cas plus subtils, ne faut-il pas piloter cette opération avec soin ?

Ne faut-il pas examiner le maillage pour comprendre ce que l'on calcule : "combien y a-t-il de points de soudure ? Comment sont-ils modélisés ?" ; Le simple fait de voir le maillage apporte des éléments de réponse à ces interrogations légitimes.

Les opérations de calcul les plus courantes sont donc regroupées au bureau d'études, ce qui est bien. Des équipes plus spécialisées prennent en charge les calculs plus "haut de gamme". C'est inévitable, et c'est le cas par exemple pour le crash et pour la vibro-acoustique. Cela pose tout de même des problèmes. Comment être sûr que la géométrie calculée est celle qui sera fabriquée ?

Le projet évolue constamment, pour des raisons variées, et le prototype qui va être fabriqué peut même s'écarter ici ou là du plan. Si les résultats d'essais sont contradictoires avec les prédictions du calcul, il faudrait prendre le temps d'analyser les raisons. Mais le projet a déjà évolué et donne souvent la priorité au calcul de la nouvelle configuration. La question de savoir si ces équipes spécialisées doivent être plutôt à proximité du bureau d'études ou plutôt à proximité des essais n'est donc pas évidente à trancher. De toutes façons, il est clair que la communication entre tous les acteurs du projet doit être de bonne qualité. Le système d'information de l'entreprise doit être organisé en conséquence.

En résumé, le constat que nous faisons est que malgré toutes les avancées qui ont été faites, on est encore loin d'une véritable filière numérique de la conception. Un gros travail méthodologique reste à effectuer pour pouvoir tirer le meilleur parti de la simulation, celle-ci étant vue comme une combinaison optimisée de simulation numérique et d'essais.

2. L'intégration de la simulation numérique dans la conception

Avant de rentrer dans le détail des travaux réalisés autour du domaine de l'intégration de la simulation numérique en conception, et comme nous venons de le voir, une première constatation s'impose de l'évolution rapide et constante du concept de maquette numérique qui est apparu ces dernières années. Celui-ci, de plus en plus utilisé dans les organisations industrielles, fait largement appel aux représentations numériques des informations mises en oeuvre au cours d'un processus de conception. De plus l'évolution des moyens informatiques favorise le développement de la simulation par des méthodes numériques, et notamment la réalisation des analyses mécaniques par la MEF ou encore l'utilisation de la méthode des volumes finis ou des éléments discrets pour d'autres types de simulation.

Dans ce cadre, la simulation du comportement mécanique des produits est possible avant que le produit n'existe grâce à l'utilisation de maquettes physiques ou de modèles de calcul. Ces modèles de calcul peuvent être soit des modèles basés sur des méthodes de calcul analytiques (théorie des poutres ou des plaques par exemple) ou des abaques, soit des modèles numériques utilisant des méthodes de discrétisation (comme la méthode des éléments finis ou la méthode des éléments frontières par exemple).

Les premiers travaux de recherche initiés sur l'intégration du calcul de structures dans la conception sont apparus au milieu des années 80. Shepard & al, proposent dès lors un environnement permettant de réaliser une idéalisation de géométrie en vue du calcul de façon fiable et favorisant le contrôle de l'analyse par la formalisation du processus de calcul ([SHE90a], [SHE90b], [SHE94]). Le passage d'un modèle géométrique utilisé en conception ou du

produit existant à un support géométrique pour le maillage en vue d'une utilisation par la méthode des éléments finis (MEF) se fait automatiquement. Cette manipulation géométrique est effectuée à partir d'un système expert qui met en oeuvre des règles relatives au produit que l'on cherche à idéaliser. D'autres travaux se sont intéressés à cette thématique, nous essayons, dans ce qui suit, de les positionner par rapport à notre travail pour affiner notre problématique

2.1 Etat de l'art du déploiement d'outils d'aide à la simulation en conception

Nombre de travaux de recherche se concentrent sur le lien entre la conception et le calcul. Différentes solutions sont proposées pour supporter les activités de simulation numérique dans la conception, solutions tournées vers une amélioration de la performance et de l'efficacité des outils de simulation, afin de répondre à plusieurs objectifs :

- Intégrer la simulation au plus tôt dans le processus de conception, donc en amont dans le développement du produit,
- Améliorer la fluidité du transfert des informations entre les concepteurs et les analystes, afin de réduire les temps de calcul,
- Améliorer la qualité des simulations,
- Améliorer la coopération entre les acteurs, concepteurs et analystes,
- Stabiliser les processus de simulation numérique dans les entreprises,

Pour satisfaire à ces objectifs, certains travaux de recherche s'intéressent à la construction et la mise à disposition des concepteurs d'outils pour la réalisation de tâches de simulation numérique, en se basant sur une modélisation de l'activité de simulation numérique dans la conception. Ils visent à répondre à différents objectifs, dont le principal consiste en un passage d'un modèle utilisé au sein du bureau d'étude (généralement restreint au seul modèle géométrique, ou modèle CAO) en une représentation dédiée au calcul. Ces travaux supposent que les connaissances sont des savoirs ou des savoir-faire qui peuvent être formalisés et exprimés sous forme de règles.

Ainsi, dans le milieu des années 80, les applications en intelligence artificielle ont été le sujet de nombreux travaux de recherche, permettant de réaliser diverses études sur la définition de structures autorisant des tâches de discrétisation automatique des géométries dans le but d'obtenir des simulations fiables et répétables.

Kurowski constate cependant, dans [KUR95], que de bons ingénieurs peuvent fournir de mauvaises analyses. Il explique cela au travers de différents dysfonctionnements, comme le fait que l'analyse par la Méthode des Eléments Finis (MEF) soit de plus en plus envisagée comme une simple extension des modélisateurs géométriques, de par l'accroissement de l'automatisation du passage à une géométrie idéalisée pour le calcul.

Ce modèle géométrique propre n'est donc plus considéré comme tel, mais comme un modèle géométrique maillé sur lequel sont mises en place des

conditions aux limites. Toutefois, l'activité de modélisation pour le calcul est plus basée sur la connaissance du comportement mécanique du produit que sur des critères géométriques. Les travaux proposés par Kurowski dans [KUR95] préconisent alors deux approches possibles :

- Fournir des outils méthodologiques au concepteur afin qu'il maîtrise les hypothèses comportementales nécessaires à la réalisation du calcul,
- Fournir une expérience en calcul au non-spécialiste, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un outil informatique pour le calcul.

Ces deux approches requièrent une formalisation de la démarche de modélisation nécessaire à l'identification des hypothèses et à la maîtrise des erreurs. Elles sont également centrées sur la mise à disposition d'outils pour le concepteur, acteur non spécialiste du domaine. Cette proposition peut alors causer des difficultés importantes dans la réalisation efficace des simulations, auxquelles quelques auteurs tentent d'apporter des réponses concrètes.

Certains, comme O'bara et al, dans [O'bara & al. 02], partent du principe que l'application de procédures actuelles de simulation numérique par les concepteurs peut être efficace uniquement si elles sont automatisées et si la quantité des résultats produits répond aux paramètres recherchés. Il est alors montré la nécessité d'utiliser des procédures pour la génération automatique de maillage, procédures qui interagissent directement avec la représentation géométrique du domaine. Les auteurs proposent pour cela un système de management d'attributs, système qui permet de supporter la spécification d'informations relatives à un domaine de définition particulier et utiles pour réaliser une analyse par simulation numérique. Les informations manipulées par ce système intègrent des tenseurs d'ordre varié qui sont utiles pour spécifier les attributs d'une analyse, comme les propriétés matériau, les chargements, les conditions limites, les données additionnelles utilisées pour l'analyse, les références à d'autres attributs ou modèles... Ce système supporte les interdépendances entre les attributs ainsi que leurs possibles variations, tout comme les associations avec les entités géométriques qui constituent le domaine géométrique à analyser. De plus, comme les informations sont couplées avec les entités du modèle au travers des spécifications d'attributs, le système est utilisé pour capitaliser les informations nécessaires au contrôle du processus de discrétisation du modèle géométrique. Ainsi, différents processus de discrétisation peuvent être utilisés et automatiquement appliqués pour fournir un modèle de simulation adapté au besoin.

Dans le même sens, pour aider les concepteurs dans leurs tâches de simulation, Fine et al, décrivent, dans [Fine & al. 00], un processus de génération automatique de modèles d'analyse de type Eléments Finis (EF) adaptés à la géométrie du produit et au besoin de la simulation numérique. L'approche qu'ils présentent part du principe que pour améliorer l'automatisation du processus d'adaptation du modèle EF, il est nécessaire d'assurer que toutes les transformations réalisées ne modifient pas de façon significative les résultats de l'analyse. Ils appuient alors la nécessité de disposer d'opérateurs d'adaptation et

d'idéalisation non seulement gérés par les descriptions géométriques ou topologiques du produit, mais également par des données reliées aux besoins de l'analyse (comme les matériaux, les sollicitations, les conditions aux limites...). Ces données de simulation sont élaborées et organisées au travers de critères spécifiques (critères mécaniques, thermiques...) rattachés au modèle géométrique.

Une approche dite a posteriori d'estimation des erreurs du modèle en comparaison des critères définis implique une procédure automatique de réadaptation du modèle en fonction de ces critères, jusqu'à obtenir un modèle adapté. De tels opérateurs permettent alors une large automatisation des simplifications géométriques et une idéalisation du processus de génération de modèles maillés, assurant que la nouvelle géométrie est plus acceptable pour les besoins de la simulation numérique.

Sur les travaux des concepteurs concernant la génération d'un modèle géométrique dédié au calcul, une première constatation qui justifie la forte tendance en l'automatisation des tâches. Ainsi, les outils sont mis à la disposition des concepteurs, qui n'interviennent pas ou peu dans le processus puisque les tâches réalisées automatiquement par ces mêmes outils.

Ensuite, ces travaux montrent l'importance de la prise en compte de critères spécifiques à l'analyse (mécaniques, thermiques...) dans le processus de génération automatique d'un modèle de calcul. La géométrie ne constitue en effet pas un critère suffisant pour la création d'un modèle de calcul adapté à la simulation, ne pouvant à elle seule garantir l'efficacité du processus d'analyse dans sa globalité. La prise en compte de ces critères d'analyse se réalise par leur traduction sous une forme analytique, permettant ainsi de disposer, en plus d'un processus d'idéalisation et de discrétisation de la géométrie, d'un processus analytique pour la création des modèles d'analyse.

Toujours en relation avec les travaux de développement d'outils de simulation pour le concepteur, Shephard et al, proposent dans [Shephard & al. 90] une approche un peu différente de celles définies précédemment. Ainsi, contrairement aux autres auteurs, la démarche de génération d'un modèle pour l'analyse présentée est répartie sur deux niveaux : le premier correspond à une idéalisation de la géométrie utilisée pour l'analyse, suivi d'un deuxième centré sur une génération automatique de maillage de cette géométrie idéalisée.

La première approche de Shephard et al. consiste en la mise en place d'un environnement permettant de réaliser une idéalisation de la géométrie en vue d'une simulation fiable favorisant le contrôle de l'analyse par la formalisation du processus de calcul. Le passage d'un modèle géométrique utilisé en conception, ou du produit existant, à un support géométrique pour le maillage en vue d'une utilisation par la Méthode des Eléments Finis (MEF) se fait automatiquement. Cette manipulation géométrique est effectuée à partir d'un système expert qui met en oeuvre des règles relatives au produit que l'on cherche à idéaliser. Pour réaliser cette automatisation, Shephard et al modélisent la démarche d'analyse comme la succession d'étapes d'idéalisation.

Dans le même sens, Turkiyyah et Fenves, dans [TUR96], proposent une aide à la construction de ce modèle dédié au calcul et à l'interprétation des résultats par la mise en évidence d'un but de simulation de haut-niveau (par opposition aux pré- et post-processeurs qui ne demandent qu'une description de bas niveau), qui définit clairement et explicitement les objectifs de cette étude. Cet objectif ne paraît cependant pas suffisant pour détailler la création d'un modèle de calcul. Ils complètent alors leur approche en associant à cet objectif une représentation explicite de l'ensemble des hypothèses réalisées au cours du calcul. Ces informations sont alors réunies au sein d'une base de données regroupant l'ensemble des calculs, base de données utilisée pour assister tout acteur dans la mise en place, l'interprétation et la recréation des modèles dédiés au calcul.

L'importance de l'objectif de l'analyse et des paramètres relatifs aux hypothèses simplificatrices pour décrire le processus d'idéalisation à suivre est soulignée lors de l'utilisation de la simulation numérique par des concepteurs, non-spécialistes du calcul. Cela étant, aucun élément n'est fourni quant aux paramètres utilisés pour traduire l'objectif de l'analyse et les mettre en oeuvre dans les règles du système expert.

Shephard, dans [Shephard & al. 90], actualisé dans [Shephard 00], présente le deuxième niveau de génération de modèles de calcul, au travers d'un environnement spécifique de contrôle et de génération automatique de maillage à partir de géométries idéalisées. Cet environnement, appelé MEGA⁷, consiste en un ensemble d'outils qui supportent la génération et la modification automatique de maillages, directement depuis des modèles géométriques discrétisés de type solide.

L'auteur explique que le maillage automatique par éléments finis d'un modèle géométrique requiert plus qu'un simple algorithme de maillage de type triangulaire. Il propose un environnement spécifique utilisant des procédures de maillage paramétrables pour lier des structures de données particulières à des opérateurs de maillage.

Le processus automatique de génération de maillage constitue une succession d'opérations modifiant petit à petit l'état du modèle jusqu'à obtenir un maillage adapté et de qualité. Ce processus utilise des procédures pour générer automatiquement le maillage à partir d'un modèle géométrique, procédures disposées en couches et qui peuvent être adaptées pour générer des maillages contrôlés pour un large domaine de problèmes.

Comme le montre la grande quantité de travaux présentés ci-dessus, le point le plus développé pour la recherche sur l'intégration de la simulation numérique en conception concerne le passage des données de conception vers les outils de simulation numérique. L'idée directrice, quels que soient les auteurs, s'articule autour de la réalisation d'une idéalisation et d'une discrétisation automatique du modèle manipulé par les concepteurs en un modèle dédié au calcul. Comme les nombreux travaux l'ont démontré, l'utilisation de données d'analyse à caractère sémantique (matériau, comportement mécanique, sollicitations...) est nécessaire en complément des caractéristiques géométriques du produit, dans

le but de traduire le modèle de conception en un modèle d'analyse adapté au besoin. Ifaoui dans [Ifaoui & al. 02], confirment cette réflexion tout en allant encore un peu plus loin dans l'analyse. Ils précisent que *"pour apporter une amélioration dans les systèmes de conception actuels, il est nécessaire d'intégrer non pas des phases spécifiques du processus d'analyse, mais de considérer la démarche de calcul dans sa globalité, depuis l'identification d'un besoin de calcul au cours de la conception jusqu'à l'analyse des résultats et la validation des solutions de conception"*.

Ils rejoignent alors les travaux sur l'intégration du calcul en conception en essayant de spécifier les différentes étapes et entités participant au processus d'élaboration des calculs et en apportant une aide au concepteur.

Des solutions ont alors été proposées pour tenter de mettre en oeuvre de façon automatique les tâches de transformation du modèle de conception en un modèle d'analyse. Ces solutions sont basées, pour certaines, sur des processus analytiques, et pour d'autres, sur des systèmes experts définis à partir de règles d'expertise.

Il est important de constater que l'efficacité de ces travaux relatifs à l'intégration du calcul en conception implique une liaison à caractère unidirectionnel entre la conception et la simulation numérique. Ces travaux s'intéressent seulement au passage d'un modèle de conception à un modèle d'analyse, alors que le retour d'information, de l'analyse vers la conception, est peu pris en compte malgré son intérêt certain. S'assurer de la qualité des simulations par le contrôle de la construction du calcul est une étape essentielle, même si elle ne peut garantir un retour efficace des résultats vers la conception ni même une interprétation satisfaisante de ces résultats pour dresser une réponse adaptée aux besoins. Les travaux relatifs au projet européen FENET¹, même s'ils restent centrés sur le développement et l'intégration des technologies liées aux éléments finis, peuvent, par le biais des entreprises, apporter des réponses à cette problématique d'intégration du calcul en conception. Le projet européen Clockwork², dont les objectifs concernent le développement de connaissances et de technologies, support des apprentissages organisationnels et du management des connaissances, se rapproche des préoccupations liées au métier de la simulation numérique.

¹ MEGA, pour Meshing Environment for Geometry-based Analysis

En effet, derrière ces objectifs très généraux sont précisés trois axes spécifiques en rapport avec notre travail. Ceux-ci consistent, d'une part, à aider les acteurs à partager des modèles de simulation enrichis de connaissances métier, d'autre part, à développer un support pour la réutilisation des connaissances de modélisation et de simulation entre organisations, et enfin, à élaborer un support pour le partage de connaissances entre différentes entreprises.

Les travaux réalisés tout au long de ce projet sont intéressants à étudier car sûrement propices à répondre à certaines de nos attentes.

D'autres auteurs, dont Szabo et Kurowski ([Szabo 96], [Kurowski & Szabo 97]) fournissent des outils méthodologiques pour aider les concepteurs à contrôler les erreurs de modélisation afin de pouvoir interpréter les résultats. Ce contrôle des erreurs tout au long du processus d'analyse permet d'obtenir une simulation numérique de qualité, ce qui signifie dans un contexte de conception, qu'il s'agit de maîtriser l'écart entre les performances du produit réel et les résultats obtenus par le calcul. Ils proposent pour cela une approche systématique basée sur la décomposition des activités de simulation numérique en trois étapes, auxquelles sont associées des types d'hypothèses (figure 7). Les trois étapes identifiées sont définies au travers des hypothèses suivantes :

- le passage du système physique "réel" à un modèle théorique qui contient une collection de lois gouvernant la réponse physique du système,
- le passage du modèle théorique à un modèle réduit visant à simplifier le comportement traduit dans le modèle théorique, où l'analyste identifie et spécifie les attributs essentiels du système physique et les grandeurs mécaniques caractéristiques du comportement,
- le passage du modèle réduit à une solution numérique.

A ces étapes sont associés des types d'erreur qui sont respectivement :

- Les erreurs théoriques (considérées comme généralement négligeables) liées au comportement supposé par l'analyste,
- Les erreurs de modélisation qui sont soit des erreurs conceptuelles dans la formulation des modèles mathématiques utilisés, soit des erreurs d'idéalisation (généralement introduites intentionnellement),
- Les erreurs de discrétisation qui sont liées à la méthode de convergence (méthode h,p ou hp).

1-FENET : consortium européen, regroupant 110 organisations dans 19 pays différents, financé par la communauté européenne, et dont les travaux s'articulent autour de l'exploitation et de la promotion des technologies des éléments finis dans les entreprises.

2-Clockwork : projet européen associant 5 centres de recherches européens et 2 entreprises d'ingénierie. Pour plus de précision, un site internet dédié à ce projet est disponible à l'adresse suivante : <http://kmi.open.ac.uk/projects/clockwork>.

Les auteurs veulent par ces travaux garantir la fiabilité des résultats d'analyse en apportant une aide au concepteur à travers la maîtrise des erreurs faites dans les différentes phases de création du modèle de calcul. Szabo, dans [Szabo 96], considère ainsi l'intégration comme un moyen d'assurer une qualité numérique des résultats de calcul, du fait que l'analyse des erreurs de modélisation permet d'identifier les ambiguïtés du modèle de calcul. Alors ils fournissent alors une liste de points à vérifier de façon systématique pour contrôler les erreurs de discrétisation et les erreurs de modélisation.

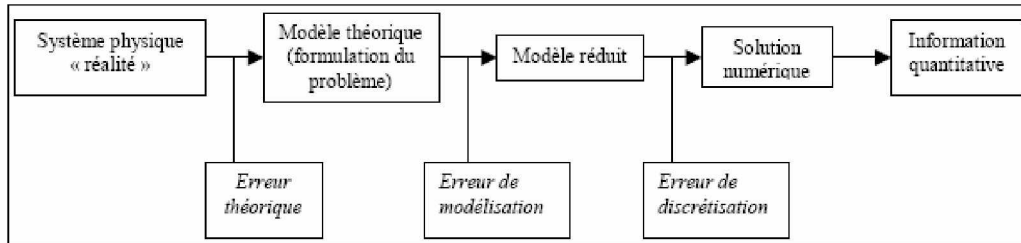


Figure 7 : Le processus de simulation et ses erreurs par Szabo [SZA96]

Morris, Vignjevic et al. ([MOR97], [VIG98]) proposent une modélisation de la démarche de calcul et une classification des erreurs légèrement différentes. La démarche de calcul est envisagée comme la succession des étapes suivantes [MOR97]

- Ø Définition du « réel » à considérer (objet à analyser et son environnement),
- Ø Définition du monde des structures (premier niveau d'abstraction qui tient compte des incertitudes sur le chargement par exemple),
- Ø Définition du monde idéalisé (contient les décisions concernant le comportement mécanique de la structure),
- Ø Définition du monde des éléments finis,
- Ø Définition du maillage,
- Ø Définition du programme de résolution à utiliser,
- Ø Dé-idéalisation (transforme et interprète les solutions obtenues à partir du monde des structures).

L'étape de définition du monde des structures est présentée comme étant la plus délicate du processus de calcul. Les sources d'erreurs potentielles sont énumérées pour chacune des étapes et des techniques sont proposées pour permettre leur contrôle. Des règles basées sur l'expérience, des calculs simples, des comparaisons entre des résultats de test relativement aux limites physiques connues, les modèles hiérarchiques, l'analyse de sensibilité, des tests complémentaires peuvent être utilisés pour aider dans les choix de modélisation afin de maîtriser la qualité du calcul effectué [VIG98].

La maîtrise de la qualité du calcul par un concepteur non spécialiste en calcul peut également se faire en fournissant au concepteur des calculs réalisés antérieurement, et sur lesquels il peut s'appuyer pour effectuer de nouveaux

calculs. Cette approche rejoint alors les travaux visant à guider le concepteur dans les choix de modélisation et est développée dans la section suivante.

D'autres auteurs expliquent encore que, même si les méthodes numériques de simulation sont considérées comme très performantes pour l'analyse et la conception de produits, leur utilisation se réduit aux étapes avale du processus de conception, lorsque la définition du modèle géométrique est suffisamment détaillée. Ces méthodes ne peuvent être que difficilement utilisées dans les phases préliminaires de conception, avec une définition du produit réduite et caractérisée par l'existence d'incertitudes sur bon nombre de paramètres du produit.

Dans ce cadre, pour améliorer la réponse de la simulation numérique par la MEF dans ces phases amont de conception, Rao et al proposent, dans [Rao & al. 98], une procédure spécifique utile pour manipuler des systèmes présentant des paramètres incertains dont les variations peuvent être aléatoires ou floues. Cette procédure se base sur la méthode classique des éléments finis améliorée par des méthodes spécifiques, de type aléatoire et flou. Ces méthodes sont alors mises en oeuvre dans un processus unique avec pour objectif d'évaluer les conséquences de ces incertitudes sur les résultats de simulation. De nombreux autres auteurs travaillent également sur cet aspect qui renvoie à la notion de conception robuste, comme par exemple les travaux développés par Lemaire dans [Lemaire 02] et [Lemaire & Mohamed 00].

Les recherches axées sur des outils d'analyse en vue d'améliorer la rapidité des tâches et de contrôler la qualité des modèles sont nombreuses, comme nous venons de le voir, mais semblent cependant éloignées des préoccupations qui nous concernent. En effet, ces recherches se tournent principalement vers l'automatisation des processus d'analyse dans les outils, et réduisent par la même l'importance des acteurs dans ces processus. Les acteurs, en charge de la réalisation des analyses, du fait de la forte automatisation des processus, n'ont besoin d'aucune formation spécifique pour la réalisation de ces procédures, et n'en retirent qu'une faible expérience. Cette automatisation amène cependant quelques problèmes, comme le montre Eckard, qui démontre, dans [Eckard 00], que pour améliorer le temps de développement d'un produit, il devient indispensable d'intégrer la simulation au

Plus tôt dans le processus de conception, et de faire participer les concepteurs dans les activités de calcul. Il précise également que cette intégration n'est pas sans conséquence et que cela nécessite :

- Une réorganisation du processus de conception pour pouvoir prendre en compte les activités de simulation,
- Un besoin de formation des acteurs pour qu'ils disposent de certaines connaissances en simulation numérique. Ces connaissances sont relatives, non seulement aux outils mis à leur disposition, mais également aux théories utilisées par les méthodes de simulation. Le but

est, d'une part, de mettre en oeuvre un modèle de simulation adapté au problème, et d'autre part, de pouvoir analyser les résultats de simulation et en déduire les répercussions sur le produit.

Ben Amara et al., dans [Ben Amara & al. 97], appuient cette réflexion en précisant que dans le cadre de la problématique d'intégration du calcul on ne peut automatiser l'ensemble des tâches de simulation numérique et mettre l'acteur en dehors de ce processus. Pièce centrale de l'activité de calcul, il doit disposer de connaissances relatives à son activité au sein de ce processus.

L'analyse reste un travail de spécialistes, et ne peut être réalisée par une personne novice. Il s'agit d'associer en un tout cohérent les différentes activités de conception, avec l'objectif de favoriser l'action simultanée ou concourante des acteurs dans le processus de conception. Les acteurs sont alors repositionnés au centre du problème, qu'ils soient spécialistes ou non du domaine. Dans ([BEN98]) il vise à intégrer la composante calcul mécanique (vue comme une fonction de conception) dans une démarche de conception fonctionnelle. Pour cela, il définit l'activité calcul comme un ensemble de tâches réparties dans tout le processus de conception. L'intégration consiste alors « à associer en un tout cohérent les différentes activités de conception, avec l'objectif de favoriser l'action simultanée ou concourante des acteurs dans le processus global et de minimiser la traduction de données, qui constitue le facteur principal de perte de temps et de sémantique ». L'intégration comporte alors deux volets : l'intégration des fonctions et l'intégration des outils. L'intégration des fonctions (comme le calcul, la fabrication, la modélisation géométrique, etc.) consiste à définir le langage associé à chacune des fonctions et à réaliser des traductions pour passer d'un langage à l'autre.

Seulement Troussier, dans [Troussier 99], constate que cette intégration semble relativement inadaptée à un contexte de conception industrielle où les interactions entre la conception et le calcul ne se limitent pas à une traduction de langage. L'intégration des outils implique une réflexion au niveau du modèle de produit, du modèle de processus de conception et du modèle d'échanges de données utilisés dans les outils informatiques. Pour cela, nous détaillons, par la suite, le travail de Nadège Troussier, dans [Troussier 99], qui propose une aide à l'intégration du calcul dans la conception par la méthode SG3C, développée au laboratoire 3S dans le cadre du projet OSCAR dont les objectifs ont été proposés dans l'introduction de ce manuscrit.

Les solutions qu'elle tente d'apporter se distinguent des solutions classiques d'automatisation des tâches, puisqu'elle est centrée sur les besoins des acteurs auxquels elle répond selon trois aspects : la formalisation d'une démarche pour l'utilisation du calcul mécanique dans un contexte de conception industrielle,

¹⁷MEF pour Méthode des Eléments Finis

une amélioration de la coopération entre les concepteurs et les spécialistes du calcul et une aide à la gestion de la complexité en termes de multiplicité, dynamique et interdépendance des modèles manipulés dès les premiers stades de la conception.

Finalement, nous évoquons le travail de thèse de Yoan Baizet dans [Baizet 04] où il présente une méthodologie dont l'enjeu industriel consiste à améliorer la productivité des acteurs impliqués dans l'activité de simulation numérique, par la mise à disposition des connaissances dont ils ont besoin pour réaliser leurs tâches. Ce travail s'attache au point de vue qui concerne les dimensions opérationnelle et tactique de la gestion des connaissances, appliquées au processus de simulation numérique dans un environnement industriel. L'apport de ce travail est de mettre en place un système de capitalisation des connaissances adapté aux acteurs impliqués dans le processus de simulation numérique. En effet, l'idée directrice s'articule autour du processus de modélisation et de discrétisation du modèle de conception pour obtenir un modèle d'analyse, processus au sein duquel des critères et des objectifs d'analyse doivent être pris en compte. L'un des intérêts réside dans la définition de modèles de simulation adaptés à une certaine définition géométrique du produit et ce, en rapport avec les objectifs de conception. En résumé la construction des solutions pour la capitalisation des connaissances de simulation numérique implique donc la prise en compte des critères et des besoins à l'origine de l'analyse, une solution qui ne passent pas nécessairement par une mobilisation automatique des connaissances au travers d'outils adaptés.

2.2 Les différents objectifs de l'intégration de la simulation numérique dans la conception

Les travaux sur l'intégration du calcul dans la conception se situent à différents niveaux relativement aux connaissances considérées. Ceux visant à l'automatisation du passage d'un modèle du produit utilisé en conception à un modèle du produit idéalisé pour le calcul supposent que les connaissances mises en jeu sont des savoirs ou des savoir-faire qui peuvent être formalisés et exprimés sous forme de règles. Ils se placent donc essentiellement au niveau des connaissances explicites formalisées.

Les travaux visant à maîtriser la qualité d'un calcul considèrent que l'activité de calcul met en oeuvre des savoir-faire relatifs à la démarche utilisée pour réaliser le calcul. En terme de démarche, ces savoir-faire sont modélisés de façon à distinguer différents types d'hypothèses. Les connaissances mises en oeuvre sont à la fois explicites et implicites, mais ne font que peu appel à des connaissances collectives.

Des propositions pour guider le concepteur dans les choix de modélisation dans le cadre d'un calcul mené dans un contexte de conception met en oeuvre des connaissances non formalisées à l'heure actuelle, qui font appel à des connaissances collectives partagées par les analystes et des connaissances d'interface construites à l'interface entre deux mondes qui coopèrent.

Enfin des travaux qui s'orientent alors vers des solutions favorisant la prise en compte des critères et des besoins à l'origine de l'analyse pour la réutilisation des calculs réalisés précédemment et la capitalisation des connaissances de simulation numérique.

La réutilisation de calculs antérieurs est nécessaire lorsque l'activité de calcul est considérée comme une activité qui met en oeuvre des connaissances à la fois relatives au produit en cours de conception et à la modélisation du comportement mécanique. Pour [FOU97], l'activité de conception met en oeuvre des connaissances de différents types. Plusieurs typologies des connaissances existent : on parle couramment et de façon générale de savoir, savoir – faire, savoir – être en didactique ; Hatchuel et Weil dans [HAT & Weil 02] proposent une typologie des connaissances utilisées en conception en savoir – faire, savoir – comprendre, savoir – combiner. De nombreuses autres typologies sont présentées dans [FOU97]. Nous reprendrons ici la typologie présentée par Vinck [VIN97], complétée par la notion de connaissances collectives [MER98] (relatives aux outils, aux méthodes, aux modes de raisonnement associés au monde) et celle de connaissances [MOI92].

En résumé, ces travaux concernant le lien entre la conception et la simulation numérique se basent sur une modélisation de l'activité de calcul dans la conception et visent à répondre à différents objectifs dont les trois principaux sont :

- D'automatiser le passage du modèle géométrique utilisé au bureau d'étude (le modèle C.A.O.) à une représentation géométrique dédiée au calcul par la méthode des éléments finis (modèle idéalisé, support de la discrétisation ou maillage associé au comportement),
- De formaliser les hypothèses réalisées tout au long d'une analyse mécanique afin de maîtriser les erreurs faites durant l'ensemble du processus de calcul,
- De tracer les simulation afin de connaître les choix de conception qu'ils ont, et qui les ont, impliqués, et de réutiliser les résultats ou les modèles existants pour fournir une aide à la modélisation pour de nouveaux calculs.
- La prise en compte des critères et des besoins à l'origine de l'analyse pour la capitalisation des connaissances de simulation numérique.

De plus, ces travaux traitent du lien entre la conception de produits et la simulation, vu essentiellement sous ses aspects informatiques. Dans un premier temps, certains travaux sont présentés de façon à balayer les principales

problématiques et approches relatives à l'intégration du calcul dans le processus de conception. Ensuite, ces mêmes travaux sont repris et analysés au travers de trois types de problèmes que nous aurons à résoudre ou appelés critères d'analyse et que sont la prise en compte :

- De l'ensemble de la conception (des premières spécifications à la commercialisation du produit),
- De la multiplicité des modèles manipulés à un instant donné de la conception,
- De l'évolution de la conception et des calculs au cours du temps.

Pour conclure sur cet état de l'art, le tableau 1 reprend les références citées dans ce chapitre en précisant leurs principaux objectifs et leur positionnement par rapport aux trois critères d'analyse présentés. Lorsqu'une case de ce tableau n'est pas cochée, cela ne signifie pas que l'aspect concerné n'est pas abordé, mais plutôt qu'il ne l'est pas de façon caractéristique par rapport aux objectifs et critères tels qu'ils sont définis ici et par rapport aux autres travaux .

	<i>Objectifs</i>			<i>Critères d'analyse</i>			
	Automatiser le passage modèle CAO	Maîtriser la qualité du calcul	Aider au choix de modélisation	La prise en compte des critères et des besoins à l'origine de l'analyse	Prise en compte de l'ensemble du processus de calcul	Prise en compte de la multiplicité des calculs	Prise en compte de l'évolution de la conception
[Shephard & al. 90]	P						
[Kurowski 95],		P			P		
[Turkiyyah & Fenves 96]		P			P		
Ben Amara & al. 97]	P				P	P	
[Kurowski & Szabo 97]		P					
[Rao & al. 98],							
[Fine & al. 00],	P				P		
[Shephard 00],	P						P
[Lemaire & Mohamed 00]							
[Eckard 00],			P				
[O'bara & al. 02],	P						
[Ifaoui & al. 02].	P				P	P	
[Lemaire 02]		P				P	
[Troussier 99],		P	P		P	P	
[Baizet 04]			P	P	P	P	

Table 1 : Résumé des principaux travaux en fonction des objectifs et des critères d'analyse

Il est à noter que, comme le précisent Shepard dans [SHE et al 90], on constate une incompréhension des relations et interactions entre les nombreux modèles mécaniques manipulés en conception. Ces relations et interactions sont nombreuses et peuvent être décrites à différents niveaux de granularité si l'on regarde le processus de calcul global et son lien avec la conception ou si l'on regarde les transferts de données entre deux modèles manipulés. Pour cela, nous orientons nos travaux à tenir compte à la fois de l'ensemble du processus de calcul, de la multiplicité des calculs et de l'évolution de la conception, c. a. d des trois critères d'analyses en même temps.

2.3 Le développement d'environnements spécifiques

De récents travaux de recherche se concentrent sur l'élargissement des systèmes de management des données produit, dans lesquels on retrouve les SIP¹. Ces systèmes ont été développés pour plusieurs raisons, dont les principales sont : le partage des données et le contrôle des flux, le partage et la documentation des processus de travail, l'assurance de la mise à jour des modifications des données, et la garantie de la non redondance des données. Ils permettent ainsi d'accroître les possibilités de communication, de management et de compréhension des informations relatives au produit. Ces systèmes sont aujourd'hui très répandus au sein des organisations des entreprises, de par les avantages qu'ils proposent pour la gestion de l'ensemble des données relatives aux produits. Cependant, bien que l'intégration des données de conception ait largement progressé, ces systèmes sont actuellement limités aux seuls processus et informations relatives au produit, et dans lesquels les données de conception tiennent une place prépondérante. Ils ne peuvent aujourd'hui prendre en compte les données spécifiques aux métiers, données complémentaires aux données du produit et parmi lesquelles les données de simulation numérique se situent. Un axe de travail actuel consiste donc à élargir l'utilisation de ces systèmes, dans le but d'intégrer dans leur structure de management des données, les processus et les données relatives au métier de simulation numérique.

Plusieurs auteurs tentent ainsi depuis quelques années de prendre en compte cette nouvelle demande qu'est l'intégration des données et des processus de simulation numérique au sein des SIP⁸. Macias et al. ([Macias & al. 00]) ont développé, non pas un simple système de gestion des données métier dans lequel les données de simulation numérique prennent leur place, mais un environnement intégré qui supporte le management des données pour l'ensemble des métiers impliqués dans le processus de conception. Ils proposent pour cela un outil basé sur un VPDM⁹, outil qui permet de regrouper dans un espace unique divers outils utilisés par une organisation. Ils proposent alors un environnement multidisciplinaire dans lequel sont regroupés et intégrés l'ensemble des outils utilisés et partagés par les métiers intervenant dans le processus de conception. Ils tentent également de fournir, en plus de cet environnement intégré, différents critères de succès pour le développement de

tels espaces de travail : une architecture des données identique et adaptée à tous les besoins des différents métiers, des méthodes de contrôle de la qualité des données rentrées, des processus d'analyse permettant d'identifier et d'éliminer les données redondantes, et enfin, de réfléchir en amont sur l'impact culturel de déploiement d'un tel environnement de travail.

Ainsi, ces travaux ne se limitent pas à l'intégration des données dans les outils classiques de management des données, déjà largement implantés dans les organisations, mais veulent aller plus loin en proposant des environnements complets et multidisciplinaires regroupant l'ensemble des métiers intervenant dans le processus de conception. Par comparaison aux systèmes de gestion des données, l'intérêt de tels environnements intégrés est l'utilisation au sein d'un même espace d'outils métier associés à un support de partage et d'échange des données entre ces deux activités. Les outils métier sont ainsi spécifiques et nécessaires à une réalisation efficace des tâches de conception et de simulation numérique, alors que les supports d'échange permettent de dialoguer facilement et efficacement entre ces deux métiers aux activités complémentaires. La problématique du développement de systèmes de management des données en provenance des différentes activités est alors élargie à l'intégration de la simulation numérique en conception au travers de la construction d'un environnement intégré de travail entre ces deux activités.

Dans ce sens, Chang et al. proposent dans [Chang & al. 98] un environnement de conception pluridisciplinaire basé sur la définition d'un modèle produit multi-niveaux qui favorise, pour chacune des phases du processus de développement d'un produit, l'activité de conception à base de simulations (ou SBD¹) de systèmes mécaniques. La méthodologie SBD¹⁰ s'appuie sur l'application d'algorithmes d'analyse performants et utiles pour obtenir le comportement réaliste d'un produit sans avoir recours à la construction et la mise en oeuvre d'essais physiques sur des prototypes. L'objectif de cette méthodologie consiste en la définition de modèles de simulation adaptés à une certaine définition géométrique du produit et en rapport avec les objectifs de conception. Ainsi, dans les premières phases d'un projet, la simulation est utilisée pour estimer le comportement global d'un produit par rapport à des solutions techniques générales. Ensuite, plus la définition du produit est détaillée, plus les modèles de simulation sont précis et nombreux. Le processus de conception et de simulation est donc multi-niveaux, chaque niveau permettant de réaliser une phase de la conception du produit.

8 : SIP pour Systèmes d'Information Produit,

9 : VPDM pour Virtual Product Development Management

Cet environnement de conception intégrant des analyses multi-niveaux nous permet de constater que la simulation constitue un outil de caractérisation du produit utilisable tout au long du processus de conception, des phases amont

aux phases avalées. Toutefois, comme le précisent Chang et al, les modèles et les objectifs des calculs ne sont pas identiques selon que les simulations sont utilisées dans les phases amont, où la définition géométrique du produit est relativement peu avancée, ou dans les phases avalées, où la définition du produit est très détaillée.

Ces constatations nous permettent de faire un retour intéressant rapport à notre problématique de gestion des connaissances de simulation numérique. Ainsi, les connaissances de simulation utilisées au cours d'un processus de conception sont fonction de l'état d'avancement du projet, et donc de la définition du produit et des objectifs du calcul.

La construction d'un système de gestion des exigences doit donc tenir compte de ce besoin de pouvoir fournir aux acteurs de la simulation les bonnes descriptions des exigences en rapport avec les objectifs de la simulation et la définition du produit.

Dans le même sens, Klaas et Shephard, dans [Klaas & Shephard 01], proposent au travers d'un système intégré d'informations relatives aux processus de conception et de fabrication, un environnement de simulation à base de géométries qui permet de fournir aux utilisateurs les outils utiles pour automatiser la réalisation de simulations. Ils introduisent l'idée d'un environnement de simulation basé sur une interaction continue entre le PDM¹¹ de l'organisation et les systèmes d'échange d'informations, dans le but de réaliser des simulations fiables et répétables, comme l'illustre la figure 8.

Il est alors possible d'utiliser des formats standards, comme le format STEP par exemple, pour créer des bases de données permettant les échanges de données tout au long du processus de conception, comme le proposent [Han & al. 02]. Le partage des données dans le cadre de processus multidisciplinaires introduit des problèmes de représentation des données et requiert l'utilisation de structures de données adaptées aux besoins ([Anderl & al. 02]).

Ainsi, Krastel et Merkt, dans [Krastel & Merkt 02], considèrent comme insuffisante la seule prise en compte des modèles de simulation sans leur couplage avec leurs résultats, et indiquent que les structures de données relatives aux modèles et résultats de simulation ne se corrélaient pas complètement avec les structures de données produit utilisées dans les environnements intégrés. Ils expliquent en effet que les structures support des données de conception sont relatives au produit et à ses composants, et dans ce sens, sont différentes des structures de données de simulation. Ces dernières sont en effet spécifiques aux objectifs de calcul qui sont définies par les buts de simulation et peuvent en cela induire une utilisation de géométries peu en rapport avec les composants du produit, une combinaison des différents composants entre eux, ou encore des caractéristiques mécaniques modifiées. Par conséquent, les structures de données de simulation ne sont a priori pas identiques aux structures de données de conception, ces différences impliquent le développement de structures séparées. Les auteurs proposent ainsi de créer des structures de représentation des données spécifiques au métier de la conception

et au métier de la simulation numérique, et de les intégrer séparément dans un environnement unique.

Cet environnement de travail n'aurait cependant aucun intérêt sans le compléter par un système d'échange semi-automatique de données entre les deux structures, réalisé en reliant directement entre elles certaines zones spécifiques des structures et en leur spécifiant des procédures automatiques de transformation et de transfert des données.

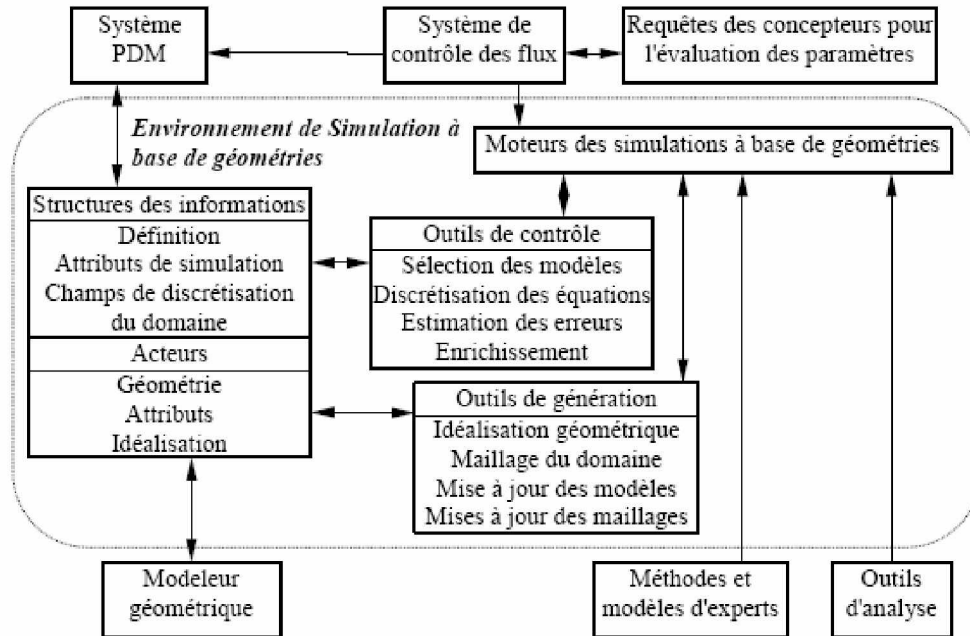


Figure 8 : Un environnement de simulation pour supporter la conception de produit [Klaas & Shephard 01]

A la fois support des activités de simulation et de conception et support de coopération entre acteurs dans le processus de développement produit au moyen d'un partage de données, les travaux relatifs au développement d'environnements intégrés sont nombreux et présentent certains avantages substantiels. Ils entraînent toutefois certains inconvénients majeurs, comme l'impossibilité de réutiliser les données dans un même ou un autre projet, ou leur manque de garantie dans la livraison de la bonne donnée au bon acteur pour la réalisation de sa tâche.

10: SBD pour Simulation-Based Design

11: PDM pour Product Data Management

Un autre inconvénient, qui s'inscrit dans le cadre de notre problématique, provient du fait que ces environnements oeuvrent autour de la notion de donnée, et mettent par conséquent en place des structures spécifiques pour la gestion des données de conception et de simulation. La synthèse des travaux réalisés évoqués, met en évidence que les notions de donnée, information, connaissance et savoir possèdent des natures et des caractéristiques sémantiques propres. Ces notions ne peuvent par conséquent être gérées de manière identique, et nécessitent le développement de systèmes adaptés. En revenant aux travaux sur l'intégration de la simulation en conception par le biais d'environnements intégrés, une question s'impose alors : peut-on gérer les connaissances de simulation numérique utilisées dans le processus de conception à travers ces environnements intégrés ?

En rapport avec la notion de connaissance, (Prudhomme et al) expliquent dans [Prudhomme & al. 01] qu'une connaissance nécessite la définition et l'utilisation d'objets de connaissance pour pouvoir être explicitée, artefacts spécifiques constitués à partir de donnée, information et savoir. Ainsi, l'explicitation des connaissances ne peut s'effectuer qu'à travers leur représentation dans des structures particulières, composées d'objets de connaissance dans lesquels s'inscrivent, entre autres, les données.

Cependant, les systèmes actuels de gestion des données, dans lesquels s'insèrent les environnements intégrés, tendent vers le développement de structures adaptées aux données, sans formellement prendre en compte la notion de connaissance. A la lumière des travaux relatifs à ces systèmes et environnements, le constat est sans appel : aucun outil actuel de gestion des données ne peut gérer de façon correcte et efficace les connaissances d'un métier ou d'un projet. Le paradoxe est donc établi entre des connaissances explicites au travers de structures de données, et donc a priori gérables par l'intermédiaire de systèmes de gestion des données, et des systèmes de gestion des données non adaptés actuellement à la gestion des connaissances. Certains auteurs ont cependant travaillé précisément sur le développement d'environnements de gestion des connaissances, toujours dans le cadre de la problématique d'intégration du calcul en conception. Ainsi, Shi et al. présentent dans [Shi & al. 02] des travaux sur l'extraction des connaissances du métier de la simulation numérique à partir des résultats obtenus. Ils partent du principe que les experts d'un domaine, la simulation numérique dans notre cas, n'ont pas la possibilité d'explicitier les connaissances et les règles qu'ils manipulent et mobilisent dans le cadre des décisions prises tout au long d'un projet. Ils proposent alors, pour solutionner ce problème, d'assister les individus par la construction et la mise en oeuvre de procédures automatiques d'extraction de connaissances, procédures qui, pour identifier les connaissances, puisent dans une base de données regroupant l'ensemble des résultats obtenus par simulation numérique. Ces procédures se basent sur la méthode KDD¹, processus non trivial fonctionnant par étapes successives de sélection,

traitement, exploitation, interprétation et enfin évaluation des données, comme l'illustre la figure 9.

Ce système présente l'intérêt de s'intéresser aux connaissances de simulation numérique, et non pas aux données comme la majorité des travaux de recherche dans le domaine. Il se rapproche d'un système classique à base de connaissances adapté à la simulation numérique dans lequel les connaissances métier sont représentées sous forme de règles et implémentées dans des outils spécifiques pour une réalisation automatique

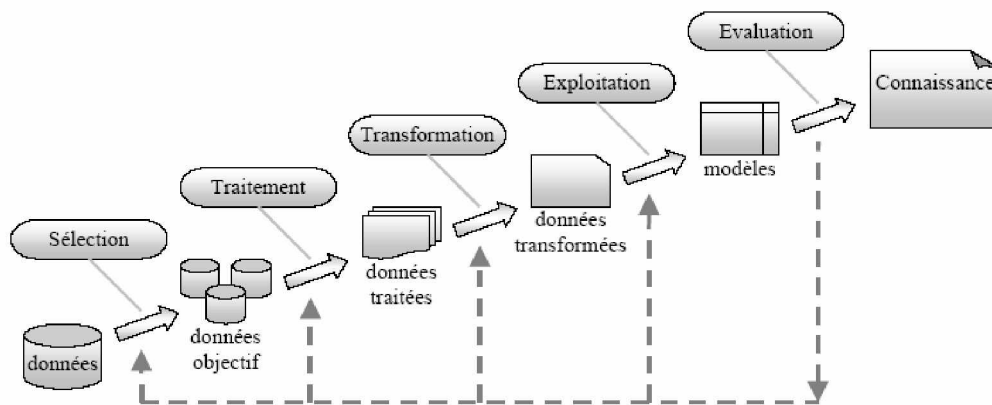


Figure 9: Les étapes successives de la méthode KDD d'identification des connaissances [Shi & al. 02]

Cette automatisation des tâches d'ingénierie au travers des outils n'est cependant pas propice à une augmentation et un partage des connaissances entre les acteurs impliqués dans les processus de développement produit, et ne va pas non plus dans le sens d'une aide à la coopération entre les acteurs.

C'est à partir de ce constat que nous avons été amenés à nous intéresser aux travaux de Troussier, détaillés dans [Troussier 99], et sur lesquels nous nous arrêtons plus longuement dans le paragraphe suivant.

2.4 L'intégration du calcul dans la conception par la méthode SG3C

Ces travaux, réalisés par Troussier, dans [Troussier 99], proposent une aide à l'intégration du calcul dans la conception par la méthode SG3C, développée au laboratoire 3S. La méthodologie est centrée sur les besoins des acteurs auxquels elle répond selon trois aspects : la formalisation d'une démarche pour l'utilisation du calcul mécanique dans un contexte de conception industrielle, une amélioration de la coopération entre les concepteurs et les spécialistes du calcul et une aide à la gestion de la complexité en termes de multiplicité, dynamique et interdépendance des modèles manipulés dès les premiers stades de la conception. Cette démarche se distingue des autres travaux, et plus

particulièrement de la méthode proposée par Shephard et Wentorf dans [Shephard & Wentorf 94]. Elle met en effet en place des modèles adaptés à leur utilisation, modèles géométriques (CAO) dédiés à la conception et modèles géométriques dédiés au calcul, dont le passage non automatique est réalisé à travers une analyse experte de l'utilisateur.

A partir d'observations industrielles, cette méthode apporte une contribution à la gestion des connaissances de simulation numérique par l'usage d'une démarche appliquée. Celle-ci se propose d'intégrer au sein même de la conception les savoir-faire de simulation numérique d'une organisation. Pour cela elle cherche à favoriser la coopération entre les acteurs de la conception et les acteurs du calcul, mais aussi à faire évoluer les pratiques de réalisation de calculs par les concepteurs. Ensuite elle s'attache à fournir un support à la capitalisation et à la réutilisation des modèles, des démarches et des connaissances issues du calcul, ainsi qu'un support d'utilisation du calcul dans la complexité du processus de conception.

Cette méthode s'appuie sur une structuration des informations manipulées lors de la mise en place du calcul mécanique et vise à fournir une aide à la gestion et au suivi des modifications ainsi qu'à la formalisation des modèles de simulation mis en œuvre. Cette structuration des données décompose en un certain nombre d'entités les points et les étapes clé d'un calcul, afin de représenter l'ensemble des démarches mises en œuvre et les connaissances issues du calcul. Elle s'articule pour cela autour de deux concepts clés, les concepts de structuration du Processus et de Cas d'Ecole.

La méthode développée s'articule autour d'une structuration du processus de simulation numérique en cycles de calcul, chaque cycle étant composé d'un ensemble d'entités distinctes regroupant chacune des informations spécifiques et fondamentales pour le calcul. Dans un cycle, six entités différentes sont distinguées : le Modèle de Conception, le But de Simulation, le Modèle Mécanique, le Modèle de Simulation, les Résultats et enfin la Conclusion. Ces six entités regroupent ainsi l'ensemble des informations contenues dans une simulation numérique, comme l'illustre la figure 10 à travers un exemple concret. La méthode permet alors de schématiser la démarche chronologique mise en œuvre pour construire la réponse aux objectifs définis, démarche modélisée au moyen de liens permettant d'associer toutes les entités entre elles. Ces liens sont principalement de deux types : les liens temporels et les liens informationnels. Les liens temporels permettent de décrire le déroulement chronologique du calcul, d'une part, à travers la description de l'enchaînement des entités au sein des cycles de calcul, depuis le modèle de conception jusqu'à la conclusion, et d'autre part, à travers la description de

l'enchaînement des cycles tout au long du processus de construction de la réponse du calcul. Les liens informationnels précisent quant à eux les informations utiles à la construction de chaque entité, et de fait, participent à la description de la démarche logique utilisée pour construire la réponse de calcul.

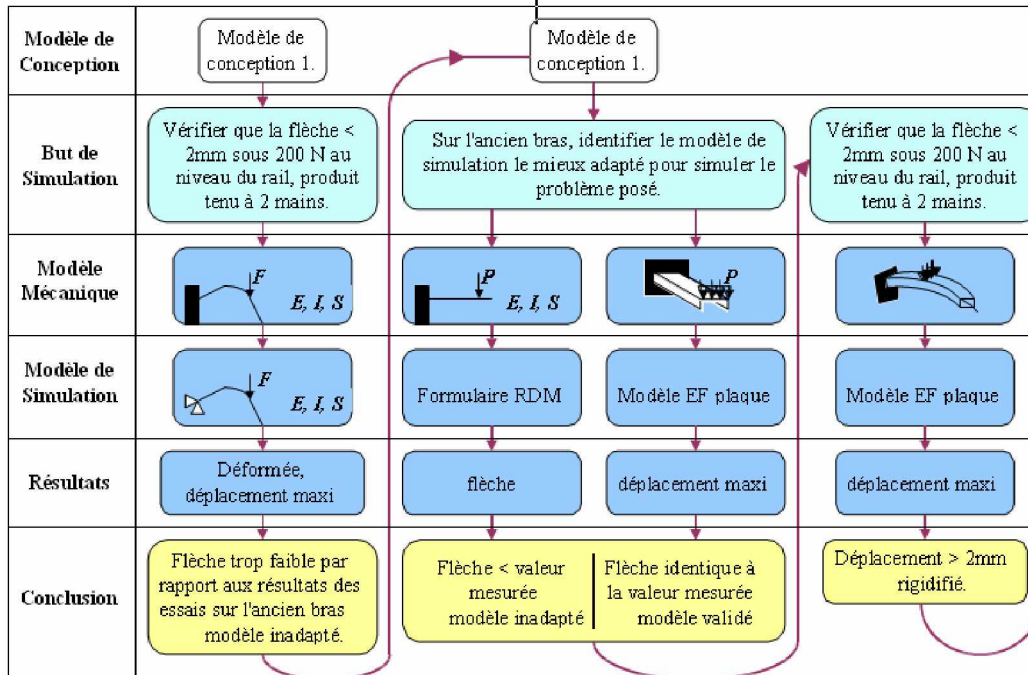


Figure 10: L'événementiel, un outil de description chronologique

Un processus complet de simulation consiste généralement en un enchaînement de plusieurs calculs élémentaires, ou cycles, réalisés soit en parallèles (comme par exemple lorsque, pour répondre à un objectif donné, plusieurs modélisations sont comparées), soit successivement (lorsque la réponse fournie lors d'un calcul sert pour effectuer le calcul suivant). Le développement et la mise en place d'un support visuel représentant la chronologie globale d'un processus de calcul (outil appelé événementiel), constitue une aide précieuse pour l'individu qui manipule les entités. Cela lui permet de voir le processus dans leur ensemble et de naviguer en son sein, comme l'illustre la figure 10.

On peut ainsi représenter tout processus de simulation numérique, du plus simple au plus complexe, à l'aide de la structuration des simulations en cycles de calcul, eux-mêmes organisés en six entités reliées entre elles par des liens. De plus, la schématisation de cette structuration sous forme d'événementiel permet de disposer d'une représentation conviviale et suffisamment fonctionnelle pour pouvoir naviguer facilement au travers des cycles et des entités du processus.

Dans la perspective de faire collaborer les concepteurs du bureau d'étude et les acteurs de production, Laureillard, dans [LAU97], a mis en place des entités géométriques liées à une sémantique particulière. Les acteurs de la conception doivent pouvoir trouver des prises sur ces objets de façon à les manipuler pour discuter et coopérer entre acteurs de différents métiers. La mise en place de ces entités de coopération fait apparaître de nouvelles connaissances (appelées connaissances d'interface) qui sont intéressantes dans leur dynamique et par leur retour dans chacun des métiers. En d'autres termes des entités spécifiques doivent être regroupées pour former des dispositifs de coopération afin de :

- favoriser le passage d'un problème de conception à un problème de modélisation,
- assurer une réponse pertinente à ce problème initialement formulé.

Il faut donc définir des entités de coopération sur lesquelles à la fois le concepteur et le spécialiste du calcul puissent avoir des prises, qui permettent de définir un objectif contextualisé de calcul (c'est à dire qui intègre des informations sur le contexte de conception dans lequel vient s'insérer le calcul) et de lui répondre. Donc, l'analyste est soit un concepteur raisonnant par rapport au monde du calcul, soit le spécialiste du calcul. Si l'analyste est un concepteur, on va également chercher à lui apporter une aide pour conduire son calcul.

Dans cette perspective, deux entités sont définies. Premièrement, le But de Simulation définit le problème qui se pose au calcul. Sa construction requiert à la fois des connaissances sur la conception et sur le calcul. Il doit permettre d'identifier le type de calcul auquel il renvoie (par exemple, « Vérifier » renvoie généralement à un calcul de validation, « Etudier l'influence des paramètres » à un calcul d'aide au choix ...). Le système mécanique qui fait l'objet de l'étude doit être spécifié ainsi que ses conditions d'utilisation par rapport à son environnement. La grandeur mécanique à laquelle on s'intéresse doit être citée (au moins implicitement : par exemple le mot tenue signifie habituellement que l'on s'intéresse aux contraintes).

En résumé, nous abordons les objectifs de ce travail selon ce point de vue, et nous focalisons notre intérêt sur le concept de but de simulation. Seulement nous préconisons de prendre en compte l'évolution de la démarche de conception ainsi les modèles « de maturité » des entreprises par les bonnes pratiques de L'Ingénierie Système. Cette démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes, que nous détaillons dans le chapitre 3, permet d'affiner nos objectifs sur les questions de recherche.

Chapitre 3

Les apports d'une approche de type I.S

L'ingénierie système est une discipline qui permet de maîtriser la conception et la réalisation d'ensembles complexes, prenant en compte tout le cycle de vie, depuis la détection des besoins jusqu'à l'achèvement du retrait de service. Trop nombreux sont les systèmes qui sont nés de la juxtaposition de produits existants et qui n'ont pas bénéficié d'une démarche d'ingénierie cohérente. L'émergence dans ces assemblages de propriétés imprévues ou mal évaluées est à l'origine de très nombreuses défaillances, attribuées à tort à des disciplines particulières (informatique, mécanique, électronique, facteur humain,...).

L'Ingénierie Système (I.S) est justement une voie de progrès indiscutable sur le plan méthodologique. L'I.S est largement déployée dans l'aéronautique et commence à l'être dans l'automobile. La simulation y tient une place importante

1. Contexte d'évolution des méthodes et outils de l'ingénierie

Le contexte d'évolution des méthodes et outils de l'ingénierie souligne une convergence des méthodes autour de "l'ingénierie système" et un concours des outils vers le support du produit virtuel et de l'usine numérique.

C'est dans cette approche que nous analysons les démarches méthodologiques de conception en ingénierie système dans l'objectif de positionner notre apport méthodologique par rapport à l'évolution des concepts dans la vie industrielle.

1.1 Définition de l'Ingénierie Système

L'ingénierie système (IS) est une démarche méthodologique pour maîtriser la conception des systèmes et produits complexes. Les pratiques de cette démarche sont aujourd'hui répertoriées dans des normes, réalisées à l'aide de méthodes et supportées par des outils. Les normes d'IS décrivent les pratiques du métier en termes de processus et d'activités de manière invariante par rapport aux domaines d'application de l'ingénierie système. Les méthodes d'ingénierie système fournissent des démarches techniques pour réaliser ces activités. Elles dépendent des secteurs d'application et résultent de choix industriels. La mise en oeuvre des processus et des méthodes est assistée par des outils, aujourd'hui très généralement informatisés.

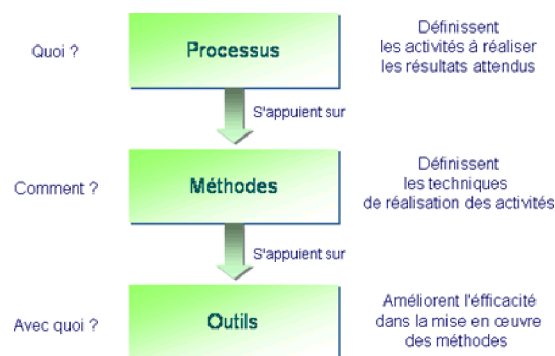


Figure 11 : Démarche de l'ingénierie système

L'Ingénierie Système (ou ingénierie de systèmes) est une démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes. Plus précisément, l'Ingénierie Système peut se définir comme :

- un processus coopératif et interdisciplinaire de résolution de problème,
- s'appuyant sur les connaissances, méthodes et techniques issues de la science et de l'expérience,

- mis en œuvre pour définir, faire évoluer et vérifier la définition d'un système (ensemble organisé de matériels, logiciels, compétences humaines et processus en interaction)
- apportant une solution à un besoin opérationnel identifié conformément à des critères d'efficacité mesurables,
- qui satisfasse aux attentes et contraintes de l'ensemble de ses parties prenantes et soit acceptable pour l'environnement,
- en cherchant à équilibrer et optimiser sous tous les aspects l'économie globale de la solution sur l'ensemble du cycle de vie du système.

Pour le maître d'ouvrage et les parties prenantes utilisatrices et exploitantes qu'il représente, elle a pour objectif d'assurer l'adéquation de la solution aux besoins sous tous les aspects (fonctionnalité, performances, économie, sécurité) pour toutes les situations d'exploitation du système.

Pour le maître d'oeuvre et les parties prenantes réalisatrices qu'il représente, elle a pour objectif de conduire à un bon compromis entre les enjeux et contraintes concernant tant la solution que le projet (besoins, attentes, performances, contraintes techniques et industrielles, coûts, délais et risques).

1.2 Le système et sa définition

Un système est décrit comme un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement, intégré pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité. Un système présente donc des propriétés nouvelles résultant des interactions entre ses constituants : si l'on intègre des éléments pour faire un système, c'est bien pour bénéficier des effets de synergie résultant de leurs interactions. L'art de l'IS est d'obtenir, du fait des interactions, les comportements synergiques recherchés en maintenant les comportements émergents non intentionnels dans des limites acceptables.

En IS, la définition du système comporte :

- celle de ses sous-systèmes et constituants (matériels, logiciels, organisations et compétences humaines) et de leurs interfaces, sièges des interactions recherchées,
- celles des processus de leurs cycles de vie permettant de les concevoir, produire, vérifier, distribuer, déployer, exploiter, maintenir en condition opérationnelle et retirer du service, et donc des produits contributeurs nécessaires à ces processus.

Cette approche de la définition induit une démarche descendante d'ingénierie s'appuyant sur une décomposition itérative du système en blocs constitutifs dont elle définit les constituants avec leurs interfaces ainsi que les produits contributeurs à leur cycle de vie:

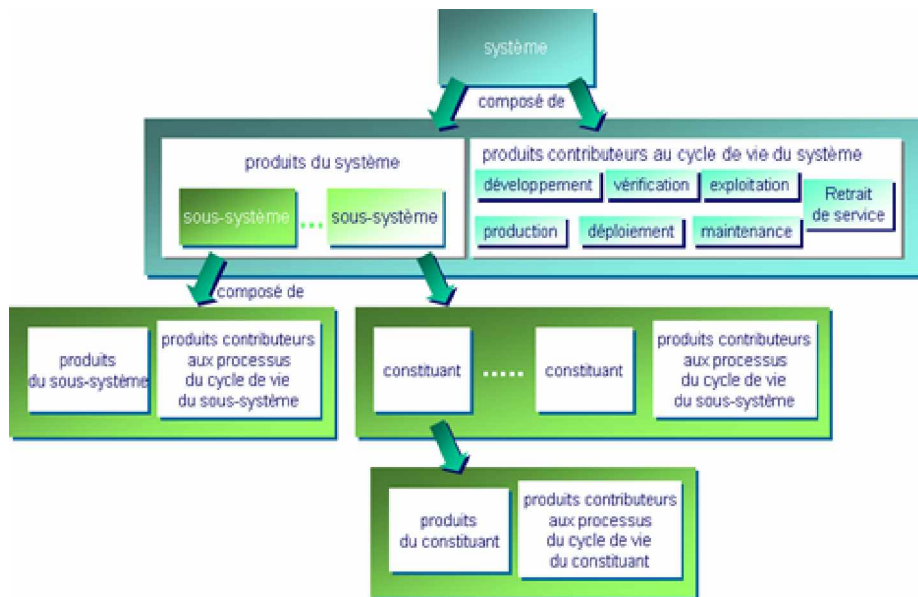


Figure 12 : Décomposition d'un système vu de L'IS

Cette démarche descendante se combine avec une démarche ascendante à partir des potentialités technologiques (et des contraintes dues à leurs limitations) ainsi que des constituants pré-existants : intégration de COTS (components on the shelves, composants sur étagères) ; intégration de systèmes non prévus initialement pour inter-opérer, conduisant à la notion de système de systèmes. Notons que l'IS s'applique aussi bien au système principal qu'à ses systèmes associés (ou contributeurs) tels que système(s) de production, système de soutien logistique regroupant l'ensemble des produits et processus contribuant à son maintien en condition opérationnelle ou encore système de démantèlement assurant son retrait de service... Chacun de ces systèmes a son propre cycle de vie et doit être opérationnel lorsque le système principal le nécessite (les produits contributeurs correspondent souvent à l'adaptation d'un système préexistant, par exemple l'adaptation d'un atelier de production aux besoins spécifiques de fabrication de produits du système principal).

Comme l'explique Meinadier J.P dans [Meinadier 02] ; La définition d'un système évolue au cours de son cycle de vie, tandis que les différents exemplaires ne correspondent pas tous au même état de la définition. C'est le rôle de la gestion de configuration de référencer les états de définition utiles : en phase de conception, elle tient à jour un état de la définition suffisamment stabilisé pour servir de référence à la suite du développement ; en phase d'exploitation, elle tient à jour la configuration applicable à tout nouvel exemplaire et, pour les besoins de la maintenance, la configuration réalisée pour chaque exemplaire en service.



Figure 13 : Exemple de cycle de vie d'un système

1.3 La démarche de conception en Ingénierie Système

La démarche technique de l'ingénierie système faisant passer du besoin à la définition de la solution se traduit par un processus itératif :

- d'exploration du problème et de spécification de la solution conduisant à des visions prescriptives du système, puis de ses sous-systèmes et constituants, sous forme d'ensembles d'exigences auxquelles ils devront satisfaire,
- de conception conduisant à des modèles constructifs sous forme d'architectures : architecture fonctionnelle et architecture de constituants avec leurs exigences spécifiées de réalisation, d'intégration, de vérification et validation ainsi que de maintenance.

L'aspect itératif est dû à la complexité du problème global :

- on ne peut définir d'emblée l'ensemble des besoins et contraintes de toutes les parties prenantes constituant le problème : on part des exigences initiales des parties prenantes utilisatrices et exploitantes du futur système (satisfaction du client), et au fur et à mesure des choix de conception on adjoindra les exigences des autres parties prenantes (système, sous-systèmes, équipementiers, développeurs, producteurs, vérificateurs, intégrateurs, maintenanciers),
- on ne peut trouver directement une solution au problème global, aussi le décomposera-t-on itérativement en sous-problèmes (décomposition en blocs constitutifs) en tenant compte de leurs interactions, jusqu'à ce que ces sous-problèmes soient suffisamment simples pour leur trouver des solutions potentielles (composants existants ou à développer). On est alors ramené à un problème d'intégration de ces solutions, préparé par la définition de l'architecture.

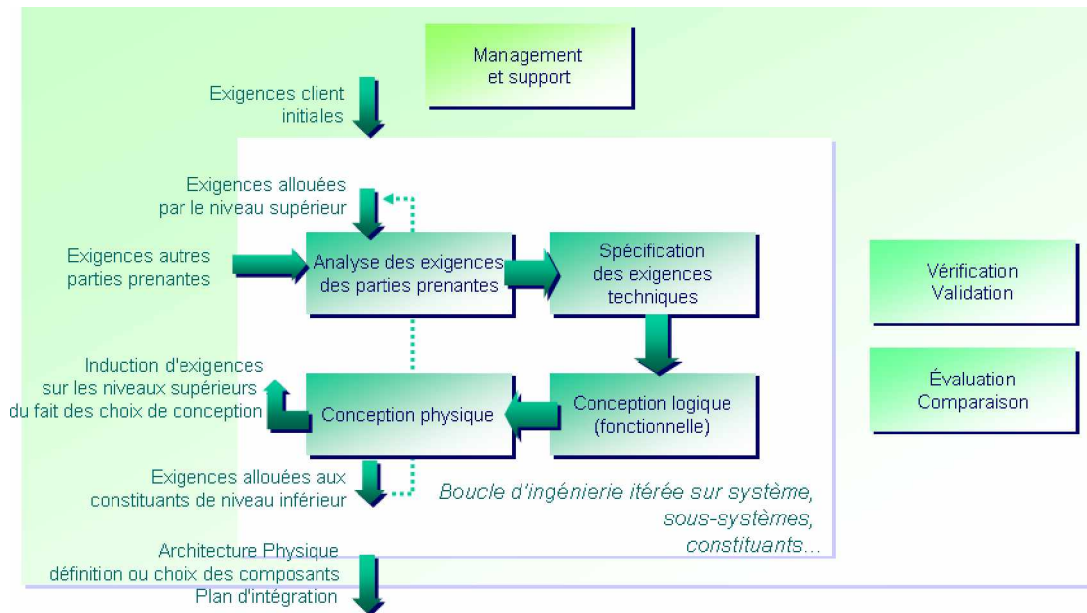


Figure 14 : Schématisation de la démarche technique d'ingénierie

On distingue deux niveaux d'architectures : l'architecture logique ou fonctionnelle qui représente la solution du point de vue de son fonctionnement, l'architecture physique qui, après les choix techniques, représente la solution d'un point de vue de la réalisation et de la maintenance. D'après [Meinadier 98] au cours des décompositions conduisant à ces architectures, les exigences sont allouées (réparties sur) les éléments de la décomposition, les interfaces sont définies.

On justifie la définition du système ainsi obtenue par :

- les activités de vérification qui vérifient que la définition est bien faite, en conformité à l'état de l'art, et les activités de validation qui vérifient que la définition répond au besoin (aux exigences des parties prenantes),
- les activités d'évaluation et de comparaison entre solutions alternatives qui justifient les choix successifs et donc témoignent des recherches d'optimisation du compromis global enjeux (fonctionnalité, performances) versus contraintes (dont coûts et délais) tout au long de la conception.

Ces activités techniques de conception doivent être managées selon les contraintes du projet et soutenues par des activités de support comme la gestion des informations (enregistrement des données d'IS, traçabilité des exigences, gestion de la configuration et des modifications...). Cette démarche nécessite la coopération de l'ensemble des acteurs de l'organisation industrielle, ce qui implique des activités de gestion de multiples relations client-fournisseur.

Les normes d'ingénierie système formalisent les processus et activités correspondant à cette démarche technique, ainsi que les processus de management associés et les processus contractuels régissant les relations client-fournisseur.

1.4 La mise en œuvre de l'Ingénierie Système

Le processus type de développement en ingénierie système met en œuvre des activités de conception faisant passer du besoin à la spécification des constituants d'un système apportant une solution à ce besoin, des activités de réalisation de ces constituants, des activités d'intégration.



Figure 15 : Les activités des processus de développement

Les processus de développement des constituants du système sont parallélisés : le système est itérativement décomposé en sous-systèmes et constituants. Ceux-ci sont développés en parallèle selon la logique générale de conception, réalisation, intégration. En final, le système est à son niveau intégré (y compris dans son environnement), vérifié et validé.

Le processus est progressif et itératif : l'évolution des contextes, la recherche progressive d'optimisation, l'émergence de nouvelles exigences, les conséquences des choix techniques, les non-conformités détectées en vérification et validation conduisent à des rétroactions sur les activités du processus qui se trouve ainsi parcouru plusieurs fois.

Le processus est conduit par une équipe intégrée : l'ensemble des compétences nécessaires est réuni au sein de l'équipe d'ingénierie système dès le début du projet : experts du besoin opérationnel, architectes et intégrateurs système, génies techniques et technologiques, spécialistes de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement, experts économiques, ergonomes, spécialistes de production, de maintenance et de recyclage en fin de vie, etc. Les problèmes sont ainsi analysés de manière interdisciplinaire : les raisons des choix successifs sont justifiées après une évaluation coopérative des solutions alternatives, de leurs impacts et de leurs risques.

Les métiers du cycle de vie du système travaillent en ingénierie simultanée : l'ingénierie associe, pendant tout le cycle de développement, les différents métiers (conception, essais, production et fabrication, achats, distribution, soutien logistique, maintenance) afin d'éviter les pertes de temps et remises en causes engendrées par la prise en compte séquentielle des problèmes. Selon

[Buckley 93], de surcroît, cette intégration des métiers permet de bénéficier de leurs sources d'optimisation, qu'elles soient propres à chaque métier ou qu'elles résultent de leur coopération (solution techniquement optimisée, couple produit/procédé de réalisation optimal, coûts d'achat minimaux, facilité et rapidité des opérations de maintenance, optimisation des coûts sur tout le cycle de vie).

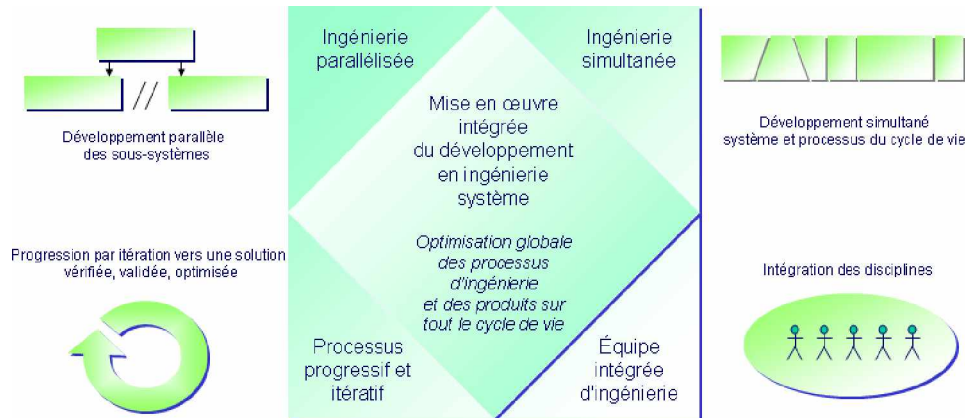


Figure 16 : Les composantes de la mise en œuvre « intégrée » du développement d'un système

1.5 Les enjeux de l'Ingénierie Système

Face aux nouveaux problèmes à résoudre et à la multiplication des contraintes dus à la complexification de notre environnement et en regards de nos nouveaux objectifs, les systèmes à faire fonctionner comme les organisations pour les développer, les produire, les exploiter et les maintenir deviennent de plus en plus complexes. La maîtrise des systèmes devient un enjeu majeur tant pour les entreprises que pour les nations.

L'analyse des échecs techniques (pertes d'engins spatiaux) ou économiques (le tunnel sous la Manche), celle des difficultés de mise en service (Grande Bibliothèque, réservation de places SNCF) mais aussi celle des dépassements de coûts et délais quasi-systématiques, par exemple dans le domaine des systèmes d'information, mettent en évidence des défauts dont l'origine concerne souvent des aspects système : besoins insuffisamment exprimés, parties prenantes non écoutées, problèmes de logistique, d'exploitation et de maintenance non anticipés, spécifications imprécises et incomplètes, solutions non justifiées ou non validées, formation des utilisateurs insuffisante, responsabilités et rôles des acteurs mal définis, communication entre acteurs non maîtrisées, ressources et compétences mal planifiées et non disponibles lors de leur sollicitation...

Selon [Planchette 02] ; L'ingénierie système n'est pas, pour autant, une nouvelle méthode révolutionnaire venant remplacer les approches traditionnelles telles que qualité, analyse de la valeur, management par les risques, développement à

coût objectif..., mais une démarche globale intégrant de manière structurante ces diverses approches et s'appuyant sur les retours d'expérience de leurs bonnes pratiques.

Ainsi, attend-on de sa bonne mise en œuvre, notamment du fait de son approche coopérative et multidisciplinaire d'ingénierie globale :

- o une meilleure maîtrise de la complexité des produits complexes, systèmes et systèmes de systèmes,
- o une amélioration de l'adéquation aux besoins et de la qualité des produits,
- o une meilleure anticipation des problèmes et des risques concernant tant le projet que le système et son environnement tout au long du cycle de vie,
- o un raccourcissement des temps de développement et une amélioration de la tenue des délais,
- o une meilleure maîtrise des coûts, et notamment une anticipation très en amont du coût global de cycle de vie,
- o une meilleure efficacité dans la maîtrise de la transdisciplinarité et de la coopération de multiples acteurs,
- o un accroissement de la satisfaction de toutes les parties prenantes,
- o une meilleure optimisation du compromis global enjeux sur contraintes des produits et lignes de produits, et, en guise de synthèse, une amélioration de la compétitivité des entreprises.

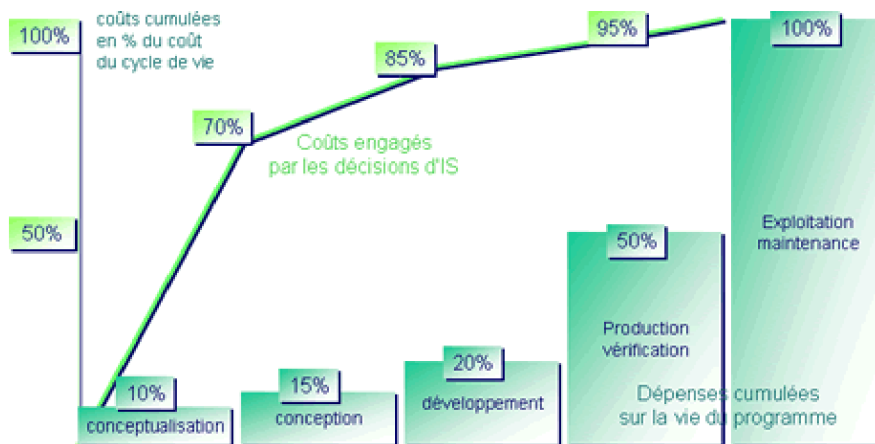


Figure 17 : Avec l'IS le coût global du cycle de vie est anticipé très en amont (source : Defense System Management College 9-1993).

1.6 Les processus de l'Ingénierie Système

Dans un métier aussi diversifié que l'ingénierie de systèmes, on a constaté :

- § d'une part que les types d'activités à réaliser constituaient des invariants par rapport aux différents types de projets et secteurs d'application,
- § d'autre part que les entreprises passaient par les mêmes étapes pour progresser dans la maîtrise de ces activités.

C'est donc sur les processus qui enchaînent ces activités que s'est peu à peu fondée une certaine formalisation générique des pratiques du métier d'IS, qui se traduit aujourd'hui :

- § dans des normes définissant les processus d'IS et leurs activités,
- § dans des modèles de maturité permettant d'évaluer la capacité d'un organisme d'IS à maîtriser son métier à l'aune de sa maîtrise des processus, ainsi que de définir des chemins de progression.

1.7 L'évaluation en IS

L'évaluation consiste à accorder de la valeur (qualitativement ou quantitativement) à un existant, généralement en vue de prise de décision ou de comparaison. En IS, l'évaluation a de multiples applications, tel que, L'évaluation technique dans le processus d'ingénierie d'un système, L'évaluation du projet, L'évaluation d'un processus et L'évaluation d'un organisme

Nous détaillons L'évaluation technique dans le processus d'ingénierie d'un système qui consiste à :

- L'évaluation de la qualité technique portant sur les activités et les produits en résultant : activités de vérification et validation (V & V) visant à démontrer respectivement que l'activité a été bien faite et que son résultat est conforme au besoin,
- L'évaluation des solutions alternatives pour le système à développer, afin de préparer et justifier les décisions techniques

Ces deux types d'activités d'évaluation réalisées tout au long du processus de définition d'un système préparent le dossier de justification de la définition du système : la définition a été bien faite (ensemble des vérifications), répond au besoin (ensemble des validations) et est optimisée (ensemble des justifications de choix).

1.7.1 Evaluation de la qualité technique : Vérification et validation

Les activités de vérification et validation (V&V) s'appliquent à tous les processus, sous-processus, activités ou tâches techniques intervenant dans les processus techniques d'ingénierie système,[Grady 97]. La figure 18, permet de schématiser cette activité, où nous identifions :

La vérification a pour but de montrer que l'activité a été bien faite, en conformité à son plan de réalisation et qu'elle n'a pas introduit de défaut dans le résultat (ainsi définit-on progressivement bien le système). Elle peut se faire notamment sur les états intermédiaires successifs du produit de l'activité.

La validation a pour but de montrer que l'activité s'est conformée à son objectif, que le résultat de l'activité répond au besoin pour lequel l'activité a été faite (ainsi définit-on progressivement le bon système). Elle se fait en vérifiant la conformité du produit de l'activité à ses exigences de besoin.

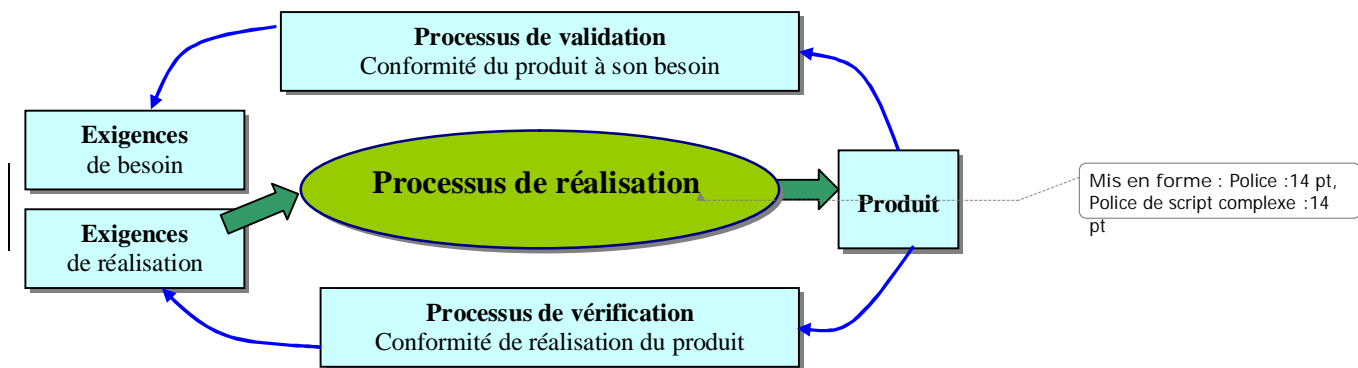


Figure 18 : Concepts de vérification et validation [Grady 97].

Ainsi, un référentiel d'exigences techniques système se vérifie par rapport à son plan de réalisation traduisant l'état de l'art (toute exigence d'entrée, client ou autre partie prenante, a été prise en compte; toute exigence est justifiée, faisable, vérifiable, etc; L'ensemble des exigences est complet et non contradictoire) et se valide en vérifiant la conformité aux exigences du client. Une architecture se vérifie par rapport aux règles de conception architecturale du plan de conception et se valide par rapport au référentiel d'exigences.

Concernant la V&V finale d'un système ou d'un constituant du système sortant de développement, la vérification a pour référentiel ses exigences techniques, la validation a pour référentiel les exigences allouées à ce produit par son "client" pour son besoin particulier.

Tous les GT (groupe de travail) traitant de processus techniques sont concernés par les V&V correspondant à leurs activités : V&V des référentiels d'exigences

pour Le GT IE (Ingénierie des Exigences), V&V des architectures et résultats de conception pour le GT AS (Architecture Système), V&V des produits finaux (constituants, sous-systèmes et système) en phase d'intégration pour le GT IVVQ (Intégration, Vérification, Validation, Qualification)...

1.7.2 Evaluation des solutions alternatives en IS Analyse système

La recherche d'une solution réalisant un bon compromis face à l'ensemble des attentes et contraintes de toutes les parties prenantes d'un système impose des choix successifs : choix des grands concepts d'opération et de solution, résolution de conflits d'exigences, choix entre solutions alternatives tant en conception fonctionnelle qu'en conception physique.

C'est le rôle du processus d'analyse système (processus décrit dans les normes IEEE 1220, EIA 632) d'évaluer les alternatives successives avec une vision pluridisciplinaire afin de garantir que les décisions sont prises en toute connaissance de cause et dûment justifiées.

Le processus d'analyse système est initialisé par une hiérarchisation des objectifs fondamentaux du projet - priorité à la sûreté de fonctionnement (systèmes critiques), au délai (design to market), aux coûts (design to cost) ? - fournissant des critères pour les analyses successives.

Chaque problème de choix fait l'objet :

- § d'une définition de l'étude d'évaluation à faire et de son objectif,
- § de la réalisation de l'étude évaluant les solutions alternatives en termes généraux d'efficacité/coût tenant compte des impacts sur le système, sur son cycle de vie, sur son environnement ainsi qu'en termes de risques sur les objectifs du projet,
- § de la comparaison des solutions candidates en fonction des critères prédéfinis, en recherchant le meilleur compromis "exigences - solution" afin de le proposer aux décisionnaires.

L'ingénierie système vise à mettre en œuvre une phase de conception " top-down " suivie d'une phase de validation " bottom-up " (voir figure 19). Autrement dit, on cherche à concevoir d'abord le système complet, puis les sous-systèmes, puis les composants. On valide en suivant l'ordre inverse d'abord les composants, puis les sous-systèmes, puis le système complet.

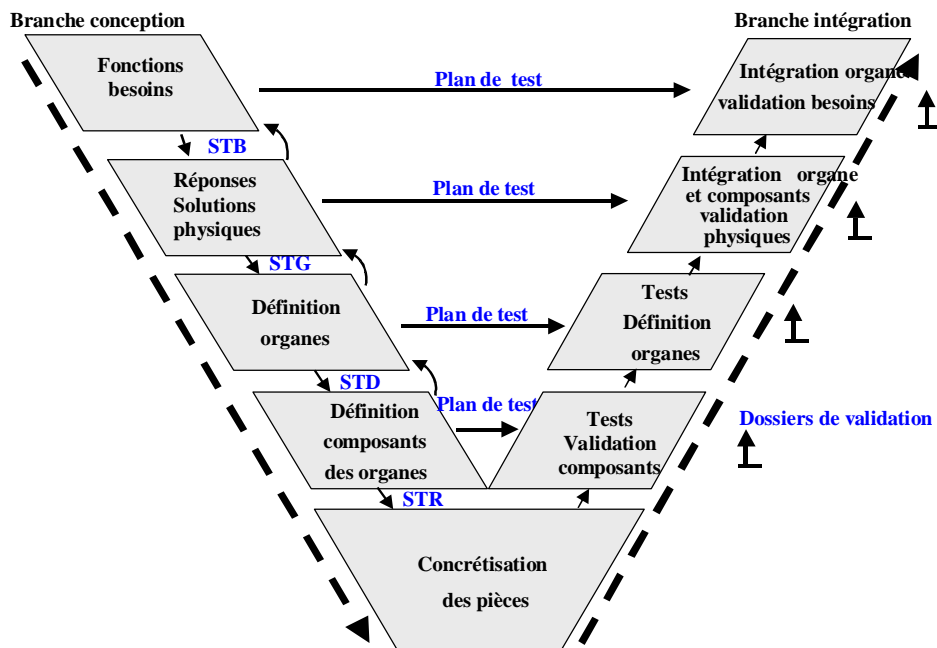


Figure 19 : Cycle en V de l'Ingénierie Système

Un intérêt de l'ingénierie système est, dans la strate de conception système, de raisonner sur des fonctionnalités et sur des performances, indépendamment des solutions techniques qui permettent de les obtenir, cela ménage un espace de liberté pour les équipes chargées de travailler sur les sous-systèmes.

De façon générale, l'application de l'ingénierie système permet de voir si l'on peut récupérer un sous-système existant sur un système en développement, et de mettre en évidence les vérifications dont on ne peut en aucun cas faire l'économie.

1.8 La modélisation systémique en I.S

La transformation d'un besoin émergent en la définition d'un système lui apportant une solution met en oeuvre de multiples activités intellectuelles faisant passer progressivement de concepts abstraits à la définition rigoureuse de produits. Il est nécessaire de s'appuyer sur des représentations tant du problème que de ses solutions possibles à différents niveaux d'abstraction pour appréhender, conceptualiser, concevoir, estimer, simuler, valider, justifier des choix, communiquer. C'est le rôle de la modélisation.

Les métiers mis en oeuvre en IS ont, de tous temps, utilisé des modèles allant de représentations des plus concrètes, tels que les plans ou modèles réduits, aux plus abstraites, telles que les systèmes d'équations. La complexification des problèmes et des produits a conduit à des démarches de modélisation systémique. Dans une première approche, dite réductionniste, la représentation du système a d'abord été essentiellement fonctionnelle : on représentait le système sous forme d'une architecture de fonctions s'échangeant des flux qui se concrétisait par une architecture d'organes réalisant les fonctions. Confrontés aux problèmes de régulation et de pilotage, les automaticiens ont introduit des

modèles de comportement intégrant les aspects continus et événementiels (et représentant l'enchaînement des fonctions). Confrontés à l'abstraction du logiciel, les informaticiens ont ajouté les modèles sémantiques (modèles de données) structurant le monde du problème à informatiser.

Du fait du poids croissant de la part informationnelle des systèmes et de la complexité inhérente à l'aspect purement abstrait des logiciels qui « l'implémentent », ce type de modélisation systémique (fonctions, comportement, sémantique) s'est plus particulièrement développé sous l'influence des informaticiens. Leur évolution vers les approches dites « orientées objet » les a conduit à passer, pour les systèmes à prépondérance informatique, d'une vision fonctionnelle où le système transforme des flux et se décompose en éléments fonctionnels (missions, fonctions de service, sous-fonctions) également transformateurs de flux, à une vision de type « client-service » où le système répond aux sollicitations des acteurs de l'environnement et se décompose ainsi en cas d'utilisation, réalisés par des collaborations d'objets (au sens du logiciel) se rendant mutuellement des services. Ainsi a émergé un langage unifié UML (Unified Modelling Language) de représentation des systèmes d'information dans un contexte de préparation à la programmation par objets.

Si l'on excepte les modèles réduits, les "systèmes de modélisation" s'apparentent à des langages de représentation, généralement de plus en plus formalisés à mesure que l'on passe du domaine du problème à celui de la solution.

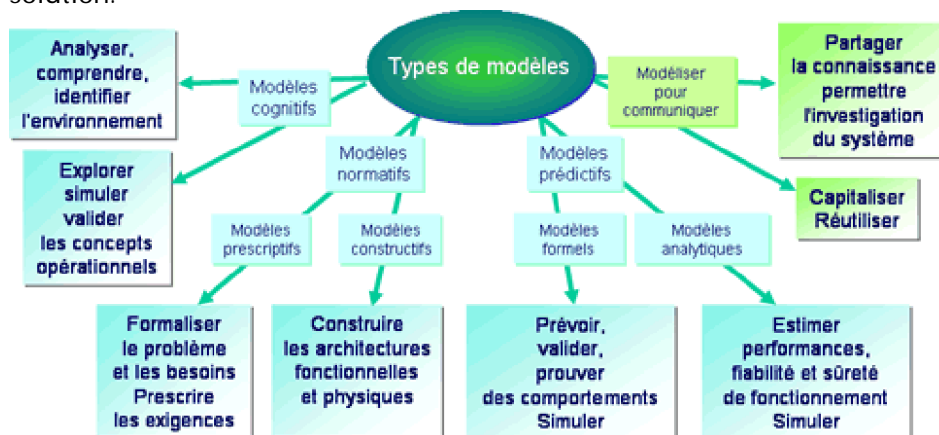


Figure 20 : Typologie des modèles en IS

Des modèles cognitifs sont utilisés pour l'analyse et l'exploration du problème ainsi que la validation des concepts opérationnels de la solution. La recherche et la validation des concepts opérationnels nécessitent des modélisations globales de haut niveau, par exemple dans le cas des systèmes militaires. La définition des scénarios opérationnels suppose la modélisation du comportement des systèmes de l'environnement, ceci pouvant aller jusqu'à leur identification (par exemple définir leurs équations d'évolution en vue de concevoir les scénarios de pilotage).

Des modèles normatifs participent à la définition de la solution à différents niveaux d'abstraction et de granularité. A chaque niveau, des modèles prescriptifs représentent ceux à quoi elles doivent satisfaire et supportent ainsi la définition des exigences, des modèles constructifs en représentent les architectures et leur fonctionnement (voir figure 20).

Des modèles prédictifs sont utilisés pour prévoir et valider le comportement des systèmes. Les parties critiques des systèmes doivent présenter des comportements déterministes malgré l'indéterminisme du comportement de l'environnement ou des défaillances du système. Les techniques de spécification et de modélisation formelles permettant d'établir des preuves théoriques de conformité de comportement répondent à ce besoin dans le domaine du logiciel et de l'électronique numérique. Plus généralement, les exigences de performances et de sûreté de fonctionnement sont estimées grâce à des modèles prévisionnels analytiques, éventuellement statistiques ou stochastiques et à des techniques de simulation associées, sous réserve d'utiliser les modèles dans leurs limites de validité.

Rappelons ici que tout effort de modélisation répond à un besoin (modélisation pour une approche globale du système, modélisation d'interfaces pour partager le travail entre sous-traitants, modélisation pour la simulation ou la validation formelle d'un comportement critique...) et que le choix tant de l'élément à modéliser que de l'outil de modélisation doit être pertinent par rapport à ce besoin.

1.9 Normes d'Ingénierie Système

Trois normes générales d'ingénierie système décrivant les processus du métier d'IS sont actuellement disponibles (voir figure 21). Elles en définissent les types d'activité à réaliser et de résultat produit. Elles recouvrent des champs différents, de manière d'autant plus approfondie que leur champ est plus limité et, ainsi se complètent. Ces normes sont introduites brièvement ici afin de positionner dans les standards le concept de l'analyse des exigences, un élément clef de notre apport méthodologique et qui est présenté dans le chapitre 4.

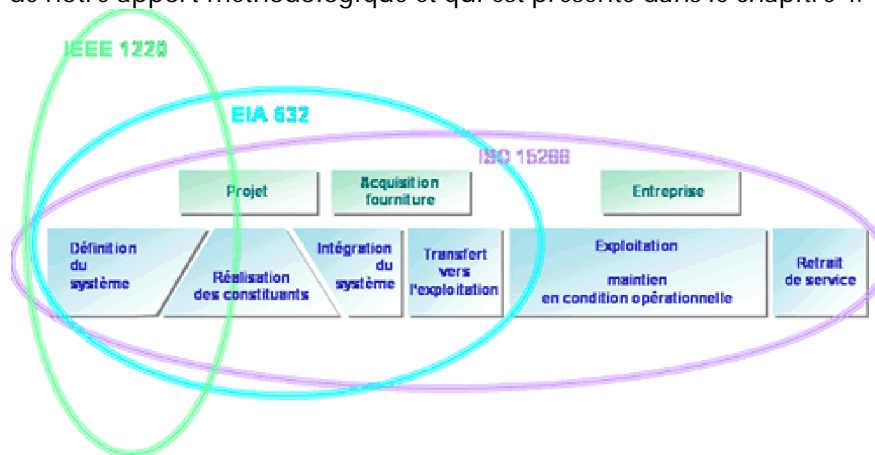


Figure 21 : Couverture respective des trois normes par rapport aux activités techniques sur le cycle de vie du système

1.9.1 Norme : IEEE 1220 "Standard for application and Management of the Systems Engineering Process"

Issue du standard militaire MIL STD 499B, cette norme de l'IEEE dans [IEEE1220-02], dont la version initiale date de 1994, se focalise sur les processus techniques d'ingénierie système allant de l'analyse des exigences jusqu'à la définition physique du système. Selon [Martin 97], les trois processus qui concernent l'analyse des exigences, l'analyse fonctionnelle et l'allocation et la synthèse, finement détaillés, comprennent chacun leur sous-processus de vérification ou de validation.

Le processus d'analyse système a pour but d'analyser dans un cadre pluridisciplinaire les problèmes (conflits d'exigences ou solutions alternatives) issus des processus principaux afin de préparer les décisions. Le processus de maîtrise de l'IS concerne tout particulièrement la gestion technique de l'ingénierie système et la maîtrise de l'information tant du système que du projet.

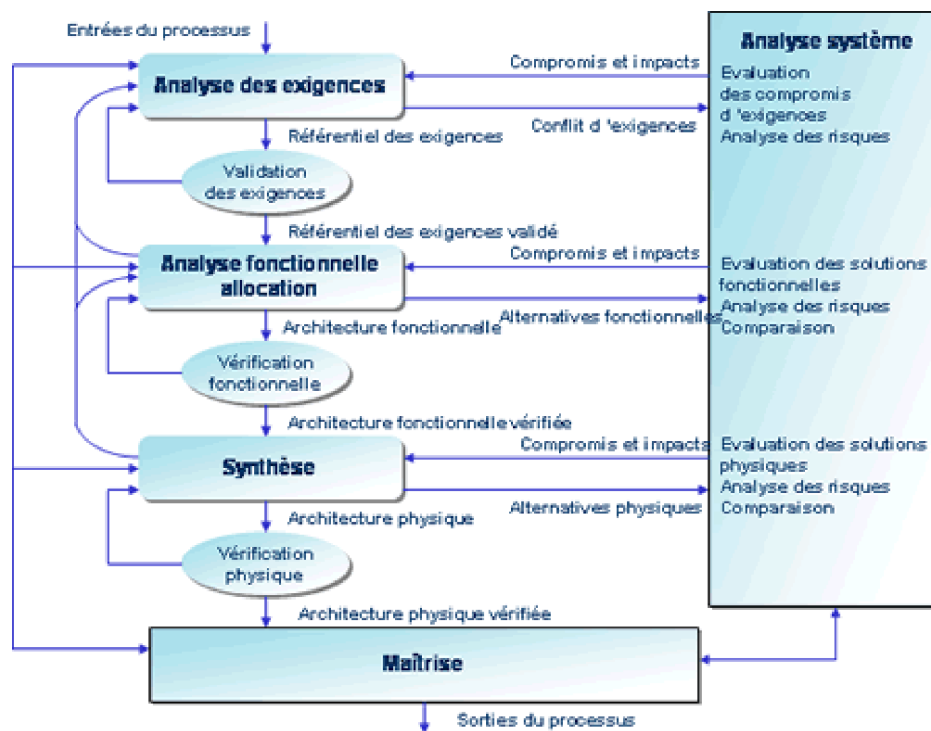


Figure 22 : Les processus selon IEEE 1220

1.9.2 Norme: EIA 632 "Processes for Engineering a System"

Selon [EIA632 -98], cette norme de l'EIA complète les processus techniques de définition du système en couvrant la réalisation des produits jusqu'à leur mise en service (transfert vers l'utilisation). De plus elle incorpore les processus contractuels d'acquisition et de fourniture.

Selon [INCOSE 04], le Processus techniques et processus contractuels sont encadrés :

- § par les processus de management (selon leur forme traditionnelle avec les trois sous-processus de planification, évaluation, pilotage)
- § par les processus d'évaluation des résultats des activités (processus de vérification vérifiant que l'activité a été bien faite et processus de validation vérifiant que le résultat répond au besoin, les deux justifiant de la conformité, ainsi que processus d'analyse système justifiant des choix réalisés tout au long de la définition et donc de l'optimisation du système).

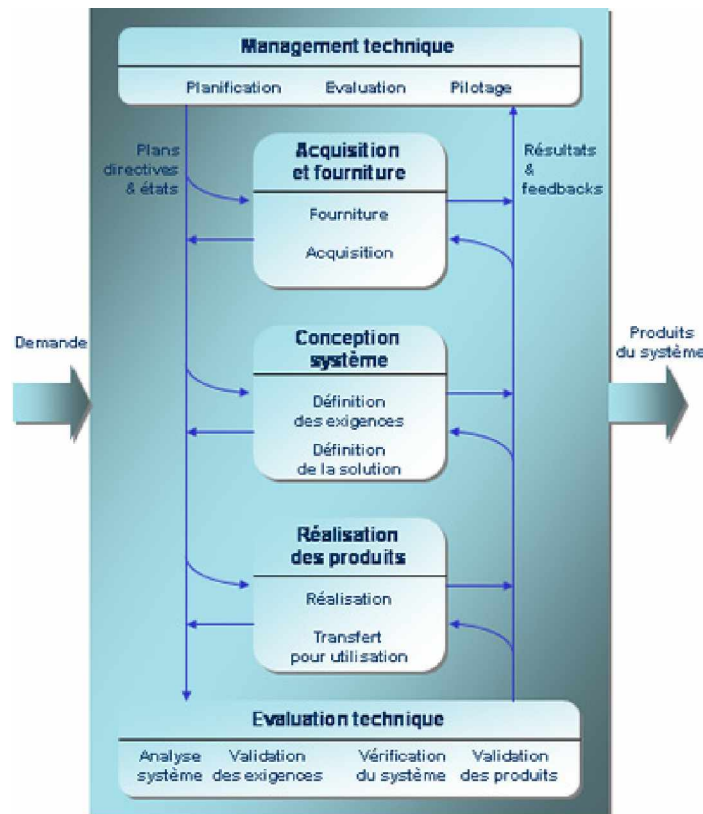


Figure 23 : Les processus de l'EIA 632

1.9.3 Norme: ISO 15288 " Systems Engineering – System Life-Cycle Processes "

Inspirée sur le plan de la norme ISO/CEI 12207 – AFNOR Z 67- 150 (Typologie des processus du cycle de vie du logiciel), cette norme de l'ISO étend les processus techniques à tout le cycle de vie du système (elle couvre ainsi les processus d'exploitation, de maintien en condition opérationnelle et de retrait de service) [ISO15288 -00].

La norme s'applique à l'ingénierie des systèmes contributeurs qui ont leur propre cycle de vie (systèmes de fabrication, de déploiement, de soutien

logistique, de retrait de service) : que l'on songe par exemple à l'ingénierie des systèmes de démantèlement et de traitements des déchets d'une installation nucléaire.

Représentée par la figure 24, elle complète les processus s'appliquant aux projets par des processus, dits d'entreprise, qui ont pour objectif de développer le potentiel de l'organisme d'IS en managant les domaines communs au profit des projets d'IS.

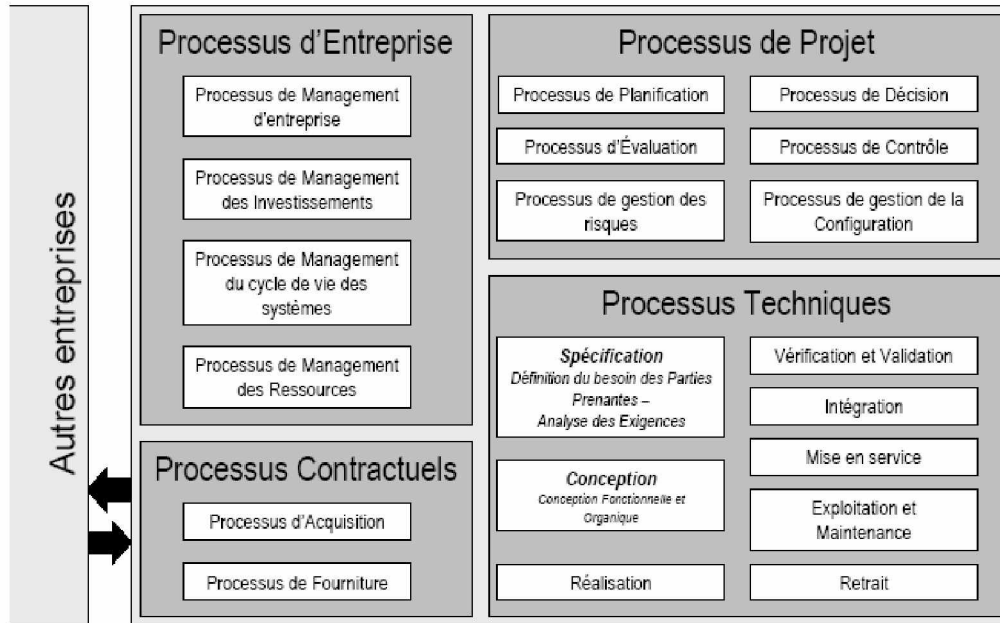


Figure 24 : Les processus de l'ISO 15288 selon [INCOSE 06]

Toutes les activités requises pour le développement d'un système sont entièrement décrites dans ces processus, par exemple dans les standards EIA 632 ou IEEE 1220. Ces descriptions peuvent être comprises et adaptées par tous les domaines d'expertise. Elles permettent ainsi de combiner les approches basées sur les activités et celles basées sur les métiers, conformément au principe énoncé par Tichkiewitch dans [Tichkiewitch 00].

En IS, les programmes de développement sont détaillés à l'aide des arborescences de développement des systèmes. C'est un héritage du concept de décomposition hiérarchique de Simon dans [Simon 81]. Une arborescence de développement représente un résultat de la conception du système : à chaque niveau de décomposition, le système est décomposé en sous-système, qui sont autant de périmètres de conception. Cela induit une organisation donnée pour les projets de management, avec la notion de building blocks. Il s'agit d'un périmètre au sein duquel correspond l'architecture du produit et l'organisation du projet. Cette mise en correspondance a été développée par Oosterman dans [Oosterman 01], et elle est décrite dans l'EIA 632 et l'ISO 15 288. La figure 25 réunit deux extraits représentatifs issus de ces standards :

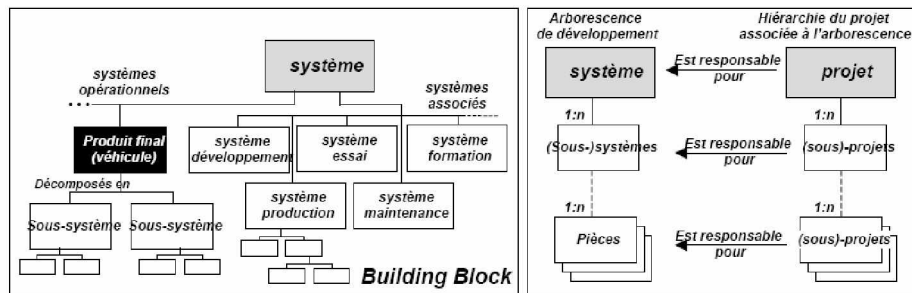


Figure 25 : les concepts des standards

L'extrait de gauche montre un building block, regroupant les systèmes opérationnels du produit final (par exemple une famille de véhicule, un nouveau moteur, une base véhicule...) et les divers systèmes qui lui sont associés dans son cycle de vie. L'ingénierie de ces systèmes associés est à prendre en considération pour le développement du système.

L'extrait de droite montre l'association système / projet à travers la notion de périmètres de responsabilité, qui suivent la décomposition successive du système.

Les notions contenues dans ces extraits sont cependant limitées car elles ne décrivent aucun des principes de coordination à déduire de ces décompositions arborescentes et de ces associations.

Chaque élément de l'arborescence de développement équivaut donc à un périmètre d'ingénierie qui consiste à la création d'un nouveau système ou la réutilisation (totale ou partielle) des éléments d'ingénierie de ce système. Les ingénieries de chaque système des arborescences de développement du produit ou du système de production peuvent être décrites par la réalisation itérative des deux activités techniques majeures de l'IS : la spécification (analyse du besoin et des exigences) et la conception.

Pour conclure cette brève description de l'IS, il faut signaler que les descriptions sur les relations entre l'IS et les méthodes de conception existantes sont rares. La référence probablement la plus complète disponible est l'article de White [White 98]. Nous citons aussi le travail de thèse de Emanuel Lardeur dans [Lardeur 03] sur la mise en place pratique des concepts de l'IS dans une organisation de conception. Par ailleurs, nos travaux fournissent, à travers le point de vue de l'intégration méthodologique, un état des correspondances entre l'IS et les autres méthodes de conception traditionnelles.

En résumé ;

Cette nouvelle approche nous permet de garantir la robustesse de l'information de développement, en vue de manager techniquement le développement de systèmes complexes avec de hauts niveaux d'exigences, tels que la réduction des délais et l'amélioration de la qualité. Nous poursuivons à présent notre étude sur l'amélioration de l'efficacité des équipes de développement dans le contexte industriel de PSA Peugeot-Citroën.

Les travaux à venir sur les méthodes consistent à construire et raffiner les arborescences de développement des systèmes de production, puis d'identifier et gérer les liens pertinents entre produit et systèmes de production. Des objectifs méthodologiques peuvent être implémentés dans chaque domaine d'expertise.

Enfin, malgré les différences réelles entre les systèmes de conception et les autres systèmes associés (comme le système de maintenance, en référence à la figure 25) ces nouveaux concepts peuvent s'appliquer. Ainsi, toutes les extensions de notre référentiel interne à d'autres systèmes associés peuvent être réalisés par analogie.

Les travaux à venir sur les outils consistent à formaliser les exigences méthodologiques pour les outils futurs et étudier l'intégration des logiciels supportant les méthodes dans leur environnement industriel, basé sur les principes existants (usine virtuelle, CAO, etc.). Notre propre activité sera dans le même temps d'explorer dans les outils existants ou nos prototypes d'outils, les fonctionnalités visées en matière de coordination des ingénieries.

2. STEP / AP 233

D'autres travaux sont en cours pour définir un langage commun de description de l'ingénierie système. Il s'agit de l'AP 233 (projet de norme ISO 10303-233). En fait, Les projets de systèmes actuels mettent en jeu des acteurs toujours plus nombreux, spécialistes des métiers concernés et de cultures différentes. Il devient donc indispensable de disposer d'un langage commun de description de l'ingénierie des systèmes et des données manipulées. Le GE3 travaille en collaboration avec les acteurs français impliqués dans les travaux de l'ISO TC 184/SC4, sur le projet de norme ISO 10303-233 dont l'objet est de définir un modèle des données utilisé par l'ingénierie des systèmes. Le projet européen SEDRES2 : (Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation) est chargé de définir l'AP233.

3.1 Historique du projet

Le projet SEDRES a débuté en janvier 96, il s'est terminé en mars 99. les travaux qui découlent du projet sont publiés dans [Barbeau 98], [Britton 98], [Harris 99] et [Johnson 98]. Le projet SEDRES 2 dans [SED 00] relatif, plus particulièrement à l'ingénierie système et à l'AP 233 a débuté en janvier 2000. Le projet SEDRES 1 & 2 s'intéresse à la modélisation des flux d'information et à leur partages aux différents acteurs d'un projet de développement de produit. SEDRES 2 doit élaborer la norme STEP / AP233 qui doit aboutir aux spécifications standards relatives à l'ingénierie système. Des travaux concernant cette norme sont disponibles dans [Britton 01], [Edmonds 01] [Herzog 00], [Johnson 00]. Do Ngoc Thang propose le modèle CPRET, il reprend le modèle de l'EIA 632 (process for engineering a system).

3.2 Définition de l'ISO 10303

Selon sa définition, l'ISO 10303 couvre les données de définition du produit pour tout le cycle de vie entier. Puisqu'un produit appartient souvent à un système plus large, le rôle du produit à l'intérieur du système entier doit être clairement défini. Leur définition est le but de l'activité de conception de L'ingénierie système. La portée de cette proposition est de présenter dans la norme ISO 10303, la représentation de données de L'ingénierie système utilisée pendant la phase de conception du système. Ce nouvel élément de travail vise à définir un protocole d'application de l'ingénierie système.

Un ensemble de documents préliminaires sont attachés à la proposition actuelle.

Le modèle produit AP 233, comprend plusieurs parties parmi eux nous citons les parties suivantes :

- § Architecture de systèmes
- § Représentation des exigences
- § Exigences sur les tests à réaliser
- § L'allocation des besoins

Une amélioration de la coopération entre les acteurs de la conception, et améliorer la fluidité du transfert des informations nécessite de faire le lien avec les nouvelles normes mises en place dans l'IS.

BILAN DE LA PARTIE I.

Précision et affinement de la problématique

Le diagnostic que nous avons réalisé et présenté au travers des trois chapitres précédents nous amène à construire la problématique générale de notre travail. Pour cela, nous allons tenter de faire ressortir les différents enjeux engagés tout au long de cette étude. Ces enjeux se résument aux différents éléments de réponses que peut apporter notre travail relativement aux disciplines de recherche sur l'organisation de l'activité de la simulation numérique en conception, sachant que la discipline de recherche qui concerne la simulation numérique se limite au seul domaine du génie mécanique.

Ce paragraphe s'attache à faire ressortir ces enjeux du présent travail, tout autant scientifique qu'industriel, à partir desquels la problématique de notre travail est soutenue.

Quels enjeux ?

Le travail effectué se positionne dans un cadre général d'étude des processus industriels et d'amélioration de leurs performances. Il vise donc à proposer une voie de recherche favorisant l'excellence dans la conception par la coopération entre le concepteur et l'analyste selon un double enjeu. L'enjeu industriel, avec l'apport de solutions concrètes aux problèmes et besoins rencontrés par les acteurs impliqués dans le processus de conception et l'enjeu scientifique qui positionne ce travail par rapport aux travaux de recherches sur cette thématique.

L'excellence dans la conception, c'est donc l'art de n'oublier aucune partie intéressée, en identifiant les risques lors des choix et en les maîtrisant dans une approche forcément systémique. La maîtrise des risques est une discipline transverse à laquelle la normalisation apporte de plus en plus sa contribution. Ce triptyque (qualité, coût, délai), très médiatisé, n'est pas nouveau, mais il se révisé sans cesse. De plus dans les bureaux d'études où le rythme de développement s'accélère fortement, où la conception est de plus en plus simultanée et où les tests sur prototypes se raréfient, il faut en effet tout faire pour adopter une démarche cadrée et rigoureuse, capable par exemple de sonder puis de « déminer » au plus tôt le terrain en évitant erreurs et pièges de conception. Car en matière de coûts, il est bien connu qu'une modification tardive reviendra vite très chère, et ce d'autant plus qu'elle peut nécessiter de revenir à une phase de test-validation si le problème initial a été mal cerné. Les délais s'envolent alors et la qualité court de gros risques. Un besoin qui favorise l'évolution des concepts dans la vie industrielle par la présence des démarches méthodologiques de conception en Ingénierie Système, celle-ci englobe les activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système

apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes.

La démarche technique de conception dans l'ingénierie système faisant passer du besoin à la définition de la solution se traduit par un processus itératif :

- d'exploration du problème et de spécification de la solution conduisant à des visions prescriptives du système, puis de ses sous-systèmes et constituants, sous forme d'ensembles d'exigences auxquelles ils devront satisfaire,
- de conception conduisant à des modèles constructifs sous forme d'architectures : architecture fonctionnelle et architecture de constituants avec leurs exigences spécifiées de réalisation, d'intégration, de vérification et validation ainsi que de maintenance.

Améliorer le dialogue externe entre les clients, l'entreprise, les circuits de distribution, les services après-vente, et le dialogue interne entre les différents services qui participent à la création du produit par l'utilisation de la simulation est l'idée maîtresse de notre travail.

L'enjeu industriel consiste à améliorer la productivité des acteurs impliqués dans l'activité de simulation numérique, par la mise à disposition des connaissances dont ils ont besoin pour réaliser leurs tâches. Cela nécessite d'une part de savoir transcrire l'information pour la rendre accessible à tous, et d'autre part de savoir gérer le flot important d'informations qui en résulte. Les informations relatives à toutes les phases du cycle de vie dépassent largement la seule représentation géométrique et les paramètres du processus de fabrication.

Les entreprises ont ainsi pris conscience ces dernières années de la problématique majeure posée par l'intégration de la simulation numérique dans les processus de conception, et l'intérêt essentiel apporté par la gestion et le management de leur capital de connaissances. Il apparaît alors prioritaire de mettre en place des solutions pour organiser, réutiliser, valoriser et transmettre les connaissances et savoir-faire du métier de la simulation numérique.

Il faut également ajouter les phénomènes de mobilité importante des acteurs de la simulation numérique au sein des organisations industrielles, la tendance croissante des entreprises à externaliser leurs activités de simulation numérique, à travers une délocalisation partielle de certains services, une utilisation de prestataires de services ou une mise en sous-traitance de tout ou partie des activités.

L'enjeu scientifique constaté est que les travaux concernant le lien entre la conception et la simulation numérique se basent sur une modélisation de l'activité de calcul dans la conception et visent à répondre à différents objectifs dont les trois principaux sont :

- D'automatiser le passage du modèle géométrique utilisé au bureau d'étude (le modèle C.A.O.) à une représentation géométrique dédiée

au calcul par la méthode des éléments finis (modèle idéalisé, support de la discrétisation ou maillage associé au comportement),

- De formaliser les hypothèses réalisées tout au long d'une analyse mécanique afin de maîtriser les erreurs faites durant l'ensemble du processus de calcul,
- De tracer les calculs afin de connaître les choix de conception qu'ils ont, et qui les ont, impliqués, et de réutiliser les résultats ou les modèles existants pour fournir une aide à la modélisation pour de nouveaux calculs.
- La prise en compte des critères et des besoins à l'origine de l'analyse pour la capitalisation des connaissances de simulation numérique.

Ces mêmes travaux sont repris et analysés au travers de trois types de critères d'analyse et que sont : la prise en compte

- De l'ensemble de la conception (des premières spécifications à la commercialisation du produit),
- De la multiplicité des modèles manipulés à un instant donné de la conception,
- De l'évolution de la conception et des calculs au cours du temps.

On ne peut automatiser l'ensemble des tâches de simulation numérique et mettre l'acteur en dehors de ce processus. Pièce centrale de l'activité de calcul, il doit disposer de connaissances relatives à son activité au sein de ce processus. L'analyse reste un travail de spécialistes, et ne peut être réalisée par une personne novice.

On parle aussi de Conception Fonctionnelle où le modèle de représentation fonctionnel du produit supportant le passage à la définition structurelle minimale d'une solution. Ainsi les choix effectués entre différentes alternatives de conception, tout comme l'optimisation de certaines parties du produit, sont réalisés par rapport à ces critères traduisant les fonctions à respecter. Le concepteur agit dans la conception et effectue des choix concernant la définition géométrique et technologique du produit relativement aux spécifications fonctionnelles, afin de les satisfaire globalement au mieux, tout en respectant les délais qui lui sont imposés.

Dans une conception fonctionnelle nous espérons atteindre les objectifs suivants :

- Intégrer la simulation au plus tôt dans le processus de conception, donc en amont dans le développement du produit,
- Améliorer la fluidité du transfert des informations entre les concepteurs et les analystes, afin de réduire les temps de calcul,
- Améliorer la qualité des simulations,
- Améliorer la coopération entre les acteurs, concepteurs et analystes,
- Stabiliser les processus de simulation numérique dans les entreprises,

En effet, derrière ces objectifs très généraux sont précisés trois axes spécifiques en rapport avec notre travail. Ceux-ci consistent, d'une part, à aider les acteurs à partager des modèles de simulation enrichis de connaissances métier, d'autre part, à développer un support pour la réutilisation des connaissances de modélisation et de simulation entre organisations, et enfin, à élaborer un support pour le partage de connaissances entre différentes entreprises. La construction d'un système de gestion des exigences doit donc tenir compte de ce besoin de pouvoir fournir aux acteurs de la simulation les bonnes descriptions des exigences en rapport avec les objectifs de la simulation et la définition du produit.

Problématique

Nos observations, études et conclusions nous amènent à construire la problématique générale de ce travail. A ce niveau, celle-ci peut être définie ainsi :

"Mettre en place une méthode favorisant la coopération entre les acteurs de la conception et les acteurs de la simulation mais aussi à faire évoluer les pratiques de réalisation de calculs par les concepteurs"

De plus, cette proposition s'attache à fournir un support à la réutilisation des modèles, des démarches et des connaissances issues de la simulation, à contribuer à la gestion des connaissances de simulation numérique par l'usage d'une démarche appliquée supportée par la gestion des exigences du cycle de vie produit, ainsi qu'un support d'utilisation du calcul dans la complexité du processus de conception.

Certains travaux de recherches se sont intéressés à répondre à cette même problématique générale, que nous avons déjà présentés dans le chapitre II, et dont l'objectif d'affiner notre problématique nous essayons d'identifier les verrous méthodologiques des approches proposées. Pour cela nous citons les travaux réalisés dans les laboratoires GILCO et 3s et plus précisément les travaux de Troussier, dans [Troussier 99], et Yoan Baizet dans [Baizet 04].

Les travaux de Troussier, ont amené des réflexions pour améliorer la coopération entre les analystes qui réalisent les simulations et les concepteurs. La méthode développée et son outil associé fournissent également un support à la traçabilité et à la réutilisation des modèles et des démarches mises en place lors des simulations numériques. Parmi les concepts proposés, celui de cas d'école pour la modélisation et pour la conception, constitue un des éléments clés de l'identification et de la capitalisation des connaissances. La méthode SG3C, qui constitue actuellement l'une des rares méthodes de gestion des connaissances adaptées au métier de la simulation numérique, propose des

concepts intéressants. La mise à disposition de connaissances pour les acteurs, et non pour leur implémentation dans un outil logiciel en est un, la structuration du processus de simulation en entités indépendantes, un autre, ou encore le concept de Cas d'Ecole, concept intermédiaire entre les notions de règle et d'exemple, défini pour mettre en évidence des connaissances génériques, susceptibles d'être réutilisées dans d'autres projets.

Dans les travaux de Yoan Baizet dans [Baizet 04], la méthode SG3C a donc été mise en usage au sein du service de calcul avancé, par une confrontation avec un certain nombre de projets de calculs à caractère industriel. Il a alors été constaté que ce système de gestion des connaissances propose des notions, certes très intéressantes, mais dont certaines nécessitent un développement conséquent en vue d'une adaptation aux besoins industriels réels. De ce fait, quelques travaux ont été menés pour faire évoluer la structuration des données afin de modéliser au plus proche de la réalité l'ensemble des projets étudiés. Il est ressorti de la confrontation avec l'environnement industriel que la solution à construire doit pouvoir intégrer des connaissances diverses et variées, et que les structures de représentation de ces connaissances en sont dépendantes. Ainsi, le besoin d'identifier les connaissances à capitaliser ressort à nouveau, ce qui confirme le caractère important, voire essentiel, de cette étape, qui révèle également qu'il n'existe pas une seule structure de représentation des connaissances. Tout type de connaissance doit disposer d'une structure de représentation qui lui est propre, adaptée tout à la fois à l'acteur, à sa tâche, et à son contexte d'utilisation. Le travail de Yoan Baizet a préconisé l'identification exhaustive des connaissances à capitaliser, pour ensuite définir des structurations adaptées. Cette structuration dont l'objectif est de mettre en place un système de capitalisation des connaissances adapté aux acteurs impliqués dans le processus de simulation numérique dans le cas de la DIEC.

Nous constatons alors que les travaux cités proposent des notions, certes très intéressantes, et complémentaires mais nous remarquons que dans les modèles du processus de simulation, proposés par Troussier et par la suite modifiés par Baizet, que l'entité But de Simulation (BS) n'a pas été prise en compte dans l'analyse comme étant une entité principale de coopération dans le processus de simulation. Cette entité, qui doit permettre d'identifier le type de calcul auquel il renvoie (par exemple, « Vérifier » renvoie généralement à un calcul de validation, « Etudier l'influence des paramètres » à un calcul d'aide au choix ...), présente un intérêt primordial dans l'organisation du processus de simulation et requiert la formalisation à la fois des informations couramment rencontrées dans la définition des besoins en calcul et d'autres moins habituelles.

Le But de Simulation définit le problème qui se pose au calcul. Sa construction requiert à la fois des connaissances sur la conception et sur le calcul. Celui-ci comporte le type de calcul, la spécification et la quantification des grandeurs mécaniques associées, la définition des conditions d'utilisation (et non pas des conditions aux limites), la spécification du système à étudier et les paramètres de coût et précision qui permettent d'effectuer les choix de modélisation.

Finalement, notre problématique peut être définie ainsi :

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit se positionnent donc autour de cette problématique : La formulation des buts de simulation en cohérence avec les analyses fonctionnelles et le cycle de vie produit. Une structuration des connaissances de conception est conduite pour répondre à nos objectifs. Ces derniers se résument à favoriser la coopération entre les acteurs de la conception et les acteurs de la simulation et à faire évoluer les pratiques de réalisation des calculs dans le concept des démarches de l'Ingénierie Système.

PARTIE II

LA PLANIFICATION DES BUTS DE SIMULATION EN CONCEPTION

- § Une méthodologie supportée par l'expression et la gestion des exigences du cycle de vie produit.
 - § Mécanisme de formulation des buts de simulation
-

La première partie de ce manuscrit a permis de définir précisément la problématique dans laquelle se situe ce travail. La deuxième partie présente les approches envisagées pour répondre à cette problématique et présente une méthodologie pour l'utilisation du calcul mécanique en bureau d'études supportée par une structuration des informations mises en jeu pour intégrer le calcul mécanique dans la conception de produits techniques. Le premier chapitre s'intéresse à analyser la structuration de la méthodologie proposée et qui doit s'effectuer à un niveau de description des informations manipulées suffisamment détaillé pour remplir les objectifs que nous nous sommes fixés, mais suffisamment global pour éviter toute lourdeur en terme d'utilisation dans un contexte industriel et pour gagner en généralité.

Le deuxième chapitre de cette partie capitalise l'analyse effectuée pour décortiquer les mécanismes mis en œuvre pour la formulation des buts de simulation et déroule les liens de dépendance qui permettent de gérer les interactions qui existent entre le cadre et les différentes entités manipulées. Enfin un troisième chapitre matérialise le cadre conceptuel de la méthodologie proposée et illustrée à l'aide d'un exemple le développement d'un outil spécifique permettant de supporter la simulation numérique dès les premiers stades de la conception.

Chapitre 4

Une méthodologie supportée par l'expression et la gestion des exigences du cycle de vie produit

L'intégration de la simulation dans la conception est une problématique industrielle actuelle. En particulier, les travaux sur l'organisation de l'activité de simulation en conception est l'objet d'importantes réflexions dès lors que l'on avance vers la manipulation d'objets techniques, de plus en plus souvent virtuels, de façon à réduire les temps et les coûts de la phase de développement du produit, tout en satisfaisant le niveau de qualité requis. Ce sujet, comme tous ceux relatifs à la conception de produits, requiert avant tout une analyse des pratiques industrielles actuelles.

La transformation d'un besoin émergeant en la définition d'un système lui apportant une solution met en oeuvre de multiples activités intellectuelles faisant passer progressivement de concepts abstraits à la définition rigoureuse de produits. Il est nécessaire de s'appuyer dans notre cas de recherche sur des représentations comme les exigences. Ces exigences se présentent à différents niveaux d'abstraction pour formaliser les besoins du cycle de vie produit et le but de simulation.

1. Structuration de l'expression du besoin

C'est par la connaissance de ces pratiques et l'identification des besoins à partir de ces pratiques que le processus de conception peut évoluer vers les concepts d'intégration des fonctions du produit, des outils de conception, et des connaissances relatives aux métiers et au produit. A ne pas oublier la composante planification et pilotage de toutes les tâches spécifiques à un projet qui permettent de transformer « un besoin » ou « une idée » en une solution produit tout en respectant les contraintes de coûts - délais - qualité. Ce concept supporté par le management de projet déjà évoqué dans la section 1 de la partie I. C'est dans cet objectif que nous détaillons, selon une étude réalisée par des groupes de travail composés de professionnels travaillant sur la conception au quotidien de différents secteurs d'activité, dans ce qui suit, le processus de conception et le management de projet.

1.1 Le processus de conception

Le schéma de la conception, proposé par la figure 26, fait apparaître clairement deux phases et à l'intérieur de ces deux phases, cinq étapes de la conception.

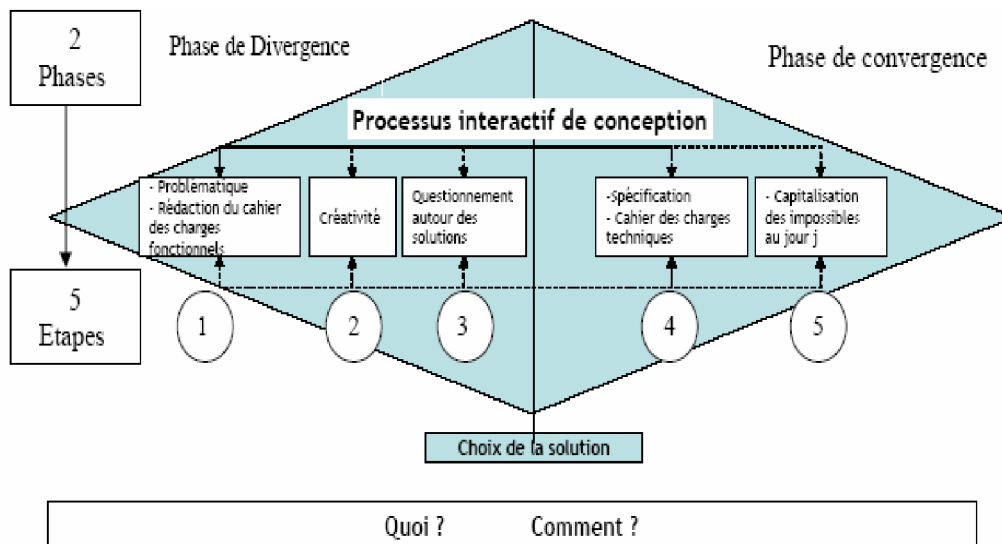


Figure 26 : Phases et étapes du processus de conception

A- Les deux phases de la conception :

- Divergence : La première phase est celle que l'on pourrait qualifier de Divergence. Le but de cette phase est de parvenir à un maximum de solutions répondant aux besoins fonctionnels du client. L'ouverture symbolise la diversité des solutions trouvées et l'accroissement du champ des possibles. A ce stade, plusieurs solutions sont proposées, ce qui explique le terme paradoxal de « divergence ».
- Convergence : La deuxième phase est celle que l'on pourrait qualifier de Convergence. Il arrive un moment où le choix devra se porter sur l'une des solutions proposées pour aboutir à un produit industrialisable. C'est la phase de convergence.

B- Les cinq étapes du processus de conception

A l'intérieur des deux phases mentionnées précédemment (divergence et convergence) s'inscrivent cinq étapes différentes qui caractérisent le processus de conception.

- Les étapes 1 et 2 répondent à la question « Quoi ? » L'analyse fonctionnelle (AF) permet de déterminer les besoins auxquels la solution devra répondre. Sa finalité est la rédaction d'un Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF) initial qui guide les équipes durant la phase 2 dite de « créativité ». Cette seconde étape a pour objectif de trouver des solutions répondant au CdCF et qui comporte le maximum de solutions innovantes, nous détaillons par la suite dans l'étude du concept (AF) cette étape.
- Les étapes 3, 4 et 5 répondent à la question « Comment ? » Ces étapes ont pour objectif de décrire comment le produit imaginé se présente « physiquement » : ses spécifications, ses qualités, ses matières... Ce sont ces étapes qui structurent le management de projet en lui donnant pour rôle d'organiser le « Qui ? » et le « Quand ? » du projet, permettant d'aboutir à la solution répondant au mieux aux besoins initiaux.

B-1) Etape 1 : Définition du besoin

Lancement du projet : la fiche de lancement

Elle comporte les documents formalisés permettant d'avoir d'un seul coup d'oeil l'ensemble des éléments clés. La fiche de lancement est un document précieux nécessaire au bon déroulement du projet. Elle doit contenir les éléments suivants :

Eléments ayant déclenché la demande du client

- Ø Contexte
- Ø Cible (utilisateur)
- Ø Enjeux (économiques & stratégiques)
- Ø Recherche de produit en rupture ou en continuité
- Ø Contraintes (temps, coût, qualité, réglementaire...)
- Ø Objectifs
- Ø Moyens
- Ø Acteurs : participants, responsabilité de chacun...

Les outils de l'analyse fonctionnelle, qui supporte cette méthode, permettent généralement d'informatiser cette fiche de lancement.

- Etude des besoins et rédaction du Cahier des Charges Fonctionnel

L'analyse des besoins des utilisateurs et le cahier des charges fonctionnel (CdDF) qui en découle vont être les documents de référence tout au long du processus de décision. Leur élaboration et la précision avec laquelle ils sont rédigés permettent d'éviter de se perdre sur des produits hors champs par rapport au cahier des charges. Les équipes de conception doivent élaborer une étude des besoins fonctionnels. Cette étude a pour objectif de connaître le détail des besoins du client, les motivations de ces besoins, ce qui existe déjà sur le marché.... Pour rédiger ce document qui servira de base à toute la conception, les concepteurs doivent donc faire appel aux clients, aux utilisateurs, aux équipes de marketing...

Si l'analyse fonctionnelle permet de réduire les incompréhensions entre l'utilisateur et le concepteur, elle ne permet en rien de se prémunir contre les changements des besoins des utilisateurs au fur et à mesure de l'évolution du projet. Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) fixe les facteurs invariants et fige à un moment donné les autres facteurs susceptibles d'évoluer. Il n'en demeure pas moins que le cahier des charges n'est jamais réellement définitif. Cette incertitude doit être considérée comme inhérente à la conception. Cependant, la réalisation d'une analyse fonctionnelle (de stabilité ou de robustesse) permet de minimiser ces risques ou de les maîtriser.

Le CdCF est un document par lequel le demandeur formule son besoin. Celui-ci est exprimé en terme de fonctions de services et de contraintes. Il se présente comme un:

Outil de cadrage : Le cahier des charges fait apparaître le cadre de la conception dans lequel (ou aux limites duquel) doivent se trouver les solutions proposées par les concepteurs. Ce cadre comprend les critères d'appréciation avec les flexibilités qui s'y rapportent. Les éléments qui doivent apparaître dans un cahier des charges sont notamment les suivants :

- § Le contexte de la demande,
- § Les motivations,
- § La traduction des attentes de l'utilisateur, ses interrogations,
- § La prise en compte des contraintes des acteurs de la conception.

Outil de réduction des risques : Le cahier des charges fonctionnel se compose de deux catégories de facteurs : les facteurs invariants (les délais...) et les facteurs variables (le marché et le contexte, le besoin, les attentes, les actions de la concurrence...). Un certain nombre d'éléments étant intuitifs ou difficilement qualifiables, un cahier des charges n'est jamais totalement achevé. Il évolue probablement tout au long de la vie du projet, ce qui veut dire que le passage du cahier des charges fonctionnel au cahier des charges définitif et détaillé est un processus interactif, continu et contradictoire.

Néanmoins, il existe dans un projet un certain nombre d'invariants qu'il appartient de bien définir. Le cahier des charges doit fixer ces éléments invariants. Il s'apparente à « un tube » à l'intérieur duquel le besoin peut évoluer durant le déroulement du projet, sans jamais en sortir. La précision de ce document est donc un outil de réduction des risques.

B-2) Etape 2 : La créativité - Recherche de solutions

Lorsque le cahier des charges est stabilisé, les équipes de conception passent à la phase dite créative. Parfois, des collaborateurs externes sont intégrés aux équipes, tels que des chercheurs, des spécialistes...afin que toutes les chances soient du côté de la créativité. Il est donc nécessaire que les concepteurs parviennent à plusieurs solutions possibles (phase dite de divergence). Il est important de comprendre que la présentation d'une seule solution est un handicap car elle condamne l'entreprise à faire en sorte que la seule solution qu'elle propose fonctionne.

- *La veille technologique – concurrentielle - scientifique*

La phase de créativité peut être très nettement améliorée et/ou accélérée par la mise en place au sein du bureau d'étude d'une veille organisée et structurée. Sans imaginer que cette dernière ne devienne une contrainte de temps trop lourde pour les concepteurs, elle doit cependant permettre aux équipes de se tenir informées des progressions de la concurrence que ce soit au niveau marketing et commercial. En cela le déploiement du QFD peut être un moyen fort intéressant dans cette phase.

- **Le « re-use »**

La créativité ne veut pas dire qu'il faut repartir de zéro. L'une des principales sources de gains (temps et argent) est d'apprendre à réutiliser des solutions techniques éprouvées (pseudo-standard). Les personnes des bureaux d'études dénomment cette faculté le « re-use ». La capacité d'un bureau d'étude à reprendre ce qui existe est une source considérable d'accroissement de la productivité de la conception.

- **B-3) Etape 3 : Questionnement et analyse critique**

L'étape de questionnement consiste à remettre en question les solutions retenues avec pour objectif de s'assurer que la solution retenue a bien pris en compte toutes les contraintes et les exigences du client. Les Critères de choix de cette analyse doivent tenir compte des trois critères de choix majeurs : coût – délais – qualité. (On entend ici par qualité, la satisfaction de l'utilisateur face au produit).

- Coût : en terme de coût, la méthode préconisée est la méthode du coût global.
- Qualité : jugement par des critères qualitatifs et quantitatifs de la satisfaction du client, comparaison à la concurrence. Pour juger de la qualité peuvent être organisées des réunions regroupant des collaborateurs des différents services, des utilisateurs, ... à qui l'on demande de critiquer le produit.
- Délais : à coût et qualité égale, la solution ayant le délai le plus réduit est sélectionné. Il est important de préciser que le poids des trois critères varie selon les projets et les contraintes du client.

Cette analyse est indispensable et débouche sur une décision qui fait passer le projet de la phase de divergence à la phase de convergence : la sélection de la solution retenue. Il arrive qu'aucune solution ne soit retenue. Dans ce cas, le projet peut être abandonné (projet impossible), mis en attente ou réinitialisé.

- **Choix de la solution et capitalisation sur les solutions écartées**

Enfin, la dernière phase du questionnement consiste à connaître les solutions qui n'ont pas été retenues et pourquoi elles ne l'ont pas été. Cela est important en terme de capitalisation, car une solution non retenue aujourd'hui peut l'être demain grâce à l'évolution des technologies, du contexte ou tout autre facteur.

B-4) Etape 4 : Rédaction du Cahier des Charges Techniques Particulières (CCTP)

L'étape 4 est la première étape de la phase convergence qui doit aboutir à la mise en production de la solution retenue. A la phase créative, succède donc une phase

très technique visant à construire le document qui servira de support aux entités de production : il s'agit du Cahier des Charges Techniques Particulières (le CCTP). Ce cahier des charges techniques doit :

- § prendre en compte les éléments capables d'impacter le produit durant toute sa vie : réglementation, environnement, ... ;
- § anticiper les problèmes que la production pourrait éventuellement rencontrer.
- § La mise en parallèle des phases Le délai entre le début de la phase de conception et la phase de production ne cesse aujourd'hui de se réduire. Le plus souvent, des sous-éléments du produit partent en production avant même que la conception complète ne soit achevée. Cette manière d'opérer vise bien sûr à parvenir à des réductions de délais et donc de coûts. Mais en contrepartie, cette réduction des délais exige une coordination encore plus fine des projets et un pilotage renforcé des risques.

- La qualification :

La mise en parallèle des phases sous-entend une validation du produit (ou qualification : niveau de performance et longévité de ce niveau) postérieure à la spécification (les plans sont faits et l'on demande de réaliser les outils nécessaires à la production). Ceci est un problème car on découvre les imperfections, voire les dysfonctionnements après l'engagement de certaines dépenses. Ces dysfonctionnements donnent alors lieu à des coûts supplémentaires non négligeables.

B-5) Etape 5 : Capitalisation

L'étape de capitalisation doit permettre de tirer le meilleur parti du projet de conception et notamment le re-use de solutions ou de sous-ensemble des solutions, tant pour la solution retenue que pour celles écartées.

1.2 Le management de projet

Si le processus de conception se compose de 5 grandes étapes, le management de projet concerne la planification et le pilotage de toutes les tâches spécifiques à un projet qui permettent au besoin identifié de déboucher sur une « solution - produit », tout en respectant les contraintes coûts - délais - qualité. Le management de projet de conception planifie le projet dans le temps en organisant le « Qui ? » et le « Quand ? » à destination des équipes de conception. Le management de projet organise leur travail au quotidien.

- **Quand (dans quel ordre) ?** : Cette interrogation centrée autour du « Quand ? » organise la réalisation des 5 grandes étapes détaillées précédemment. Le quand est donc propre à chaque projet.
- **Avec quelles règles ?** : Quelles sont les règles à suivre pour aboutir à l'excellence en conception : Répartition des rôles, rythme....? Cette étape permet de piloter la maturité du projet afin de suivre le rythme (délais) initialement prévu.

Cependant et avant toute chose, la préparation d'un projet de conception doit commencer par le découpage de ce dernier en tâches élémentaires. Le découpage du projet en sous-ensembles (éléments ou lots) permet de considérer chacun d'eux comme un projet en soi. Ceci améliore la compréhension du projet dans son ensemble. Chaque sous-ensemble est plus facile à appréhender par sa taille, ses intervenants et ses objectifs réduits. Sur chacun de ces sous-ensembles (et donc au final sur le projet de conception dans son intégralité), le chef de projet doit mettre en place des indicateurs de contrôle et de mesure des risques. Ces indicateurs permettront également d'assurer la « communication » auprès des acteurs d'autres sous-projets qui doivent être informés des changements survenus afin d'en tenir compte s'il y a lieu.

Pour cela, il existe des trames permettant de n'oublier aucun point du projet pouvant comporter des risques. Il existe des méthodes telles que Le PM Book « Project Management Body Of Knowledge », émanant du Project Management Institute (Darby, PA, USA) qui structure les projets en 9 sous-projets :

1. Intégration des métiers
2. Scope (contenu, contour, périmètre, ...)
3. Temps
4. Coût
5. Qualité
6. Ressources Humaines
7. Communication
8. Risque
9. Procurement (achats)

Ce document doit être utilisé comme une « check list » du risque.

Au delà du suivi des risques par des indicateurs qualitatifs, le chef de projet doit mettre en place une méthode de chiffrage des risques permettant de transformer des données textuelles et qualitatives en données monétaires afin d'en faire un outil d'aide à la décision.

Il faut identifier deux niveaux de risques :

- le premier au niveau du déroulement du projet (exemple : le chef de projet démissionne en cours de projet : comment l'entreprise est-elle préparée ?)

- le second au niveau du produit et de son utilisation (exemple : à l'usage quels sont les risques liés au produit ?). Ceci nécessite une analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC).

1.3 La mise en œuvre des outils d'aide au concepteur

Les bureaux d'études sont aujourd'hui confrontés à un problème de compétitivité qui se traduit par la nécessité de concevoir des produits de qualité, au sens où le produit doit répondre au plus près des besoins du client, au moindre coût et dans les délais les plus courts possibles. Pour s'adapter à ce nouveau contexte économique, ils ont dû modifier leurs démarches de conception et leur organisation. La démarche de conception intégrée, mise en œuvre dans un environnement d'ingénierie simultanée, tend de plus en plus à remplacer les modèles de conception séquentiels. Cette problématique d'intégration a d'abord été entendue comme une intégration des connaissances, ce qui suppose pouvoir mettre à la disposition des concepteurs des bureaux d'études des outils dans lesquels sont intégrées les connaissances des métiers avants du cycle de vie du produit. La mise en œuvre de ces outils permet alors de soumettre le produit, virtuellement défini, à des évaluations (tests, simulations, ...) pour prendre des décisions identiques à celles que prendraient les acteurs métiers, si on les consultait à ce moment de la conception. Diverses méthodes Djeapragache & al, dans [Djea & al 98], W. Eversheim dans [Eversheim 97] et C. Foure dans [Foure 96], d'aide à la conception ont vu le jour, fournissant des outils et préconisant une certaine organisation des activités de conception.

De cette panoplie d'outils utiles au concepteur pour appréhender les différentes phases de son projet, nous avons voulu centrer notre intérêt sur ceux pouvant s'intégrer dans un macro processus basé sur la volonté de considérer trois points de vue complémentaire :

- l'aspect fonctionnel, traité avec la méthode de *l'analyse fonctionnelle*, et qui traduit les besoins exprimés voire attendus par le client en spécifications techniques, sous forme de fonctions.
- l'aspect technique considérant les diverses solutions susceptibles de répondre au besoin précédemment exprimé et utilisant la méthode *QFD*: déploiement des fonctions qualités (ou Quality Function Deployment) qui contribue dans ce cadre à l'évaluation des choix effectués
- l'aspect fiabilité des produits étudié à travers la méthode AMDEC (*Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité*)

Cette proposition est basée sur des hypothèses concernant :

- Le processus de conception sous ses aspects techniques, en d'autres termes, elle suppose qu'une analyse fonctionnelle précède le début du processus de conception sous ses aspects techniques.
- La démarche d'intégration de toutes les disciplines impliquées dans le cycle de vie d'un système en tenant compte des différents besoins, pour pouvoir développer une solution à la fois économique, performante et satisfaisant tous les points de vue. En d'autres termes la démarche de l'Ingénierie Système
- L'adoption d'ingénierie partagée qui permet de faire intervenir le meilleur spécialiste pour traiter un problème.

Des travaux récents réalisés en collaboration entre des mécaniciens et des sociologues [Blanco 96] et [Boujut 96], montrent l'importance de la prise en compte de l'usage dans la conception de nouveaux outils d'aide à la conception mécanique, En fait la première section de ce chapitre a pu mettre en évidence les pratiques réelles des phases du projet de conception.

1.3.1 Les concepts de l'Analyse Fonctionnelle.

L'analyse Fonctionnelle (AF) se définit dans [Eversheim 97], comme une méthode qui décrit complètement les fonctions et leurs relations, qui sont systématiquement caractérisées, classées et évaluées. Originellement (normes de 1985), elle est considérée comme une étape initiale de la conception d'un système mécanique, ayant comme objectif de déterminer le besoin à satisfaire pour l'utilisateur ou le demandeur. Elle s'appuie sur les concepts de Besoin, de Fonction de service (qui se décline en fonction d'usage, partie rationnelle du besoin, et fonction d'estime, partie subjective du besoin), de contrainte définie comme une limitation à la liberté du concepteur - réalisateur d'un produit. La caractérisation des fonctions doit conduire à définir des paramètres (critères d'appréciation) qui, associés à des échelles de valeur (niveaux) et à des taux d'échanges possibles sur ces niveaux (flexibilités), seront des références pour l'évaluation des performances du produit en cours de conception. Les outils mis à disposition pour définir le besoin utilisateur sont l'aide à l'expression du besoin (Bête à cornes), le contrôle de validité, le graphe des interactions (Pieuvre), le tableau de caractérisation des fonctions [Lefebvre 97]. Menée en groupe qualifié de pluridisciplinaire, au sens où le groupe de travail doit regrouper toutes les compétences requises pour traiter le travail, l'AF est vue comme conduisant l'ensemble des acteurs métiers ainsi réunis à interroger les besoins client et à les consigner dans le Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF). Les Fonctions de service ainsi définies sont alors déclinées en Fonctions Techniques (Utilisation de l'outil FAST), puis à terme en différentes solutions par les concepteurs de bureau d'études. Dans cette acceptation de l'AF, ce sont les attentes et contraintes du client qui sont premières et qui vont devenir

des prescriptions pour l'ensemble des acteurs participant à la conception et à la réalisation, les obligeant à optimiser, chacun dans leur propre métier, leurs propres contraintes. Le modèle de coordination des activités de conception suggéré ici est un modèle qui a les caractéristiques d'un modèle séquentiel.

Concernant l'évolution des normes définissant l'AF, celles de 1996 font explicitement apparaître deux concepts nouveaux : celui de point de vue, qualifié d'externe ou d'interne, et celui de cycle de vie. Le point de vue externe, celui du client, de l'utilisateur, ne s'intéresse au produit que comme une boîte noire, capable de fournir des services dans son environnement durant son cycle d'utilisation. Il conduit à l'AF Externe, parfois nommée AF du besoin, qui doit expliciter les services que devra rendre le produit. Le point de vue interne est celui du concepteur en charge de fournir le système qui répondra aux besoins identifiés. Il conduit à l'AF interne, parfois nommée AF Technique, qui permet d'analyser les ressources nécessaires et leur affectation au regard du service à rendre. Le cycle de vie, ensemble des situations dans lesquelles se trouve le produit au cours de sa vie, de l'expression du besoin à son retrait de service, inclus le cycle d'utilisation, ensemble de situations du produit dans sa phase d'utilisation qui peuvent être d'emploi effectif ou de non emploi (stockage, livraison, entretien).

Parallèlement le concept de contrainte évoluée, défini maintenant comme caractéristique, effet ou disposition de conception, qui est rendu obligatoire, [Prudhomme 01]. Ainsi est suggéré le fait que ce sont les contraintes ou les exigences fonctionnelles de tout le cycle vie qui doivent être considérées, les contraintes que nous qualifierons d'externes et qui concernent les finalités (effets) comme les contraintes que nous qualifierons d'internes et qui concernent les solutions (disposition de conception). Selon notre analyse de l'évolution des normes, les deux types de contraintes (externes et internes) sont alors à considérer de manière simultanée au moment de la définition des besoins, besoins qui ne sont plus uniquement ceux du client, mais ceux de tous les acteurs du cycle de vie du produit. La notion de client ne renvoie alors plus au seul client externe, auquel doit répondre l'ensemble des acteurs métiers de la conception - fabrication. Tous les acteurs du cycle de vie doivent être considérés comme des clients, externes et internes, tendus vers un même objectif : celui de la réalisation consensuelle du produit, rejoignant ainsi les principes de conception intégrée.

Dans le cadre de l'approche fonctionnelle développée dans le projet PIRAMID, l'analyse fonctionnelle est définie comme méthode qui permet de parvenir à une optimisation du produit du point de vue de la satisfaction de son utilisation. Le produit se situe dans un environnement avec lequel il interagit, et il est alors considéré comme un système. La méthode considère alors ce système du point de vue de sa finalité, et met en évidence la qualité d'un produit par l'expression de son usage.

Son application se déroule en trois étapes : expression et description du besoin, définition des fonctions attendues, établissement des blocs-diagrammes

fonctionnels. L'expression du besoin se traduit dans le vocabulaire du produit par la notion de fonction. Trois types de fonctions sont utilisés par la méthode : les fonctions principales, les fonctions contraintes et les fonctions de conception. La fiche de synthèse de la méthode, répondant aux questions formulées précédemment, apparaît sur la figure 27.

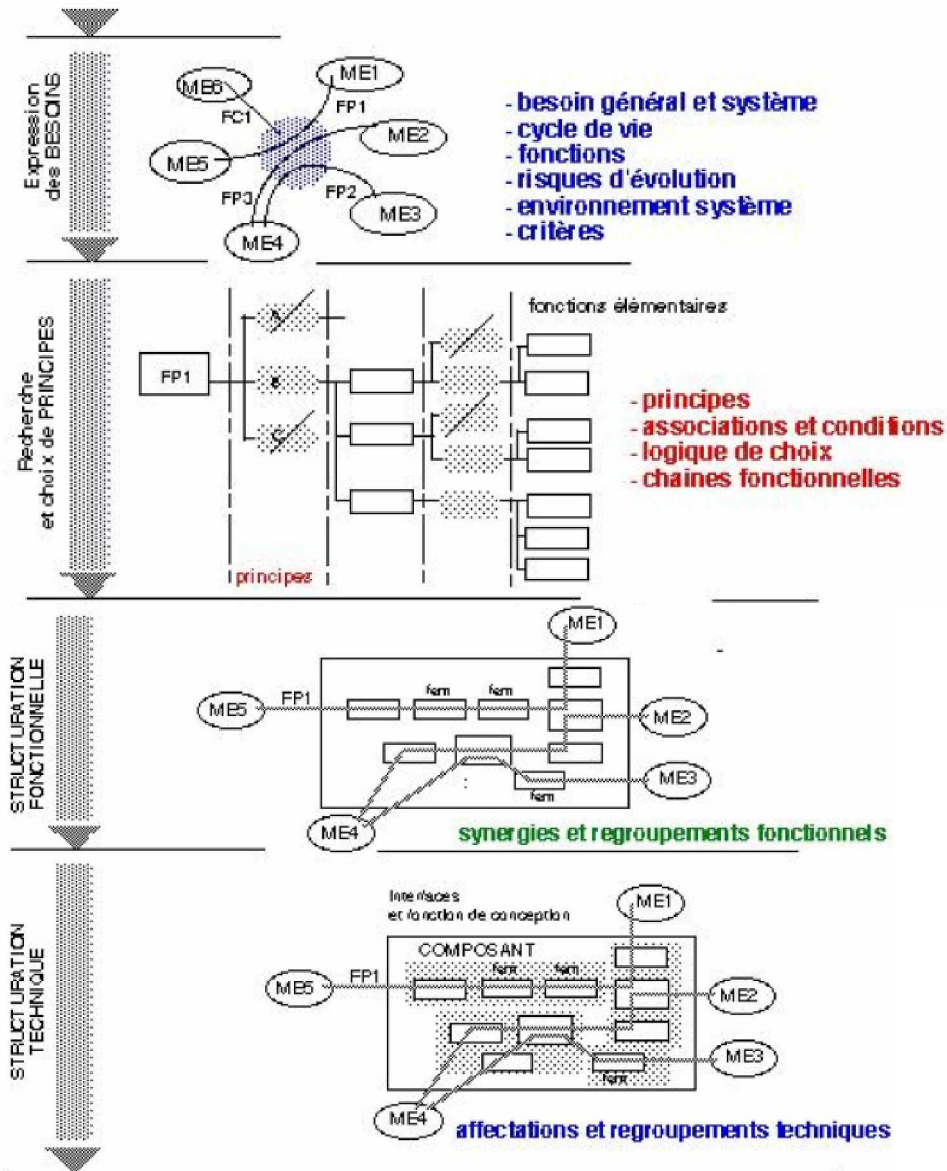


Figure 27 Représentation synthétique de l'Analyse Fonctionnelle

1.3.2 Mise en usage des outils de la méthode AF

L'AF, telle qu'elle est présentée par la norme, est une méthode fonctionnelle, permettant l'expression du besoin en termes de finalités sans référence aux solutions susceptibles d'y répondre, structurée, car faisant progresser logiquement du besoin à ce qui le satisfait, du résultat à obtenir aux éléments à mettre en place pour l'obtenir.

La méthode se veut structurée, systématique (figure 28). Partant d'un désir, potentiel ou succinctement exprimé dans un Cahier des Charges Initial (CdCI), elle préconise, après confirmation de son existence effective, l'expression du besoin en termes fonctionnels, sans référence aux solutions. L'ensemble des Fonctions de Service, caractérisées et hiérarchisées, issues de cette AF externe participent à l'élaboration du premier Cahier des Charges Fonctionnel. Les Fonctions de service doivent ensuite être déclinées, au cours d'une AF interne, en Fonctions Techniques (FT), puis en solutions susceptibles d'assurer ces FT. C'est donc une structuration des activités assez linéaire que propose la norme, même si d'autres versions du CdCF sont envisagées, une deuxième suite à une étude de faisabilité et une troisième après l'avant projet.

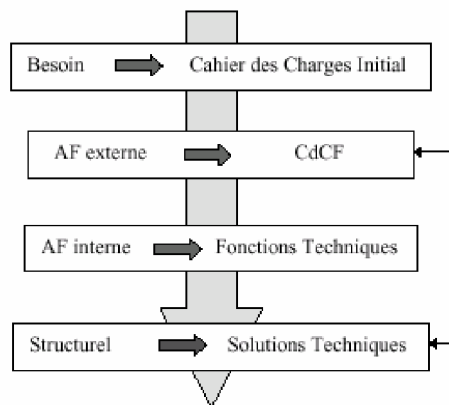


Figure 28 : Modèle d'organisation des activités de conception proposé par la méthode AF

La méthode AF a évolué en parallèle avec les contextes industriels de la fin du 20ème siècle. De nouveaux concepts apparaissent (cycle de vie, point de vue externe et interne), d'autres évoluent (contraintes) pour prendre en compte au plutôt les différents métiers du cycle de vie du produit. Orientée initialement vers la définition du besoin du client externe (les clients internes optimisant leurs

contraintes pour lui répondre) elle s'organise aujourd'hui autour des besoins des clients externes et internes caractérisant et concevant collectivement le produit.

L'AF est une démarche effective, s'appuyant sur les relations fonctions de service – fonctions techniques (ou solutions) et sur les relations entre les critères d'appréciations de ces différentes fonctions, se construit dans l'action. La coordination des différentes activités s'élabore de manière coopérative en s'appuyant sur les définitions simultanées du problème, consigné dans le CdCF, et des solutions supposées possibles. Répondant ainsi à une démarche d'ingénierie système. Cette étape permet de comparer un produit existant au cahier des charges fonctionnel que l'on vient d'achever.

On peut ainsi comparer :

- les fonctions avec les intitulés,
- les critères, leurs niveaux de réalisation et les flexibilités associées,
- le sens du produit existant et l'arbre fonctionnel retenu,
- les moyens affectés aux fonctions et l'histogramme obtenu à la hiérarchisation.

1.3.3 Les concepts du QFD

La méthode QFD (Quality Function Deployment) est une méthode de conduite de projet qui permet de traduire les attentes du client en spécifications internes à l'entreprise à chaque stade de la conception intégrée produit et procédé :

- recherche et développement,
- études, méthodes fabrication,
- commercial, vente et distribution ;

Elle permet aussi de réduire les délais de développement en se focalisant sur les priorités :

- exigences du client,
- qualité, coûts et délais (QCD),
- performances techniques.

Le QFD contribue à la satisfaction des clients en nous faisant part de leurs attentes, parce qu'elle associe tous les services de l'entreprise. Pour cette raison, le QFD s'inscrit pleinement dans une démarche globale de réduction des coûts et délais propre à une action qualité totale. Le QFD sera mené surtout en phase amont d'un nouveau projet, à un stade où le large éventail de choix est encore possible. La méthode QFD ne peut être déroulée sans définir préalablement les objectifs, qui sont différents selon le contexte et le résultat attendu : développement du produit et mise en œuvre du service, fiabilisation d'une réponse à appel d'offres, analyse de satisfaction, mise en place d'une nouvelle organisation...

L'outil de base QFD est la maison de la qualité. Elle consiste à développer le concept entier d'un nouveau produit ou service en partant des besoins des clients et en déterminant les caractéristiques à lui donner et l'importance relative à chacune d'elles. Il en résulte une grille qui permet de bien voir le processus de conception et son résultat. La méthode QFD se déroule en deux phases : la construction de la maison de la qualité et le déploiement de la maison de la qualité. Elle s'appuie sur un déploiement de matrices. La mise en œuvre de la première phase du QFD voir (figure 29), consiste à élaborer puis à déployer dans toute l'entreprise des matrices QUOI - COMMENT qui permettent à la fois :

- § De définir les spécifications d'un produit concurrents
- § De comparer le produit avec ses produits concurrents
- § De faire apparaître la solution optimale à mettre en place par l'entreprise.

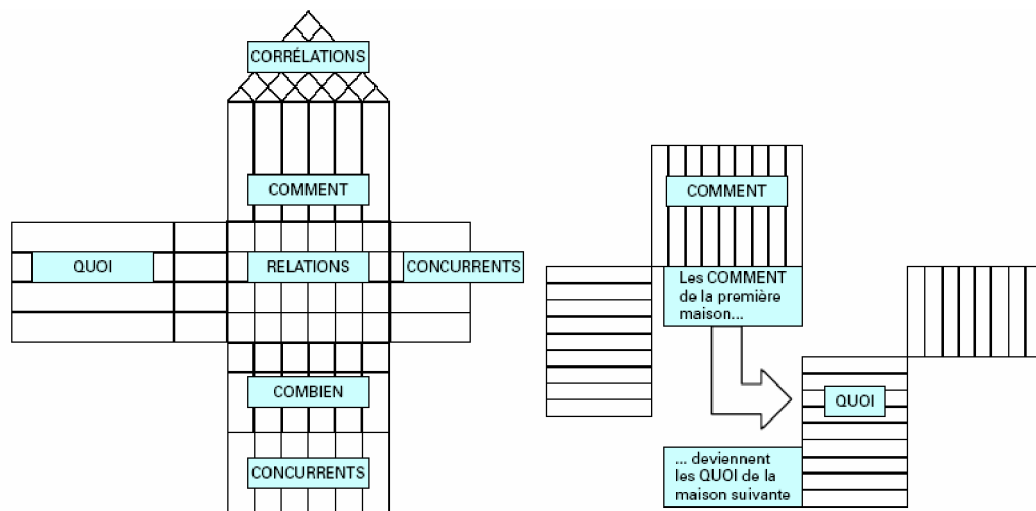


Figure 29 : Construction de la maison de la qualité. Méthode QFD.

Source : TI [E. LE COZ] AG 1 771

La démarche consiste à traduire la voix du client dans le langage des ingénieurs de développement. Les principaux éléments à prendre en compte dans ce cadre sont alors : les critères de valeur du produit, les enquêtes marketing, les matrices relationnelles, la sélection des paramètres critiques. Dans la pratique, la plupart des applications du QFD se limitent à la construction d'une seule maison de la qualité. La méthode offre cependant des possibilités qui vont bien au-delà de cette première phase. En effet, on peut, à l'étape du déploiement, préciser encore davantage les exigences des clients. On reprend alors la démarche (construire une deuxième maison) en partant d'éléments de la première. On transfère l'information

d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Le comment et le combien (étapes 2 et 4) de la première maison deviennent le quoi (étape 1) de la seconde maison (figure 30).

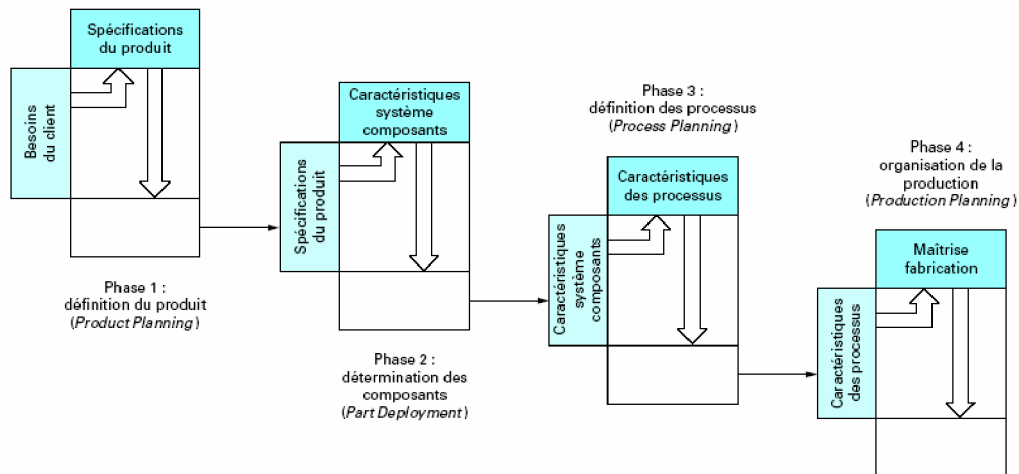


Figure 30 – Déploiement de la fonction qualité à tous les services de l'entreprise.

Source : TI [E. LE COZ] AG 1 771

D'après les travaux de [Bocquet 99], [Chuen-lung 92], et [Eversheim 97] cette méthode permet de répondre à trois questions : quelles sont les attentes clients à considérer en priorité pour assurer la réussite commerciale du produit ? Quelles sont les réponses techniques à privilégier ? Et quelles sont les difficultés potentielles du cycle de développement de produit? La réponse à ces questions est apportée par une équipe projet formée de personnes complémentaires réunies autour de la problématique à solutionner.

Dans son livre sur Le QFD, Takao Taniguchi, Directeur ingénierie de la société Aishin-Warner, témoigne de l'intérêt du QFD dans un BE (en Annexe d'autres témoignages sont proposés).

Une tendance à la diversification des produits, à la multi-fonctionnalité et à la réduction des coûts se dessine de plus en plus clairement depuis quelque temps. Pour assurer la survie de l'entreprise, nous devons nous conformer à cette tendance en créant de nouvelles techniques et de nouveaux produits. Il est donc essentiel d'améliorer la maîtrise de la technologie. Le QFD peut jouer un rôle important pour répondre à ces défis parce que l'accent est mis sur :

- § La maîtrise de l'information liée au développement à moyen et long terme visant à anticiper les besoins ;

- § La maîtrise de la fiabilité de nouveaux produits ;
- § Une conception de la fiabilité à l'aide de simulation.

1.3.4 Les concepts de l'AMDEC

Applicable à un produit, un procédé ou un projet, l'AMDEC permet d'optimiser la fiabilité en détectant les erreurs à un stade précoce et en les prévenant. L'AMDEC est une méthode préventive et inductive. Elle consiste à détecter le plus tôt possible les caractéristiques critiques d'un produit ou d'un procédé afin d'engager des actions préventives.

La méthode s'applique au stade de la conception et de l'industrialisation des produits et des procédés. L'AMDEC peut s'intéresser :

- Ä à un produit industriel ou de service (AMDEC produit) ;
- Ä à un procédé (AMDEC processus) ;
- Ä à un moyen de production (AMDEC moyen).

L'AMDEC utilise les caractéristiques d'un produit permettant d'instaurer un dialogue entre plusieurs entités de l'entreprise comme le bureau d'études, les services de design, les personnels chargés de la réalisation, de l'industrialisation, de la commercialisation, de la maintenance, du service après-vente... en prenant en compte plus précisément le triptyque Produit - Procédé - Processus. Une méthode de la famille des outils, de la sûreté de fonctionnement comme le montre la figure 31. De nombreux auteurs ont écrit sur cette méthode et nous soulignons les travaux de C. Martin dans [Martin 99] qui nous dévoilent que l'analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) doit permettre aux acteurs du projet d'anticiper d'éventuels aléas. Cette réflexion conduira naturellement aux solutions techniques ou organisationnelles destinées à faire disparaître ou tolérer les modes de dysfonctionnement potentiels.

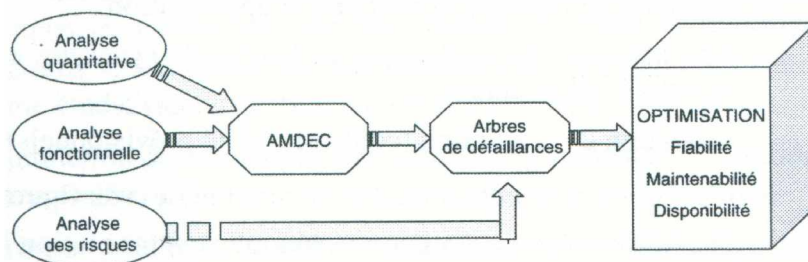


Figure 31 Méthode et outils de la sûreté de fonctionnement

L'AMDEC constitue donc un système extrêmement puissant d'aide à la conception des systèmes. L'AMDEC permet de déterminer les points faibles d'un système et

d'y apporter des remèdes, de préciser les moyens de se prémunir contre certaines défaillances, de faire dialoguer les personnes concernées par un projet, mieux connaître le système, et principalement d'étudier les conséquences de défaillance vis-à-vis des composantes majeures de la sûreté de fonctionnement : fiabilité, disponibilité, sécurité, maintenabilité...

Les AMDEC doivent être remises à jour périodiquement. Leur contrôle systématique doit avoir pour but :

- De s'assurer qu'elles ont été rédigées dans un esprit participatif et non pas pour satisfaire les visées d'un petit groupe de personnes
- De garantir que les informations transitent entre les différents niveaux
- D'analyser les raisons pour lesquelles une action qui a été recommandée n'est pas prise en compte.

1.3.5 Intéropérativité de ces trois méthodes

Les méthodes présentées précédemment ne permettent pas une comparaison directe. Cela n'aurait pas de sens, car les buts recherchés dans chaque méthode sont très différents. Pour cette raison, l'utilité de ces trois méthodes est dans son intégration dans des démarches plus globales de conception ou d'analyse de problèmes par la vision qu'offrent les méthodes.

Nos objectifs qui concernent le lien entre la conception et la simulation numérique se basent sur une modélisation de l'activité de calcul dans la conception et visent à répondre à différents besoins que nous avons déjà cités dans le chapitre 2. Nous rappelons l'objectif qui s'attache à la prise en compte des critères et des besoins à l'origine de l'analyse pour la capitalisation et la réutilisation des connaissances de simulation numérique afin de formaliser un but de simulation qui permet de maîtriser les erreurs faites durant l'ensemble du processus de calcul. Le constat que nous avons eu, retient la nécessité de capturer l'ensemble des critères et des besoins dans la phase de vie du produit pour réussir de formaliser un bon but de simulation. Ce dernier doit refléter une maîtrise de la phase de conception et une assurance qualité des essais numériques. Cependant, nos observations, lors de la mise en usage de la méthode Analyse Fonctionnelle dans les bureaux d'études, montrent que l'approche fonctionnelle se traduit par un regard interactif entre fonctions et solutions où l'aspect fonctionnelle du produit est détaillé. La méthode QFD permet de cibler l'aspect technique du produit par l'expression des justes paramètres nécessaires pour satisfaire le client, travailler sur la qualité perçue et découvrir tôt dans le cycle de déroulement du projet les points techniques sensibles pour lesquels des mesures préventives pourront et vraisemblablement devront être prises cette méthode incite l'innovation du produit et l'évolution de la conception au cours du temps.

Seulement de nos jours, la composante « sûreté de fonctionnement » d'un produit en service représente un facteur primordial dans la phase de conception, vu qu'elle doit répondre aux exigences de situation de vie du produit.

Pour cela, le concepteur doit installer un scénario d'utilisation du produit dans son environnement réel pour un respect de la fiabilité et la disponibilité (l'exigence du marché), de la sécurité (exigence des normes) et la maintenabilité (exigence de l'utilisateur).

De plus, les méthodes évoquées, nécessitant la présence des différents acteurs métiers dès le début de la conception, s'intègrent dans une démarche qualité. Une démarche possible dans laquelle ces trois méthodes sont intégrées est inspirée des travaux présentés par [Djea 98] et représentée dans la figure 31. En fait, ces méthodes utilisent les sept nouveaux outils du management de la qualité pour déployer la fonction qualité à tous les niveaux de l'entreprise afin de satisfaire les exigences des clients, les traduire en objectifs de conception et en points clés qui seront nécessaires pour assurer la qualité en phase conception. Ils participent activement à l'amélioration du produit par les membres du groupe de développement produit dit aussi groupe pluridisciplinaire, dont la présence des concepteurs est capitale et qui coopèrent activement. De plus, nous devons aussi prendre en compte la multiplicité des modèles manipulés à un instant donné de la conception et l'évolution de la conception et des calculs au cours du temps. Dans ce cas le recours aux démarches de l'ingénierie système permet de riposter aux contraintes citées.

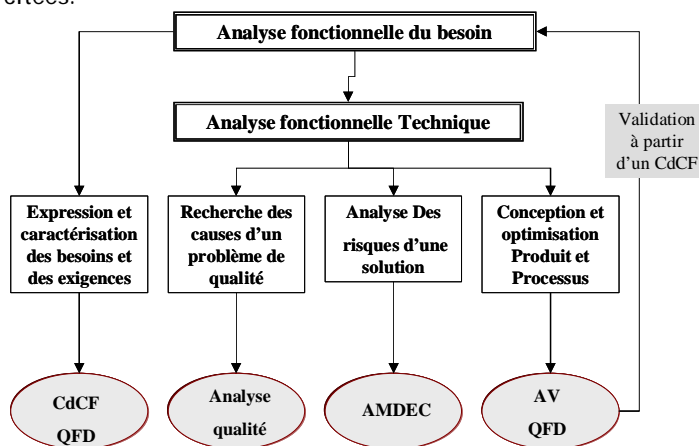


Figure 32 : Intégration de l'AF, le QFD et l'AMDEC dans une démarche qualité (Djea 98)

Etablir la relation entre les finalités des différentes méthodes, avec un objectif commun, améliorer la conception par l'expression des besoins des clients est

traduite en paramètres exploitables par le concepteur, formalisée dans des documents tels que le Cahier de charges Fonctionnel Produit (CdCF produit), qui doit contenir les fonctions de services attendues du produit ainsi que les critères de valeur associés. Ces critères doivent indirectement justifier que notre futur produit s'adapte vraiment aux attentes clients et répond aux différentes contraintes de conception ainsi que les contraintes du cycle de développement produit. Cette transformation de données d'entrée (sous forme des "besoins clients") est réalisée à l'aide de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin, qui garantit l'adéquation entre le Cahier de Charges Fonctionnel Produit et les attentes client. L'étape suivante commence avec le Cahier des Charges de Conception, car à partir de ce document, le concepteur établit une ou plusieurs solutions techniques, et pour comparer ces différentes solutions techniques que l'entreprise est susceptible de mettre en place, le concepteur peut employer la méthode QFD. Cette méthode lui permettra de garantir que la solution technique choisie emploie, de la meilleure façon possible, les différentes ressources techniques existantes dans l'entreprise. Une fois le choix de la, ou des solution(s) technique(s) effectué, nous pouvons valider l'adéquation de celle-ci au Cahier des Charges Fonctionnel préalablement établi.

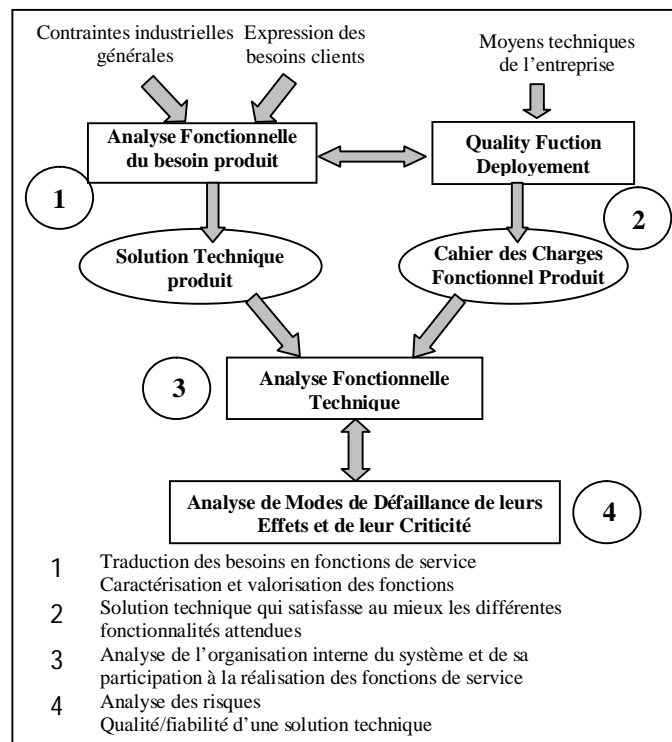


Figure 33 : Relation d'association entre les méthodes de conception, [Martin 98]

Cette vérification est effectuée à l'aide de la méthode AMDEC Produit, qui nécessite à la base une Analyse Fonctionnelle Technique du produit. La figure 33, ci-dessous d'après [Martin 98], nous montre une représentation schématique résumant cette démarche.

Un élément essentiel à prendre en compte dans la considération de ces trois méthodes est celui de l'intégration de la démarche d'ingénierie système. Celle-ci nécessite l'intégration de toutes les disciplines impliquées dans le cycle de vie d'un système en tenant compte des différents besoins, pour pouvoir développer une solution à la fois économique, performante et satisfaisant tous les points de vue. Nous avons pu découvrir dans le chapitre 3 de la première partie que l'IS porte sur différents éléments dont la simulation, la Sécurité de fonctionnement et la conception sont à considérer dans cette approche.

De plus l'ingénierie système se présente comme étant une démarche de résolution de problèmes consistant à assurer la compatibilité fonctionnelle et organique du système avec les besoins d'équilibrer l'économie globale de la solution, sur tous les aspects du problème, dans toutes les phases de la vie du système (point de vue de l'utilisateur) et finalement de rechercher l'équilibre entre *les exigences, les contraintes, les performances, les coûts, les délais et les risques* du projet (point de vue du concepteur). Trois points de vue qui soulignent l'intérêt et l'intégration des méthodes proposées dans une démarche d'IS.

2. La gestion des exigences du cycle de vie produit

La réussite d'un produit se mesure d'abord à l'aune de la satisfaction de ses utilisateurs. Dans un contexte de développement d'un produit qui s'intègre dans des environnements complexes et variés, l'enjeu de la maîtrise des exigences est d'abord de prendre en compte et satisfaire tous les besoins et contraintes des parties intéressées de près ou de loin par l'utilisation et l'exploitation du produit. Il est aussi de répondre aux attentes et contraintes des parties prenantes participant à sa conception, sa production, son déploiement, sa commercialisation, son maintien en condition opérationnelle et son retrait de service.

La démarche d'Ingénierie Système permet, progressivement, de construire la définition du système et de la justifier. Tout au long de son déroulement, les activités de spécification et de conception, qui sont au cœur de la démarche, reposent sur des activités de soutien dont les principales sont :

- La maîtrise des exigences et la maîtrise de la configuration,
- Les évaluations, vérifications et validations,
- La maîtrise des risques et les revues.

Comme décrit dans l'EIA 632 (figure 23 du chapitre 3 de la partie I), la contribution essentielle d'un système associé pour la conception d'un produit final, se situe dans l'analyse des exigences. Nous sommes en mesure de confirmer théoriquement ce point de vue : l'analyse des exigences du produit final apporte la source des informations acquises à partir de chaque système associé. En revanche, la description de l'ingénierie, comme la conception fonctionnelle et organique des systèmes associés n'est pas abordée dans le standard EIA 632 [EIA632 -98].

D'après l'AFIS, pour structurer une démarche d'IS, il faut adapter les méthodes et outils au contexte de l'entreprise et des projets afin de conduire les activités de support de la démarche d'IS dont la principale est celle de l'ingénierie des exigences. Une activité du processus techniques qui assure la définition la vérification et l'évolution d'un système.

La transformation d'un besoin émergeant en la définition d'un système lui apportant une solution met en oeuvre de multiples activités intellectuelles faisant passer progressivement de concepts abstraits à la définition rigoureuse de produits. Il est nécessaire de s'appuyer dans notre cas de recherche sur des représentations comme les exigences. Ces exigences se présentent à différents niveaux d'abstraction pour formaliser les besoins du cycle de vie produit et le but de simulation.

La construction d'un système de gestion des exigences doit donc tenir compte de ce besoin de pouvoir fournir aux acteurs de la simulation les bonnes descriptions des exigences en rapport avec les objectifs de la simulation et la définition du produit. On se propose au travers des méthodes et outils présentés précédemment de fournir une solution capable de piloter le processus de conception vis à vis des simulations et d'assurer la traçabilité de la validation ou de la vérification d'exigences par des simulations numériques tout au long du cycle de vie produit.

Nous introduisons l'idée d'un environnement de simulation basé sur une interaction continue entre la gestion des exigences du cycle de vie produit et les systèmes d'échange d'informations, dans le but de réaliser des simulations fiables et répétables. Pour cela, la première étape vers la gestion de la compréhension des exigences est de convenir d'un vocabulaire commun, capable de traduire le vrai sens de l'exigence. Puisque la conformité aux exigences définit le succès ou l'échec d'un projet, il est primordial d'identifier les exigences, de les décrire, de les organiser et de les suivre au cours de leur évolution.

- AFIS : Association Française d'Ingénierie Système (www.afis.fr)

2.1 Analyse des exigences du cycle de vie produit

Pour chaque métier, les acteurs impliqués dans la définition du produit disposent de leurs propres visions et fournissent des définitions individuelles des exigences. La raison majeure de ce conflit est expliquée par une vision limitée du rôle que peut jouer cette entité dans la phase de développement du produit. Pour cela, le besoin de génération efficace des exigences est probablement, aujourd'hui, la première priorité dans la phase de développement de produit.

Comme nous l'avons évoqué dans la présentation des standards relatifs à l'IS dans le chapitre 3 de la partie I, l'analyse des exigences est un processus capital selon IEEE 1220 dans [IEEE1220 - 02], qui permet d'amorcer le processus d'analyse de la conception fonctionnelle figure 22 (chapitre 3). Dans les processus de l'ISO 15288 dans [ISO15288 -00] et selon [INCOSE 06], l'analyse des exigences est un sous processus du processus technique qui permet aussi d'engager le sous processus de conception.

D'après Pradip Kar dans [kar 96], il est généralement admis que le développement de bonnes exigences est essentiel pour la conception d'un produit de qualité. Seulement, il est bien connu que les exigences, dans beaucoup de projets passés, sont pauvrement écrites. La raison de cette anomalie est expliquée par une mauvaise définition du besoin client et une insuffisance en temps et en effort dédiées à la définition des exigences. De plus, nous retiendrons plusieurs échecs de projet de référence engendrés par de mauvaises définitions des exigences. Parmi les problèmes fondamentaux associés à la rédaction de bonnes exigences, nous identifions celui lié à la formation des ingénieurs sur la rédaction des exigences.

La base de la réussite de cette activité est la clarté, la concision et la simplicité. Il est clair que pour formuler de bonnes exigences, les concepteurs ont besoin de développer des capacités de rédaction qui ne sont pas nécessairement enseignées dans les universités. Ils ont aussi besoin d'une bonne accessibilité aux exemples livrables des bonnes et mauvaises définitions des exigences. La réussite à formaliser des bonnes exigences permet, dans le contexte de notre problématique, de formaliser de bons buts de simulation.

Dans ce contexte nous avons étudié avec soin la nature d'une exigence ainsi que les processus d'identification et d'exploitation de celle-ci par les acteurs projet. Plus précisément, notre intérêt se centre sur l'équipe de conception. Nous discutons également l'importance des caractéristiques des exigences afin de nous assurer de la qualité d'exploitation des exigences en termes d'adéquation contextuelle.

2.1.1 Vers une définition consensuelle des exigences

Une exigence prescrit une aptitude, une caractéristique ou une limitation du système, d'un de ses constituants ou encore d'un produit ou d'un processus contribuant à leur cycle de vie.

[Harwell & al., 93] introduisent la notion de niveau d'abstraction d'une exigence dont ils proposent la définition suivante « s'il est exigé que quelque chose doit être accompli, transformé, produit, ou fourni, c'est une exigence ». Les auteurs la présentent sous forme de caractéristiques et de rapports. Ceci permet de situer l'exigence comme centre d'intérêt pour toute information relative au produit dans l'environnement de gestion des exigences. Les catégories permettent de classifier les exigences : fonctionnelles, non fonctionnelles et en contraintes. Toute exigence appartient à une catégorie et une seule.

Mais, une exigence est-elle une contrainte ou une spécification ? Pour répondre à cette question, nous proposons de définir d'après l'IEEE Std 1220-1994 les notions suivantes :

- § Une contrainte est une limitation ou exigence implicite qui contraignent la solution de conception ou l'exécution du processus de l'Ingénierie Système, fixé par la représentation de l'activité, et est généralement non affectée.
- § Une spécification est un document qui décrit complètement un élément physique ou ses interfaces dans les termes de l'exigence (fonctionnelle, performance, contraintes et caractéristiques physiques) et les conditions de qualification et les procédures pour chaque exigence.
- § Une exigence est une déclaration qui identifie une capacité, une caractéristique physique, ou un facteur de qualité qui borne un produit ou le besoin du processus pour qu'une solution s'avère viable

Nous avons pu identifier, dans le chapitre 3 de la première partie qui présente l'ingénierie système, les activités et les processus de l'IS. Ainsi, les activités « de définition des exigences des parties prenantes » et « l'analyse des exigences » figurent sous le processus technique dans l'exemple de la cartographie des processus (figure 18). Cette représentation montre la maturité des modèles dans l'IS permettant d'évaluer la capacité d'un organisme à maîtriser son métier à l'aune de sa maîtrise des processus, entre autres, le processus technique, ainsi que de définir des chemins de progression par la vérification et la validation qui s'appliquent à tous les processus, sous-processus, activités ou tâches techniques intervenant dans les processus techniques d'ingénierie système.

Dans ce contexte et selon les concepts de « vérification et validation » (voir figure 19 chapitre 3), nous retenons qu'un référentiel d'exigences techniques système se vérifie par rapport à son plan de réalisation traduisant l'état de l'art (toute exigence d'entrée, client ou autre partie prenante, a été prise en compte; toute exigence est

justifiée, faisable, vérifiable, etc ..., l'ensemble des exigences est complet et non contradictoire) et se valide en vérifiant la conformité aux exigences du client.

L'intérêt de la strate de conception système (top-down du cycle en V de l'IS), de raisonner sur des fonctionnalités et sur des performances, indépendamment des solutions techniques, se situe au niveau de la définition des exigences. De façon générale, tous les projets commencent par un rapport des exigences, dans lequel des spécifications du concepteur d'un nouveau concept ou des analyses du marché sont définies. Seulement, la difficulté réside dans la conversion des concepts en produit et entrave la capacité de produire le concept conforme aux spécifications d'origine du projet. Souvent la maîtrise du processus de développement des exigences permet de palier ces difficultés.

2.1. 2 Catégories et caractéristiques des exigences

Nous analysons ici les moyens pour identifier les caractéristiques définies d'une exigence qui peuvent être employée par des analystes et des équipes de conception. Ces caractéristiques peuvent aider à déterminer la source, l'applicabilité, la justification, et d'autres facteurs requis pour évaluer et mettre en place une logique des exigences organisées. L'analyse des caractéristiques assignées peut aider une équipe de conception à identifier si une exigence spécifique établit un seuil quantifiable, si elle a besoin davantage d'analyse pour déterminer son impact, ou si elle peut être traitée comme un but ou un désir client.

Dans un environnement de spécifications, il est courant d'identifier des classes multiples d'exigences, comme des exigences fonctionnelles, des exigences de fiabilité, des contraintes, etc. selon une structure indiquée de spécifications. Cependant, dans un environnement de système de gestion des exigences, appelé aussi base de données exigences, des spécifications sont simplement une "tranche" de la base de données selon des attributs prédéfinis. Dans cet environnement, des classes des exigences sont traitées comme caractéristiques d'une exigence ou comme une relation attribuée à une exigence, plutôt que comme une classe séparée des exigences.

Bien qu'il puisse être difficile de trouver la bonne définition d'une exigence qui nous fournisse la forte perspicacité dans la définition de la génération des exigences, nous pouvons uniformément identifier une empreinte digitale d'une exigence. Cette empreinte est spécifiée en catégories et en caractéristiques.

Pour la catégorie des exigences, et d'après Ulf Sellgren, dans [Sellgren 99], les exigences sont divisées en deux catégories : les exigences fonctionnelles et les exigences non fonctionnelles. Les exigences fonctionnelles sont associées aux fonctions spécifiques, les tâches ou les comportements que le système doit réaliser, alors que les exigences non fonctionnelles sont des contraintes sur les divers

attributs de ces fonctions ou tâches. En termes de caractéristiques de qualité ISO « quality characteristics for evaluation », les exigences fonctionnelles adressent la qualité caractéristique de la fonctionnalité tandis que les autres caractéristiques de qualité sont concernées par de divers genres des exigences non fonctionnelles. Puisque des exigences non fonctionnelles tendent à être énoncées en termes de contraintes sur les résultats des tâches qui sont données comme conditions fonctionnelles (par exemple, contraintes sur la vitesse ou l'efficacité d'une tâche donnée), une tâche basée sur un rapport des exigences fonctionnelles représente la base pour construire un rapport complet des exigences. C'est l'approche adoptée dans ce travail. Il peut être utile de penser à des exigences non fonctionnelles comme adverbiallement liées aux tâches ou aux exigences fonctionnelles : combien est la vitesse, comment avoir l'efficacité, comment avoir un fonctionnement sans risque, etc. une tâche particulière est-elle effectuée par un système particulier ?

La catégorisation des exigences trouve son intérêt dans l'amélioration, d'une part de l'étalonnage, et d'autre part de la communication de celles-ci. D'après [Waters, 01], cette catégorisation permet une organisation de la présentation des exigences selon différents points de vue, et les besoins de différentes assistances. Les travaux de [Pradip K et al., 96] identifient neuf caractéristiques en tout pour une exigence, trois caractéristiques essentielles (type, application et niveau de conformité) et six caractéristiques facultatives, (voir tableau 2) que nous discutons par la suite.

„ Le type de l'exigence : Il identifie la source et l'applicabilité contractuelle de l'exigence. Il y a seulement deux types d'exigences :

- **Primaire.** Ces exigences (dont leur disposition de contrat est de la forme, spécifications, base de données, analyse du marché, etc.) prélevées sur un producteur sous la conformité du cahier des charges. L'identification est non ambiguë et c'est une exigence fondamentale. Un exemple serait "la charge utile sera transportée dans le compartiment de charge utile".
- **Dérivé.** Ces exigences (dont leur source interne, fournisseur, membre d'équipe, client interne, etc.) sont générées indépendamment des exigences fondamentales. L'identification est non ambiguë. Si ce n'est pas une exigence fondamentale, c'est une exigence dérivée. Un exemple serait "la charge utile aura un diamètre de moins de 1400 mm" l'indication du diamètre de charge utile est dérivé de la taille de compartiment de charge utile basée sur l'exigence fondamentale originale. Cette dérivation a pu être accomplie par le concepteur par le résultat d'une étude sur site, ou par un examen physique. Elle ne correspond pas à une requête du cahier des charges.

Le type d'exigence permet à l'équipe de développement d'évaluer les difficultés liées à la modification d'une exigence. Par définition, dans le cas d'une exigence fondamentale, un changement du cahier des charges ou peut-être une analyse du

marché, sera exigé. Mais si c'est une condition dérivée, la décision de modification dépend de l'équipe de développement et ne concerne pas nécessairement l'exigence fondamentale.

„ L'application de l'exigence : Qui identifie l'objet d'une exigence, là nous identifions seulement deux applications de l'exigence :

- Paramètre De Produit. Un paramètre de produit est une exigence qui s'applique au produit ou au service à développer. L'identification est non ambiguë. Si elle agit directement sur le produit ou le service, c'est un paramètre de produit. Les exemples de telles exigences incluraient "les surfaces externes de tout l'équipement seront peints tandis que", et "le programme de formation d'opérateur aura comme conséquence un taux de passage pas moins de 95% pour les candidats qualifiés".

Les paramètres de produit ont deux subdivisions primaires :

§ qualitatif - ce paramètre de produit ne contient *aucune exigence mesurable*. Un exemple serait "le mélangeur produira un mélange d'aspect homogène." Un paramètre qualitatif du produit rend nécessaire habituellement davantage d'analyse pour déterminer des critères quantifiables appropriés.

§ quantitatif - ce paramètre de produit contient une exigence mesurable. Un exemple serait "le mélangeur supporte une contrainte de l'ordre de 200 Mpa sur les parois". Un paramètre quantitatif de produit peut avoir des enfants, mais de tels enfants seraient produits afin d'indiquer des approches particulières à répondre à cette exigence mesurable.

- Paramètre De Programme. Un paramètre de programme est une exigence qui s'applique aux activités liées à la création d'un produit ou d'un service, tel que les études de conception. Ceci inclut également les dispositions de contrat qui définissent le rapport entre le client et le service commercial; par exemple, confidentialité, droits de propriété intellectuelle, garanties, etc. En bref, un paramètre de programme définit des activités liées à la direction technique et administrative du développement du produit. L'identification est non ambiguë. Si elle n'agit pas directement sur le produit ou le service, c'est un paramètre de programme. Les exemples de telles exigences incluraient "*l'entrepreneur conduira des études de conception internes toutes les deux semaines*" Les paramètres de programme ont trois subdivisions primaires :

§ *tâche* - identifie une analyse ou tout autre effort d'être exécuté. Les exemples incluraient par exemple "préparation du planning d'intervention des techniciens soudeurs" ou "exécuter une analyse des charges structurales sur les pylônes du pont".

§ **Évaluation de conformité** - identifie la méthodologie pour la conformité de mesure des paramètres, (un programme de vérification lié à chaque paramètre du produit).

§ **de normalisation** - identifie les normes et les éléments administratifs tels que "des données livrables seront fournies avec des droits illimités au gouvernement".

„ **Le niveau de conformité** des exigences identifie la profondeur de la conformité demandée pour une exigence. Il y a seulement trois niveaux de conformité :

- **Obligatoire.** une telle exigence est généralement en rapport avec sa structure. Si c'est une exigence fondamentale et n'est pas réalisable, alors un changement du cahier des charges ou une déviation est nécessaire. Si c'est une condition dérivée et n'est pas réalisable, alors un briefing doit être présenté au groupe de développement pour modifier l'exigence. Un exemple pourrait être une directive pour employer un composant interne, qui n'est pas considéré pour se conformer à une exigence fondamentale. S'il n'y a aucune solution de rechange à l'exigence dérivée dans un tel exemple, il est très probable qu'une exigence fondamentale plus fortement commandée puisse ne pas être réalisable et doit également être modifiée.
- **Conseils.** si une exigence primaire ou dérivée, il est souhaitable qu'elle soit mise en application. En général, le manque de mettre en application cette exigence ne constitue pas un obstacle pour le développement du produit. C'est équivalent à indiquer un but ou un désir de la part du client ou du chef du projet.
- **L'information :** cette caractéristique unique est essentielle pour des systèmes de gestion des exigences (bases de données des exigences). En fait, elles ne sont pas réellement des exigences, mais sont des rapports non contraignants qui influencent de manière significative le contexte, la signification, et la compréhension d'autres exigences. Un exemple pourrait être une référence au raisonnement du client pour définir une approche ou une exigence particulière.

„ **Priorité :** pour cette caractéristique qui exprime le niveau de priorité du facteur de paramètre (Budget – Sécurité), les valeurs particulières de la priorité seront parfois à la charge du projet et de l'entreprise

Partie II : La planification des buts de simulation en conception

Caractéristique	Description
Le type de l'exigence	<i>A- Primaire</i> : figure habituellement comme une condition contractuelle d'un document de pré-contrat, ou condition établie par Marketing
	<i>B- Dérivé</i> : Dérivé des exigences fondamentales ou dérivé du niveau supérieur des exigences
L'application de l'exigence	<p>A. Paramètre produit: il se rapporte à une exigence qui s'applique au produit ou au service à développer. Il peut être ajusté à une application ou à une phase spécifique, les sous-ensembles peuvent inclure :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Qualitatif - pas directement mesurable <ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnel : (ce que doit / une capacité du produit) - Processus : (menant à un résultat / produit) 2. Quantitatif : ou directement mesurable <ul style="list-style-type: none"> - Performance - Note de conception:(Altitude, endurance, taux de mélange) - Procédure (séquence d'opérations, algorithme spécifique) - Physique (c'est quoi) <p>B. Paramètre du projet: il se rapporte à une condition qui n'est pas directement impliquée dans le développement, production, ou opération du produit. L'évaluation de conformité est nécessaire par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tâche (une analyse, construit selon des spécifications de produit) - Evaluation de conformité (conformité de mesure) - Norme : (Règlements/ pratiques administratives)
Niveau de conformité	<p><i>A- Obligatoire</i> : « ce que doit », conformité obligatoire</p> <p><i>B- Conseil</i> (but) (objectif) : « ce que peut », c'est un désir/préférence</p> <p><i>C- Information</i> : expression qui supporte ou apporte une perspicacité à une exigence mesurable afin d'éviter tout malentendu sur l'exigence associée.</p>
<i>Priorité</i>	<i>Facteur de paramètre</i> (Budget – Sécurité) : les valeurs particulières de la priorité seront parfois à la charge du projet et de l'entreprise

Tableau 2. Caractéristiques essentielles des exigences (Pradip K et al., 96)

La détermination des caractéristiques d'une exigence donnée permet à l'équipe de développement de comprendre la nature d'une exigence. Également, l'attribution d'un rapport avec une exigence dans une base de données permet à l'équipe de visualiser et de comprendre la nature interactive et interdépendante des exigences équilibrées. Cette perspicacité est réalisée en mettant à la portée du groupe de développement une série d'exigences autrement débranchée dans des structures significatives pour exécuter l'analyse.

Suite à la définition des caractéristiques, les anomalies seront identifiées, et les décisions seront dégagées explicitement, l'équipe produit est principalement intéressée à identifier des exigences applicables aux composants d'équipe. La définition du procédé d'allocation des tâches devrait être approchée du point de vue de l'utilisateur. Par conséquent, l'effort initial est habituellement l'attribution

de la responsabilité de chaque exigence à l'équipe respective. Pendant que le programme progresse, cette tâche peut changer, mais une ligne de base d'exécution des responsabilités sera maintenue. La clef dans cet effort n'est pas les détails de l'attribution ni le processus suivi. Plutôt, la clef établit une hiérarchie convenue des rapports qui permettront aux équipes d'examiner la grande quantité d'exigences selon les besoins.

A noter que chacune de ces caractéristiques admet des sous-ensembles qui peuvent être utilisés en tant que composantes appropriées pour chaque projet. De plus, une classification des exigences peut être faite selon la nature de l'exigence (fonctionnelle ou non fonctionnelle, de sécurité ou de performance), de la validation liée (uniformité, clarté) ou du type d'exigence (du point de vue technique ou non technique).

D'autres classifications, qui nous concernent particulièrement proposent des catégories liées au cycle de vie du produit et aux exigences techniques. Robertson dans [Robertson 03], propose des catégories relatives aux différentes sources d'exigences du projet, par exemple le client final, l'assurance qualité, l'ingénierie. Notons également quelques caractéristiques très importantes liées à la réutilisation et l'identification de l'historique des exigences, qui sont souvent définies plus tard dans le projet, comme :

- § assigné à : personne ou organisation chargée de développer l'exigence,
- § alloué à : un sous-ensemble, composant et assemblage,
- § vérifié à l'aide de : plans et procédures de vérification.

2.2 La formulation des Exigences Fonctionnelles Quantifiées

Les exigences sont élaborées lors du processus d'analyse des exigences. Elles peuvent subir durant ce processus un certain nombre de transformations destinées à leur assurer des qualités. Ces transformations peuvent conduire à les reformuler ou à les décomposer, [Lemoine et al, 01] proposent les relations associées à une exigence qui :

- issue d'une source, soulève des problèmes, qui peuvent être résolus via une décision et donc supporte l'exigence de départ, est justifiée,
- s'appuie sur une ou plusieurs hypothèses, est documentée par un document qui en décrit ou explicite le contenu ou la portée (référence à une norme, un plan),
- appartient à une catégorie et une seule, contraint sa caractéristique.

L'idée maîtresse de l'analyse faite sur les caractéristiques des exigences se focalise sur l'intérêt d'identifier les exigences testables ou selon le vocabulaire des caractéristiques déjà citées « les exigences quantifiables ». Cette entité est du type primaire ou dérivé dont le paramètre est quantitatif peut être aussi un paramètre du projet

En fait le concept, que nous essayons de le présenter, se focalise sur la formulation d'un but de simulation à partir des exigences quantifiables que nous avons identifiées par les « Exigences Fonctionnelles Quantifiées : EFO ». Ce sont ces exigences qui peuvent être traduites en but de simulation. C'est pour cette raison que nous proposons d'identifier le mécanisme de structuration de l'expression des EFO jusqu'à la rédaction du but de simulation. Pour cela nous commençons par exposer les dispositifs méthodologiques pour supporter la contribution des outils d'aide au concepteur à l'identification des exigences du cycle de vie produit, par la suite nous définissons les exigences testables ou vérifiables, et finalement nous déployons les mécanismes d'identification et de caractérisation des EFO.

2. 2.1 La contribution potentielle des méthodes de conception à l'identification et la capture des exigences globales.

D'après Catherine Laval dans [Laval 00], les exigences requièrent une rigueur de différenciation, à chaque niveau, des exigences, découlant des besoins initiaux, ou des choix de principes, ou d'architecture ou d'organisation. Leurs raisons d'être différant, elles ne peuvent être traitées de manière identique. De plus, les exigences d'un système complexe nécessite la maîtrise et la formalisation d'une méthode de conception, pour expliciter les liens entre exigences de niveaux différents et donc d'explicitier les choix successifs qui les transforment.

L'utilisation des méthodes (AF, QFD, AMDEC), montre que chaque méthode appréhende en termes de qualité, un champ réduit du produit, ce qui permet ainsi d'identifier les exigences qui s'intéressent à l'usage par l'AF, à la faisabilité par l'AFI, à la fiabilité par l'AMDEC et à la technologie utilisée par le QFD. Dans cette démarche de conception, nous pouvons identifier la totalité des exigences du cycle de vie produit, que nous les appelons aussi par « Exigences globales du cycle de vie produit ».

L'activité de conception, conduite par les méthodes (AFE, AFI, QFD, AMDEC,...), consiste à définir les caractéristiques géométriques, fonctionnelles et technologiques, en regard des différentes phases de vie d'un produit. Ce qui permet de faire dégager selon l'avancement du projet un ensemble d'exigences relatives à chaque phase de vie du produit qui construit un référentiel des exigences. Ce concept est évoqué dans l'IEEE 1220 pour la maîtrise des processus selon l'IS (figure 22), seulement notre intérêt se focalise sur la façon d'identifier les exigences pour générer le référentiel des exigences et pouvoir l'utiliser pour répondre à notre problématique de recherche.

Pour cela, nos réflexions se sont basées sur la démarche de l'ingénierie Système qui fournit une méthode qui repose sur des processus s'appuyant sur des méthodes et des outils, voir figure 11 (chapitre 3). Cette démarche nous permet de valider le processus et les méthodes par la mise en œuvre des outils. C'est une lecture inverse

de la méthodologie qui nous permet d'appliquer des outils support des méthodes comme l'outil « TDC Need » pour une étude d'analyse fonctionnelle externe, l'outil « TDC Structure » pour l'analyse fonctionnelle interne, l'outil « TDC FMEA » pour la méthode AMDEC et l'outil « QFD Capture » pour la méthode QFD, (Figure 34). Une présentation des outils cités est à consulter dans (l'annexe 1) du manuscrit.

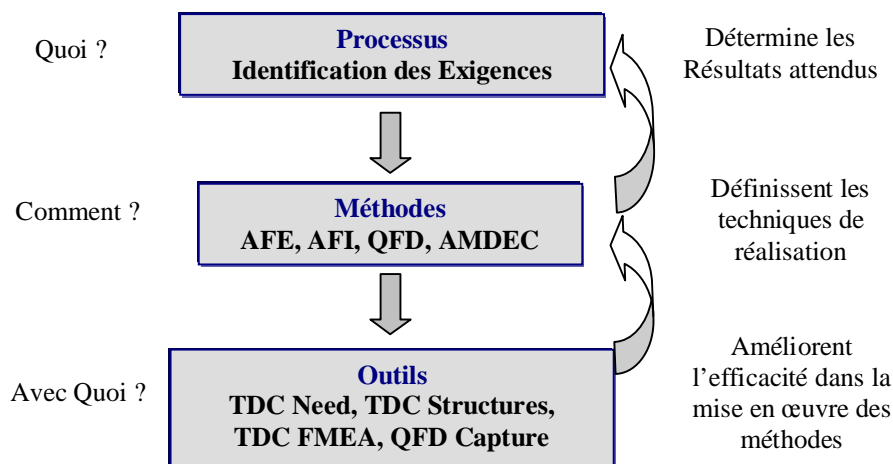


Figure 34 : Démarche d'identification des exigences

L'identification des exigences globales, par les outils d'aide au concepteur, passe nécessairement par la traçabilité des exigences qui comporte en elle-même différentes significations :

- le terme « exigences globales » fait-il référence strictement aux besoins des futurs utilisateurs, et/ou aux critères et contraintes du maître d'ouvrage, et/ou aux exigences générées par les choix techniques et les contraintes de réalisation ? Se situe-t-on à un niveau système ou équipement ?
- le terme traçabilité fait-il référence à la trace entre le besoin et la solution, ou la trace des choix, ou à la logique de déclinaison des exigences selon l'arborescence technique, ou à une logique de validation ou preuve de la pertinence de la solution... ?

Nous avons pu démontrer, dans la première section de ce chapitre, la mise en œuvre des outils d'aide au concepteur dans une démarche de conception pour l'expression des exigences globales du cycle de vie produit. Notre intérêt à ce niveau s'oriente vers l'identification de ses exigences pour pouvoir les exploiter dans notre démarche de formulation des buts de simulations. Avant de parler de démarche et mécanisme pour identifier les exigences (« Comment identifier ? »), il nous paraît fondamental avant tout de déterminer : pour qui ? Et pour quelle utilisation ? Et donc que faut-il identifier ?

Pour qui ?

De nos jours, l'identification des exigences est une priorité dans la phase de développement de produit ou de système. Cette phase permet au groupe de développement de prescrire une aptitude, une caractéristique ou une limitation du système, d'un de ses constituants ou encore d'un produit ou d'un processus contribuant à leur cycle de vie. De plus, nous avons montré précédemment que les activités de conception et d'essai sont étroitement reliées à la phase d'identification des exigences et que la réussite à formaliser des bonnes exigences permet à l'analyste, dans le contexte de notre problématique, de formaliser un bon but de simulation.

Pour quelle utilisation ?

L'identification des exigences globales permet de piloter le processus de formulation des buts de simulation. En fait, nous avons besoin, pour un projet de développement d'un produit (PDP), de concevoir une base qui rassemble toutes les exigences. Beaucoup de travaux se sont intéressés à la génération d'une telle base selon une multitude d'objectifs (base de connaissances de conception, gestion des modifications en conception, spécifications des exigences, etc.). Notre intérêt n'est pas focalisé sur la façon de concevoir cette base mais plutôt sur les dispositifs de mise en œuvre d'une démarche logique pour gérer ces exigences et représenter les informations contenues dans l'objet calcul. Ces exigences générées au cours du PDP se révèlent essentielles à tracer et à capitaliser dans un souci de réappropriation ultérieure du savoir dans le métier de la simulation numérique. Notre objectif consiste alors à identifier les différents types d'exigences constitutifs et représentatifs d'un projet puis à les caractériser selon un modèle normalisé ensuite à les organiser à travers une structuration spécifique.

Que faut-il identifier ?

Une exigence ne se présente pas comme étant un bout de texte isolé. Elle doit rassembler toutes les informations utiles pour savoir la transcrire, l'utiliser et la rechercher. Pour fournir une réponse à cette question, nous avons voulu nous appuyer sur les travaux de l'ingénierie des exigences. Selon Catherine Laval dans [Laval 00], la première contribution méthodologique de la gestion des exigences n'est-elle pas d'imposer la définition du problème avant d'étudier sa résolution ? Parle-t-on :

- de traçabilité pour faciliter/maîtriser l'évolution du système dans le futur
- ou de traçabilité pour vérifier/valider la solution proposée
- ou de traçabilité pour justifier sa propre solution
- ou de traçabilité pour s'assurer de la cohérence de développements confiés à différents concepteurs/réalisateurs ?
- ou de traçabilité pour vérifier que la solution est non seulement bonne mais aussi la meilleure ?

- ou de traçabilité pour faciliter la prise en compte des évolutions des exigences? Ce terme évolution des exigences comportant lui-même plusieurs sens: compléments d'exigences, modifications, évolution du besoin, levées d'incertitudes.

- ou traçabilité pour anticiper les risques de non-atteinte des exigences? Il serait illusoire – et dangereux – de penser qu'une même réponse méthodologique ou encore pire organisationnelle puisse être apportée, de manière pertinente, à des buts aussi différents

Pour nous focaliser sur notre contexte de recherche, nous pouvons affirmer que, pour une exigence perçue, elle doit être consignée à un projet (PDP) selon ses contraintes, à une méthode et l'outil support de la méthode de capture de l'exigence, à la personne ou l'équipe définie par l'acteur chargé de la formulation de l'exigence, et finalement à un identifiant unique permettant ainsi la sauvegarde de celle-ci dans une base.

La figure 35, résume la phase d'identification des exigences globales et déroule le concept utilisé pour plusieurs projets dont les contraintes sont différentes. Cette notion de contrainte projet, issue de l'étude du besoin produit, permet de soutenir la prise en compte des évolutions des exigences dans l'avancement du projet et souscrit une levée de risques sur le calcul. Nous revenons sur ce concept de risque dans la phase vérification de l'exigence.

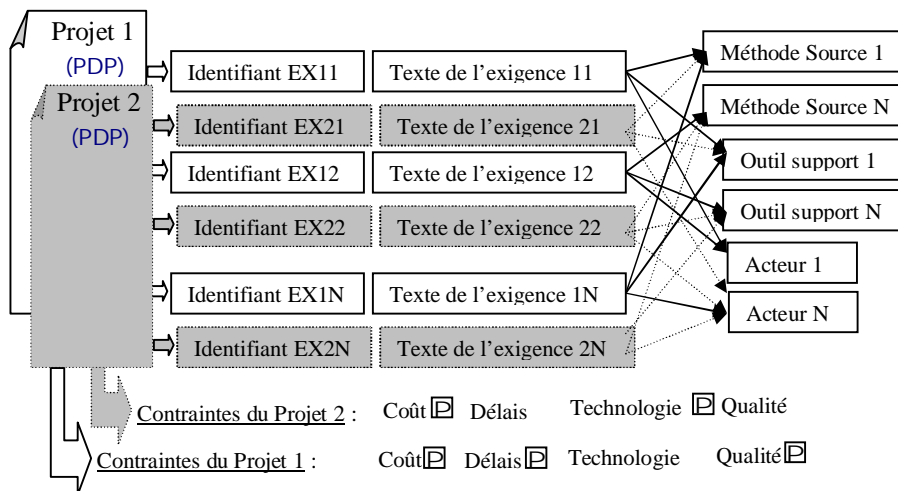


Figure 35 : Identification des exigences globales

Comment identifier ?

Il serait agréable de penser qu'il pourrait y avoir une « structure commune » dans ces réponses méthodologiques qui se différencieraient alors par les éléments de structure qu'elles traiteraient. En fait, nous avons pu montrer, dans la première section de ce chapitre, que l'analyse de la phase de conception et les méthodes utilisées expliquent l'origine des exigences.

La maîtrise des exigences se fonde sur la rigueur d'expression des besoins. Des méthodes et outils existent dans ce domaine. Ces approches doivent se référer à une approche systémique tant du système que du projet, prenant en compte :

- les besoins et contraintes liées aux phases d'utilisation mais aussi aux autres phases de vie du système,
- les exigences tant en mode nominal qu'en modes dégradés,
- mais aussi l'ensemble des points de vue : organisationnel, temporel, technique.

L'ingénierie Système permet de piloter cette démarche et la figure 36 schématise une méthode de conception intégrant les outils d'aide au concepteur et les approches de l'ingénierie systèmes, concoure à formaliser les exigences du cycle de vie produit. De cet fait, nous avons opté pour des scénarios de mise en œuvre des outils d'aide au concepteur (AFI, AFE, AMDEC et QFD) sur des exemples de produits, et pour illustrer la démarche d'identification des exigences, nous avons employé une logique simple basée sur des fiches sur un tableur classique où nous prescrivons les informations relatives à l'exigence formulée. La figure 37 illustre une fiche d'identification des exigences globales pour l'exemple du frein à disque.

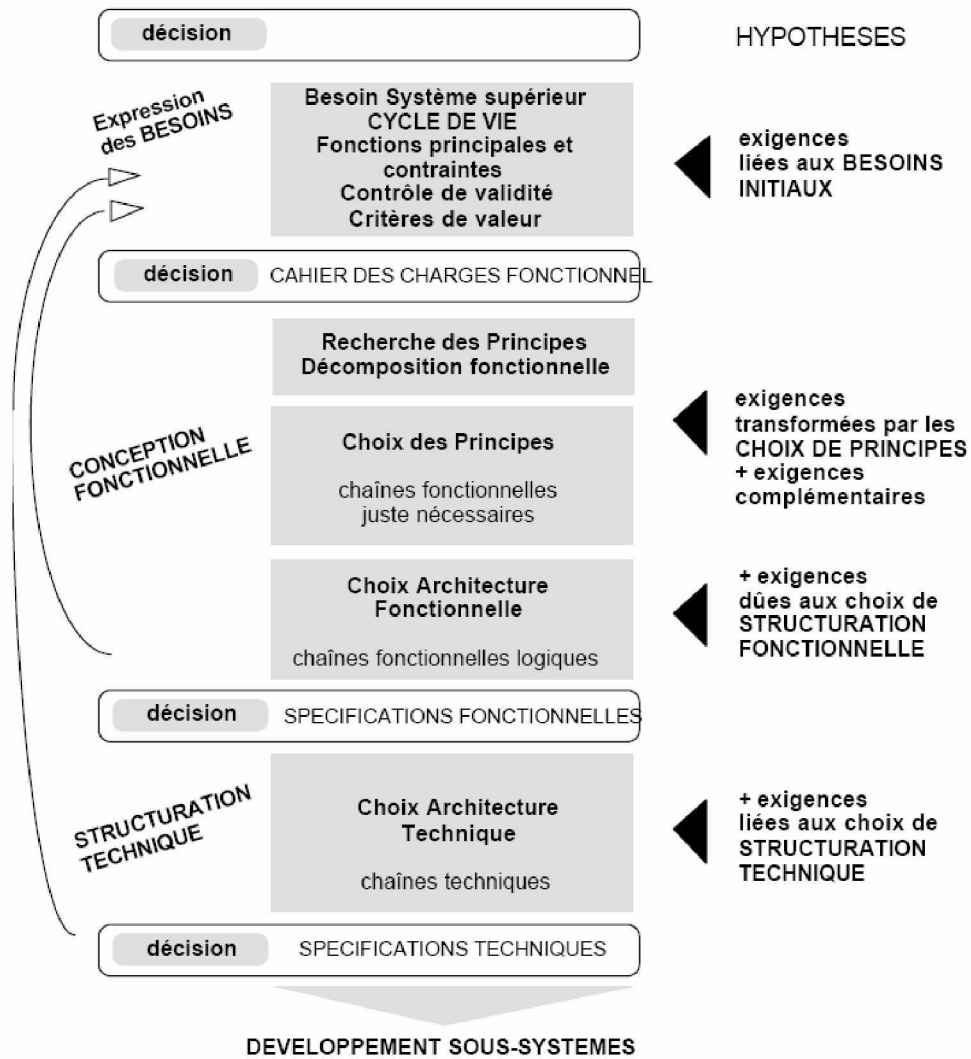


Figure 36. Schématisation d'une méthode de conception intégrant les outils d'aides au concepteurs et l'ingénierie systèmes d'après [Laval 00]

Partie II : La planification des buts de simulation en conception

Cette approche par les scénarios nous a permis de discuter sur les liens informationnels qui peuvent exister entre les outils d'aide au concepteur et les mécanismes pour construire une plate forme méthode capable de capturer l'ensemble des exigences produit. C'est dans cette perspective que nous avons voulu chercher à comprendre les liens de dépendances et informationnels entre les méthodes citées.

Titre du projet : Frein à disque			Acteur :	Date :	
Contraintes projet :		Coût : <input type="checkbox"/>	Délais :	Technologie : <input type="checkbox"/>	Qualité : <input type="checkbox"/>
Identifiant	Exigences globales	Phase du cycle de vie	Méthodes source	Outil support	
EX1	Transmettre l'effort de freinage	Utilisation	AFI	TDC Structure	
EX2	Doit être fixé au support	Montage	AMDEC	TDC FMEA	
EX3	De faible coût	Marché	AFE & QFD	TDC Need QFD capture	

Figure 37 : Fiche d'identification des exigences globales [AIDI 03],

D'après une étude de terrain proposée par Mark V. Martin, Steven Kmenta et Kos Ishii de l'université de Stanford, publié dans ME217 - DFM (Design for Manufacturability graduate course at Stanford University) [ME217 98], les auteurs soulignent comment diverses méthodologies peuvent être combinées pour construire un procédé complet de développement de produit. Un graphique de diagramme et de valeur d'affinité est employé pour organiser les entrevues et les enquêtes client dans l'objectif de détailler les besoins client utilisés dans la phase I du QFD. Cette information est également employée comme entrées à d'autres outils tels que l'AMDEC (FMEA), le diagramme d'affinité (Affinity diagramm), le Pugh (Pugh concept selection) [Pugh 1981], l'analyse coût/valeur par l'Analyse de la Valeur (AV) et d'autres méthodologies illustrées par (la figure 33). L'étude souligne aussi que le QFD est un outil puissant qui ne devrait pas être pris comme l'unique centre d'intérêt des efforts de conception. Cette méthodologie sera bien plus puissante quand elle est soigneusement combinée avec d'autres méthodologies de développement du produit, telles que l'analyse des coûts/valeurs par la méthode AV et l'AMDEC.

Ce travail met le point sur un constat fort intéressant qui souligne que « bien que le QFD soit employé traditionnellement comme outil de développement de produit, il peut être employé dans n'importe quelle situation où un concepteur voudrait convertir des exigences du produit ». En effet, l'étude pratique réalisée dans le ME217 - DFM illustre que les étudiants ont adapté le QFD créativement pour contrôler des exigences diverses du projet. Garder un esprit ouvert peut mener à des utilisations intéressantes pour n'importe quel projet qui exige de traduire des exigences dans des objectifs quantifiables.

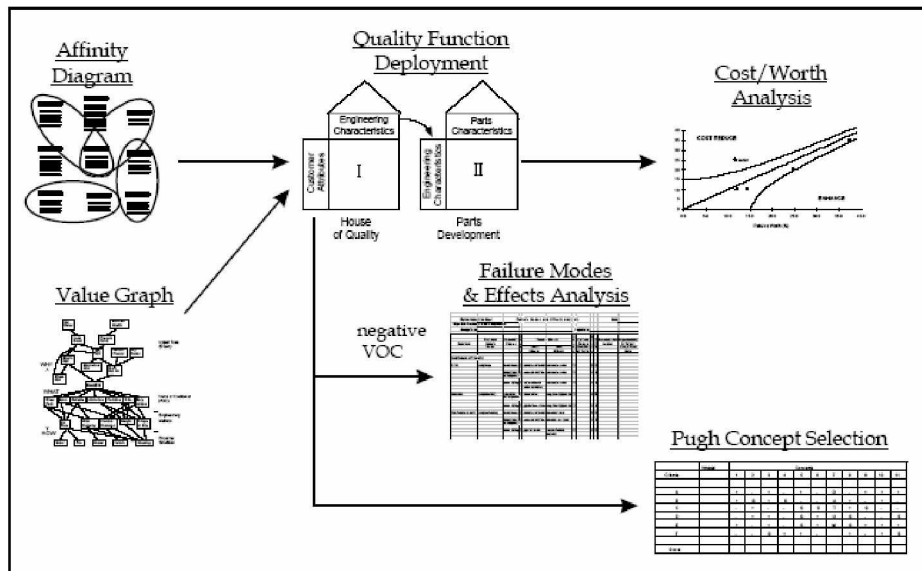


Figure 38, L'intégration du QFD et d'autres outils [Mark & al 98]

Un dernier constat qui réaffirme le processus d'identification des exigences globales par la mise en place de cette plateforme de méthodes donné par (la figure 39). Les méthodes sont organisées de façon qu'il est possible de valider par la conception un cahier des charges fonctionnel. Dans son livre « Maîtriser le processus de conception », Michel Cattan dans [Cattan 04], présente une étude tirée de l'expérience sur la méthodologie de construction d'un système de validation du besoin par une structuration des outils AF, AMDEC et QFD.

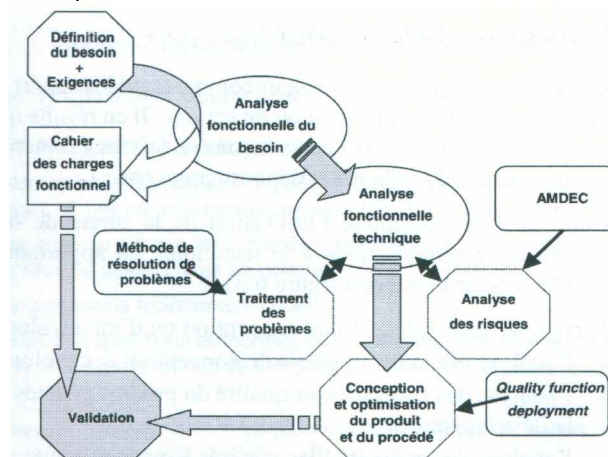


Figure 39 : Structuration des outils méthodologiques [Cattan 04]

2.2.2 Les exigences testables

Les gens qui sont habitués à penser que les exigences se produisent au début d'un projet, et l'essai à l'extrémité, peuvent être pardonnés pour penser que ce sont des activités indépendantes. La vieille image du cycle de vie de système était d'un jet de montagne élaboussant son chemin vers le bas d'une piscine d'activité à l'autre, des chutes d'eau dans l'intervalle. Chaque activité plus ou moins finie a été conduite indépendamment.

Mais réellement le but d'un projet est de livrer un produit aux clients qui trouvent en lui leurs besoins. Ces besoins sont documentés dans les exigences, satisfaits dans la conception, et démontrés pour avoir été satisfaits par les essais de vérification ou autre. De ce point de vue, déjà démontré dans le chapitre 2 de la partie I, des activités de conception et d'essai sont étroitement reliées aux exigences. Tous les documents de l'ingénierie système ont un raccordement logique aux exigences. Avec un peu plus de détail :

- Un essai est vu pour être valable parce qu'il vérifie une ou plusieurs exigences. Il a une trace du type vérifié de nouveau à chacune de ces exigences. Une partie décisive de la conception des essais se résume dans l'ingénierie d'un ensemble complet de traces de vérification, de sorte que le système soit connu pour répondre à ses exigences. Un outil est utile pour construire et vérifier un grand nombre des traces.
- Réciproquement, une exigence est vue d'être vérifiable parce qu'elle est liée à un ou plusieurs essais, qui prouvent qu'ils ont été rencontrés. Une exigence quantifiable qui ne peut pas être vérifiée est nécessairement mal formée.

Les exigences et les essais forment ensemble un modèle du système sous la conception. Quelques ingénieurs concluent du fait que pendant la première phase de réalisation du produit, ils ont du mal à développer leurs liens de tracabilité.

À première vue, une exigence est juste un morceau de texte, probablement avec au milieu l'instruction « Doit », mais ce n'est pas assez. Des exigences sont partagées, ainsi chaque exigence doit avoir une marque permettant à des acteurs projet de se référer à elle uniquement. Ils doivent également savoir la priorité et le statut de chaque exigence qui devient une transcription de base des données produit, avec un ensemble de champs ou d'attributs tenant différentes informations. De plus et du point de vue essai, la question de base est comment chaque exigence doit être vérifiée. Quelques exigences définissent pratiquement leurs propres vérifications. Par exemple, le pilote relève l'altitude de l'avion. Bien, si l'altitude est correctement montrée, l'essai est passé. Beaucoup d'exigences sont apparemment simples à vérifier de cette façon, mais pour certaines exigences, il faut bien assigner l'exactitude de l'information, la rapidité, la justification et associer la flexibilité sur

l'exigence. Ce qui nous amène directement à introduire l'idée des critères d'acceptation pour chaque exigence. Suzanne Robertson, dans « Mastering the Requirements Process » expose une réflexion sur la maîtrise du processus des exigences et identifie la notion « d'adaptation du critère » qui confirme si le système parvient à satisfaire les besoins de l'utilisateur. C'est une reformulation de l'exigence pour une finalité de l'essai physique ou par simulation. Une exigence n'est pas statique, mais elle est d'abord esquissée pour passer par la suite à une interprétation plus soignée, et finalement arriver à une définition dans le détail le plus complet.

Cette réflexion, proposée par Suzanne Robertson, nous a guidée à relier l'exigence à la notion de critère. Le critère d'acceptation de la fonction, dans une analyse fonctionnelle ou une étude AMDEC, est un élément indispensable à la quantification de la fonction ou du mode de défaillance. C'est dans cette vision que nous avons voulu démontrer la contribution des méthodes de conception à l'identification, l'extraction et la capture des exigences fonctionnelles quantifiées.

Finalement, la portée de discuter les exigences testables est de rappeler la représentation de données de l'Ingénierie Système utilisée pendant la phase de conception du système. Selon la norme ISO 10303 (chapitre 3) où le modèle produit AP 233 s'appuie sur la partie : Exigences sur les tests à réaliser, nous avons développé, sur la base de ce constat, la définition des « EFQ » comme exigences testables qui nécessitent un objectif de simulation. Nous parlons ainsi, d'exigence sur la simulation à réaliser.

2.2.2 Mécanisme d'identification et de caractérisation des EFQ

Seulement, nous avons besoin d'identifier les exigences fonctionnelles quantifiées (EFQ) ou encore appelées les exigences testables qui peuvent être traduites en but de simulation. Pour cette phase de notre approche nous essayons d'appliquer les représentations évoquées dans la partie analyse des exigences de ce chapitre. Nous avons pu découvrir dans la partie 2.1.2 (Catégories et caractéristiques des exigences) que la détermination des caractéristiques d'une exigence donnée permet à l'équipe de développement de comprendre la nature d'une exigence.

Pour identifier les EFQ, nous essayons de caractériser toutes les exigences globales. Ainsi nous pouvons identifier le type et le paramètre d'application de l'exigence, ce dernier peut être ajusté à une application ou à une phase spécifique, les sous-ensembles peuvent inclure un paramètre fonctionnel qualitatif qui n'est pas directement mesurable ou un paramètre fonctionnel quantitatif directement mesurable et qui peut exprimer une Performance, une note de conception, une procédure ou un élément physique. Une EFQ est une exigence dont le paramètre est quantitatif. La figure 41 permet de schématiser la procédure d'identification des EFQ.

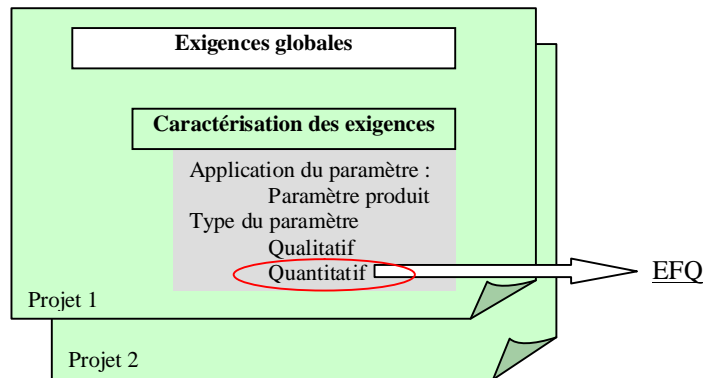


Figure 40 : Procédure d'identification des EFQ

Pour assurer une maîtrise du processus de gestion et d'identification des exigences, dans [AIDI 02], nous avons pu mettre un mécanisme d'extraction des EFQ à partir de l'analyse des méthodes utilisées comme l'AF et l'AMDEC. En fait, la phase de caractérisation de la fonction dans l'AF ou la caractérisation du mode de défaillance dans une étude (AMDEC produit) fait appel nécessairement aux critères. Quoi qui doit avoir un niveau, une flexibilité et un moyen de contrôle (voir figure 43) et figure 44. L'identification des EFQ est réalisée par le niveau du critère ainsi que le mode de contrôle du critère. Cette constatation est fort intéressante pour la prise en compte des évolutions des exigences par la modification ou l'évolution du besoin. La figure 42, qui représente une caractérisation de la fonction « Agrémenter le parcours du conducteur de véhicule » pour la phase « Assemblage » dans l'analyse fonctionnelle, permet de confirmer le constat évoqué.

Phase Assemblage : Caractérisation de (F 3) Agrémenter le parcours du conducteur du véhicule				
	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	Angle de confort à assurer	$r \geq 25$ mm	F2	dimension congé
2	support siège doit résiste au poids du conducteur	contrainte maxi de rupture ≤ 120 MPa	F1	simulation numérique

Figure 41 : Caractérisation d'une exigence par les critères dans l'AF

Partie II : La planification des buts de simulation en conception

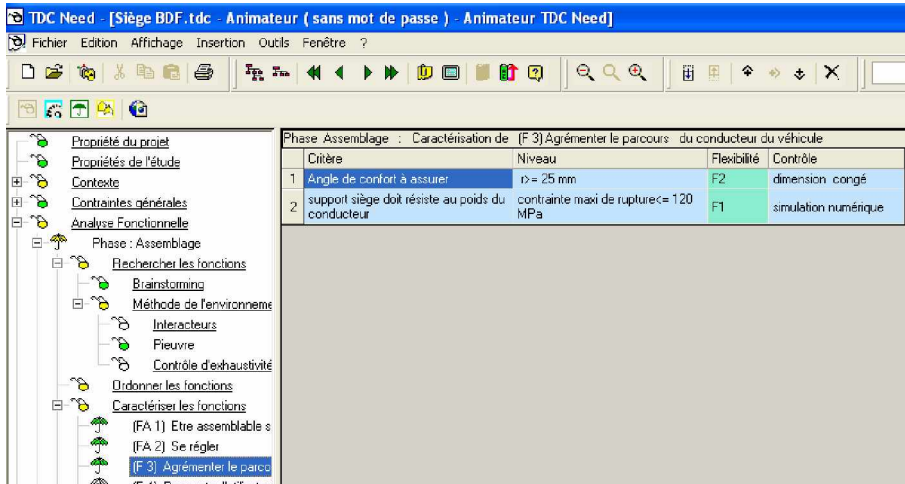


Figure 42 : Caractérisation d’une exigence par les critères dans l’AF
Copie d’écran sur l’outil TDC Need

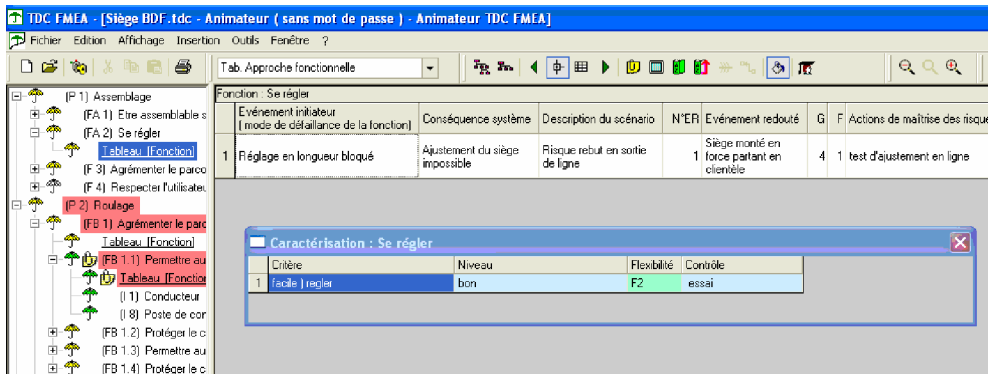


Figure 43 : Caractérisation d’une exigence par les critères dans l’AMDEC
Copie d’écran sur l’outil TDC FMEA



Figure 44 : Critères d’une exigence dans l’AMDEC

En résumé

Dans ce chapitre nous avons démontré dans la première partie la mise en œuvre des outils d'aide au concepteur à structurer l'expression du besoin en conception de produit ainsi nous avons pu prouver l'interopérativité de ces trois méthodes et la capacité de construire une plateforme méthodologique d'aide à la coopération entre le concepteur et l'analyste, dans une considération de l'intégration de la démarche d'ingénierie système. Celle-ci nécessite l'intégration de toutes les disciplines impliquées dans le cycle de vie.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté une analyse des exigences du cycle de vie produit selon les travaux de l'ingénierie des exigences pour approcher la proposition de formulation des EFQ. Celle-ci permet d'introduire l'idée d'un environnement de simulation basé sur une interaction continue entre la gestion des exigences du cycle de vie produit et les systèmes d'échange d'informations, dans le but de réaliser des simulations fiables et répétables. Dans les propositions faites, nous avons soigné la conformité de l'expression des exigences, car ils définissent par la suite le succès ou l'échec de notre objectif de simulation. Nous avons recherché l'équilibre entre *les exigences, les contraintes, les performances, les coûts, les délais et les risques* du projet.

Chapitre 5

Mécanisme de formulation des buts de simulation

Le développement de systèmes s'est transformé d'un traitement de systèmes en tant que problèmes purement techniques, vers voir des systèmes comme parties de l'environnement des utilisateurs. Les clients internes, tels que des opérateurs, sont de plus en plus impliqués dans l'ingénierie des exigences en particulier.

Dans le chapitre 4 du manuscrit, nous avons constaté que la définition d'un système de gestion des exigences nécessite en premier lieu d'identifier les informations issues des premières phases du processus de développement d'un produit, puis de construire leurs structures de représentation. Préalablement, il a été établi qu'une phase de définition de la notion même d'une exigence testable, du point de vue de sa nature et de sa dynamique de création et d'utilisation, ainsi que de modélisation du contexte dans lequel se situe notre projet, est également nécessaire. Comme nous l'avons démontré plus haut, cette organisation des exigences s'articule principalement autour de formulation de l'objectif de simulation et de la coopération entre le concepteur et l'analyste.

Dans ce chapitre, nous détaillons les mécanismes mis en œuvre pour atteindre notre objectif en termes de coopération et de réutilisation des démarches. Les acteurs impliqués dans les tâches de calcul doivent pouvoir formuler l'objectif du calcul et doivent également pouvoir réutiliser les connaissances générées par le processus de vérification au cours de cette activité.

Enfin et pour valider les concepts proposés, nous exposons un outils support de la méthodologie conceptualisé dans le cadre de ce travail.

1. Gestion des EFQ et expression des buts de simulation

L'ingénierie des exigences est équilibrée entre la coopération avec les clients qui possèdent les exigences, et le besoin de contrôler le processus de développement. Le dilemme est que ce contrôle et les méthodes prédéfinies tendent à exclure la coopération. Pour cela nous essayons de proposer une méthodologie capable de faire évoluer les concepts vers une ingénierie des exigences entièrement coopérative.

Comme déjà présenté dans l'étude du processus de conception de la première partie du manuscrit, l'activité principale d'un concepteur peut se résumer à la conception d'un produit au regard d'un certain nombre de fonctions et prestations. Cet acteur doit alors vérifier tout au long des différentes phases du processus de conception la cohérence de ses solutions techniques avec les objectifs prédéfinis, aidé pour cela par différents métiers en charge des validations produit, dont le métier de la simulation numérique fait partie intégrante. Pour intégrer cette activité de simulation numérique dans les processus de validation produit, les concepteurs doivent avoir connaissance à tout instant de l'ensemble des ressources mises à leur disposition pour la validation de leurs solutions techniques par la simulation numérique. Comme il a été démontré dans le chapitre 2, Nadège Troussier dans [Troussier 99], propose une aide à l'intégration du calcul dans la conception par la méthode SG3C, développée au laboratoire 3S. La méthodologie fournie est centrée sur les besoins des acteurs auxquels elle répond à l'amélioration de la coopération entre les concepteurs et les spécialistes du calcul et une aide à la gestion de la complexité en termes de multiplicité, dynamique et interdépendance des modèles manipulés dès les premiers stades de la conception. Cette démarche, cadrée sur le passage du modèle géométriques (CAO) au modèle de simulation et qui offre une représentation du processus de simulation numérique, n'a pas précisée les étapes associées à la formulation du but de simulation et les liens qui peuvent exister avec la modélisation des cycles de vie, des situations de vie et des fonctions associées.

Le besoin d'intégration du calcul mécanique dans la conception s'est fait ressentir très tôt dans les travaux de recherche mais les chercheurs et les développeurs ont rapidement buté sur un certain nombre d'écueils. L'un de ces écueils est dû à la nature avant tout cognitive de l'activité de simulation numérique. Dès que les techniques de calcul sont utilisées par des non spécialistes, le contrôle et le cadrage du processus de création du modèle mécanique apparaissent donc comme une nécessité. Ceci semble d'autant plus évident à l'heure où les logiciels d'IAO "intégrés" tendent à automatiser le passage du modèle géométrique de conception au modèle géométrique pour le calcul, conduisant souvent à l'inefficacité de l'approche calcul, mais aussi parfois à des résultats erronés et potentiellement dangereux. Il est important de noter que ce contrôle et ce cadrage des tâches de modélisation concernent également les spécialistes du métier (les ingénieurs calcul) à partir moment où

l'on va chercher à adresser des problématiques de traçabilité, de capitalisation et de réutilisation. Il faut souligner également le lien très fort qui existe entre l'étape de génération du modèle de calcul et l'expression des buts de simulation, que ce soit du point de vue fonctionnel ou du point de vue cycle de vie du produit.

Pour émaner ces barrières et éviter l'inefficacité de l'approche calcul par l'automatisation du passage de la conception au calcul, nous proposons, dans l'avancement de notre approche méthodologique, d'introduire la notion « d'attribut de l'exigence ». Cette représentation de l'exigence permet d'étalonner les connaissances sur l'exigence et supporte le partage et la réutilisation des informations à travers une organisation adéquate favorisant la coopération entre les acteurs au sein d'un projet.

1.1 Gestion des caractéristiques exigences

Sur la base des travaux réalisés dans le domaine de l'ingénierie des exigences nous avons présentés, dans la deuxième section du chapitre 4, une analyse des catégories et des caractéristiques des exigences où nous avons démontrés le rôle des concepts analysés. En effet, la détermination des caractéristiques d'une exigence donnée permet à l'équipe de développement de comprendre la nature d'une exigence. Également, l'attribution d'un rapport avec une exigence dans une base de données permet à l'équipe de visualiser et de comprendre la nature interactive et interdépendante des exigences équilibrées. Cette perspicacité, fortement utile dans notre contexte, est réalisée en mettant à la portée de l'acteur de simulation une série d'exigences autrement débranchée dans des structures significatives pour exécuter l'analyse.

Suite à la définition des caractéristiques d'une exigence, les anomalies seront identifiées, et les décisions seront dégagées explicitement, l'équipe produit est principalement intéressée à identifier des exigences applicables aux composants d'équipe ceci est vari pour l'analyste comme étant une composante de cette équipe. La définition du procédé d'allocation des tâches devrait être approchée du point de vue de l'utilisateur. Par conséquent, l'effort initial est habituellement l'attribution de la responsabilité de chaque exigence à l'équipe respective. Pendant que le projet progresse, cette tâche peut changer, mais une ligne de base d'exécution des responsabilités sera maintenue. La clef dans cet effort n'est pas les détails de l'attribution ni le processus suivi. Plutôt, la clef établit une hiérarchie convenue des rapports qui permettront aux équipes d'examiner la grande quantité d'exigences selon les besoins. Offrir une logique présentation des caractéristiques des exigences à l'analyste ou au concepteur permet d'affiner la compréhension de l'exigence et concoure à offrir une assistance à la formulation d'un objectif de simulation pour l'exigence étudié. Cette présentation est proposée selon un modèle en arbre qui assiste l'acteur à appréhender les caractéristiques des exigences. Dans les scénarios de la représentation des caractéristiques proposés, nous avons voulu adopter celle qui admet une commodité d'utilisation. Choisir entre une saisie des

caractéristique ou une affectation des choix, nous avons optés pour une affectation directe c. a. d les catégories sont figées et l'acteur affecte son choix. Cette solution, qui permet d'assister l'acteur, assure la conformité des informations prescrites et déballe les erreurs de saisie ce qui permet d'assurer une maîtrise de l'activité par les utilisateurs. La figure 45 permet de dégager le nombre de choix à faire pour accomplir la phase de caractérisation des exigences. Nous avons un premier choix sur le type de l'exigence en (1), en (2) sur le niveau de conformité, en (3) sur la priorité, en (4) sur l'application de l'exigence et à ce niveau, si nous choisissons le paramètre produit nous aurons à réaliser un choix en (5) sur les six catégories et si nous optons pour un paramètre projet, nous réalisons (6).

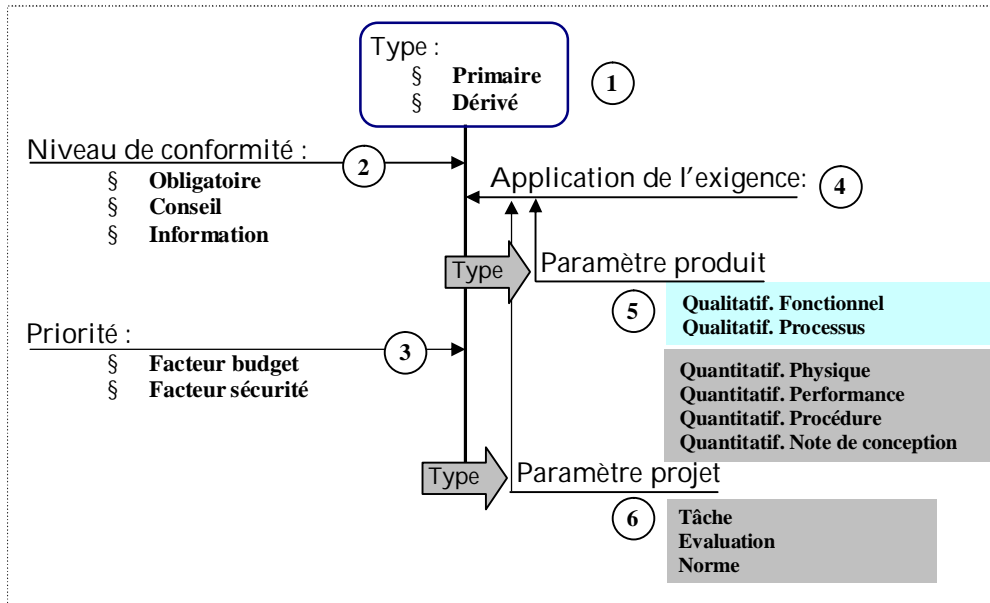


Figure 45 : Itération des choix sur la caractérisation des exigences

1.2 Attributs des exigences

Dans le contexte actuel de diversification et de complexité de l'offre produit allant de pair avec l'extension du périmètre de l'entreprise et la multitude d'acteurs intervenant sur le produit de sites différents, une gestion cohérente de l'ensemble du système d'information du produit s'impose. Parmi les principaux systèmes d'information de l'entreprise qui concourent à la gestion des produits, nous citons les Systèmes d'Information Techniques (SIT) ou appelés aussi Systèmes d'Information Produit (SIP) supportés par des outils connus sous le nom générique de Systèmes de Gestion de Données Techniques (SGDT) ou encore PDM (Product Data Management) et les Systèmes d'Information de Gestion comme les ERP (Entreprise Resource Plannin). Les SIP interviennent fortement donc dans le processus de conception (et re-conception) des produits lors de la définition de l'offre ou de son évolution. Ils constituent le noyau central dans la gestion des données techniques liés au produit durant ces

phases. Le développement d'une méthodologie support de l'activité de simulations en conception ne saurait se passer des SIP. En fait, le capital de connaissances sur le produit entreposé dans les bases de données techniques et les informations générées par le déploiement des méthodes de conception peuvent être exploiter pour construire un système support des exigences défini par les attribut des exigence. Cette entité offre aux acteurs des compétences nécessaires pour calibrer l'expression des exigences, favorise la coopération et le partage efficace des informations entre les acteurs projet, documente les exigences et favorise la traçabilité des procédures d'identification de l'exigence.

A ce stade de l'évolution de notre démarche nous avons pu identifier, dans le chapitre 5, les exigences globales du cycle de vie produit par les outils d'aides au concepteur. Seulement cette identification détient sur l'exigence une définition sous forme de texte, un identifiant, la phase d'utilisation de l'exigence dans le cycle de vie produit et l'outils support de la méthode source qui l'a délibéré. Voir figure 37 : Fiche d'identification des exigences globales. Dans l'objectif de maîtriser le processus de simulation ou de calcul, par l'expression d'un bon but de simulation et de garantir la qualité des résultats de simulation, nous avons vu utile de discuter chaque exigence et d'apporter de la précision sur les informations que nous disposons sur elle.

Selon notre vision méthodologiques, les objectifs spécifiques visés par la mise en place des attributs des exigences concernent en premier lieu la description de l'exigence et le lien avec les EFQ, en deuxième lieu l'évolution des exigences dans la phase du projet et la coopération entre les acteurs.

1.2.1 Description de l'exigence La nécessité de décrire l'exigence émane de la nature de celle-ci ainsi un grand conflit persiste encore sur sa définition selon le contexte de l'étude et la position ou la fonction de l'acteur dans le projet. Cette description, dans notre contexte, concerne le compromis entre le langage des concepteurs et celui des acteurs du calcul opérationnel. Ceci permet ainsi aux concepteurs et aux analystes de bien comprendre et de bien identifier la nature de l'exigence par rapport à des contraintes projet que nous avons déjà discutés dans la phase identification des exigences globales, voir figure 35 (identification des exigences globales). Ce compromis permet également d'utiliser un langage qui permet d'appuyer la structure de l'exigence ou de la compléter dans le cas où c'est avérer qu'elle est imprécise ou incomplète. La description de l'exigence doit être la plus juste possibles, pour minimiser les problèmes d'interprétation des informations et de mauvaise appropriation de la connaissance représentée par une exigence. Pour cela, nous appuyons cette description par une justification de l'exigence énoncée. Cette justification permet de prouver l'existence de l'exigence et de discuter le sens de sa formulation. Rappelons que nous avons déjà discutés l'activité de gestion des caractéristiques exigences, et que nous avons pu installer une représentation normalisée des caractéristiques des exigences. De plus, cette phase permet de spécifier la nature de l'exigence et permet aussi de préciser si le paramètre produit sur l'exigence est quantitatif ou qualitatif. Dans le cas où ce paramètre est quantitatif, nous pouvons ainsi

renseigner le critère de mesure de l'exigence permettant, de ce fait, de contribuer à la description de l'exigence et de produire une connaissance fort utile pour la rédaction du but de simulation. Finalement et pour compléter la phase « description de l'exigences », nous évoquons deux autres entités, que nous avons déjà présentées dans la phase identification des exigences. La première concerne **la méthode source** de détection de l'exigence et la deuxième concerne la Phase du d'utilisation du produit ou la phase du cycle de vie : l'exigence est lié à qu'elle phase du cycle de vie du produit (Utilisation, rangement, transport,...). Documenter l'exigence permet aussi de consolider et d'affiner sa construction par la mise à disposition d'un document support qui permet de proposer plus d'éclaircissement sur l'exigence. Dans le cas où une exigence de sécurité, par exemple, le document concerne alors les réglementations de sécurité et des procédures normatifs de prévention. Enfin, hiérarchiser l'exigence permet de présenter un agencement selon **la classe de flexibilité et l'indice de satisfaction client**. Rappelons que la flexibilité d'un niveau définie, dans l'analyse fonctionnelle, selon la norme NF EN 1325-1:1996 comme étant un « Ensemble d'indications donné par le demandeur quant à la possibilité d'adapter le niveau visé pour un critère d'appréciation » admet que tout niveau d'appréciation doit être assorti d'une indication de flexibilité qui peut s'exprimer quantitativement sous forme de limites d'acceptation et de taux d'échange ou au moins qualitativement par des classes de flexibilité. Ainsi la classe de flexibilité est une indication littérale, placée auprès d'un critère d'appréciation, permettant de préciser son degré de négociabilité ou d'impérativité voir figure 46. " On peut par exemple définir quatre classes de flexibilité :

- Flexibilité nulle : F0 niveau impératif
- Flexibilité faible : F1 niveau peu négociable
- Flexibilité moyenne : F2 niveau négociable
- Flexibilité forte : F3 niveau très négociable

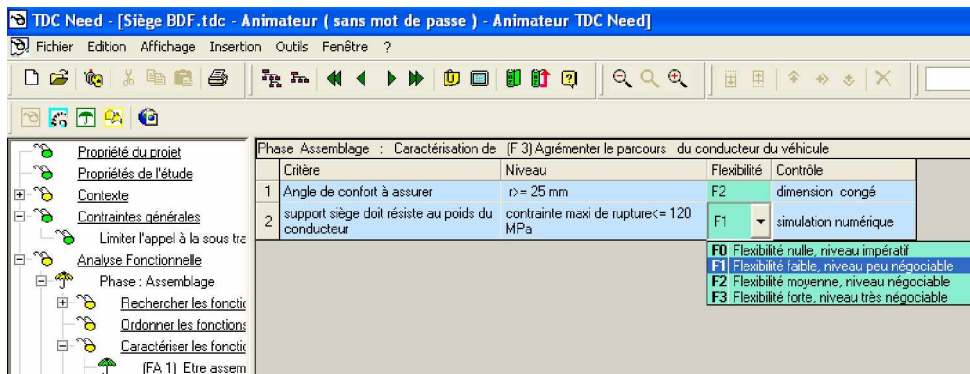


Figure 46 : Critère de flexibilité sur une copie d'écran sur l'outil TDC Need (AF)

L'indice de satisfaction client est une information produite dans l'élaboration de la méthode QFD. Il est annoncé sous forme de note (valeur chiffrable à trois niveaux) ou en pourcentage qui exprime le degré de satisfaction du client sur

l'exigence concernée et il est obtenu par des enquêtes client sur le marché ou un suffrage dans le groupe chargé de l'élaboration du QFD. Ce paramètre positionne la caractéristique demandée sur le produit étudié par rapport à la même caractéristique existante sur un produit concurrent. La figure 47 représente une copie d'écran de l'outil QFD/CAPTURE, nous découvrons la méthode de détermination de l'indice de satisfaction client (Customer importance perception) appliquée sur une porte de voiture (CARDOOR.MD3). Une appréciation sous forme de note est donnée par tranche d'âge du client, de 16 à 25 dans la colonne (2), de 26 à 35 dans la colonne (3) et de +36 dans la colonne (4). La colonne (5) présente une moyenne sur les appréciations des différents ages de la clientèle et qui sera comparée par rapport aux produits concurrents (Competitor A) et (Competitor B). Finalement une valeur sera attribuée à l'indice de satisfaction client selon un standard et ne peut prendre que les valeurs (9 : pour élevée), (3 : pour moyenne) et (1 : pour faible), voir figure 48.

QFD/CAPTURE Professional Edition (Demo) - C:\PROGRAM FILES\QFD CAPTURE PROF DEMO\SAMPLE\CAR DOOR PROJECT\1.MD3 - [Demanded Qua

File Edit Format Create Tools Window Help

Current Cell: Graph

Related Data Entries										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Rating of Importance	Company CAR DOOR New	Competitor VW D600	Competitor OPEL G900	Plan	Ratio of Improvement	Sales Points	Absolute Weight	Demanded Weight
List Entries	0									
1	Hatch Opening And Closing									
2	Easy to open	3.0	4.0	5.0	4.0	1.0	0.3		0.8	4.7
3	Easy to close	9.0	3.0	4.0	3.0	2.0	0.7		6.0	37.5
4	Stays open	1.0	4.0	5.0	5.0	1.0	0.3		0.3	1.6
5	Stays closed	1.0	5.0	4.0	5.0	1.0	0.2		0.2	1.3
6	Hatch Properties									
7	Low liftover height	3.0	4.0	5.0	5.0	2.0	0.5		1.5	9.4
8	Wide opening	1.0	5.0	4.0	3.0	1.0	0.2		0.2	1.3
9	Tall opening	1.0	4.0	4.0	4.0	1.0	0.3		0.3	1.6
10	No obstacles	1.0	4.0	5.0	3.0	1.0	0.3		0.3	1.6
11	Good visibility	9.0	4.0	5.0	5.0	2.0	0.5		4.5	28.2
12	No leaks when closed	3.0	3.0	4.0	3.0	1.0	0.3		1.0	6.3
13	No drips when open	1.0	4.0	5.0	3.0	1.0	0.3		0.3	1.6
14	Lock Properties								0.0	0.0
15	Easy to insert key	1.0	3.0	4.0	4.0	1.0	0.3		0.3	2.1
16	Easy to remove key	1.0	4.0	5.0	3.0	1.0	0.3		0.3	1.6
17	Easy to turn	1.0	4.0	4.0	4.0	1.0	0.3		0.3	1.6
18										

Figure 47 : Détermination de l'indice de satisfaction client dans le QFD pour le produit « CAR DOOR »

Symbol Set Name	Label	Symbol	Color	Value
Standard 9-3-1	Strong	●	Blue	9
	Moderate	○	Green	3
	Weak	▽	Red	1
Standard 5-3-1	Strong	⊙	Blue	5
	Moderate	○	Green	3
	Weak	▽	Red	1

Figure 48 : Les symboles standard utilisés par le QFD

La figure 49, illustre la maison de la qualité pour le produit « Vidéo projecteur » où nous pouvons distinguer l'indice de satisfaction client évoqué dans la matrice par « Customer weights ». Nous apercevons sur la matrice que les valeurs des indices sont représentées selon le standard et nous pouvons associer aussi un pourcentage pour exprimer le niveau de l'indice par exigence client.

PHASE I QFD -- Portable Slide Projector

Customer Requirements	Customer Weights	Customer Weight %	Engineering Metrics											
			Brightness	Weight	Dimensions (grth + width)	Time/Tasks required to start presentation	Distortion	Distance from presenter (with 3' x 3' projection)	Time to insert/pull-out slide	Attractive product	Tombstone	Contrast	Sharpness	
Good image	9	20%	9				9					3	9	9
Easy to transport	9	20%		9	9									
Device sets up quickly	9	20%		3	1	9		3	3					
Works well for short present.	9	20%			1	3		3	3					
Keeps present. flowing	1	2%				3		3	9					
Image visible in bad conditions	3	7%	9				3							
Minimizes unplanned interruptions	1	2%				3		1	9					
Design makes the product attractive	3	7%		3	3					9				
	Raw score		108	117	108	114	90	58	72	27	27	81	81	
	Relative Weight		12%	13%	12%	13%	10%	7%	8%	3%	3%	9%	9%	

Figure 49: la maison de la qualité pour le produit « Vidéo projecteur »

En résumé, pour appréhender la phase de description de l'exigence, il faut s'informer sur les éléments suivants :

- *Description* : Description juste de l'exigence
- *Justification* : Une justification de l'exigence énoncée
- *Source* : La méthode source de détection de l'exigence
- *Critère de mesure* : le ou les critères de quantification de l'exigence

- *Phase du cycle de vie* : l'exigence est liée à qu'elle phase du cycle de vie du produit (Utilisation, rangement, transport,...)
- *Document support* : un lien de consultation.
- *Critère de flexibilité* : le critère de flexibilité ou la flexibilité alloué à cette exigence (phase contractante du CdCF)
- *Satisfaction client* : généralement une valeur qui permet en d'exprimer le degré de satisfaction du client pour cette exigence.

Il faut bien signaler que nous avons travaillé sur des scénarios sous forme de fiche de gestion des exigences. Dans chaque scénario proposé nous avons discuté les informations qui peuvent contribuer à compléter la connaissance sur l'exigence et à la technique envisagée pour exploiter le maximum de connaissances produites dans les premières phases du cycle de développement produit. Nous sommes inspirés dans la proposition de nos scénarios des travaux de Michael Lang et Jim Duggan. Dans [Lang & al 01] ils proposent un outil pour supporter la gestion coopérative des exigences pour le développement des logiciels "A tool to support collaborative software requirements management". Même si le concept n'est pas similaire, car dans notre contexte on s'intéresse au développement de produit technique, mais les concepts que les auteurs ont développés nous ont permis d'orienter nos réflexions. Les auteurs proposent un système de spécification des exigences « The system requirements specification (SRS) » qui représente un document dynamique qui évolue dans le développement du projet. Ce document, illustré par la figure 50, est conceptualisé sous la forme d'une page web favorise la coopération entre les acteurs projet.

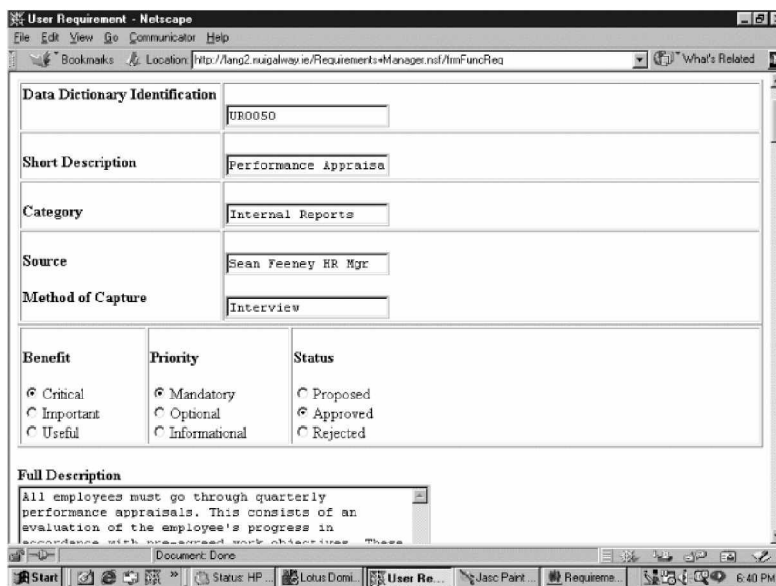


Figure 50 : Création des exigences utilisateurs par un web outil [Lang & al 01]

D'autres travaux, comme celles de Ian Alexander et Richard Stevens dans [Alexander et al 02] et [Alexander 03], nous ont permis de guider la représentation de l'attribut de l'exigence. Les auteurs cités, dont nous dénombrons plusieurs publications, présentent dans « Writing Better Requirements » et « Requirements and Testing: Two Sides of the Same Coin » des concepts intéressants pour l'ingénierie des exigences. Cette vision est concrétisée dans l'outil DOORS¹² de l'éditeur Telelogic. Cet outil est utilisé dans des grandes entreprises comme PSA, EADS, etc...

1.2.2 Le lien avec les EFQ

Les EFQ sont ainsi définies dans le chapitre précédent, et le besoin d'identifier ces exigences a été démontré, seulement la question qui trouve sa place dans ce contexte est la suivante : Pourquoi gérer les attributs des exigences globales si nous avons besoin que des EFQ, qui représentent les exigences testables, pour formuler les buts de simulation ? En fait, dans les premiers scénarios de notre représentation des attributs, nous avons considérés seulement les EFQ, et lors de la mise en application des phases d'essais de notre maquette nous sommes confrontés à un problème qui concerne le conflit et la dépendance entre une exigence quantifiable et une ou plusieurs exigences de mêmes natures ou de natures différentes, comme des exigences qualitatives. Le conflit est expliqué par la contradiction qui intéresse deux exigences par exemple, une exigence qui prescrit que la bielle doit résister à l'usure et une deuxième qui impose que la bielle doit résister aux chocs. Le conflit intéresse dans ce cas deux exigences quantifiables et le conflit conditionne le choix de la matière et la forme du siège bielle. La dépendance résume le fait que les deux ou plusieurs exigences découlent du même critère. Par exemple une exigence qui impose une condition sur le coût « le corps de la pompe doit être de faible coût », une deuxième qui établit une condition sur la résistance au milieu extérieur « le corps de la pompe doit résister aux agressions extérieures » et une troisième qui prescrit une condition sur la résistance mécanique « le corps de la pompe doit résister à la pression de fonctionnement ». La satisfaction des exigences de résistance au milieu extérieur et à la sollicitation mécanique engendrée par la pression dépend du critère imposé par le faible coût, dans ce cas, prévoir des nervures dans la forme du corps permet de réduire l'épaisseur du corps et optimiser la matière surtout que le choix de la matière doit aussi satisfaire l'exigence sur la résistance du milieu extérieur.

Pour énoncer un but de simulation capable de traduire le contexte de l'étude l'acteur doit être informé des conflits et des dépendances entre les exigences du cycle de vie produit que ce soit des exigences quantifiables ou qualitatives.

12: Scenario Plus website: <http://www.scenarioplus.org.uk> (onion model tool for Telelogic DOORS, stakeholders template for Microsoft Word, etc)

Ce constat démontre l'importance de la phase d'identification des exigences et l'intérêt que nous avons accordé à l'ingénierie des exigences dans ce travail.

Les questions qui restent à résoudre dans cette étape s'attachent à la méthode d'identification des conflits et des dépendances et à la façon de pouvoir construire une approche permettant à l'acteur de consulter les exigences qui ont un conflit ou une dépendance entre eux.

Pour la première question qui retient la méthodologie d'identification des conflits et des dépendances, nous avons pu mettre dans un premier temps une matrice de corrélation entre les exigences, identifiées par la mise en applications des outils d'aides au concepteur, et nous avons relié par un symbole les exigences entre eux. La figure 51, illustre un exemple de la matrice de corrélation pour identifier la dépendance et le conflit entre les exigences.

EX1	EX2	EX3	EX4	EX5	EX6
EX1	£		£		
	EX2	⊕			⊕
		EX3	£		
			EX4	⊕	
				EX5	
					EX6

£ Dépendance
⊕ Conflit

Figure 51 : Identification des conflits et des dépendances

En effet cette méthode permet d'identifier les conflits et les dépendances mais peu entraîner un désintéressement du groupe de travail chargé de cette tâche à cause de sa lenteur puisqu'ils sont obligés de reprendre les exigences dans la matrice de corrélation. Pour remédier à l'inconvénient de cette approche et dont l'objectif de proposer une méthodologie qui s'intègre aux outils connus par le groupe de travail, nous avons préconisé d'utiliser l'outil QFD pour accomplir cette tâche puisque la méthode QFD est basée sur les matrices de corrélations et de plus les exigences sont déjà saisie dans la première phase de la maison de la qualité dans le « Quoi » donc il reste à corréler le « Quoi » et le « Quoi » et de choisir un symbole pour le conflit et un autre pour la dépendance. Cette tâche, qui semble théoriquement simple, a nécessité un travail considérable sur la personnalisation de l'outil QFD pour aboutir à l'objectif attendu. En fait la matrice qualité dans la phase I du QFD établie des relation entre le Quoi - exigences clients et le Comment- caractéristiques qualité, voir figure 29 : Construction de la maison de la qualité dans le chapitre 4. Pour corréler le « Quoi » avec le « Quoi » il a fallu créer une nouvelle matrice dans le QFD. La figure 52 illustre en a) le diagramme projet initial et en b) le diagramme projet modifié où nous avons ajouté une matrice sous le nom « conflict and dependency matrix » (Ellipse rouge sur la figure b-52). Pour cette matrice nous avons définis la qualité demandée pour les lignes comme « Input » et la même entité pour les colonnes comme « Output » par la suite nous avons paramétrés le conflit et la dépendance par un symbole, une couleur et une valeur chiffrable qui nous intéresse peu pour notre cas. La figure 53 expose les champs de paramétrage de la matrice sur l'outil QFD/CAPTURE.

Finalement la mise en œuvre de cette matrice donnée par la figure 54 qui affiche la rapidité de la corrélation entre les exigences par un simple clic sur la bannière conflit ou dépendance ainsi la figure 55 permet de montrer le résultat de la corrélation affiché dans la maison de la qualité.

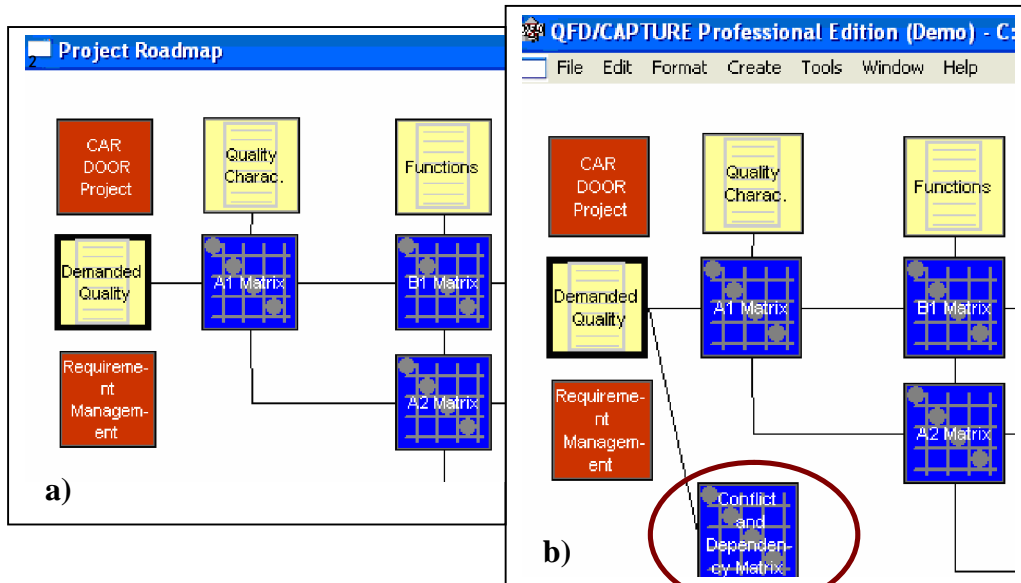


Figure 52 : a) Le diagramme projet initial, b) Le diagramme projet modifié

Format

Charts | List | Matrix | Preferences | Documents

Matrix Name: Conflict and Dependency Matrix View: As Spreadsheet

Input List(s) to form rows: Demanded Quality, Quality Charac., Functions, Methods

Output List(s) to form columns: Demanded Quality, Quality Charac., Functions, Methods

Symbol Set: User Defined Symbol Set

Label	Symbol	Color	Value
Dependency	□		1.00
Conflict	■		0.00

Relationship Data Format: Integer

Show As Roof Matrix

Buttons: Rooms in Chart..., OK, Cancel

Figure 53 : Paramétrage de la matrice « conflit et dépendance »

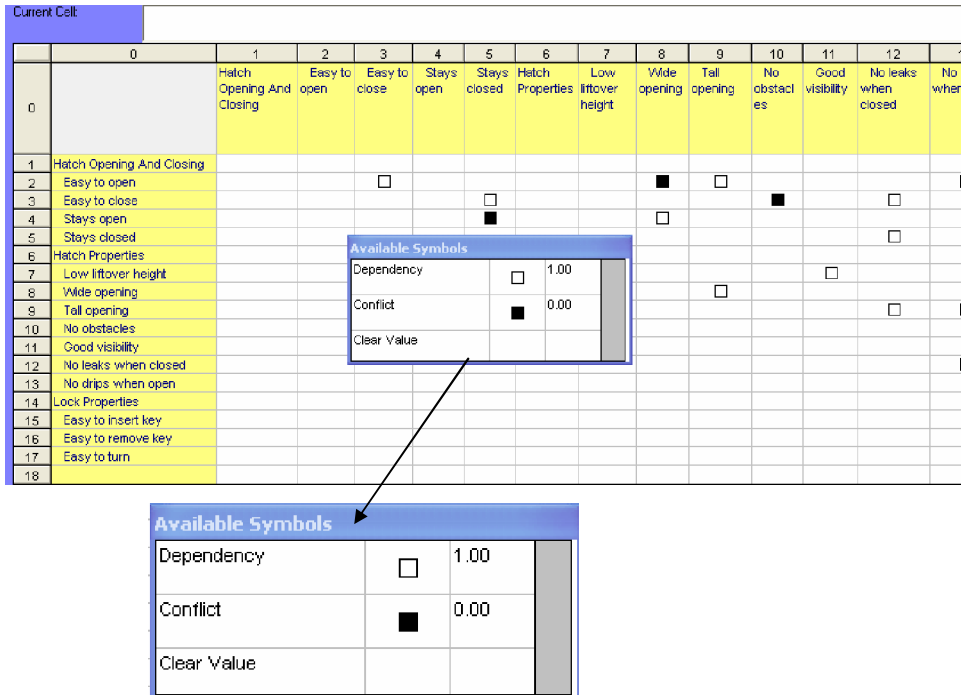


Figure 54 : Mise en œuvre de la corrélation des exigences

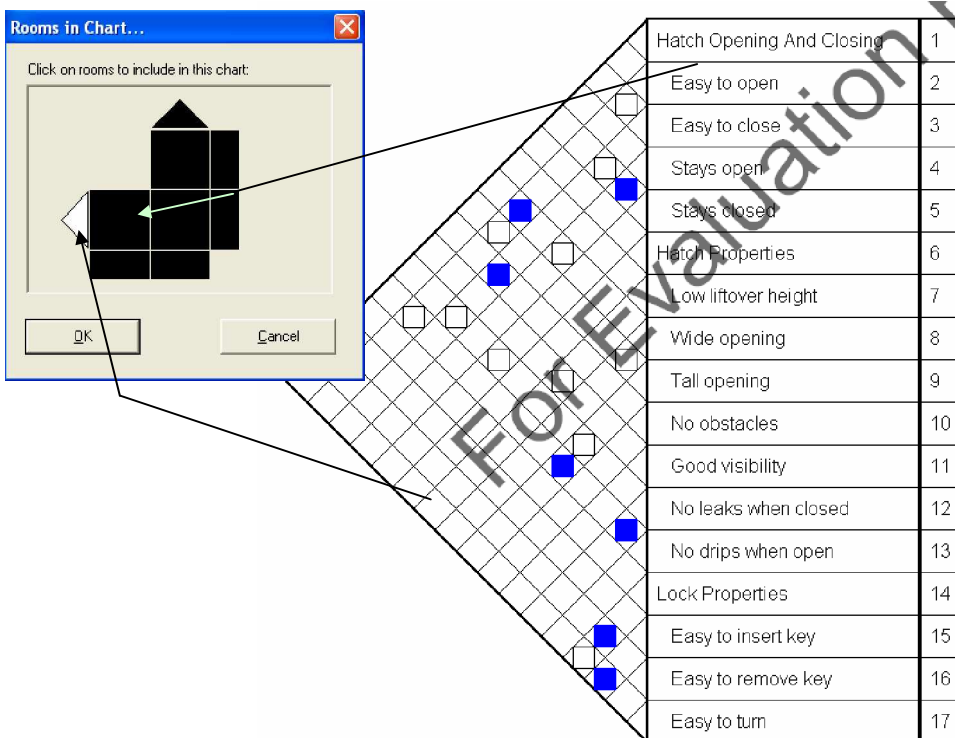


Figure 55 : Résultat de la corrélation affiché dans la maison de la qualité

Ainsi nous avons mis en place une méthode pour identifier les conflits et les dépendances des exigences par l'outil QFD, l'intérêt de cette proposition réside dans la mise en considération de l'approche socio-technique des processus de conception. Promouvoir l'intégration des outils utilisés par le concepteur, permet de garantir la maturité de la méthodologie proposée et atténue la résistance aux changements.

1.2.3 Améliorer le dialogue externe

Nous avons pu montrer que les attributs des exigences associent des connaissances issus de l'ensemble des premières phases du cycle de développement produit. L'identification de ces attributs nécessite de faire collaborer les acteurs projet à discuter ou faire évoluer des attributs. Dans notre situation, le concepteur ou l'analyste est censé être informé de l'évolution des attributs des exigences pour mettre à jours son système de vérification par les simulations. Cette mise à jour affecte nécessairement le but de simulation. Pour cela un système de gestion de configuration doit être mis en place pour promouvoir l'échange des données entre intervenants et tracer la validation des connaissances dans un même support de communication pour la simulation.

Certains travaux sur l'élaboration d'un support d'informations pour le calcul nous évoquons l'exemple de la fiche descriptive de calcul élaborée dans le laboratoire LMSP, ENSAM Centre de Paris (Voir annexe 2). Cette représentation des informations contenues dans les objets du calcul sont formalisées au moyen de supports spécifiques, les fiches d'étude et de calcul, au sein desquelles les liens de réutilisation et de validation sont pris en compte. Ces fiches ne suffisent cependant pas à représenter la structure globale d'un projet et l'organisation des objets de connaissance qui le composent. En effet, dans une fiche de calcul, aucune information ne permet de relier ce calcul à l'étude de niveau supérieur. De même, à partir des fiches, il est difficile pour un acteur d'avoir une vision d'ensemble des différents calculs et études composant ce projet. La seule vision des informations situées dans les fiches ne lui suffit donc pas, et l'utilisation d'un support supplémentaire est alors nécessaire pour lui fournir un point de vue général sur le projet calcul.

L'outil méthodologique événementiel proposé par Troussier dans [Troussier 99], utilisé pour représenter la chronologie d'un processus de simulation, s'attache seulement aux connaissances des acteurs qui participent à la simulation. Par contre notre idée, qui c'est basé sur une démarche d'ingénierie système, favorise le dialogue externe par la mise en place des liens de coopération entre les acteurs impliqués dans la validation de l'exigence (les analystes) et ceux qui la fournissent (tous les acteurs projet). Rappelons que nous avons définie l'ingénierie des exigences est équilibrée entre la coopération avec les clients qui possèdent l'exigence et ceux qui la vérifie. Dans l'environnement de gestion des attributs des exigences nous avons prévu de mettre en place des liens de consultation et de validation des connaissances produites. Comme le montre la figure 56, Les acteurs projets disposent des

droits d'écriture de modification ou de consultations des attributs des exigences selon les objectifs des tâches réalisées dans le projet et la chronologie temporelle des phases du projet ce qui permet de construire l'historique des attributs et la prise en compte de la dynamique de reproduction des exigences. Sur cette base nous contribuons à faire évoluer les concepts vers une ingénierie des exigences entièrement coopérative. C'est dans cette perspective que nous avons optés pour documenter les attributs des exigences. Des liens pour des documents support de la description sous forme de directives normatifs de rapports de non conformités, de réglementations externes ou internes, etc... Dans la section 3 de ce chapitre, nous détaillons la représentation des attributs sur l'outil « support informationnel ».

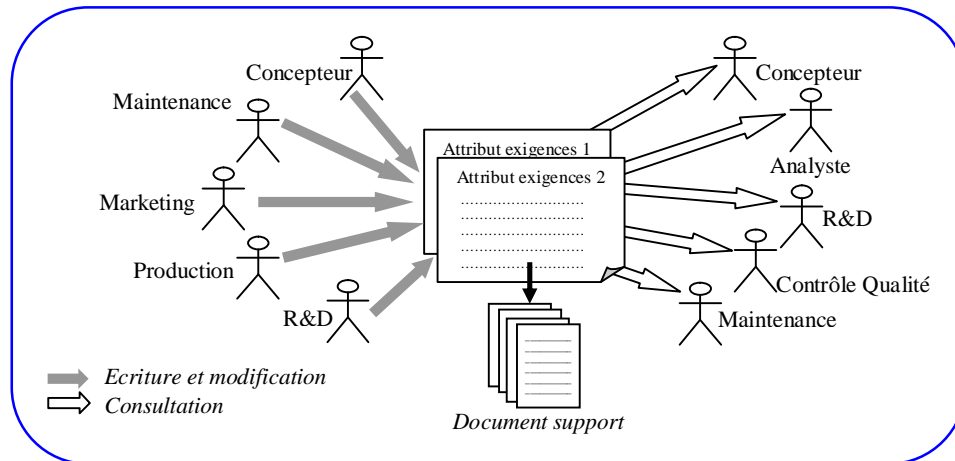


Figure 56 : Déploiement du dialogue externe par l'attribut des exigences

1.3 Formulation du but de simulation

Le but de simulation représente une entité principale de coopération entre le concepteur et l'analyste dans le processus de conception. Cette entité, qui doit permettre d'identifier le type de calcul auquel il renvoie présente un intérêt primordiale dans l'organisation du processus de simulation et requiert la formalisation à la fois des informations couramment rencontrées dans la définition des besoins en calcul et d'autres moins habituelles.

Le But de Simulation définit le problème qui se pose au calcul. Nous avons pu démontrer que sa construction requiert à la fois des connaissances sur toutes les phases du cycle de développement produit. Celui-ci comporte le type de calcul, la spécification et la quantification des grandeurs mécaniques associées, la définition des conditions d'utilisation (et non pas des conditions aux limites), la spécification du système à étudier et les paramètres du projet qui permettent d'effectuer les choix de modélisation.

L'évolution des processus de conception telle qu'elle est présentée au chapitre 1 affirme que le besoin de s'assurer, au plus tôt, que le produit a les capacités à respecter le cahier des charges fonctionnel auquel il correspond. Dans cette

perspective, le calcul peut être utilisé dans différentes situations de conception pour apporter différents types de réponse. La classification proposée ici présente l'intérêt de faire apparaître les différents objectifs d'usages. On distingue ainsi trois situations particulières de l'utilisation du calcul dans le cadre de la conception.

Premièrement, avant d'effectuer un choix entre différentes alternatives de conception, le concepteur peut chercher, à l'aide du calcul, à évaluer les performances relatives des solutions. Par performance relative, il faut comprendre que ce n'est pas l'évaluation quantitative de la performance d'une alternative de conception qui est intéressante, mais l'évaluation de la potentialité d'une alternative à remplir une fonctionnalité relativement aux autres alternatives. Ce type de calcul conduit donc à une évaluation qualitative du comportement mécanique de différentes alternatives et à un classement des solutions, pour chaque fonctionnalité critique à remplir. Dès lors, le concepteur peut juger de la solution la plus apte à vérifier le cahier des charges fonctionnel en évaluant relativement la performance globale (par rapport à l'ensemble des fonctionnalités regardées) de chacune des alternatives. La figure 57 illustre l'intérêt du calcul d'aide au choix par rapport à l'activité du concepteur. Le calcul intervient avant le choix des alternatives de conception les plus intéressantes en terme de performance. Par exemple, lors de la conception d'un arbre pour lequel on s'interroge sur la tenue mécanique, le choix de sa section peut être réalisé par la comparaison des concentrations de contraintes obtenues pour différentes sections de l'arbre.

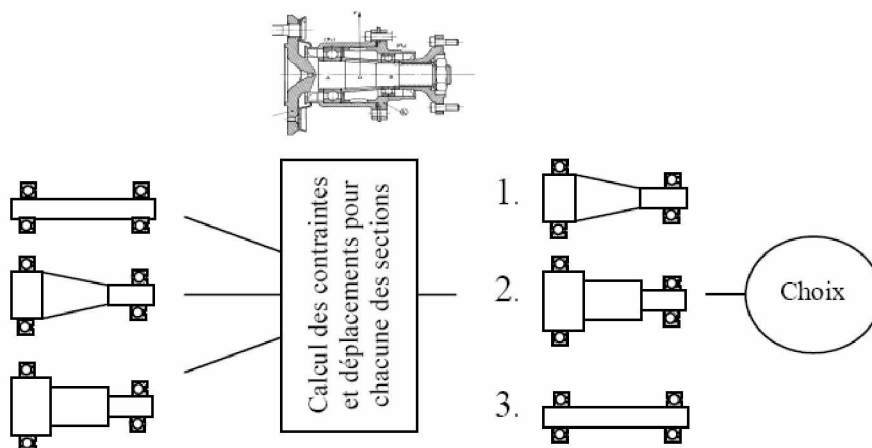


Figure 57 Calcul d'aide au choix ou d'estimation

Les niveaux et la répartition des contraintes obtenues pour chaque section n'ont de valeur que pour une estimation relative. On parle alors de calcul d'aide au choix. Les calculs de type analyse de sensibilité entrent dans cette catégorie d'usage dans la mesure où ce n'est pas la ou les valeurs elles – mêmes mais leurs variations par rapport à des paramètres qui intéressent l'analyste. On parle de calcul d'estimation.

Deuxièmement, lorsque des choix viennent d'être effectués, faisant avancer l'état de définition du produit, le concepteur cherche à vérifier par la simulation si le produit satisfait les spécifications fonctionnelles. Dans cette perspective, les performances du produit sont évaluées quantitativement par rapport aux critères techniques tirés des spécifications fonctionnelles. Le calcul est alors nommé calcul de validation. La figure 58 illustre le positionnement du calcul de validation relativement aux choix effectués par le concepteur. Sur l'exemple de l'arbre, une fois le choix de la géométrie de l'arbre réalisé, un calcul peut permettre d'estimer quantitativement le niveau de contrainte obtenu pour affirmer ou infirmer la tenue de l'arbre sous les sollicitations envisagées. Il s'agit alors d'un calcul de validation.

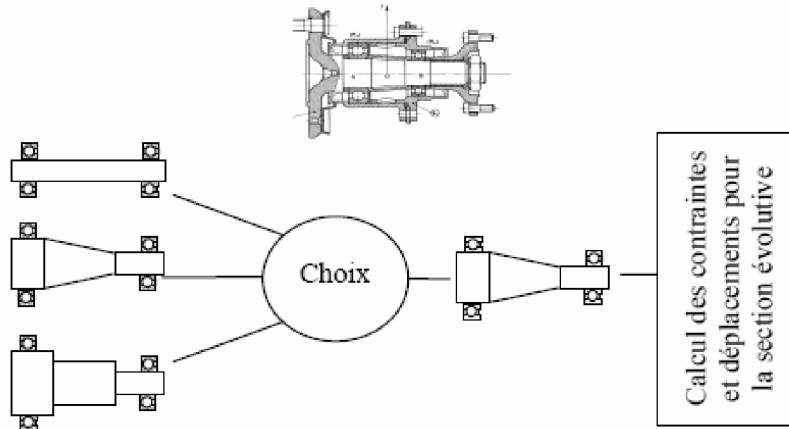


Figure 58 : Calcul de validation

Troisièmement, dans la perspective d'appréhender les performances du produit conçu, il est nécessaire de maîtriser son comportement. Certains calculs sont menés afin de comprendre comment le produit réagit à différentes conditions d'utilisation. Ces calculs interviennent de plus en plus fréquemment lorsque les essais contredisent des avis d'experts, comme l'évoque la figure 59 sur l'exemple de l'arbre. Ces calculs peuvent être lancés sans forcément qu'une ou plusieurs solutions soient choisies ou remises en cause. Mais leur utilisation la plus courante concerne la mise au point de modèles représentant des comportements mal maîtrisés, que l'on veut décrire pour simuler et, à terme, aider à la conception de produits faisant intervenir ce comportement. Il s'agit alors d'un calcul de vérification.

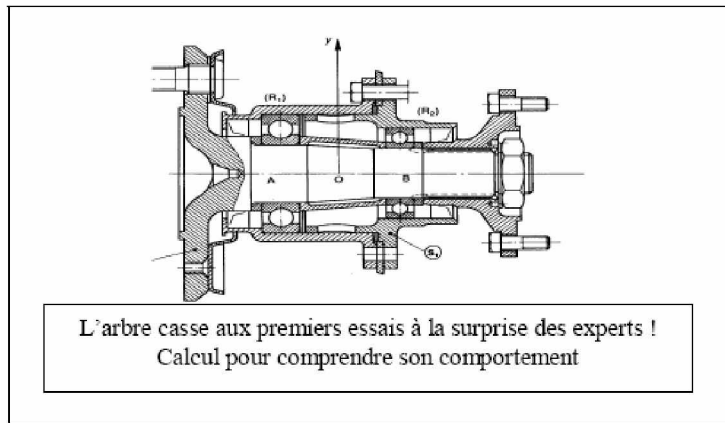


Figure 59 : Calcul de vérification

Selon la classification des calculs citées, nous pouvons définir un but de simulation selon l'objectif du calcul, ce qui permet de savoir exprimer ce but selon l'orientation requise dans la phase de simulation. Il faut bien garder une trace de l'objectif visé par la simulation car, et dans le cas d'une consultation de l'objectif de simulation déjà défini, il faut bien associer à cette définition le contexte dont il fait référence. Pour cela nous préconisons d'inviter l'acteur de simulation à préciser la situation particulière de l'utilisation de son calcul dans la conception. Ce qui revient à préciser si son but de simulation sera validé, estimé ou vérifié.

Dans la perspective de définir un but de simulation qui doit permettre d'identifier le type de calcul auquel il renvoie (par exemple, « Vérifier » renvoie généralement à un calcul de validation, « Etudier l'influence des paramètres » à un calcul d'aide au choix ...).

Le système mécanique qui fait l'objet de l'étude est spécifié par ses exigences qui conditionnent son utilisation par rapport à son environnement. La grandeur mécanique à laquelle on s'intéresse est aussi spécifiée dans le critère de mesure ou dans la description (par exemple le mot tenue signifie habituellement que l'on s'intéresse aux contraintes). La figure 60 illustre sur l'exemple d'un châssis porte composantes électriques, la structure du But de Simulation. Celui-ci comporte le type de calcul, la spécification et la quantification des grandeurs mécaniques associées, la définition des conditions d'utilisation, la spécification du système à étudier et les paramètres de coût et précision qui permettent d'effectuer les choix de modélisation. Il requiert la formalisation à la fois des informations couramment rencontrées dans la définition des besoins en calcul et d'autres moins habituelles.

L'étape suivante consiste à traduire les informations relatives à l'EFO en but de simulation. Cette traduction est associée avec une analyse visuelle des caractéristiques et de l'attribut de l'exigence sélectionnée. Dans cette tâche une grande attention est accordée à la consultation des conflits et des dépendances entre les exigences. Il faut bien rappeler ici que nous avons géré l'ensemble des

exigences du cycle de vie produit dont l'objectif de traduire les EFO conformément à la relation de conflit ou de dépendance qui peuvent exister entre une EFO et une autre ou une EFO et une exigence non quantifiable. De plus les contraintes de notre projet antérieurement spécifiées, conditionnent aussi la définition de notre but de simulation, par exemple pour effectuer des calculs d'aide à la conception qui nécessitent des délais supérieurs à quelques jours pèsent lourdement sur une contrainte de délais imposée sur le projet. Finalement l'outil de simulation utilisé doit être spécifié selon le cas d'utilisation du calcul.

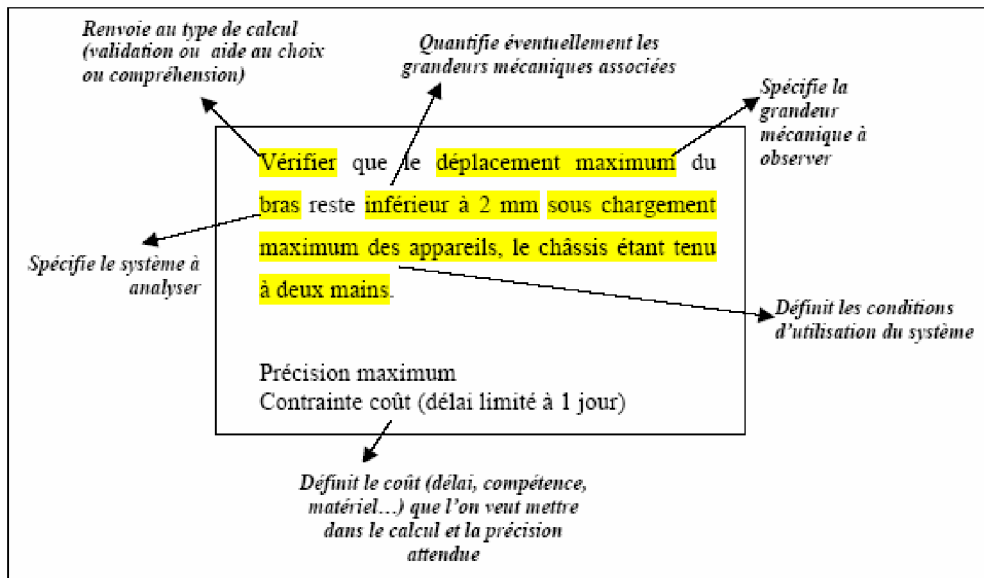


Figure 60 : Illustration sur l'exemple du châssis le But de Simulation

Seulement à ce niveau et avant de passer à la phase de simulation, la question qu'il faut se poser est la suivante : a-t-on défini le bon problème qui se pose au calcul ? Ou a-t-on formulé le bon but de simulation ? La réponse est conditionnée par la réussite de la mise en place des connaissances d'interface entre le concepteur et l'analyste. Ces connaissances qui sont intéressantes dans leur dynamique et par leur retour dans chacun des métiers. Nous jugeons que le regroupement des connaissances liées aux exigences pour former des dispositifs de coopération permet de :

- § favoriser le passage d'un problème de conception à un problème de modélisation,
- § assurer une réponse pertinente à ce problème initialement formulé.

L'analyse des connaissances de coopération sur lesquelles à la fois le concepteur et le spécialiste du calcul puissent avoir des prises, qui permettent de définir un objectif contextualisé de calcul (c'est à dire qui intègre des informations sur le contexte de conception dans lequel vient s'insérer le calcul) ne permet que de maîtriser le processus de formulation des buts de simulation.

1.4 Pilotage du processus de vérification et de validation

Une fois que le but de simulation est défini, la phase de simulation est amorcée. A ce niveau nous reprenons les concepts développés dans les travaux de Troussier [Troussier et al, 98]. La méthode s'appuie sur une structuration des informations manipulées lors de l'utilisation du calcul en conception. Elle s'articule autour des six étapes représentées sur la figure 61. Ces différentes étapes sont liées à la fois chronologiquement, pour traduire la démarche de simulation, et à titre informationnel, pour traduire la dépendance entre les entités.

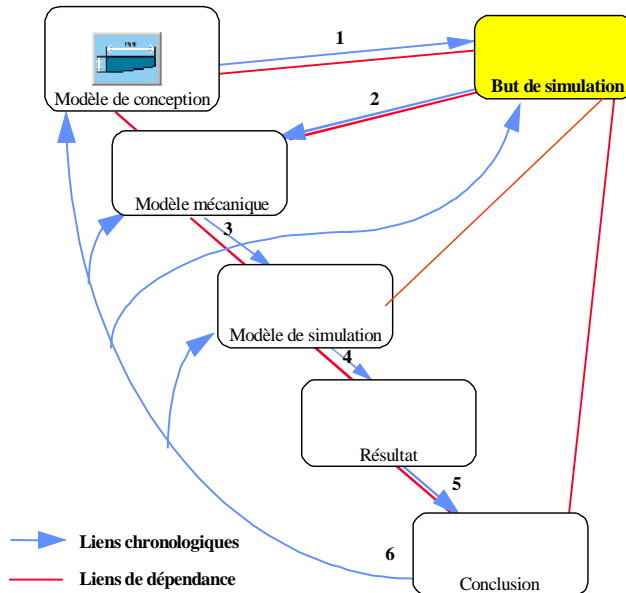


Figure 61. Structuration du calcul en conception [Troussier et al, 98]

Le processus de vérification repose sur plusieurs itérations entre le modèle de conception et les résultats de simulations. Le processus de vérification et de validation proposé par la figure 3 permet d'identifier l'enchaînement des activités pour les deux phases de vérification et de validation. Il présente les liens informationnels et chronologiques entre les étapes et positionne le support informationnel par rapport à l'activité d'identification du besoin et l'activité d'ingénierie.

Le parcours des étapes illustrées sur la figure 62 justifie le recalage qui peut être réalisé sur la définition du but de simulation. Par exemple, il arrive que le but énoncé ne permette pas de concrétiser une conclusion sur le phénomène observé en simulation. Dans ce cas, il faut bien revenir sur le contenu informationnel et proposer une correction du but de simulation. La modification du but de simulation peut aussi être nécessaire suite à une nouvelle contrainte déclarée par un intervenant du projet sur l'exigence en cours de traitement ou une exigence qui dépend de celle-ci. Finalement, la validation de l'exigence permet d'enregistrer le rapport de simulation généré par l'outil de simulation (lien dans le champ « résultat de simulation » de la

figure 62), ainsi que les informations du support informationnel relatives à l'exigence étudiée.

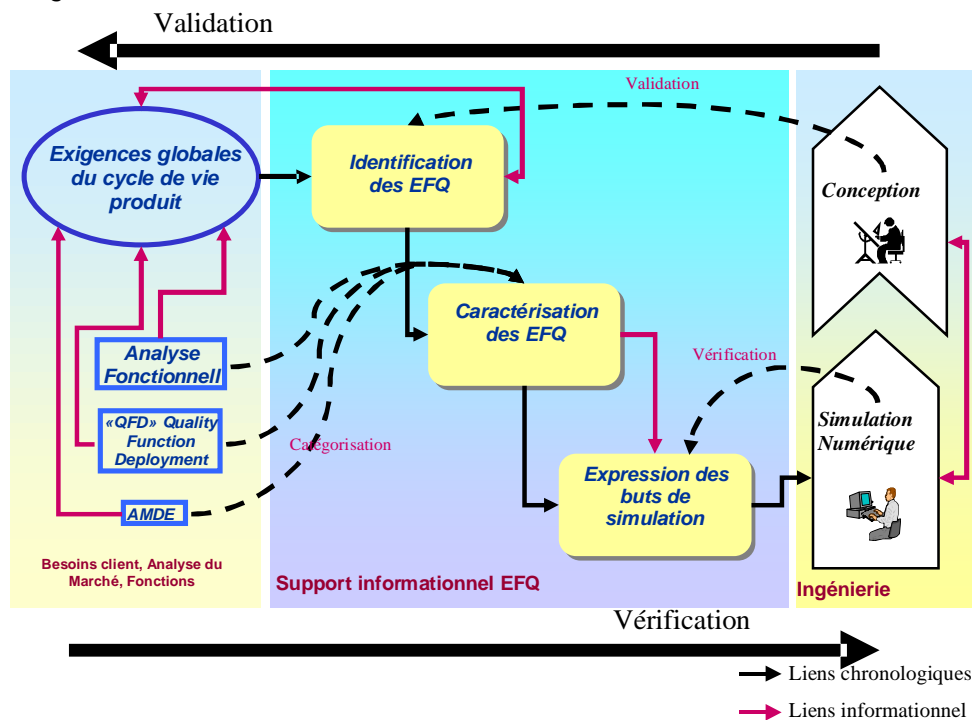


Figure 62. Processus de vérification et de validation

Ce processus qui résume la méthodologie supporter par l'outils de coopération « Support informationnel EFQ » permet d'illustrer la chronologie des activités ordonnées pour la formulation du but de simulation. Il identifie ainsi les entrées et les sorties du support informationnel et met en place les interactions entre les activités du processus. L'identification des liens informationnels dans ce dernier permet de construire les mécanismes de structuration des traces de l'activité de simulation par le but de simulation.

Notre problématique de formulation de but de simulation n'est pas encore résolue à ce niveau. Car si nous avons bien justifié la définition d'un but de simulation par les approches développées, nous n'avons pas disculpé la vérification de l'exactitude de ce but. Il faut bien se rappeler que nous avons positionné nos travaux au niveau de l'amélioration et la maîtrise du processus de conception. Nous avons aussi visé l'excellence en conception qui sera autant « l'excellence du processus » que « l'excellence du résultat » du processus.

Selon le modèle de structuration du calcul en conception, proposé par Troussier dans [Troussier et al, 98] (Figure 61) et suite à la formulation du but de simulation, l'acteur fournit son modèle de conception, propose son modèle mécanique et son modèle de simulation et réalise le calcul. Il faut bien noter que pour définir les modèles déjà cités, la consultation du but de simulation est nécessaire. Les liens de dépendances qui permettent de gérer les interactions qui existent entre les différentes entités manipulées et qui sont mentionnés dans

la représentation de Troussier, justifie cette remarque. Les résultats de simulation obtenus suite à la réalisation du calcul sont présentés sous la forme de graphiques, de tableaux, de cartes d'isovaleurs... Nous appelons alors l'ensemble des données fournies par la procédure de calcul le Résultat. Il s'agit d'une entité qui découle directement des choix faits dans le Modèle de Simulation. Finalement une entité qui définit le résultat de simulation identifiée par la conclusion. Cette entité qui admet un lien de dépendance avec le but de simulation permet ainsi de valider le modèle mécanique.

Parmi les liens de dépendance énoncés plus haut, le lien Conclusion – But de Simulation a un statut un peu particulier puisqu'il réalise le retour du calcul sur la conception. La limitation du décalage entre le problème initial et la solution fournie par le calcul se fait par la consultation du But de Simulation nécessaire à la rédaction de la Conclusion. L'analyste doit attribuer un état au lien de dépendance Conclusion – But de Simulation, qui traduit à la fois la confiance qu'il fait au calcul et la réponse qu'il apporte au But de Simulation en fonction de son interprétation. Ces deux points correspondent aux deux étapes de construction de la Conclusion. Il est à noter que l'état associé au lien de dépendance Conclusion – But de Simulation présente l'intérêt non seulement d'assurer le retour sur la conception, mais aussi peut être envisagé comme un résumé de la réponse que la Conclusion apporte au But de Simulation.

Ces trois entités (Modèle de Conception, Modèle de Simulation et Résultat) sont les trois types d'informations formalisés dans les pratiques actuelles. Ces informations sont le minimum nécessaire pour réaliser un calcul. Cependant, ces trois entités s'avèrent insuffisantes pour une interprétation efficace du calcul mécanique en conception. Tout d'abord, le Modèle de Simulation est souvent davantage lié aux représentations géométriques du produit, à l'outil et à la méthode de calcul qu'au comportement mécanique. En effet, l'analyste a une tendance naturelle à privilégier ce que l'on voit et cette tendance est amplifiée par les outils intégrés actuels. Il est alors difficile d'assurer une certaine maîtrise des erreurs de modélisation dans la mesure où le modèle est une représentation très implicite des hypothèses. Ensuite, ces seules entités ne permettent pas de définir un objectif de calcul clair traduisant le contexte de conception et permettant d'effectuer des choix de modélisation. Enfin, elles ne favorisent ni la coopération entre le concepteur et le spécialiste, ni le retour d'informations sur la conception.

2. Une structure pour l'amélioration de la coopération

Comme l'énonce Jeantet dans [JEA98], la réalisation de nouveaux outils d'aide à la conception requiert de « concevoir et faire fonctionner de véritables « objets frontières », comme par exemple des « entités de coopération » dans la conception en mécanique.

Cependant, Jeantet continue en soulignant que ceci « n'est pas une mince affaire et constitue un véritable champ de recherche ». Les acteurs de la conception

doivent pouvoir trouver des prises sur ces objets de façon à les manipuler pour discuter et coopérer entre acteurs de différents métiers. La mise en place de ces entités de coopération fait apparaître de nouvelles connaissances (appelées connaissances d'interface) qui sont intéressantes dans leur dynamique et par leur retour dans chacun des métiers.

Dans la perspective de favoriser la coopération entre le concepteur et l'analyste, le but de simulation occupe parfaitement la fonction d'objet frontière et s'identifie comme étant une véritable entité de coopération dans le processus de conception. Il paraît intéressant d'utiliser ce concept d'entité de coopération, en d'autres termes, des entités spécifiques doivent être regroupées pour former des dispositifs de coopération. Ceci permet de favoriser le passage d'un problème de conception à un problème de modélisation et d'assurer une réponse pertinente à ce problème initialement formulé. Il faut donc définir des entités de coopération sur lesquelles à la fois le concepteur et le spécialiste du calcul puissent avoir des prises, qui permettent de définir un objectif contextualisé de calcul (c'est à dire qui intègre des informations sur le contexte de conception dans lequel vient s'insérer le calcul) et de lui répondre.

2.1 Une structure de formalisation des traces de l'activité de calcul par le but de simulation

La problématique d'intégration du calcul en conception, présentée en introduction de ce manuscrit, est présente dans de nombreux travaux. Parmi les différentes solutions envisagées et possibles, nous avons vu que la mise en place d'un système de tracabilité des connaissances apparaît comme un élément de réponse intéressant. Dans ce cadre, la proposition méthodologique proposée a pu construire une structure de représentation des connaissances adaptées aux différentes organisations. Afin d'être au plus près des besoins réels des acteurs de la simulation et notamment lors de la mise en place de l'outil SG3C [Troussier 99] dans le BE de Schneider Electric, les acteurs du calcul ne parvenaient pas à représenter directement leur travail de manière structurée, il leur fallait revenir en arrière et analyser a posteriori leurs calculs pour être capables de les représenter selon le formalisme requis par la méthode. Nous pouvons rappeler que celui-ci a permis de constater un certain nombre de besoins liés au processus de tracabilité et de réutilisation des connaissances. Parmi ces différents besoins, celui évident d'une structuration fine du système de tracabilité permettant de disposer d'objets de connaissance suffisamment pertinents pour représenter l'ensemble des connaissances des acteurs et des processus de construction de ces connaissances. Dans ce cadre, les premiers concepts se sont principalement articulés autour de :

- § La création d'objets de connaissance, d'un point de vue des informations manipulées aussi bien
- § que des processus engagés, représentatifs des connaissances et supports de la réutilisation.
- § La mise en place de critères de validation et de vérification des informations et des connaissances.

Les scénarios réalisés sur l'utilisation du support informationnel nous ont alors permis de développer une structure de traçabilité et de réutilisation des connaissances liées au processus de simulation.

2.2 Application de la méthodologie sur une étude de cas :

« Support d'étrier de frein à disque »

En 1999, l'entreprise Avid – HAYES, équipe les vélos tous terrain d'un frein à disque sur la roue avant et commandé par un système hydraulique. Avec son système CPS (Caliper Positioning System) le frein HAYES offre un alignement parfait et sans effort important de l'étrier sur le disque, ce qui permet d'augmenter la performance de freinage de plus il présente la caractéristique d'être léger à actionner. Ce système est basé sur un disque métallique, aux deux faces rigoureusement planes, qui est solidaire au moyeu de la roue avant du vélo. Lors du freinage, le liquide sous pression contenu dans l'accumulateur est envoyé vers l'étrier mobile à deux mâchoires garnies de plaquettes. L'arrivée du liquide commande le déplacement d'un piston qui met le patin mobile en contact avec le disque puis provoque le déplacement de l'étrier pour mettre le second patin en contact de freinage centré sur le disque et la répartition des pressions est automatiquement équilibrée. Cette pression est uniforme sur toute la surface de frottement des garnitures (voir figure 63). Le faible jeu entre le disque et les garnitures permet une action pratiquement immédiate du frein. Un dispositif de rattrapage automatique de jeu permet de conserver une distance constante entre disque et garnitures quelle que soit l'usure de celles-ci.

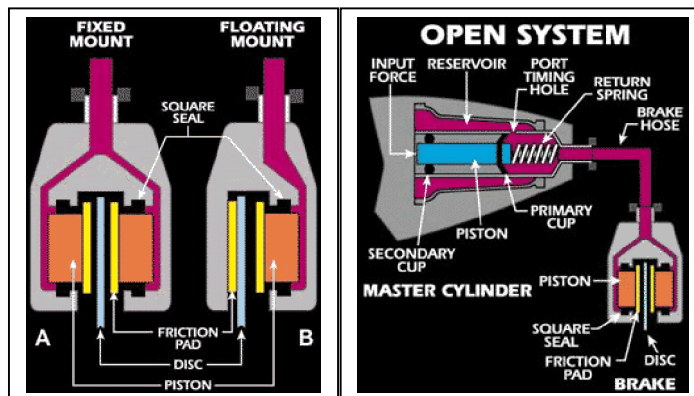


Figure 63. Système frein à disque hydraulique Hayes

Dans l'esprit de l'architecture Avid, les freins à disque CPS sont conçus pour limiter le temps d'installation et de réglage des freins. Avec ce système l'utilisateur ne cherche pas à réaliser un réglage complet des plaquettes et de la tension de ressort avant chaque utilisation du vélo.

Notre étude porte sur le support d'étrier du frein, représenté sur la figure 64, pour lequel on a constaté, en fonctionnement, une déformation pouvant

compromettre son intégrité et nuisant à l'efficacité du freinage. Il s'agit notamment d'une re-conception du support l'une des pièces maîtresse du système de freinage, en vérifiant qu'elle reste dans le domaine élastique. Les deux configurations sur le modèle de conception du support d'étrier sont ainsi représentées ci dessous.

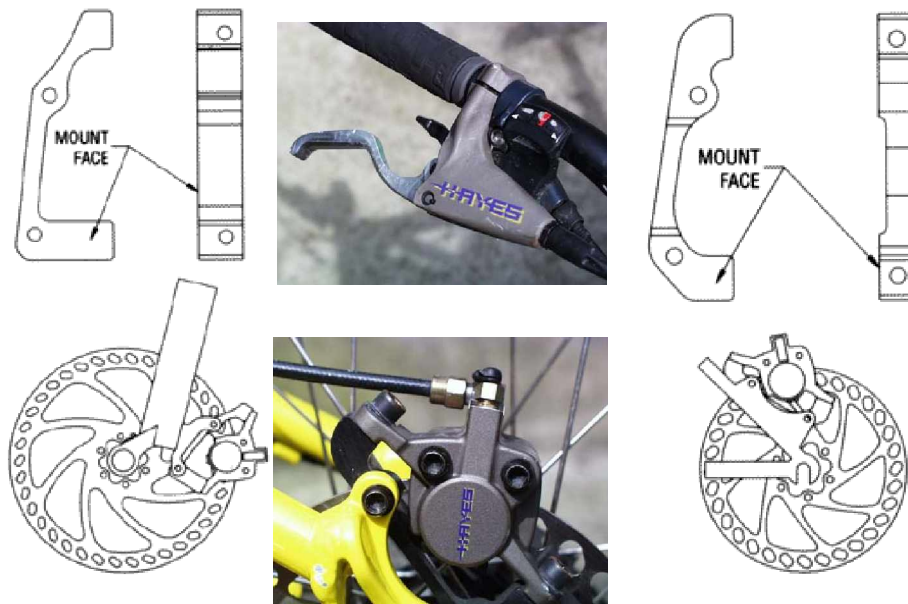


Figure 64 : Propositions des solutions pour la conception du support d'étrier
Le déploiement des outils AF, QFD et AMDEC dans la phase de conception du frein hydraulique, a permis d'exprimer toutes les exigences du produit. Nous allons, dans cette phase de re-conception du support d'étrier, identifier et analyser les exigences qui concernent seulement notre composant. Il faut noter que pour limiter cette étude à notre objectif d'illustration de la méthodologie, nous n'allons pas présenter toute l'étude que nous avons menée par l'application des outils (AFE-AFI-AMDEC- QFD) qui fait plus de 40 pages. L'annexe 4, illustre quelques copies d'écrans des outils TDC comme TDC Need, pour l'analyse fonctionnelle externe, TDC Structure, pour l'analyse fonctionnelle interne, TDC FMEA pour l'AMDEC et QFD/CAPTURE pour le QFD.

Identification des exigences globales

Ident	Exigences	Phase du cycle de vie	Méthode source	Outil utilisé
EX1	Doit transmettre l'effort de freinage	Phase utilisation	AFE	TDC Need
EX2	La matière du support doit être recyclable	Phase recyclage	AFE	TDC Need
EX3	Doit être rigidement assemblé sur le cadre	Phase utilisation	AFI AMDEC	TDC structure TDC FMEA
EX4	Doit être interchangeable	Phase d'entretien	QFD	QFD/capture

Gestion de Configuration Support Inf B.S Recherche Projet Sauvegarde Communication

Métier: Deformation Projet: Frein hydraulique à disque Exigence Globale: Sélectionnez une couleur

Ajouter: Sélectionnez une couleur: EX1, EX2, EX3, EX4

Identification des contraintes projet :

L'analyse fonctionnelle externe ainsi l'analyse de la concurrence menée respectivement par les outils « TDC-need » et l'outil « QFD/CAPTURE » ont pu identifier les contraintes suivantes :

- § Technologique, la commande hydraulique du frein nécessite la maîtrise de cette technologie.
- § Coût : la concurrence sur le développement de ce type de frein est assez grande et le positionnement sur le marché par rapport au coût du produit est stratégique.

Caractérisation de Phase d'utilisation du système de freinage				
	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	Technologie	système hydraulique	F1	Etude
2		Système mécanique	F1	Etude
3	Liste des normes et réglementations à respecter	Sécurité	F0	Essais physique

Caractérisation de Phase d'entretien				
	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	Maintenabilité	Coût composants	F2	Analyse fonctionnelle
2		maintenance facile	F2	Essais sur prototype

Caractérisation de Phase de recyclage du produit				
	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	Recyclage matériaux	80 % recyclés	F1	etude

Identification des exigences fonctionnelles quantifiables :

Initier la recherche des caractéristiques des exigences permet d'identifier les exigences fonctionnelles quantifiables ceci nécessite une analyse des critères renseignés dans l'AFE et l'AFI. Par exemple la caractérisation dans l'AFE de l'exigence EX1 admet un critère dont le niveau est quantifiable celui de la déformation limite du composant.

Critère identifié dans l'AFE

Phase utilisation du système : Caractérisation de (Fi 1.1) doit transmettre l'effort de freinage				
	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	résistance des composants	déformation limite < à 0,04mm	F1	calcul par simulation

Critère identifié dans l'AFI

Phase utilisation du système : Caractérisation de (F 1.3) doit être assemblée sur le cadre			
Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1 rigidité d'assemblage	contrainte > 280 MPa	F1	calcul par simulation

Critère identifié dans l'AMDEC

Système : support d'étrier											
Fct ?	Mode de défaillance	Effets	S	Classe	Causes de défaillance	0	Contrôle Conception Prévention	Contrôle Conception Détection	D	IPR	Actions recommandées
1	Fonctionnement irrégulier	CLIENT ASSEZ MECONTENT	8	⊙ ^S	mode d'assemblage	6	Essai prototype	Détection lors de tests laboratoire	9	432	Expérience sur des produits comparables
2	Cassure	GRAND MECONTENTEMENT	9	YS	Matière fragile	4	simulation numérique	Détection lors de tests de simulation	3	108	Calculs résistance des matériaux

Gestion de Configuration Support Inf B.S Recherche Projet Sauvegarde Communication Fermer

Métier: Deformation Projet: Frein hydraulique à disque Exigence Globale: EX1 Validé

Contraintes du Projet: Technologie Coût Délais Qualité Valider Consulté Ajouter Annulé

Caractéristiques Exigences

Type: Primaire Application de l'exigence: parametre produit Type du Paramètre: Quantitatif Note de conc. Niveau de Conformité: Obligatoire Priorité: Facteur sécurité Valider Annuler

Recherche des attributs de l'exigence :

La recherche des attributs des exigences est une étape primordiale pour la rédaction d'un bon but de simulation. C'est dans cette phase que le concepteur doit capitaliser sur les études faites dans la phase d'analyse du besoin. Il faut noter que tous les acteurs du projet participent directement ou indirectement à la formulation des attributs. Cet espace de coopération n'est pas figé car des modifications concernant certains attributs peuvent être demandées par un ou plusieurs acteurs et sera validé par l'administrateur du support informationnel. La consultation des exigences qui présentent un conflit ou une dépendance avec l'exigence étudiée permet d'affiner notre but de simulation. Pour cette étude nous identifions un conflit avec EX2 et une dépendance avec EX3.

Attributs des exigences

Description: le support ne doit pas présenter une grande déforma

Justification: toute déformation sur le support est répercutée sur l

Source: AFE

Critère de mesure: déformation sous charge maxi de 280MPa < 0.04mm

Document support: Consulter

Ajouter un Document: Parcourir...

Phase de cycle de vie: utilisation du frein

Critère de flexibilité: F1 ((faible)

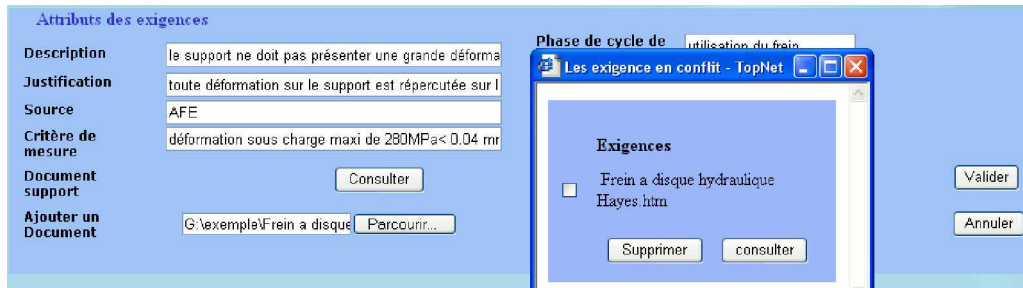
Satisfaction Client: 4

Conflit: Consulter

Dépendance: Consulter

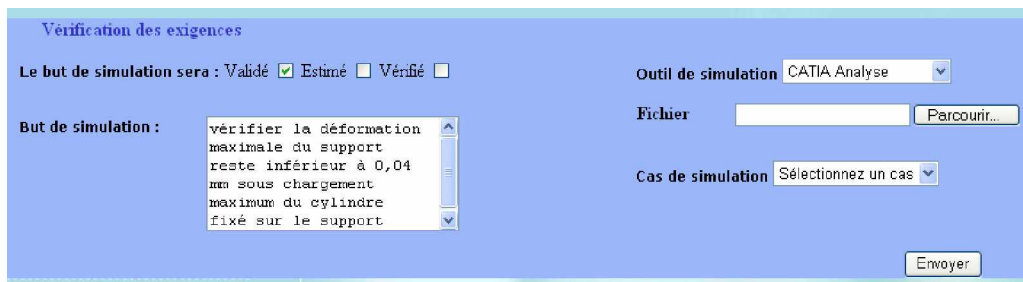
Valider Annuler

Ajouter des documents par la fonction « Parcourir » permet aussi de documenter les attributs et de consolider les justifications apportées. Dans notre cas d'application, le document « Frein à disque hydraulique » est ainsi attaché.



Formulation du but de simulation :

L'espace vérification des exigences permet de saisir le but de simulation pour un objectif de validation de l'exigence. Ici nous identifions comme but de simulation « vérifier la déformation maximale du support reste inférieure à 0,04 mm sous chargement maximum du cylindre fixé sur le support ». L'étape suivante, et après le choix de l'outil de simulation à utiliser, il s'agit de réaliser la simulation numérique.



Nous apercevons que pour cette étude nous n'avons pas de cas de simulation pour le but formulé, de plus la zone fichier est vide car nous n'avons pas encore attaché un rapport de simulation.

Le passage du modèle de conception dans « CATIA part » au modèle mécanique et par la suite au modèle de simulation dans « CATIA Analysis » nécessite de revenir sur le support informationnel pour consulter les solutions techniques envisagées sur les composants du système. Les blocs diagrammes fonctionnelles « BDF », réalisés dans L'AFI, (voir en annexe4, le module TDC Structure). Identifient la nature des contacts entre les composants.

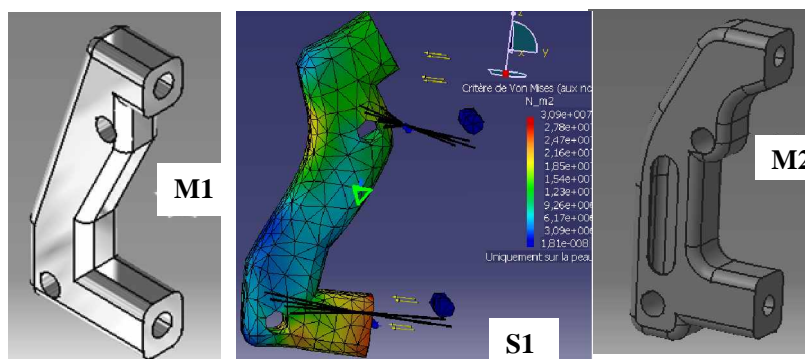
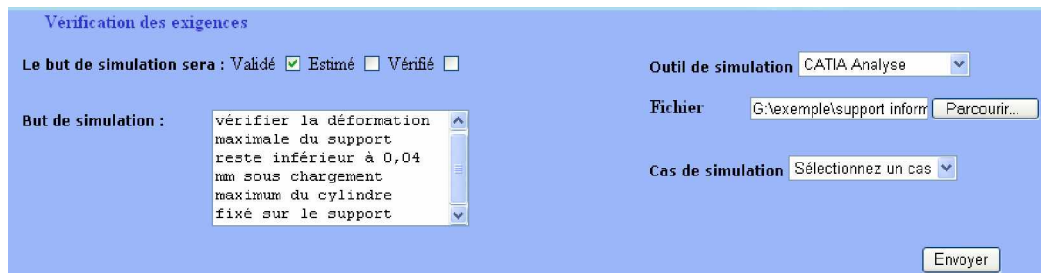


Figure 65. Différents modèles du support frein étudié

La figure 44 illustre le modèle de conception dans « CATIA part » et le modèle de simulation avec une visualisation du résultat de simulation dans « CATIA Analysis ». Pour une première analyse et après avoir affecté un matériau au support, nous définissons les pièces virtuelles rigides qui permettent de représenter l'axe et la biellette qui seront supposés infiniment rigides. Puis, les liaisons entre ces pièces virtuelles et le référentiel (une liaison pivot et une liaison rotule) sont définies. Enfin, le chargement dû à l'action de l'étrier sur le support est mis en place. L'analyse peut alors être effectuée. Le résultat de la première analyse permet de constater que le but de simulation n'est pas satisfait, grande concentration des contraintes sur le support de frein, et qu'il en est de même pour la dépendance sur l'exigence EX3 «Doit être rigidement assemblé sur le cadre ». La satisfaction de cette exigence de dépendance nécessite une surface de contact assez importante pour avoir un assemblage rigide.

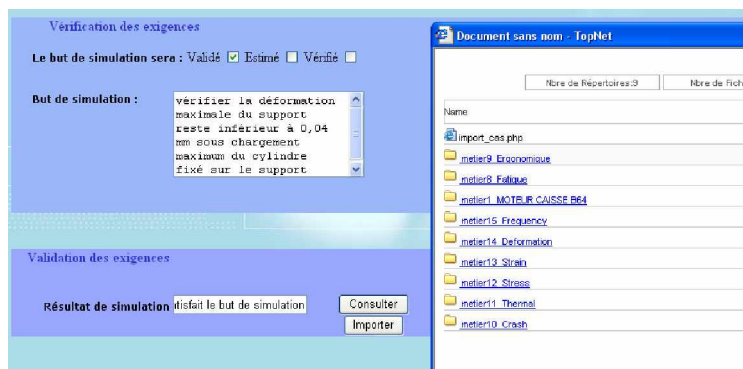


Formulation du but de simulation :

Enfin le résultat de simulation permet de valider l'exigence et un commentaire suivi du critère d'acceptation, seront renseignés dans les champs correspondants.



Pour créer un cas de simulation dans le métier « déformation » il faut envoyer le résultat de simulation par le lien « Envoyer » dans l'espace vérification des exigences. La consultation est faite par le lien « consulter » dans l'espace validation des exigences



Cooperative Management of Numerical Simulation in Design
La gestion Coopérative des Exigences du Cycle de Vie Produit par la Simulation en Conception

Gestion de Configuration Support Inf B.S Recherche Projet Sauvegarde Communication Fermer

Métier: Deformation Projet: Frein hydraulique à disque Exigence Globale: EX1 Validé

Contraintes du Projet: Technologie Coût Délais Qualité Valider Consulté Ajouter Annulé

Caractéristiques Exigenc

Type: Primaire Application de l'exigence: parametre produit Type du Paramètre: Quantitatif Note de conc

Niveau de Conformité: Obligatoire Priorité: Facteur sécurité Valider Annuler

Attributs des exigence

Description	le support ne doit pas présenter une grande déforma	Phase de cycle de vie	utilisation du frein
Justification	toute déformation sur le support est répercutée sur l	Critère de flexibilité	F1 ((faible))
Source	AFE	Satisfaction Client	4
Critère de mesure	déformation en mm	Conflit	Consulter
Document support	Consulter	Dépendance	Consulter Valider
Ajouter un Document	Parcourir...		Annuler

Vérification des exigences

Le but de simulation sera : Validé Estimé Vérifié

Outil de simulation: CATIA Analyse

Fichier: G:\exemple\support inform Parcourir...

Cas de simulation: Sélectionnez un cas

But de simulation : vérifier la déformation maximale du support reste inférieur à 0,04 mm sous chargement maximum du cylindre fixé sur le support

Envoyer

Validation des exigenc

Résultat de simulation: Consulter Importer

Commentaire: Valider

Critère d'acceptation: Annuler

3. Conceptualisation du démonstrateur :

« Support informationnel but de simulation »

L'usage du médium informatique comme support de coopération dans les activités de l'entreprise s'impose logiquement compte tenu du nombre croissant d'activités exploitant ses capacités de calcul, de communication ou de mémorisation. Dans le domaine de la conception coopérative d'artefacts complexes exigeant l'intervention de plusieurs équipes se rattachant à plusieurs métiers, l'informatique devient le vecteur même de la coopération grâce au potentiel offert d'explicitation, de partage et de capitalisation à fin de réutilisation des connaissances mobilisées.

L'organisation sociale du processus de conception prend maintenant en compte cette dimension en cherchant à « mettre en relation » les différents maillons de la chaîne de personnes utilisant des outils informatiques spécialisés, fournissant des modèles de coopération qui spécifient eux-mêmes des formes d'organisation des hommes et du système d'information.

Les outils utilisés par les différentes composantes sont relativement indépendants techniquement les uns des autres, mais les tâches qu'ils participent à réaliser sont en relation selon des modèles plus ou moins explicites.

Le support informationnel matérialise ainsi un espace virtuel et partagé pour la gestion coopérative des exigences du cycle de vie produit par la simulation en conception permettant d'illustrer et de valider les concepts mis en place et décrits dans les chapitres précédents, une présentation du support conçu permet à la fois de montrer la faisabilité d'un outil relativement aux concepts élaborés et l'intérêt de la structuration dans un contexte de conception. Le choix d'un environnement PHP-MySQL comme support de développement est expliqué par la suite et le modèle relationnel utilisé est décrit. Enfin, le résultat obtenu avec cette maquette en termes d'accès à l'information et de navigation est présenté.

3.1 Objectifs du support informationnel

Ce projet consiste à concevoir et à réaliser un démonstrateur relatif à un outil informatique d'aide à la formulation des buts de simulation. Ce démonstrateur permettra de supporter le traitement des exigences de la demande jusqu'à l'apport du processus de validation de celle-ci par la simulation numérique au travers d'un espace de travail virtuel et collaboratif. Le démonstrateur « support informationnel » sera destiné à valider la méthodologie propre à ce travail et sera utilisé dans une première phase par des équipes d'étudiants concepteurs. Nous précisons que le contexte de réalisation de cette thèse a entravé l'exploitation de l'environnement industriel pour la validation des concepts proposés. Les quelques essais pour l'application de la

méthodologie dans les bureaux d'études des entreprises tunisiennes se sont rendus à l'échec. Dans ce contexte nous n'allons pas discuter le pourquoi et nous avons opté pour une validation dans le contexte de la formation des ingénieurs.

Le but de cet outil est d'apporter une aide pour la compréhension des verrous qui peuvent entraver l'apport de nouvelles méthodes proposées dans un environnement de recherche. Le support informationnel et de communication entre les différents acteurs est basée sur l'exploitation d'une base de donnée « Exigences du produit et de ces composants » qui permet de supporter des fonctionnalités de type liens, ainsi que d'une base de données « Ressources de calcul ». L'outil présentera aussi une synthèse, pour chaque élément de la base de données, des différentes simulations numériques et les buts de simulation consignés pour chaque exigence, ainsi que des informations sur les phases antérieures du projet étudié.

3.2 Structure du support informationnel

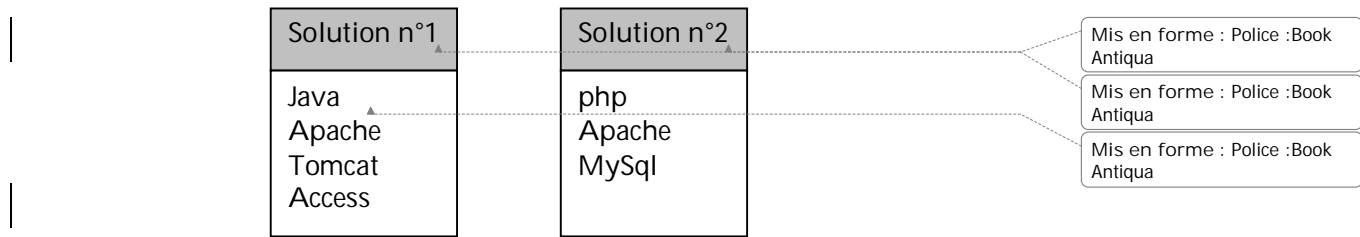
La structuration proposée peut être représentée à trois niveaux différents s'incluant les uns dans les autres comme des poupées russes. Au niveau de granularité le plus gros, l'entité projet et l'entité vérification mettent en évidence différents niveaux de connaissances générées par le calcul. A un niveau intermédiaire, la gestion des exigences permet de modéliser la démarche de formulation des buts de simulation et de gérer plus facilement la traçabilité informationnelles entre les entités, dans le cadre de la réutilisation des démarches.

Cette structuration plus fine de l'environnement dédié aux exigences, vise à la fois à aider le concepteur à construire son but de simulation et mettre en évidence les hypothèses fondamentales réalisées relativement au comportement mécanique du système pour mieux maîtriser la qualité du calcul. De façon encore plus précise, le portail a pour objectif de montrer quelle utilisation peut être faite des liens avec les outils d'aide au concepteur et d'illustrer les intérêts qu'ils présentent dans un contexte de conception.

Pour remplir les objectifs précédemment évoqués, l'outil de développement de la maquette informatique doit remplir les exigences suivantes :

- § être facile à maîtriser en termes de fonctionnement et de développement,
- § permet de satisfaire le travail collaboratif via le réseau Internet ou intranet.
- § Facile et conviviale dans son utilisation par les concepteurs et ingénieurs pour ne pas trop les déstabiliser en leur présentant à la fois de nouveaux concepts par l'outil informatique.

Ce démonstrateur doit avoir une interface graphique de bonne qualité et doit, entre autres, permettre la gestion des bases de données. De plus l'accessibilité doit être une priorité. Pour cela il est nécessaire de s'orienter vers une technologie avec un client léger. Deux solutions de développement sont alors possibles pour le projet :



Notre choix c'est porté vers la solution n°2. Cette orientation est due au fait que le langage PHP est un langage script. Il est interprété, par conséquent il ne nécessite pas d'être compilé pour obtenir un exécutable avant d'être utilisable. De plus, PHP est un module supporté par le serveur Web Apache, le plus répandu dans le monde, il est donc développé pour être facilement utilisable via ce serveur. PHP permet d'interfacer très facilement de très nombreuses bases de données notamment MySql. Nous retrouvons d'ailleurs l'ensemble Apache-PHP-MySql souvent sur les plates-formes Web. Il offre ainsi des outils et de nombreuses fonctions facilitant ce travail. Du fait de l'utilisation par un grand nombre de ce langage nous avons accès sur Internet et dans la littérature à de nombreuses sources d'informations et d'aides. Un dernier élément en faveur du langage PHP est sa portabilité. En effet, si nous développons un programme PHP, nous pourrions l'installer sur toutes les machines sans avoir à modifier le code source, il suffira que le serveur Web soit configuré de manière correcte et que PHP soit sur la machine.

Le modèle du support informationnel, mis en œuvre sous PHP-SQL, se présente sous la forme d'un portail web hébergé dans le serveur du laboratoire «GILCO» et sera accessible via l'extérieur par un lien de navigation.

3.3 Description du support informationnel

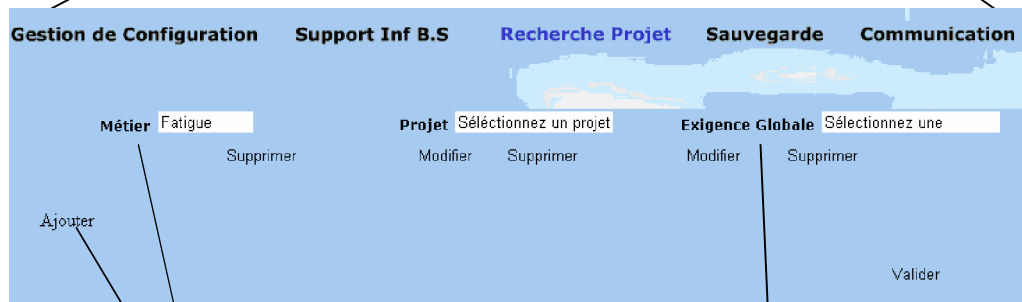
Cette description déploie les fonctionnalités de l'outil proposé et détaille la structuration de la méthodologie développée pour la gestion des informations relatives au processus de simulation. Cette description est détaillée dans le cahier des charges proposé dans l'annexe 3 où nous présentons des scénarios d'utilisation du support informationnel.

Il est nécessaire de s'identifier avant de pouvoir utiliser les fonctionnalités du support informationnel, Il existe trois rôles différents : Administrateur, acteur métier et gestionnaire de configuration. Suivant l'identification chaque rôle aura accès à un espace personnalisé. Nous détaillons ici l'espace « recherche projet » et celui du « SI but de simulation ». L'administrateur du support informationnel sera chargé de mettre à jour l'espace « recherche projet », dans cet espace, il identifie pour un nouveau projet le métier du calcul et l'identifiant des exigences du projet d'étude. De plus il est possible de modifier les éléments d'un projet ou d'ajouter des exigences. La notion métier concerne la nature du calcul à réaliser, nous citons par exemple (le calcul de structure, le calcul de fatigue, un calcul thermique, un calcul aérodynamique, etc). Pour chaque projet

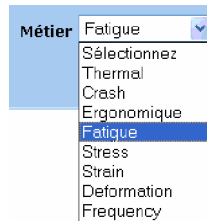
il saisit des identifiants pour les exigences exemple (EX1, EX2 etc.) du projet. Finalement il valide ses données. Cet espace est utilisé pour alimenter le support informationnel.



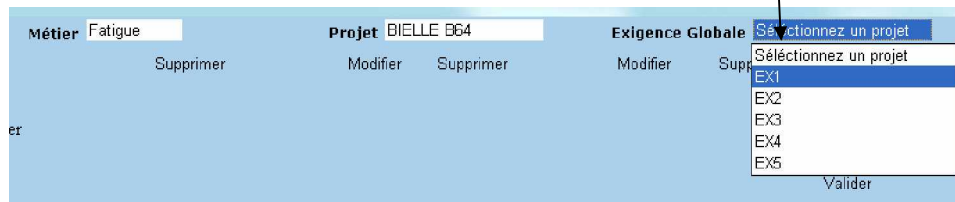
Lancer le serveur EasyPHP avant toute connexion
EasypHP.Ink



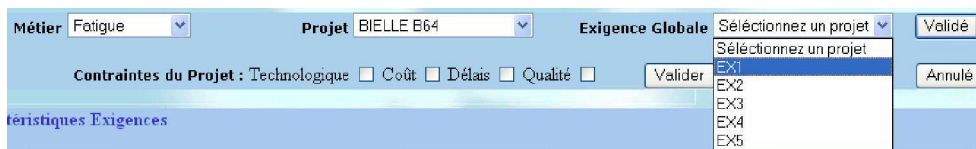
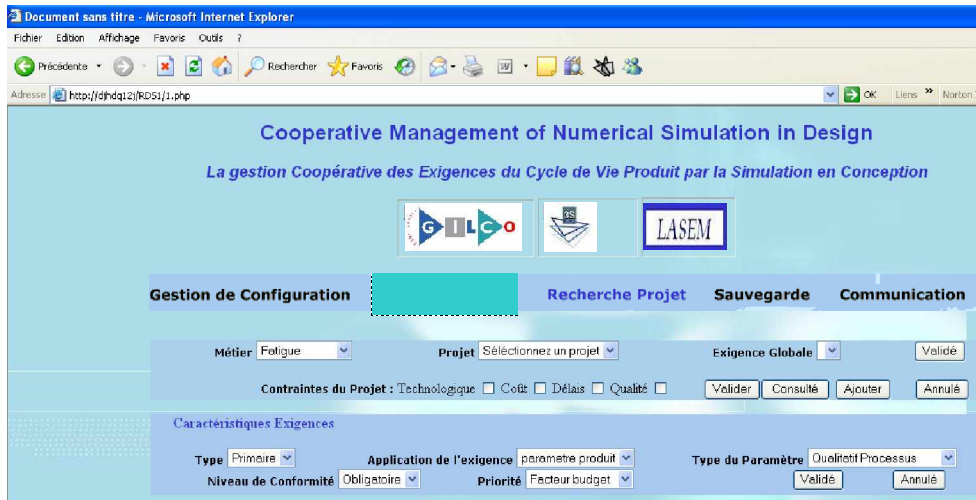
Choisir ou ajouter un métier



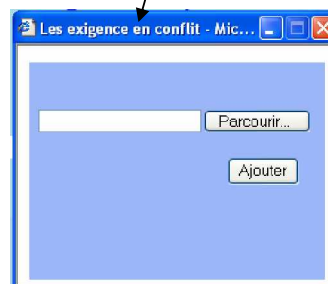
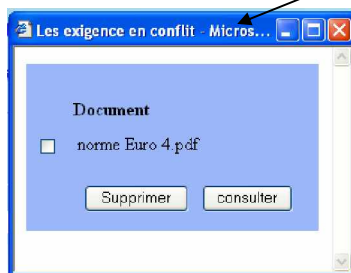
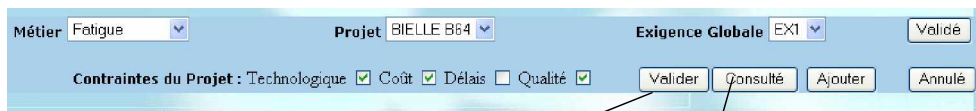
Saisir ou modifier un identifiant



S'identifier comme étant un acteur métier permet à l'utilisateur d'accéder à l'espace support informationnel but de simulation. Dans ce menu l'acteur choisit un métier, un projet correspondant et une exigence dans la liste proposé.



L'acteur choisit une exigence et valide son choix. Cette action permet de faire afficher les contraintes relatives au projet. Ces contraintes peuvent être modifiées et cette modification sera retenue suite à la validation de ses contraintes. Seulement il peut aussi consulter les documents support pour expliquer les contraintes.

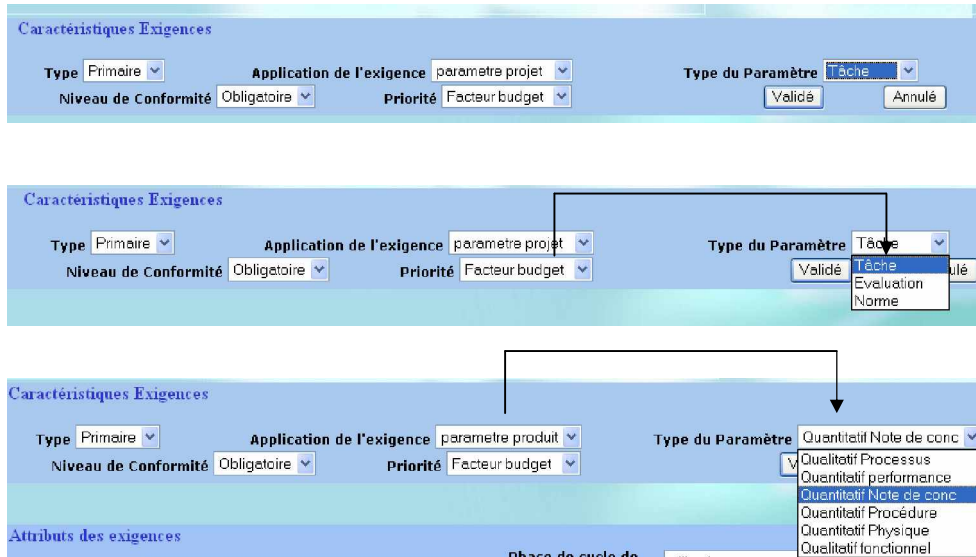


Mis en forme : Normal
Mis en forme : Normal

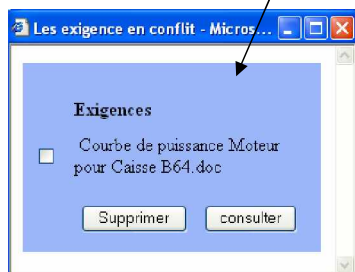
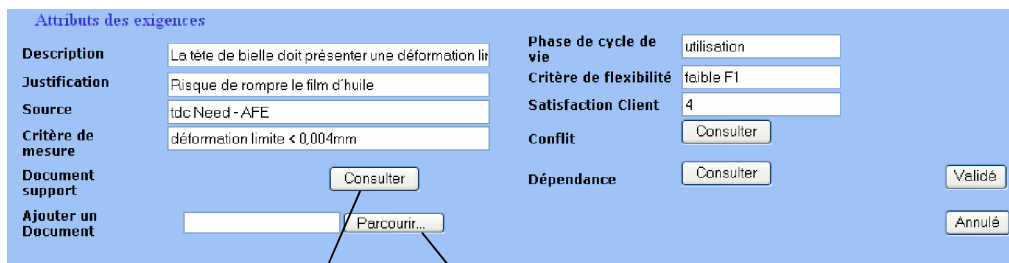
De plus, l'acteur a la possibilité d'ajouter des documents par le lien « parcourir »

Mis en forme : Police :Book Antiqua

Valider le premier espace permet ainsi de passer à l'identification des caractéristiques des exigences. Dans ce menu l'acteur ne fait que des choix sur les caractéristiques des exigences par un menu déroulant. Nous remarquons que selon le paramètre d'application de l'exigence, le menu type du paramètre propose des types différents.

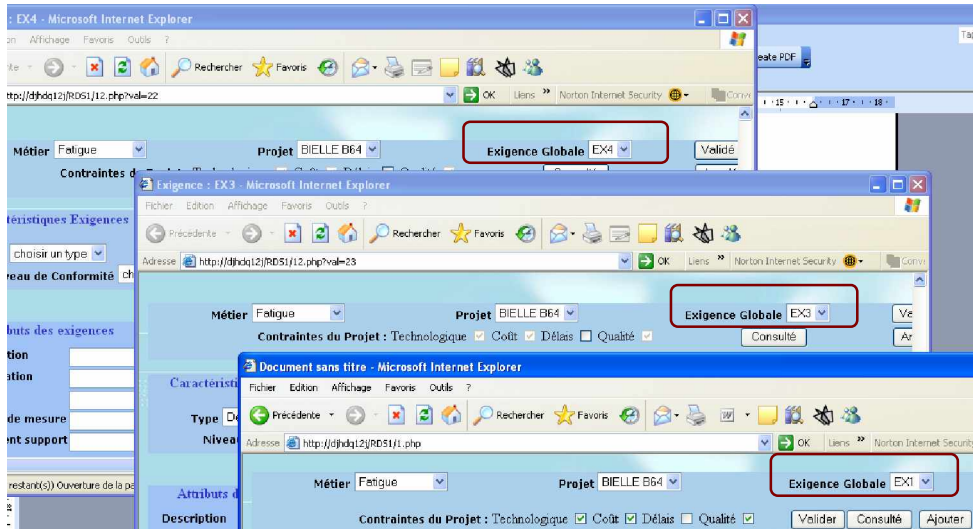


De la même manière, l'acteur peut valider ces choix pour passer au menu : attributs des exigences. Dans cet espace, la saisie des différents champs nécessite de consulter des documents issus de la base des outils d'aides aux concepteurs. Nous citons par exemple le rapport de l'analyse fonctionnelle ou du QFD par exemple. Il peut aussi ajouter des documents ou supprimer d'autres.

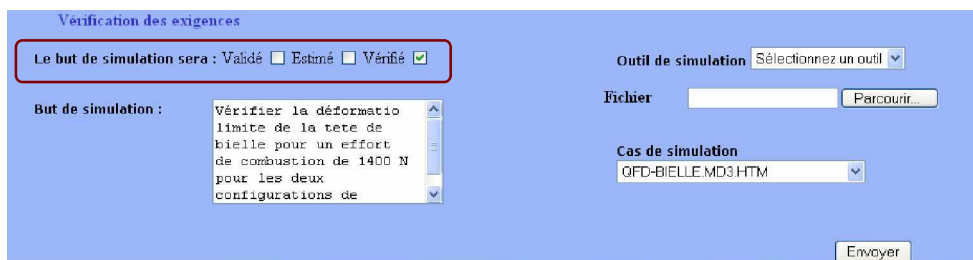


Mis en forme : normal, Gauche

L'étape de consultation des conflits et des dépendances, consiste à choisir en premier lieu, parmi les propositions une exigence qui fait l'objet d'un conflit ou d'une dépendance et par la suite valider la consultation. Les fenêtres support informationnel relatives à chaque exigence seront affichées en cascade.

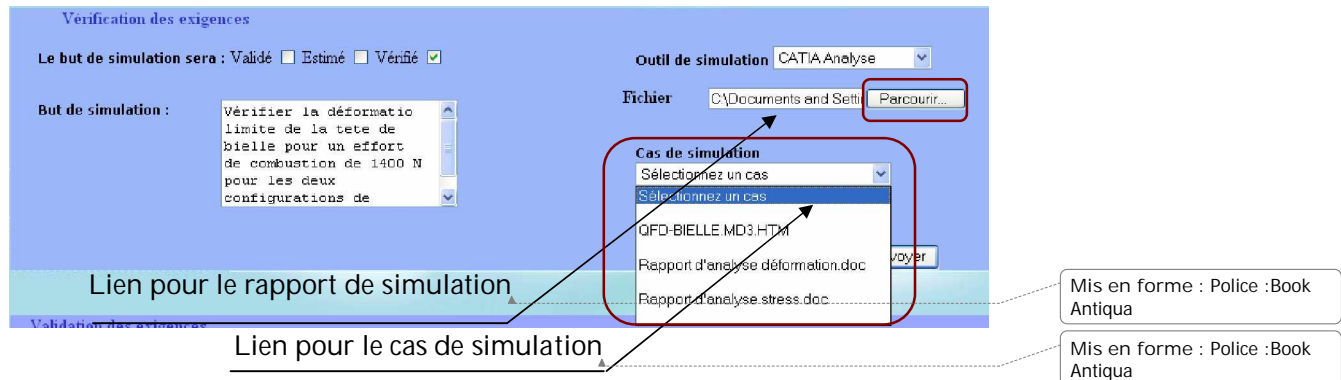


Le passage dans le menu vérification des exigences, suppose que l'analyste dispose d'une vision assez éclatante sur le contexte de l'étude et pour affiner la formulation de son but de simulation, nous avons prévu de lui proposer l'objectif du calcul « le but de simulation sera valider, estimer ou vérifier.



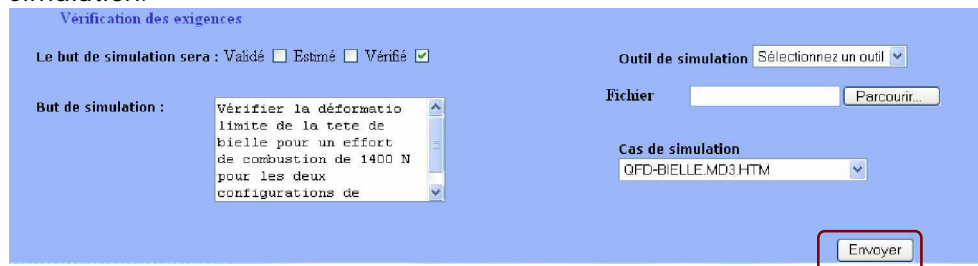
Suite à la saisie du but de simulation, l'analyste choisi l'outil de simulation pour effectuer sa vérification. Le passage à la phase simulation numérique n'est pas lié au support informationnel car il peu utiliser un autre poste pour appréhender son modèle mécanique en CAO, réaliser son modèle de simulation

et exécuter la simulation. Dans le cas où il utilise le même poste, il est obligé de réduire le support informationnel pour réaliser sa simulation. Dans le cas, où le résultat de simulation satisfait son but de simulation, toute en prenant en considération les contraintes de son projet et l'objectif du calcul, l'analyste peut revenir sur son portail du support informationnel. Il faut signaler que plusieurs itérations entre la consultation du support informationnel, le modèle mécanique et le calcul sont nécessaires pour se décider sur un résultat conforme au but de simulation. Dans l'espace vérification l'acteur du calcul explore sa base pour faire lier le fichier rapport de simulation au support informationnel. Notons que, le module simulation sur le logiciel CATIA génère un rapport de simulation sous forme d'un fichier « html ».



Il faut noter que, plusieurs résultats de simulations peuvent répondre à un même « but de simulation » selon différentes contraintes projet et différents objectifs du calcul. Pour cela nous avons prévu de proposer un lien aux différents rapports que l'analyste a jugé de les enregistrer. Ceci permet d'avoir une trace des simulations que dans un contexte ou un autre l'acteur a jugé de ne pas les prendre en compte. Ils peuvent être d'une grande utilité dans la re-conception d'un produit ou la réutilisation des buts de simulation pour d'autres cas similaires.

Finalement, et pour passer à l'espace de validation de l'exigence il suffit d'envoyer le bon rapport de simulation. La notion d'envoyer un rapport permet de faire enregistrer dans la base métier le fichier relatif au rapport de simulation.



L'espace de validation comporte une zone de saisie du résultat de simulation, un commentaire sur le résultat et le critère retenu d'acceptation du résultat.

Validation des exigences

Résultat de simulation : déformation de 0,003mm

Commentaire : acceptable

Critère d'acceptation : dans la zone de limite

Consulter, Importer, Validé, Annulé

Dans le cas où le but de simulation est déjà vérifié nous pouvons consulter directement un rapport de simulation de la base métier. Pour cela il faut bien parcourir la base par le lien « importer » et attacher à notre étude un rapport de simulation. Le consulter et saisir un résultat correspondant.

Validation des exigences

Résultat de simulation : []

Commentaire : []

Critère d'acceptation : []

Consulter, Importer, Validé, Annulé

Document sans nom - Microsoft Internet Explorer

Nbre de Répertoires:10 Nbre de Fichiers: 1 Taille de fichiers : 11.16 KB

Name	Derniere Modification	Taille
import_cas.php	20 Jan 2006 12:47:04	11.16 KB
metier10_Crash		
metier11_Thermal		
metier12_Stress		
metier13_Strain		
metier14_Deformation		
metier15_Frequency		
metier16_tadise.far		
metier1_MOTEUR_CASSE_B64		
metier8_Fatigue		
metier9_Ergonomique		

Document sans nom - Microsoft Internet Explorer

Précédent Nbre de Répertoires:1 Nbre de Fichiers:1

Name	Derniere Modification	Taille
projet19_BELLE_B64		

Document sans nom - Microsoft Internet Explorer

Précédent Nbre de Répertoires:5 Nbre de Fichiers:5

Name	Derniere Modification	Taille
exigence21_EX5		
exigence22_EX4		
exigence23_EX3		
exigence24_EX2		
exigence25_EX1		

Document sans nom - Microsoft Internet Explorer

Précédent Nbre de Répertoires:0 Nbre de Fichiers: 2 Taille de fichiers : 102.66 KB

Name	Derniere Modification	Taille
import_cas.php	11 Jun 2006 11:06:36	11.16 KB
Rapport d'analyse fatigue.doc	13 Feb 2006 08:52:06	91.50 KB

Importer

Validation des exigences

Résultat de simulation : []

Commentaire : []

Critère d'acceptation : []

Consulter, Importer

Les exigences en conflit - Microsoft Internet Explorer

Cas de simulation

Rapport d'analyse fatigue.doc

consulter

3.3 Accès à l'information et navigation

Deux accès à l'information ont été envisagés pour correspondre à deux situations d'usage différentes. Le premier type d'accès est une recherche par métier du calcul qui est possible par l'intermédiaire de la structuration de la base de données. Cette structure est associée aux cas de simulation enregistrés dans celle-ci.

La recherche par mots clés est essentiellement envisagée pour une utilisation prospective de la base de calcul mais qui n'est pas encore conceptualisée dans cette version du démonstrateur. Dans leur pratique quotidienne, comme le souligne Schön [SCH91], les concepteurs et les analystes raisonnent par rapport à leur expérience. Cette remarque est en complète adéquation avec les réalités faites par le diagnostic de plusieurs travaux de recherches. En effet, pour la plupart des problèmes rencontrés, il est suggéré d'aller voir ce qui s'est fait dans un autre projet. Lorsqu'une information sur un projet précédent par exemple est recherchée, les informations manipulées lors de la recherche sont le métier du calcul, le projet, l'outil de simulation utilisé et les résultats.

Un second mode d'accès que nous avons voulu le mettre en place, allant chercher par mots clés sur le but de simulation formulé. A partir de cette recherche le concepteur ou l'analyste peut naviguer vers les autres entités soit par l'intermédiaire des liens temporels en déroulant l'événementiel du calcul soit en utilisant les liens de dépendance. Cependant, les modes d'accès à l'information doivent être envisagés dans leur usage et il est sans doute intéressant d'observer les pratiques de futurs utilisateurs utilisant un réel prototype logiciel. Cette observation peut alors servir de support de réflexion pour trouver un mode d'accès à l'information adapté aux pratiques, sans doute en mixant les deux aspects (mots – clés et référence à un métier ou projet) mais aussi en employant des techniques de recherche d'informations sophistiquées (comme par exemple l'analyse sémantique pour des textes non structurés).

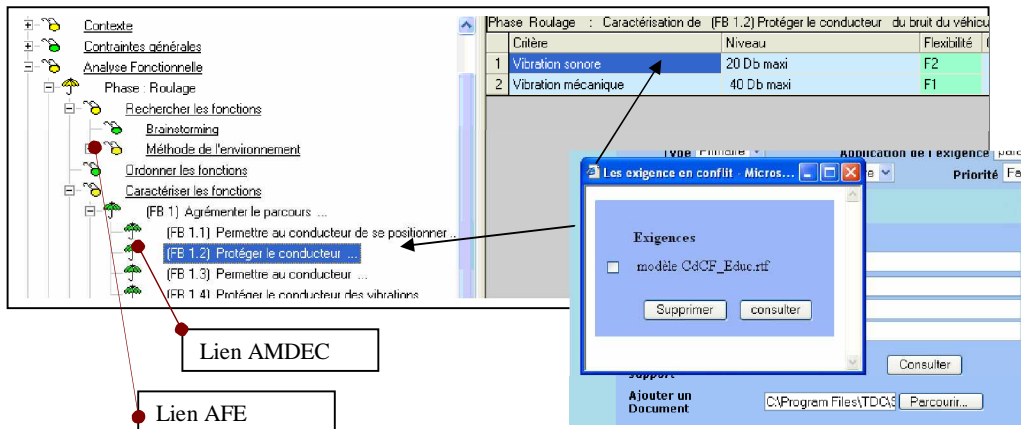
Cette maquette a servi pour illustrer les concepts mis en place dans ce travail de thèse mais a également permis d'atteindre un premier niveau de validation de ces concepts et d'ouvrir sur des perspectives. Des travaux ultérieurs peuvent alors être envisagés en termes de réflexion et de structuration mais aussi de développement d'un réel prototype informatique d'outil d'aide à l'utilisation du calcul mécanique en conception.

3.4 Le lien avec les outils d'aide au concepteur

L'Analyse Fonctionnelle, L'analyse des modes de défaillances (AMDEC) et le QFD sont des méthodes qui se veulent pluridisciplinaires et structurées. La pluridisciplinarité renvoie au fait qu'elles préconisent la constitution d'un groupe de concepteurs dans lequel sont représentés tous les métiers du cycle de vie du produit, nous avons déjà détaillé ces concepts dans le chapitre 4 de la partie II. La notion de structuration rappelle que les activités doivent être menées dans un ordre prescrit dans la méthode, de manière extérieure au

groupe pluridisciplinaire constitué. Mais le fait qu'il existe un groupe va introduire une dimension sociale à la conception. La complexité qui en découle ne peut se résumer à l'application d'une méthode rationnelle. Le processus effectif de conception va se construire dans l'action de conception. L'utilisation des outils informatique dans le cadre d'une conception intégrée permet de réduire cette complexité. De plus La prise en compte des problèmes de fabrication, de maintenance, de la qualité et du marché dès la conception permet de penser "conception intégrée" en demandant de repenser certaines méthodes de calcul de structures. Celui ci, avec l'introduction de la technologie dans les systèmes CAO, devenant une méthode de dimensionnement et non plus seulement de vérification. Il s'agit d'intégrer, en précisant dès la conception (c'est à dire au plus tôt), les contraintes des différents métiers pour que les outils CAO servent en synthèse et non plus dans une analyse a posteriori, en vérification. Cette option s'est heurtée à deux problèmes majeurs : tout d'abord la difficulté de formaliser les connaissances qu'utilise l'acteur de métier, et ensuite la décontextualisation de ces connaissances qui fait qu'elles ne sont plus opératoires pour l'action dans un autre contexte.

De cette acceptation de simple extraction de l'aval vers l'amont pour enrichir une base informatique de connaissances mise à la disposition du concepteur, nous avons proposer de faire le lien entre le support informationnel but de simulation et les outils d'aide aux concepteurs dans une perspective d'intégration dynamique, dans le cadre de groupes de conception, des acteurs et, à travers leurs contraintes, des métiers qu'ils représentent. Ce que Tichkiewitch [Tichkiewitch 95] traduit en expliquant que la notion de conception intégrée tend vers l'intégration du cycle de vie du produit pendant la phase de conception par l'intégration de l'ensemble des acteurs devant intervenir dans l'histoire de ce produit. Il s'agit d'intégrer les acteurs du cycle de vie du produit et de mettre à leur disposition les éléments qui sont nécessaires à leur réflexion, de leur permettre d'interagir pour décider de la solution la mieux adaptée (un mécanisme de coopération permettant la construction de compromis à partir des contradictions issues des objectifs propres de chaque acteur doit être étudié), de leur permettre d'agir sur la définition des exigences. Il ne s'agit plus seulement de formaliser, indépendamment du contexte, des connaissances que l'on rend disponible pour le concepteur, mais de créer un espace permettant la coopération des personnes possédant différents points de vue sur le produit, au moment de sa conception. Ceci nécessite l'utilisation de moyens informatiques comme support de cette intégration.



On peut considérer que les liens informationnels entre les attributs de l'exigence et les outils logiciels supportant les méthodes (AF, AMDEC et QFD) est un exemple de ce type d'intégration du support informatique. Ainsi nous avons pu justifier dans la description des attributs des exigences de ce chapitre le lien qui existe entre ses outils et notre support informationnel. Les liens de consultation proposés et le concept de validation des données permettent de garantir cette coopération. Consulter les champs d'attribution de l'exigence relatives au document support : Le concepteur est invité par le lien de consulter les documents qui concernent la description de l'exigence par exp (Cdcf, rapport AF, rapport AMDEC, rapport QFD).

4. Transfert du métier calcul du spécialiste vers le concepteur

L'intégration du calcul mécanique dans la conception de produits techniques se situe à la frontière entre deux mondes, au sens de Mer [MER98]. En d'autres termes, le calcul et la conception font intervenir des acteurs qui n'ont ni les mêmes modes de raisonnement ni les mêmes échelles de valeur. Pour permettre à ces acteurs d'intégrer le calcul à la conception, trois moyens sont possibles (relativement aux positions industrielles caractérisées de façon générique au chapitre 2). Faire concevoir un spécialiste du calcul, faire utiliser le calcul au concepteur pour qu'il l'utilise dans un contexte de conception, Coordonner le spécialiste du calcul et le concepteur. Le premier point semble difficile à mettre en oeuvre. En effet, pour pouvoir concevoir, le spécialiste du calcul doit alors acquérir de nombreuses connaissances relatives au produit et aux différents métiers qui interviennent dans la conception sans qu'il en ait a priori l'intérêt dans son monde du calcul, ce qui est déjà particulièrement difficile à maîtriser. Cependant, la seule possibilité qui reste est alors de l'affecter au projet de telle façon qu'il appartienne au monde de la conception. Mais il est alors un concepteur qui réalise des calculs si nécessaire et non plus un spécialiste du

calcul. Le problème est alors toujours le même ! Devant ces difficultés, le principe de faire concevoir un spécialiste du calcul ne sera donc plus envisagé.

Dans le second cas, il est nécessaire, comme il a déjà été souligné, de former le concepteur à la fois aux outils et méthodes de calcul utilisés. Il doit aussi acquérir une méthodologie d'utilisation du calcul dans un contexte de conception, pour qu'il puisse définir le problème à résoudre par le calcul de façon à effectuer les choix de modélisation en fonction du contexte de conception, mais aussi interpréter les résultats de façon à répondre au problème posé. La formation des concepteurs au métier calcul nécessite la formulation d'hypothèses relatives au mode de fonctionnement du « professionnel » du calcul qu'est le spécialiste du calcul. Selon ces hypothèses que nous avons pu définir le cadre de notre outils méthodologiques à mettre en place pour que le concepteur puisse devenir un « professionnel » du calcul.

Dans la perspective de formuler ces hypothèses relatives aux connaissances nécessaires à un « professionnel », il a fallu choisir un modèle du fonctionnement du « professionnel ». Schön, dans [SCH91], décrit comment les « professionnels » résolvent réellement leurs problèmes. Le terme « profession » (le « professionnel » appartenant à une profession) se rapproche du terme métier tel qu'il est utilisé dans ce manuscrit.

Or le processus de conception de produits techniques auquel nous nous intéressons est à la fois non déterministe, unique, incertain, instable et conflictuel. Schön [SCH91] propose alors un modèle de la pratique professionnelle, le modèle du praticien réflexif. Il note que la difficulté la plus importante à laquelle est confronté un professionnel est essentiellement la construction du problème, que le professionnel aborde toujours comme un cas unique. Pour construire le problème, le professionnel entame une démarche de réflexion sur son action et pendant son action. Cette réflexion, basée sur son expérience passée (répertoire de cas) est avantagée par la traçabilité des connaissances dans le support informationnel.

Si ce modèle est particulièrement adapté aux professions basées sur les sciences (comme par exemple le calcul mécanique), il présente quelques limites. Une de ces limites, la plus importante d'après Schön, est liée à la posture du professionnel dans sa réflexion. Il doit se positionner entre « proposer » et « disposer ». Pour cela, il doit être capable de se placer et se positionner aisément dans une situation conflictuelle qu'il crée lui - même. C'est cette facilité de positionnement qui caractérise la capacité à la réflexion dans et pendant l'action. On peut donc penser que cette hypothèse est raisonnable. Dès lors, le modèle du praticien réflexif semble bien adapté à la représentation de la pratique du spécialiste du calcul. En effet, leur propre description de leur pratique se rapproche très fortement du modèle de Schön.

Bilan

Bilan de notre contribution à la planification des buts de simulation numérique dans la conception de produits techniques

Cette partie a comme objectif de dresser un bilan de l'apport de ce travail de thèse par rapport à la problématique de la planification et la formulation d'un but de simulation et l'intégration du calcul mécanique dans la conception de produits dans une démarche d'ingénierie système. Pour ceci, nous nous appuyons sur les travaux sur l'ingénierie des exigences présentés dans ce manuscrit. Le travail s'inscrit alors dans l'amélioration des processus de conception, leur organisation et la réutilisation des connaissances techniques.

Supposant que l'amélioration des processus de conception passe par l'intégration (au sens défini au chapitre 2), nous nous sommes intéressés à favoriser l'intégration de la simulation numérique dans la conception de produits techniques en permettant de formaliser, et d'identifier des connaissances qui supportent la coopération entre le concepteur et l'analyste et ainsi qu'en proposant un support méthodologique à de nouvelles pratiques. Cette contribution présentée en détail dans la deuxième partie du manuscrit, peut être relue à la lumière des concepts qu'elle apporte. Pour ceci, nous allons distinguer trois types de concepts. Les concepts relatifs à l'identification des connaissances générées dans les premières phases de conception en prenant en compte l'évolution des démarches vers l'ingénierie système. Ensuite, les concepts qui supportent l'activité de coopération entre la simulation numérique et la conception qui sont présentées par les buts de simulation. Enfin, l'apport de ce travail en terme d'évolution des activités de calcul et de conception est souligné

1. Contribution à la formalisation du calcul mécanique

La simulation numérique met en oeuvre des choix de modélisation qui dépendent d'un certain nombre de facteurs (facteurs contextuels, géométriques, logiciels, etc.). Si le rôle important du coût de calcul et de la précision attendue est souligné dans la littérature, l'influence effective de ces paramètres sur les choix de modélisation n'est pas formalisée. De plus, l'ensemble du calcul n'est généralement décrit que pour identifier les différentes hypothèses effectuées lors de ce calcul. Dans le cadre de ce travail, une formalisation de l'influence des paramètres de coût et de précision sur les hypothèses méthodologique est proposée. L'identification des hypothèses est importante pour interpréter les résultats mais aussi pour garantir de réelles possibilités de réutilisation de la simulation. Cependant, elle n'est pas suffisante dès lors que l'on s'intéresse à l'utilisation du calcul mécanique en conception. La formalisation du calcul et du

processus de calcul ne doit plus s'effectuer uniquement dans la perspective d'identifier les hypothèses, mais doit aussi

- § fournir un guide à la réalisation d'un calcul correspondant au besoin de conception,
- § permettre la gestion des modèles de calcul dans un contexte de conception
- § caractérisé par une forte dynamique,
- § favoriser la coopération entre concepteurs et analystes,
- § permettre une traçabilité ouvrant sur une réutilisation des calculs au niveau de leurs modèles, de leurs démarches, des connaissances qu'ils génèrent...

Ces différents points sont relatifs aux objectifs de notre travail. Ce sont eux qui ont conduit à la formalisation de l'ensemble du processus de calcul à l'aide de la structuration proposée au chapitre 5 et précisée tout au long de la deuxième partie.

Dans un souci de synthèse nous allons donc tout d'abord reprendre les apports en terme de formalisation adressés par la structuration proposée, indépendamment du quelconque contexte d'utilisation du calcul. Ensuite, l'intérêt de cette formalisation pour la formation au calcul est souligné et quelques propositions sont formulées.

1.1 Le besoin pour une formalisation

Dans la perspective de maîtriser un calcul ou de pouvoir réutiliser certains éléments (modèles, résultat, démarche...), la formalisation des hypothèses effectuées tout au long du processus de calcul est un enjeu majeur. De plus, pour guider un non spécialiste dans la réalisation de choix judicieux d'hypothèses au bon moment du calcul, celles-ci doivent être identifiées. Ceci doit conduire à la réalisation d'un calcul répondant au mieux au besoin de la conception. La structuration proposée identifie alors, au travers des méthodes utilisées en conception, différents types de connaissances. En considérant que les hypothèses qui conduisent à la formulation du But de Simulation ne sont pas des hypothèses relatives au calcul. Cette constatation fait apparaître les hypothèses liées au mécanisme à mettre en place pour trouver la passerelle entre le calcul et la conception permettant de faire traverser la coopération des acteurs.

L'étude de la formalisation et de l'impact des buts de simulation ou hypothèses du comportement mécanique n'a pas suscité l'intérêt des chercheurs et rare sont les travaux qui abordent le problème. La principale cause semble être due au fait que leur impact sur le résultat est considéré comme négligeable. Cette remarque est généralement avérée lorsque le calcul est utilisé par un spécialiste maîtrisant facilement l'ensemble des hypothèses qu'il manipule. Par contre, elle est beaucoup moins transposable au cadre de l'utilisation du calcul par des concepteurs. Il est alors nécessaire de guider l'analyste non spécialiste dans la formalisation des hypothèses, d'indiquer les facteurs qui conduisent à leur formulation, et de connaître leur impact pour rendre possible l'interprétation des résultats de simulation.

Le chapitre 5 apporte donc une méthode de formalisation et d'organisation des buts de simulation dans le métier calcul par plusieurs niveaux de structuration. Cet apport est intéressant dans un contexte industriel de maîtrise des processus de calcul mais aussi pour la formation universitaire.

1.2 Formalisation des démarches

Lorsqu'il est demandé à un spécialiste du calcul ce qu'il réutilise le plus de ses anciens calculs, il répond sans hésiter que ce sont les démarches de calcul qui l'intéressent. Or ces démarches sont difficiles à transcrire dans une note de calcul et donc à capitaliser. Par ailleurs, la lecture de notes de calcul montre qu'il manque généralement des informations relatives au contexte et à l'intention du calcul pour pouvoir en réutiliser certains éléments.

Par le biais de la structuration et des liens proposés, le travail de thèse présenté dans ce manuscrit fournit un support à la formalisation des démarches et des intentions de la simulation numérique. Ces liens permettent d'enchaîner les données au sein d'un même métier et d'un même calcul, mais aussi au sein d'un processus de calcul donné. Ils représentent bien un mode de description de la démarche propre à une étude ou de l'ensemble des simulations réalisées.

1.3 Formalisation des connaissances

La croissance de la simulation numérique est quelques fois justifiée par un coût moindre par rapport aux essais et la simulation est alors envisagée comme une alternative économique aux essais. Comme il a déjà été souligné dans ce manuscrit, la simulation ne pourra jamais remplacer les essais. Par contre, la simulation donne accès à d'autres grandeurs (plus « microscopiques ») que les essais. Le calcul (ou simulation) peut donc être utilisé pour préparer ou comprendre des phénomènes mis en évidence par les essais. Les essais permettent quant à eux de mettre au point et de valider des modèles de simulation. Le positionnement relatif des essais et du calcul se joue donc plus au niveau de la complémentarité que de la concurrence. Cette complémentarité apparaît lorsque l'efficacité des calculs et des essais est jugée par rapport aux deux paramètres coût (comprenant le délai) et précision. La concurrence que le calcul fait aux essais ne semble donc pas être la cause profonde de la croissance du calcul. Nous plaçons plutôt les enjeux du calcul au niveau de la connaissance.

Le calcul est un moyen de générer et formaliser des connaissances. Ces connaissances peuvent être relatives à la conception (d'où l'importance d'intégrer le calcul à la conception de produits) pour maîtriser le comportement du produit conçu mais aussi pour progresser vers la formulation de guides ou règles de conception. Il en est de même pour la formulation de guides ou règles de simulation.

A l'heure actuelle, les analystes considèrent généralement que la connaissance qu'ils génèrent est donc basique. Ils ont alors tendance à cacher l'existence de ces calculs pour ne pas mettre en évidence une lacune tout juste comblée. Cette

situation rend la mise en oeuvre de ce concept relativement délicate et implique un changement de positionnement par rapport à ces calculs. Ce nécessaire changement de culture est général pour la mise en oeuvre de l'ensemble de la structure et nécessite un accompagnement en termes de suivi, de formation...

L'enjeu des connaissances apportées par la simulation numérique nous semble d'une grande importance. C'est la raison pour laquelle nous avons accordé une attention au statut attribué au calcul vis-à-vis des connaissances du cycle de vie produit tout au long de ce travail de thèse.

2. La méthodologie proposée: comme support de formation

Les connaissances enseignées aujourd'hui en calcul mécanique portent essentiellement sur les méthodes et outils de calcul. Qu'en est-il de la formation à l'utilisation du calcul qui va de la formulation du problème de calcul à la rédaction d'une conclusion pour répondre au besoin du concepteur ? Si la connaissance des méthodes et outils de calcul est nécessaire à la mise en oeuvre du calcul mécanique, elle ne s'avère généralement pas suffisante pour une utilisation du calcul qui répond au besoin de la conception.

Cette remarque est fortement intéressante pour positionner une structuration du processus de calcul et la formalisation d'une démarche pour la construction de l'objectif du calcul. Nous apportons ainsi une certaine contribution à la formalisation du métier de la simulation en proposant un modèle conceptuel de structuration du processus de calcul qui peut être utilisé comme support à la formation au calcul mécanique en considérant des aspects méthodologiques plus larges que ceux généralement abordés, de par la couverture de l'ensemble du processus de calcul. Ces aspects méthodologiques sont nécessaires au concepteur qui va réaliser des calculs dans un contexte de conception pour avoir un minimum d'autonomie, tout en étant encadré par un spécialiste du calcul.

De plus, du point de vue des formations universitaires, des formations d'ingénieurs et des formations industrielles, il est certainement intéressant de pouvoir fournir quelques outils méthodologiques globaux pour l'utilisation du calcul dans un contexte industriel.

3. Les connaissances d'interface et de coopération

De par l'évolution de la complexité des produits techniques, les concepteurs font de plus en plus appel au calcul pour les aider dans la maîtrise des produits. Comme nous l'avons déjà évoqué, le calcul leur donne accès à des grandeurs « microscopiques » telles que les contraintes, les déformations. Ces grandeurs leur permettent de comprendre plus précisément le comportement mécanique des produits qu'ils conçoivent. Le calcul est alors un moyen de mieux maîtriser le comportement du produit, alors que celui n'existe pas encore nécessairement. Le calcul apporte donc au monde de la conception des connaissances relatives au comportement d'un produit particulier. De plus le calcul est une source de connaissance pour le monde du calcul par l'intermédiaire des cas de simulation. L'établissement de nouveaux modèles passe par la compréhension de

comportements mal maîtrisés et constitue ensuite un support pour le monde de la conception.

Sous l'hypothèse que l'activité de conception est une activité sociale, l'intégration des connaissances entre différents mondes passe en partie par la coopération entre des représentants de ces deux mondes. Nous avons également souligné l'importance de mettre en place des dispositifs nécessaires au support de cette coopération. Ce travail de thèse fournit donc un support en terme de coopération pour la définition du besoin d'une part et pour assurer le retour sur la conception d'autre part.

En d'autres termes, la coopération entre le concepteur et l'analyste est envisagée selon deux directions non indépendantes en terme d'objectifs. Il s'agit d'une part que le concepteur exprime son besoin de telle façon que l'analyste puisse s'en saisir et d'autre part que l'analyste conclut sur son calcul de telle façon que le concepteur puisse s'approprier cette conclusion.

Ce mode de coopération est schématisé à la figure 66 qui reprend, dans la « zone de coopération » la dichotomie en deux objectifs et en deux étapes du dispositif de coopération mis en place dans ce travail.

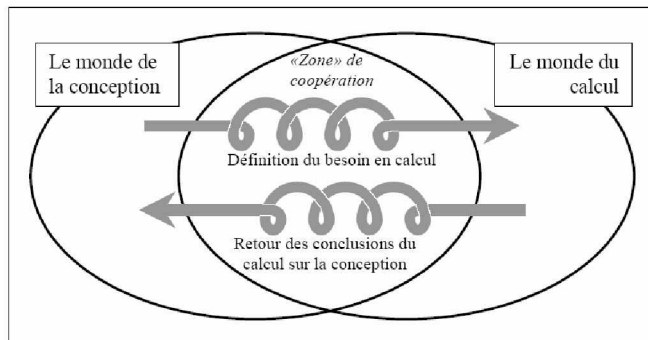


Figure 66 : La coopération, un dispositif et deux objectifs

La structuration du But de Simulation a été réalisée de façon à donner prise à la fois au concepteur et à l'analyste. Il permet donc de discuter les objectifs à atteindre et le contexte d'utilisation dans des termes accessibles aux deux mondes en présence. La formulation du résultat de simulation affirme dans une première étape l'acceptation ou le refus de la démarche et/ou des hypothèses de calcul et par la suite la validation ou l'infirmité vis-à-vis des fonctionnalités à remplir par le calcul ce qui permet d'assurer un minimum de retour relativement au besoin du concepteur.

La première étape consiste en une réflexion de l'analyste sur son calcul et à un jugement par rapport à son échelle de valeur du monde du calcul (au sens de Mer [MER98]). La deuxième étape ne peut être menée qu'en discussion entre l'analyste et le concepteur car elle est construite relativement à l'échelle de valeur du concepteur (qui diffère de celle de l'analyste) en tenant compte du

jugement fait par l'analyste sur la validité de son calcul en terme de modélisation (ce qui correspond à la première étape).

Dans la discussion du mécanisme de traduction des exigences et la formulation d'un but de simulation, nous avons pu introduire des notions d'interfaces nécessaires à la construction du dispositif de coopération. Elles se situent à la frontière entre les deux mondes qui discutent et sont nommées connaissances d'interface. Ces connaissances d'interface contribuent à l'intégration des métiers dans la conception. Ce sont des connaissances qui émergent de la coopération entre différents mondes, apparaissent de façon évanescence et font évoluer les connaissances propres à chaque monde. C'est essentiellement dans leur dynamique de création et d'usage qu'elles sont intéressantes. La méthodologie proposée supporte cette intégration et offre un dispositif de coopération sur lesquels les différents intervenants doivent avoir des prises. En d'autres termes, il est nécessaire que les acteurs puissent se saisir des entités de coopération et en faire un usage précis, compréhensible pour les autres intervenants. Chaque intervenant apprend alors des autres par l'intermédiaire de leurs actions sur ces entités de coopération. Comme le proposent Hatchuel dans [HAT94], on peut alors parler d'apprentissages croisés. Dès lors, les connaissances caractérisant chaque métier peuvent être modifiées par celles acquises dans la coopération. De cette façon, une intégration des connaissances est rendue possible moyennant que l'organisation et la définition des entités de coopération doivent être ouvertes et souples.

Conclusion générale

Il faut bien constater que le recours à la simulation numérique n'est pas aussi systématique qu'il pourrait l'être et que les outils disponibles ne sont pas utilisés à leur plein rendement. La pression sur les délais ("time to market") contribue à un changement progressif de cet état de fait. La simulation doit être fonctionnelle et donc apte à suivre les évolutions des fonctions du produit. On peut ainsi avoir une trace à forte valeur ajoutée utilisable pour des remises en cause ou des évolutions des fonctions. Cette approche exige un formalisme capable d'identifier et de capturer les informations du processus de conception dans un objectif de réutilisation des modèles par la génération des cas de simulation et enfin de réduire les délais de développement.

On identifie généralement que le développement de bonnes exigences est essentiel à la conception de produits de qualité qui prennent en compte tous les contraintes de son cycle de vie. Cependant, comment garantir que toutes les exigences issues du suivi du cycle de vie du produit ont été validées et testées ?

La solution passe nécessairement par l'identification du besoin réel des utilisateurs et par l'utilisation de méthodes spécifiques pour la formulation des bonnes exigences. Finalement, nous remarquons que beaucoup d'organismes utilisent des techniques tout à fait simples de l'ingénierie des exigences bien que des méthodes plus avancées et des outils soient disponibles. Nous confirmons d'après ce travail que les exigences forment une ligne de base pour le développement du produit et de la fonction calcul. Ainsi, l'approche proposée offre un support pour assurer la conformité d'un système aux exigences formulées et permet de prendre en compte au plus tôt les contraintes des uns et des autres et d'éviter les blocages, les arbitrages a posteriori et les allers-retours.

Améliorer la productivité des acteurs impliqués dans l'activité de simulation numérique, par la mise à disposition des connaissances dont ils ont besoin pour réaliser leurs tâches. Cela nécessite d'une part de savoir transcrire l'information pour la rendre accessible à tous, et d'autre part de savoir gérer le flot important d'informations qui en résulte. Les informations relatives à toutes les phases du cycle de vie dépassent largement la seule représentation géométrique et les paramètres du processus de fabrication et passent nécessairement par l'identification des exigences du produit.

Notre proposition méthodologique s'insère dans les récents travaux de recherche qui se concentrent sur l'élargissement des systèmes de management des données produit, dans lesquels on retrouve les SIP1. Le support informationnel conceptualiser comme outil de planification des buts de simulation, permet le partage et le contrôle des flux des données relatives au processus de simulation ainsi le partage et la documentation des processus de travail, l'assurance de la mise à jour des modifications des données, et la garantie de la non redondance des informations. Il permet ainsi d'accroître les possibilités de coopération par la communication, le management, la compréhension et la maîtrise des informations relatives aux exigences produit.

Cette proposition, qui prend en compte les données spécifiques aux métiers, données complémentaires aux données du produit et parmi lesquelles les données de simulation numérique se situent, présente un potentiel avantageux d'intégration dans les équipes de conception. Les systèmes de management des données produit sont aujourd'hui très répandus au sein des organisations des entreprises et bien que l'intégration des données de conception ait largement progressé, ces systèmes sont actuellement limités aux seuls processus et informations relatives au produit et de par les avantages qu'ils proposent pour la gestion de l'ensemble des données relatives aux produits, ils ne peuvent aujourd'hui prendre en compte les données spécifiques aux métiers.

Un grand avantage qu'offre aussi cette proposition se résume, dans la conséquence est la délocalisation d'un savoir-faire qui n'est pas dans le cœur de métier vers les partenaires PME sous-traitantes, ce qui entraîne une nouvelle typologie de contrats entre PME et Grands Groupes. Les échanges de type maître esclave laissent place à l'intelligence répartie d'une ingénierie collaborative autour des fonctions du produit à mettre sur le marché au meilleur du triptyque coûts/qualité/délais par la maîtrise de la fonction calcul en conception. Il faut également ajouter les phénomènes de mobilité importante des acteurs de la simulation numérique au sein des organisations industrielles, la tendance croissante des entreprises à externaliser leurs activités de simulation numérique, à travers une délocalisation partielle de certains services, une utilisation de prestataires de services ou une mise en sous-traitance de tout ou partie des activités.

L'étude et les concepts présentés précédemment portent sur la conception d'éléments de structure. Toutefois, la méthode semble présenter un intérêt majeur dans le cas de conception de systèmes complexes, incluant matériels et logiciels de pilotage et de contrôle, pour lesquels la maîtrise des exigences est une tâche ardue (Ariane, 1996). Les approches basées sur les activités, comme l'ingénierie système par exemple, doivent être couplées à des approches basées sur les « expertises métiers » afin de bâtir des systèmes de coordination de l'ingénierie. La coordination entre les phases d'extraction des exigences et de conception par exemple est bien présentée par l'IS. Ce constat ouvre des perspectives pour valider la méthodologie proposée sur un système dans une démarche d'IS.

Les ingénieries de chaque système des arborescences de développement du produit ou du système de production peuvent être décrite par la réalisation itérative des deux activités techniques majeures de l'IS : la spécification (analyse du besoin et des exigences) et la conception.

Finalement il faut signaler que les descriptions sur les relations entre l'IS et les méthodes de conception existantes sont rares. Par ailleurs, nos travaux fournissent – à travers le point de vue de l'intégration méthodologique – un état des correspondances entre l'IS et les autres méthodes de conception traditionnelles.

Perspectives de recherches

Les perspectives de cette recherche sont nombreuses. Elles portent à la fois sur le renforcement des concepts et l'amélioration du caractère opérationnel de la méthode.

Au niveau des concepts :

La prise en compte des combinaisons de exigences et des modélisations de la structure du calcul dans la simulation est montrée seulement la transposition de la méthode pour l'étude d'un système complet doit être vérifié et prévoit à faire l'objet d'une validation de la méthodologie dans le concept évoqué.

Le lien avec les travaux sur la gestion des connaissances entreprise et des liens sur les méthodes d'innovations.

Au niveau de l'opérationnalité de la méthode :

La validation de la méthode sur un plus grand nombre de projets, dans des contextes variés, est une nécessité évidente. Ce travail va être réalisé dans le cadre de la formation des ingénieurs concepteurs de l'école d'ingénieurs de l'ENIS. Il est également nécessaire d'enrichir la base des buts de simulation et des rapports générés par le calcul pour comprendre les mécanismes de capitalisation à fournir aux utilisateurs de la méthode. L'informatisation de la méthode est une voie importante pour en rendre son utilisation plus efficace. Un objectif possible serait de disposer de bases de connaissances associées à un système expert. Le tout permettrait de simuler les modèles (scénarios), et les dysfonctionnements. Cet outil informatique permettrait enfin de former des concepteurs et des analystes en simulant des déroulements des projets de simulation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AFITEP 99], l'AFITEP (Association Francophone de Management de Projet) l'AFITEP Quinio B., Tournan L., Miny M., Vezie R., Marciniac C « *Un triple regard sur la risque d'un projet de Système d'Information* » Commission Informatique de.1999: La cible Vol 80 et 81.
- [AIDI 03], M.AIDI, M. Tollenaere, H. Ben Bacha, F. Pourroy A. Maalej : « *La gestion coopérative des exigences du cycle de vie produit par la simulation en conception* » Revue internationale de la CFAO et d'Informatique Graphique « de l'échange des données techniques au PLM » Volume 18 – n°4 / 2003, pages 1 à 16.
- [AIDI 02], Aidi, M. Tollenaere, M. Pourroy, "Towards a numerical simulation scheduling in an engineering system approach" International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE "Bridging the Digital Divide for Cyber-development, Human Progress, Understanding and Prosperity" October 6-9, 2002, Hammamet – Tunisia
- [Alexander 03], Alexander, Ian, *Requirements and Testing: Two Sides of the Same Coin*, IEEE Joint International, 2003
- [Alexander, a 102], Alexander, Ian and Richard Stevens, *Writing Better Requirements*, Addison-Wesley, 2002
- [Anderl & al. 02], Anderl R., Kleiner S. et Krastel M. — *Product Data Management in Simulation and Calculation*, Product Data Journal, n°1, pp. 37-41, 2002.
- [Baizet 04], Baizet Y., *La Gestion des Connaissances en Conception Application à la simulation numérique chez Renault – DIEC : Thèse de doctorat de Mécanique de l'université Joseph Fourier de Grenoble*, 2004.
- [Barbeau 98], Barbeau.S. :the M-51 project on the design of the electrical ground segments and development of various missile digital mock-ups. the SEDRES project (data model development, the ISO AP-233 SE working group).
- [Ben Amara & al. 97], Ben Amara A., Deneux D., Soënen R. et Dogui A. — *CAD / Analysis Integration*, chapitre 1 dans [Chedmail & al. 97], pp. 31-40, 1997.
- [BLA98], Blanco E., « *L'émergence du produit dans la conception distribuée : vers de nouveaux modes de rationalisation dans la conception de systèmes mécaniques* », Doctorat de Génie Industriel de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 15 décembre, 1998.
- [Blanco 96] Blanco E, Jeantet A, Boujut J.F : COPSET de la construction à l'usage et vice versa, revue des sciences et techniques de la conception, Vol 5, n°2, 93 – 118 (1996)....
- [Bocquet 99], J.-C. Bocquet, B. Duffau.- La gestion du changement : de la gestion de production à la gestion de conception. L'art du management. 1997, pp. 626-631, V. Mondiale
- [BOU96], Boujut J.F., Laureillard P., Jeantet A., « *Rethinking CAD Tools Trough their Use ?* », Actes de IDMM'96, Nantes, France, pp. 643-652, 15-17 avril, 1996.
- [Britton 01], Britton, J.H, Candy, L and Edmonds, E.a, *A Method for Sharing information for Quality Measurement in Multi-site Team Developpm*, Proceedings Software Quality Measurement 2001, April Loughborough University, UK (To appear).
- [Britton 98], Britton, J.H, Candy, L and Edmonds, E.A (1998), *Software Support for Usability Measurement, And application to systems Engineering Data Exchange Development*

Proceedings of HCI'98, People and Computers XIII. H.Johnson, L.NIGAY, C Roast (eds).Springer-Verlag Berlin, 1998,pp 37-52.

[**BRO96**], Brown D.C., « *Routineness revisited in mechanical design theory and methodology* », Waldron & Waldron ed. Springer, pp. 195-208, 1996.

[**Buckley 93**], Buckley F. J., *Implementing configuration management*, IEEE Computer Society press, 1993. Les activités de gestion de configuration système en relation avec le standard MIL-STD 973.

[**Cattan 04**], Michel Cattan, *Maîtriser le processus de conception*, livre édition AFNOR.

[**CHA98**], Chang K.H., Choi K.K., Wang J., Tsai C.S., Hardee E., « *A multilevel product model for simulation-based design of mechanical systems* », *Concurrent Engineering : Research and Applications*, Technomic Publishing, vol.6, n°2, pp.131-143, juin, 1998.

[**CHANCHEVIER 93**] CHANCHEVIER (M.). – L'ingénierie simultanée, un nouveau mode de management de projets. Conférence AFITEP, 4 et 5 nov. 1993, Paris.

[**Chuen-lung 92**], C. Chuen-lung, Stanley F. Bullington.- *Development of a strategic plan for an academic department through the use of QFD Computers & industrial engineering*, 1993. 25, 1-4, pp.49-52

[**CON96**], Constant D., « *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques* », Doctorat de l'Université Joseph Fourier, 3 octobre, 1996.

[**Dardy et al 93**], Dardy F.- Teixido C. (1993) Congrès francophone du management de projet (2001) : « *Innovation, conception...et projets* », 6 et 7 novembre 2001, Edition EFITEP: « *La compétitivité industrielle, 1. Démarche de conception* », 1993 Paris, Edition Foucher

[**Djea 98 & al**], Djeapragache, V. Aumont, A. Laville, T. Beaujon.- *Une plateforme destinée à concevoir pour bien fabriquer et capitaliser le savoir-faire*. Consortium PIRAMID. MICAD-1998

[**LE COZ**], E. LE COZ , Techniques de l'ingénieur AG 1 771.

[**Eckard 00**], Eckard C. — *Advantages and Disadvantages of FEM Analysis in an early state of the Design Process*, Proceedings of the 2nd Worldwide Automotive Conference, MSC.Software Corporation, Dearborn, Michigan, USA, 2000.

[**Edmonds 01**], Edmonds, (Edmonds 01) E.a, *A Method for Sharing information for Quality Measurement in Multi-site Team Developpm*, Proceedings Software Quality Measurement 2001, April Loughborough University, UK (To appear).

[**EIA632 -98**] : EIA632, "*Processes for Engineering a System*", in *ANSI/EIA-632-1998*. 1998, EIA.

[**Eversheim 97**], W. Eversheim, W. Bochtler, R. Gräbler, W. Kölscheid.- Simultaneous management for concurrent engineering, *European Journal of Operational Research*. 1997. Vol. 100, pp. 327-337

[**EYN99**], Eynard B., « *Modélisation du produit et des activités de conception, contribution à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie* », Doctorat de Productique l'Université de Bordeaux, 30 juin,1999.

[**Fine & al. 00**], Fine L., Remondini L. et Léon J.C. — *Automated generation of FEA*

[**FOU 97**] Fouet J.M., « *Connaissance et savoir-faire en entreprise, intégration et capitalisation* », Editions Hermes, Paris, 1997.

- [**Fouré 96**], C. Fouré, J. Bernard-Bouissières.- Orchestrer les appuis méthodologiques dans un projet. *Travail et Méthodes*, 1996. Vol. 529, pp. 23-29.
- [**Grady 97**], Grady J., *System Validation and Verification*, CRC Press, 1997. *Une approche globale des processus de Vérification et validation des systèmes*.
- [**Han & al. 02**], Han S., Choi Y., Yoo S. et Park N. — *Collaborative Engineering Design Based on an Intelligent STEP Database*, *Concurrent Engineering : Research and Application*, vol. 10, n°3, pp. 239-249,
- [**HAR97**], Harani Y., « *Une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception* », Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 19 novembre, 1997.
- [**Haris 99**], Harris, D. & Candy L, Evaluation in the SEDRES Project: *Measuring the Effectiveness of Model Data Exchange between Systems Engineering Tools*, in *Proceedings of the 9th Annual International Symposium of INCOSE*, INCOSE, pp 59-67, 1999.
- [**Harwell & al. 93**], Harwell R , Aslaksen E , Hooks I , Mengot R , Ptack K « *What Is A Requirement?* » Published in the Proceedings of the Third International Symposium of the NCOSE, 1993. Prepared by the Requirements Working Group of the International Council on Systems Engineering,
- [**HAT & Weil O2**], Hatchuel, Armand, and Weil, Benoit. (2002) “*La théorie C-K : fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception.*” Colloque sciences de la conception, Lyon, 15-16 mars 2002.
- [**Herzog 00**], Herzog, E. and Trne, A. *Support for Exchange of Functional Behaviour Specifications in AP-233. Proceedings 7th IEEE International Conference on the Engineering of Computer Based Systems*. Pages 351–358, IEEE Computer Society Press, 2000.
- [**IEEE1220 - 02**], :IEEE1220, “*IEEE Trial-Use Standard for Application and Management of the System*.”
- [**Ifaoui & al. 02**], Ifaoui N., Deneux D., Ben Amara A., Soënen R. et Dogui A. — *Intégration CAO / Analyse autour d'un modèle générique du processus de calcul mécanique*, 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont-Ferrand, 2002.
- [**INCOSE 04**], INCOSE SE Handbook Working Group, *System Engineering Handbook, A « How To » Guide For All Engineers, July 2004. les méthodes, techniques, outils des activités de l'IS, fondée, pour cette deuxième version, sur les processus de la norme EAI 632.*
- [**ING87**], Ingrand F., « *Inférence de formes à partir des fonctions ; application à la conception de montage d'usinage* », Thèse de 3ième cycle de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, février, 1987.
- [**ISO15288 -00**], ISO15288, “*Life Cycle Management & System Life Cycle Processes*”, in *ISO 15288 CD2*, Canada, Editor.2000, ISO/IEC.
- [**JEA98**], [Jeantet A., Boujut J.F., « *Approche socio – technique* », chapitre 5 dans [TOL98],
- [**Johnson a 00**], Johnson, JFE, (). et al., *The Maturing Systems Engineering Data Exchange Standard AP233 & Your Role*, Accepted for publication at the INCOSE 2000 symposium, 2000.
- [**Johnson a 98**], Johnson, J. (). *The SEDRES Project: Producing a Data Exchange Standard Supporting Integrated Systems Engineering*. INCOSE 1998.

[Klaas & Shephard 01], Klaas O. et Shephard M.S. — *Embedding Reliable Numerical Analysis Capabilities into an Enterprise-Wide Information System*, Engineering with Computers, vol. 17, pp. 151-161, 2001.

[Krastel & Merkt 02] Krastel M. et Merkt T. — *Integration of Simulation and Calculation in a PDM Environment*, Product Data Journal, n°2, pp. 7-9, 2002.

[KUR95], Kurowski P.M., « *When good engineers deliver bad FEA* », Machine Design, Edited by Paul Dvorak, november, 1995.

[Kurowski & Szabo 97], Kurowski P.M. et Szabo B.A. — *How to find errors in finite-element models*, Machine Design, Edition Dvorak P., 1997.

[Lang & al 00], Michael Lang et Jim Duggan, National University of Ireland, "A tool to support collaborative software requirements management" publié dans la revue Requirements Engineering (2001) 6:161–172 _ 2001 Springer-Verlag London Limited;

[LAT77], Latombe J.C., « *Une application de l'intelligence artificielle à la conception assistée par ordinateur : le système TROPIC* », Thèse d'état, Grenoble, 1977.

[Lardeur 03], Lardeur E., Bocquet J.-C., and A. C., *Systems Engineering used in Products and Manufacturing Systemsdevelopment : case of Automotive Industry*, in *Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, G. GOGU, P. CHEDMAIL and P. RAY, Editor. 2003, KLUWER Academic Publishers.

[LAT77], Latombe J.C., « *Une application de l'intelligence artificielle à la conception assistée par ordinateur : le système TROPIC* », Thèse d'état, Grenoble, 1977.

[LAU97], Laureillard P., Boujut J.F., Jeantet A., « *Conception Intégrée et entités de Coopération* », Actes de 01DESIGN'97, Thémoule-sur-mer, Org. Tuffan Orel, Brigitte Trousse, 1997.

[Laval 00], Catherine LAVAL : *Traçabilité des exigences ou traçabilité des logiques de conception et de maîtrise des risques ?*, Journée AFAV 2000, Maîtriser la dynamique d'expression des exigences.

[Lefebvre 97], D. Lefebvre.- *Expérience industrielle dans l'association du QFD, de l'analyse fonctionnelle et de l'analyse de la valeur*. La valeur, 1997, Vol. 73, pp. 2-7 ;

[Lemaire & al 00], Lemaire M. et Mohamed A. - *Finite Element and reliability : a happy marriage ?*, In *9th IFIP WG 7.5 Working Conference, Reliability and optimization of structural systems*, Ann Arbor, Michigan, USA, September 25-27, 2000.

[Lemaire 02], Lemaire M. - *Dimensionnement mécanique en contexte incertain*, Journée AIP-PRIMECA, Méthodes non déterministes en conception intégrée, ENS-Cachan, 31 janvier, 2002.

[Lemoine et al, 01], Lemoine M, Foisseau J, *Gestion des exigences pour la maîtrise de la pérennité* - 2ème Conférence Annuelle d'Ingénierie Système, Toulouse 26-28 juin 2001 ;

[Macias & al. 00], Macias M., De Souza M., Jackson T. et Paydarfar S. — *Integrated Analysis Architecture for Concurrent Engineering and the Digital Enterprise*, Proceedings of the 2nd Worldwide Automotive Conference, MSC.Software Corporation, Dearborn, Michigan, USA,

[MAR95], Marin P., Tichkiewitch S., « *A step in the development of FORGEROND, a fast stamping simulation tool* », Materials and Processing Technologies'95, Dublin, vol. 2, pp. 848-856, 8-12 août, 1995.

[**Martin 97**], C. Martin.- Elaboration de méthodes et d'outils d'aide à la gestion du processus de conception intégrée. Premier rapport bibliographique. CER 98-07. 1998. Ecole Centrale Paris. Laboratoire Productique-Logistique ;

[**Martin 98**], C. Martin, Jean-Claude Bocquet - « *Conception Intégrée. Interopérativité des méthodes AF, QFD, AMDEC dans le cadre du projet PIRAMID* ». colloque National PRIMECA 99 ;

[**ME217 98**], ME217 Course Reader (1998). Stanford University, Palo Alto, CA.

[**Mellon 00**], Carnegie Mellon, *CMMI Model Components, derived from CMMI-SE/SW*, V1.0, by CMMI Product Development Team, August 2000, , Software Engineering Institute.

[**Mer 98**], Mer S. — *Les mondes et les outils de la conception. Pour une approche socio-technique de la conception du produit*, Thèse de doctorat de Génie Industriel de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.

[**MID93**], Midler C., « *L'auto qui n'existait pas* », Inter., Paris, 1993.

[**MOI 92**], Moisdon J.C., Weil B., « *L'invention d'une voiture : un exercice de relations sociales ?* », Gérer et comprendre, Annales des Mines, septembre-décembre, 1992.

[**MON87**], Montalban M., Haren P., Delcambre B., « *Systèmes experts de conception fondés sur les spécifications* », Septièmes journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, Avignon, 1987.

[**Morley 98**], Morley C. (1998) : « *Une grille d'analyse des projets système d'information : proposition de critiques et validation* », Système d'information et Management n° 3 Vol 3, pp.49- 78 ;

[**NAVARRÉ 92**], NAVARRÉ (C.). – Améliorer votre réactivité grâce au concurrent engineering. Conférence IIR, 1992.

[**O'bara & al. 02**], O'Bara R.M., Beall M.W. et Shephard M.S.. *Attribute Management System for Engineering Analysis*, Engineering with Computers, vol. 18, pp. 339-351, 2002.

[**OIN 99**], Organisation internationale de normalisation (1999) : « *Processus de conception centré sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs* », Editeur : Genève Organisation internationale de normalisation.

[**Oosterman 01**], Oosterman B. "*Improving Product Development Projects by Matching Product Architecture and Organization*". 2001, Rijksuniversiteit Groningen: Groningen.p. 144.

[**Perrin 01**], Perrin J. (2001) : « *Concevoir l'innovation industrielle : méthodologie de conception de l'innovation* », 2001 Paris, Edition CNRS ;

[**Petit 90**], Petit Demeage (C.). – La maîtrise de la valeur, la gestion de projet et l'ingénierie simultanée. AFNOR Gestion, 1990.

[**Planchette 02**], Planchette G., Nicolet J.-L., Valancogne J, *Si les risques m'étaient comptés !*, Octares Edition, 2002 *La maîtrise des risques systèmes avec l'expérience de la RATP*.

[**Pradip K et al., 96**], Pradip Kar Characteristics of Good Requirements Presented at the 1996 INCOSE Symposium. Prepared by the Requirements Working Group of the International Council on Systems Engineering;

[**PRANDTL 52**], Ludwig PRANDTL- The essentials of Fluid Dynamics Blackie pub., 1952;

[Prudhomme & al. 01], Prudhomme G., Boujut J.F. et Pourroy F. — *Activités de conception et instrumentation de la dynamique des connaissances locales*, Ingénierie des Connaissances, Plate-forme AFIA, Presses Universitaires de Grenoble, pp. 41-60, 2001.

[Prudhomme 01], Guy Prudhomme, Peggy Zwolinski :*Analyse Fonctionnelle et Conception Intégrée* , PRIMECA 2001.

[Pugh 1981], Pugh, S. (1981) “*Concept Selection – A Method that Works*,” Proceedings of the International Conference on Engineering Design.

[Rao & al. 98] Rao S.S., Chen L. et Mulkay E. — *Unified Finite Element Method for Engineering Systems with Hybrid Uncertainties*, AIAA Journal, vol. 36, n°7, pp. 1291-1299,1998.

[Robertson 03], Robertson J, Robertson S «*volere Requirements Specification Template* » Edition 9 Principals of the Atlantic Systems Guild London, 2003- Aachen & New York;

[SED 00], SEDRES-2, Project Technical annex, 20/10/99, SEDRES consortium.(The SEDRES-1 and SEDRES-2 projects are funded Southampton in the UK and at NASA/MSFC in the US. In BAE SYSTEMS since 1987 in technical & management roles, most recently as Product Data Management Technologist, he is the SEDRES Technical Manager.

[SEL98], Sellgren U., Drogou R., « *Behavior modeling in mechanical engineering – a modular approach* », Engineering with Computers, Springer – Verlag, London, vol. 14, pp.185-196, 1998.

[Shephard & al. 90], Shephard M.S., Korngold E.V. et Wentorf R. — *Design systems supporting engineering idealizations*, Geometric Modeling for Product Engineering, M.J Wozny, J.U. Turner and Preiss Editors, Elseviers Science Publishers B.V., North Holland, 1990.

[Shi & al. 02], Shi X., Chen J., Yang H., Peng Y. et Ruan X. — *A novel Approach to Extract Knowledge from Simulation Results*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 20, n°5, pp. 390-396,

[Simon 81], Simon H.A., *The Science of the Artificial*, ed. M. Press. 1981, Cambridge, USA, MA.

[SUBE 00 & al], R. Maria-Sube, B. Mercier « *La Modélisation et la Simulation pour le Développement d'un Produit Industriel* » Journée d'étude SIA-AFM -1-La Simulation, outil de Maîtrise des risques du Développement Paris, 30 novembre 2000 ;

[SZA96], Szabo B.A., «*The problem of model selection in numerical simulation* », Advances in Computational Methods for Simulation, B.H.V. Topping Editor, Civil-Comp Press, Edinburgh, pp. 9-16, 1996.

[Tichkiewitch 94], Tichkiewitch S., « *De la C.F.A.O. à la Conception Intégrée* », Revue Internationale de C.F.A.O. et d'Infographie, vol. 9, pp. 609-621, 1994.

[Tichkiewitch 00], Tichkiewitch S. and Brissaud D. « *Co-Ordination Between Product and Process Definitions in a Concurrent Engineering Environment* », in The 50th General Assembly of CIRP. 2000;

[TIMO 54], S. TIMOSHENKO - Résistance des Matériaux 1 ère & 2 ème partie, Ch. Béranger, 1953 & - Théorie des Vibrations, Ch. Béranger, 1954 ;

[TOL98], Tollenaere M. et al., « *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils* », Hermes, Paris, 1998.

[Troussier 98], TROUSSIER N., POURROY F., TOLLENAERE M., TREBUCQ B., *Mechanical models management in engineering design*, Actes de IDMME'98, Compiègne, France, pp. 1087-1094, 27-29 mai, 1998.

[**Troussier 99**] Troussier N. — *Contribution à l'intégration du calcul mécanique dans la conception de produits techniques* : proposition méthodologique pour l'utilisation et la réutilisation, Thèse de doctorat de Mécanique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.

[**TUR96**], Turkiyyah G.M., Fenves S.J., « *Knowledge-based assistance for finite-element modeling* », Artificial Intelligence in Civil and Structural Engineering, IEEE Expert, pp. 23- 32, juin, 1996.

[**VAR95**], Vargas C., « *Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques* », Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 1995.

[**VIN97**], Vinck D., « *La connaissance : ses objets et ses institutions* », chapitre 3 dans [FOU97], 1997.

[**White 98**], Preston White K. Jr., *Systems Design Engineering*. The Journal of The International Council on Systems Engineering, 1998. 1-4: p. 285-302.

ANNEXE 1

Fiche descriptive de Calcul EF

titre :

XXXXXX

Auteur(s) :

XXXXXX

Numéro d'identification :

XXXXXX

Dates de publication de la fiche, modifications comprises :

date et nature de la dernière modif : XXXXXX

XXXXXX

date et nature de la modif 2 : XXXXXX

XXXXXX

date et nature de la modif 1 : XXXXXX

XXXXXX

date de création : XXXXXX

Liste des fiches antérieures par ordre de création :

XXXXXX

XXXXXX

Chacune des fiches listée ici doit être référencée dans la fiche : cette référence apparaît en particulier lorsque l'on décide de ne pas remplir une rubrique déjà remplie dans une fiche existant déjà. Dans ce cas il suffit de mettre dans la rubrique voir fiche zzz où zzz désigne le numéro d'identification de la fiche.

Description succincte du problème traité :

XXXXXX

XXXXXX

Objet matériel à modéliser (le cas échéant si il existe) :

XXXXXX

XXXXXX

Modèle géométrique de conception de l'objet à modéliser :

XXXXXX

XXXXXX

nom du fichier de construction automatique (si existe et si disponible) et lieu d'archivage

XXXXXX

But de simulation :

XXXXXX

Modèle mécanique ou physique retenu

généralités :

XXXXXX

XXXXXX

por chacune des parties (y compris les liaisons) :

description :

XXXXXX

XXXXXX

justification :

XXXXXX

critique éventuelle :

XXXXXX

Modèle géométrique associé au modèle mécanique ou physique :

généralités :

XXXXXX

pour chacune des parties (y compris les liaisons) :

description :

XXXXXX

nom du fichier de construction automatique (si disponible) et lieu d'archivage :

XXXXXX

justification :

XXXXXX

critique éventuelle :

XXXXXX

Modèle de simulation éléments finis :

généralités :

XXXXXX

XXXXXX

pour chacune des parties (y compris les liaisons) :

description :

XXXXXX

XXXXXX

nom du fichier de construction automatique (si disponible) et lieu d'archivage :

XXXXXX

XXXXXX

nom du fichier de données : (.bdf ou .dat de MSC/NASTRAN)

XXXXXX

XXXXXX

justification :

XXXXXX

XXXXXX

critique éventuelle :

XXXXXX

XXXXXX

Résultats de la simulation éléments finis :

généralités et synthèse :

XXXXXX

XXXXXX

points importants pour l'analyse critique des résultats :

XXXXXX

XXXXXX

synthèse des résultats en liaison avec le but de simulation :

XXXXXX

XXXXXX

nom des fichiers contenant les résultats obtenus (.f06, .pch, .op2 de MSC/NASTRAN) et

lieu d'archivage :

XXXXXX

XXXXXX

Validité des résultats vis-à-vis du but de simulation :

XXXXXX

XXXXXX
XXXXXX
XXXXXX

En cas de remise en cause du modèle :
remise en cause du modèle de simulation : oui / non
justification si acceptation ou raison de la remise en cause :

XXXXXX
XXXXXX

identification de la fiche décrivant ce nouveau modèle et son utilisation :

XXXXXX

remise en cause du modèle mécanique : oui / non
justification si acceptation ou raison de la remise en cause :

XXXXXX
XXXXXX

identification de la fiche décrivant ce nouveau modèle et son utilisation :

XXXXXX
XXXXXX

Conclusion de simulation :
uniquement si les résultats sont acceptés :
énoncé de la (des) conclusion(s) vis-à-vis du but de simulation

XXXXXX
XXXXXX

Signature et date

ANNEXE 2

Les activités pour développer un système dans l'AP 233

Les activités recensées pour l'application de l'ingénierie système (cycle en V) sont les suivantes :

A0 : développer un système

A1 : acquérir et fournir

A2 : manager les activités techniques

A21 : gérer les configurations

A211 : établir le plan de gestion des configurations

A212 : gérer les changements

A213 : gérer les autorisations

A22 : gérer les tâches techniques et les partenaires

A23 : tracer les informations

A24 : analyser et établir le « trade off » (« compensation »)

A25 : gérer les risques

A3 : réaliser la conception du système

A31 : réaliser l'analyse des exigences

A311 : capturer les exigences

A3111 : capturer les exigences de service

A3112 : capturer les autres exigences des « dépositaires »

A3113 : capturer les exigences techniques du système

A3114 : compiler toutes les exigences

A312 : définir les conditions aux limites

A313 : définir les exigences fonctionnelles

A314 : définir les exigences non fonctionnelles

A315 : définir les interfaces

A316 : produire le document des exigences

A317 : définir les scénarios de vérification, validation,

qualification

A32 : baseline « exigences »

A33 : réaliser la conception fonctionnelle

A331 : réaliser l'analyse des données

A332 : réaliser l'analyse des fonctions

A333 : réaliser l'analyse des comportements

A334 : analyser les modes de défaillance et leurs effets

A335 : valider l'arborescence fonctionnelle

A34 : réaliser l'architecture topologique de conception

A341 : analyser l'arborescence structurelle

A342 : identifier les paramètres critiques

A343 : identifier et estimer les options physiques

A344 : analyser les performances

A345 : identifier et définir les besoins techniques dérivés

A346 : sélectionner les solutions physiques préférées

A35 : « mapper » l'architecture fonctionnelle à l'architecture topologique

A351 : allouer les fonctions aux composants

A352 : modéliser les flux

A353 : comparer la structure établie avec les exigences

- A354 : réaliser la revue de l'environnement technologique
- A36 : établir toutes les spécifications du système
 - A361 : définir le support des fonctions et du système
 - A362 : établir les spécifications du système
 - A363 : produire les plans de test
- A37 : établir les spécifications des éléments du système (plan de développement)
 - A371 : identifier les fournisseurs et les sous-traitants
 - A372 : définir les rôles
 - A373 : produire les spécifications des éléments du système
 - A374 : définir les spécifications des interfaces
- A38 : réaliser les simulations et modéliser les activités
- A4 : réaliser le produit
- A5 : vérifier et valider le système
- A6 : intégrer le système
- A2 : utiliser et supporter le système
- A3 : disposer du système

2/ Le modèle produit AP 233

Le modèle produit comprend les parties suivantes :

- Architecture de systèmes
- Représentation des exigences
- Exigences sur les tests à réaliser
- L'allocation des besoins
- Classification des éléments
- Prioritisation des éléments
- Information administrative
- Propriétés
- Hierarchie fonctionnelle
- Comportement fonctionnel – interaction
- Comportement fonctionnel – chaîne causale
- Comportement fonctionnel - machine d'éléments finis
- Architecture physique
- Allocation fonctionnelle
- Gérer les versions
- Gérer le travail, les configurations le contrôle des changements
- Graphiques
- Documents externes de référence du mécanisme

Les attributs de l'activité pour l'AP233 sont :

- Le type d'activité
 - Ø Analyse
 - Ø Conception
 - Ø Revue
 - Ø Changement / conception
 - Ø Trade of analysis
- La date de fin effective
- L'identifiant
- La date de départ effective
- La date de début planifiée
- Le nom
- La description
- La date de fin planifiée
- Tâches effectuées
- Le statut

ANNEXE 3

Conceptualisation d'un outil collaboratif pour la gestion des exigences et la formulation des but de simulation



Cahier Des Charges

Démonstrateur Support Informationnel

**UN ESPACE VIRTUEL ET PARTAGE
POUR LA GESTION COOPERATIVE
DES EXIGENCES DU CYCLE DE VIE
PRODUIT PAR LA SIMULATION EN
CONCEPTION**

Version 1.0

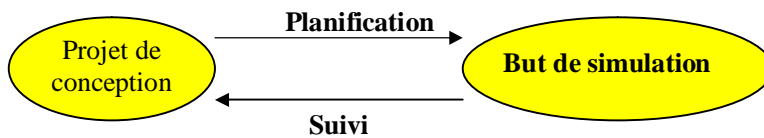
- Cahier des Charges
- Dossier de spécification des besoins relatifs au support informationnel

Objectif du document :

Ce document présente le cahier des charges pour le développement d'un outil d'aide au concepteur pour La gestion Coopérative des Exigences du Cycle de Vie Produit par la Simulation en Conception. Cet espace collaboratif consacré est identifié par le support informationnel.

Les spécifications techniques détaillées dans ce document reposent sur les informations fournies dans le document « description de la méthodologie »

Ce document a donc pour but de spécifier les besoins logiciels et matériels pour la conception et la réalisation du support informationnel.



Présentation :

Contexte de réalisation du projet :

Ce projet repose une méthodologie pour la planification des buts de simulation dans le processus de conception de produit par la gestion des exigences du cycle de vie produit.

L'outil qui supporte cette méthodologie permet de supporter la méthodologie proposée et présente les modules suivants :

§ Modules :

- Ø Accès et gestion de configuration
- Ø définition des paramètres du projet
- Ø Caractéristiques des exigences
- Ø Attribution et définition des Exigences
- Ø Processus de planification des buts de simulation
- Ø Processus de validation des exigences
- Ø Support à l'évaluation de l'impact des modifications
- Ø Echanges et interactions entre acteurs
- Ø Capitalisation (sauvegarde de l'espace)
- Ø Recherche et réutilisation des concepts

Contexte d'utilisation :

Ce projet consiste à conceptualiser un support informationnel relatif à un outil informatique d'aide aux concepteurs. Ce support informationnel permettra de supporter, au travers d'un espace de travail virtuel et collaboratif, la planification et le suivi des buts de simulation. Le support informationnel final sera destiné à être utilisé par l'ensemble des acteurs

du projet. Ces acteurs n'ayant pas la même priorité pour consulter ou modifier les paramètres utiles au concepteur/analyste.

Le but de cet outil, est d'apporter une aide dans la conception préliminaire des produits où la vérification des spécifications est demandée. Cet outil permet la planification et la réutilisation des but de simulation et d'appuyer la coopération entre le concepteur et l'analyste chargé de l'activité du calcul. Un espace de communication entre les différents acteurs du projet. Cet outil est basée sur l'exploitation d'une base de donnée « Modélisation du produit et de ces composants » (qui permet de supporter des fonctionnalités de type liens) ainsi que d'une base de données « Ressources Exigences».

L'outil présentera aussi une synthèse, pour chaque élément de la base de données, des différentes exigences du produit (validées ou non) par métier ainsi que des informations sur les phases antérieures de conception. Ce qui permettra de l'utiliser comme un outil de formation.

Ce projet consiste donc à réaliser un support informationnel illustrant les fonctionnalités d'un nouveau type d'outil d'assistance au concepteur/analyste permettant de superviser le processus de conception de produit et de supporter les activités assignées aux acteurs impliqués.

Description de la prestation attendue :

Ce projet consiste en la réalisation d'un support informationnel relatif à un outil informatique de traitement des exigences du cycle de vie produit. Ce support informationnel permettra à plusieurs groupes distants travaillant sur le même projet de gérer le traitement des exigences produit jusqu'à la définition d'un but de simulation. Il doit permettre d'illustrer les concepts liés à la formulation proposée par les acteurs. Il devra disposer d'une interface conviviale, être évolutif et s'inscrira dans un environnement informatique facilitant les démonstrations.

Principaux objectif :

Le support informationnel devra pouvoir :

- Ø Extraire et alimenter en informations la base de donnée.
- Ø Permettre la consultation des informations de la base de donnée.
- Ø Créer, gérer et sauvegarder un espace de traitement.
- Ø Mettre à disposition un module d'administration du support informationnel et de gestion de ressources.
- Ø Mettre à disposition un module d'analyse et de hiérarchisation des exigences produit selon les contraintes du projet.
- Ø Mettre à disposition un module de vérification des exigences par l'expression des buts de simulation.
- Ø Mettre à disposition un module de validation des exigences par la simulation
- Ø Mettre à disposition des outils de communications entre les acteurs projet.
- Ø Permettre d'identifier le rôle de l'utilisateur afin de lui fournir les fonctionnalités personnalisées.
- Ø Etre couplé avec d'autres logiciels (Analyse fonctionnelle, AMDEC, QFD)

Terminologie :

§ Définition d'une Exigence produit :

La première étape vers la gestion de la compréhension des exigences est de convenir d'un vocabulaire commun, capable de traduire le vrai sens de l'exigence. Puisque la conformité aux exigences définit le succès ou l'échec d'un projet, il est primordial d'identifier les exigences, de les décrire, de les organiser et de les suivre au cours de leur évolution.

La définition, d'après l'IEEE Std 1220-1994, de la notion d'exigence : c'est une déclaration qui identifie une capacité, une caractéristique physique, ou un facteur de qualité qui borne un produit ou le besoin du processus pour qu'une solution s'avère viable. (Harwell *et al*, 93) introduisent la notion de niveau d'abstraction d'une exigence dont ils proposent la définition suivante « s'il est exigé que quelque chose doit être accompli, transformé, produit, ou fourni, c'est une exigence ». Les attributs définissant une exigence sont donc :

- Les acteurs impliqués.
- Le processus affecté.
- Les caractéristiques d'une exigence
 - Type
 - Application de l'exigence
 - Niveau de conformité
 - Priorité
- La catégorisation des exigences :
 - Primaire ou dérivé
 - Paramètre produit ou projet
 - Obligatoire/conseil/information
 - Sécurité ou budget
- Les attributs
 - Description
 - Justification
 - Source
 - Critère de mesure
 - les dépendances
 - La satisfaction client accordée pour cette exigence
 - La phase du cycle de vie qui exprime cette exigence (usage, rangement, élimination,..)
 - Le document support qui définit l'exigence
 - Historique de l'exigence (création ou modification)
 - Les conflits avec d'autres exigences (en cas d'existence)

Description du support informationnel :

Les rôles :

Les rôles qui peuvent être assignés aux différents acteurs seront les suivants :

- Les gestionnaires de configuration (chef de projet)
- Les acteurs métiers (concepteur, analyste, Les autres acteurs projet : spécialiste).
- L'administrateur du support informationnel.

Pour le support informationnel, on partira du principe qu'un acteur ne joue qu'un seul rôle. La notion de rôle permet de nommer un groupe de privilèges. Nous pouvons affecter un rôle à un ou plusieurs utilisateurs (acteurs). Ces rôles limitent l'accès des utilisateurs à certaines informations de la base et leur interdisent certaines actions.

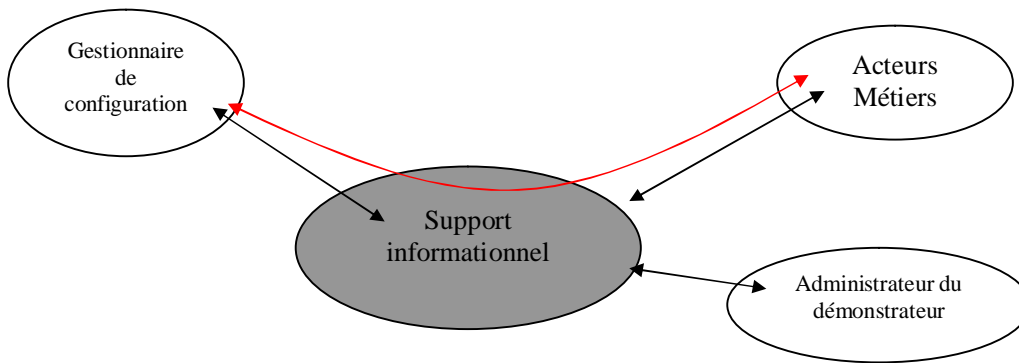


Figure 1 : Les rôles

◆ Les gestionnaires de configuration :

Un gestionnaire de configuration est associé à un ensemble (ou un sous-ensemble) de la structure produit. Il a pour rôle de maintenir la cohérence de la configuration en s'assurant du bon déroulement du processus de vérification et de validation des exigences relatives à l'ensemble dont il est responsable. Il est donc en charge de la supervision du déroulement du processus de conception.

◆ Les acteurs métiers :

Les acteurs métiers peuvent avoir différents rôles et peuvent intervenir à diverses phases du processus s'ils sont sollicités par le gestionnaire de configuration. Il existe trois grandes catégories d'acteurs métiers :

- Les concepteurs chargés de la conception et de la définition des solutions proposées durant les phases de développement du produit.
- Les analystes qui interviennent pour réaliser les vérifications dans une phase avancée de la définition du produit
- Les autres acteurs projet ou spécialistes qui peuvent intervenir à n'importe quelle phase du processus s'ils sont sollicités par les deux autres catégories d'acteurs ou par le gestionnaire de configuration.

◆ L'administrateur :

L'administrateur dispose de l'ensemble de toutes les fonctionnalités précédentes. De plus, il peut créer, modifier ou supprimer un utilisateur de l'application et l'associer à l'un des rôles précédents (Gestionnaire de configuration, Acteur métier, Administrateur).

Les fonctionnalités générales :

Le support informationnel sera basé sur cinq fonctionnalités principales :

- ∅ La gestion d’une modification : la création d’un environnement de travail dédié au processus de traitement et adapté à la logique d’action des acteurs. Création, gestion et sauvegarde de cet espace de traitement.
- ∅ L’accès aux informations relatives aux produits et à ses composantes :
 - Ses contraintes (liens de dépendances).
 - Son historique.
- ∅ L’utilisation des outils de communications entre les différents acteurs afin de permettre un échange d’informations.

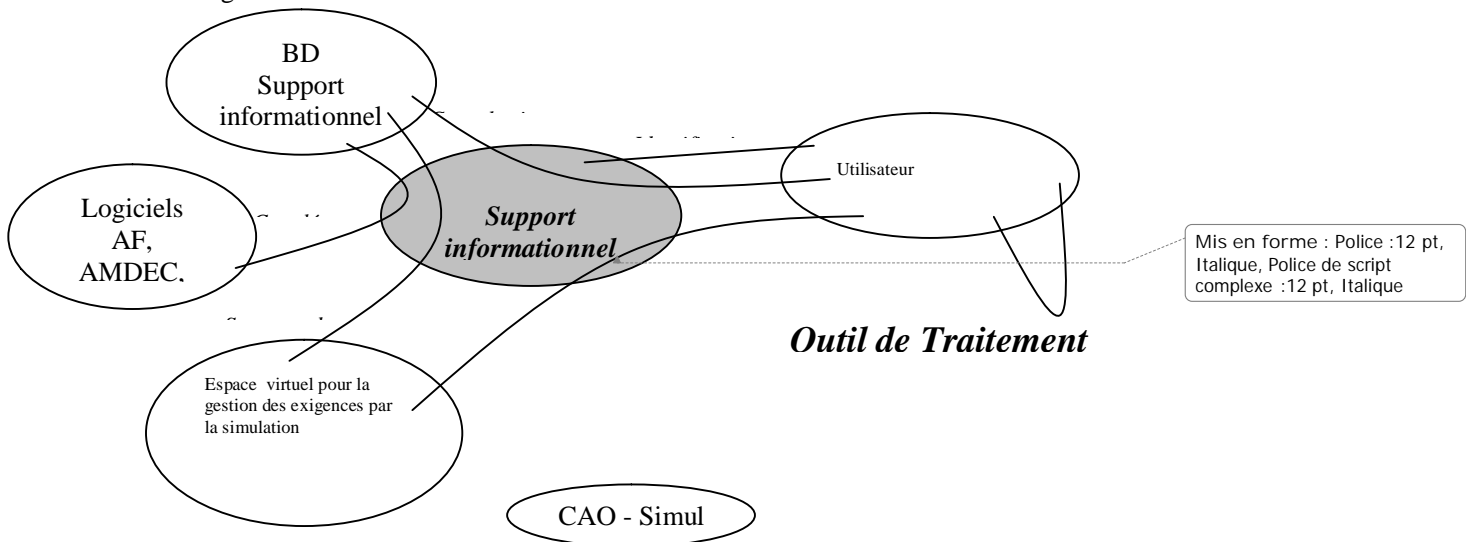


Figure 2 : Fonctionnalités générales

Base de données du support informationnel :

Au début de la phase de développement la création d’une base de données démonstration sera nécessaire. L’outil développé s’appuiera sur celle-ci, elle devra permettre d’accéder à un support de documents liés aux exigences du produit étudié ainsi que la base des modèles CAO des composants du produit. Cette base de données sera alimentée par les outils d’aide aux concepteurs « AFE, AFI, l’AMDEC et le QFD » afin de permettre l’utilisation du support informationnel.

Au sein de cette base de données il existera différents liens entre les outils de la conception et ceux utilisés dans la simulation numérique.

Détails des fonctionnalités :

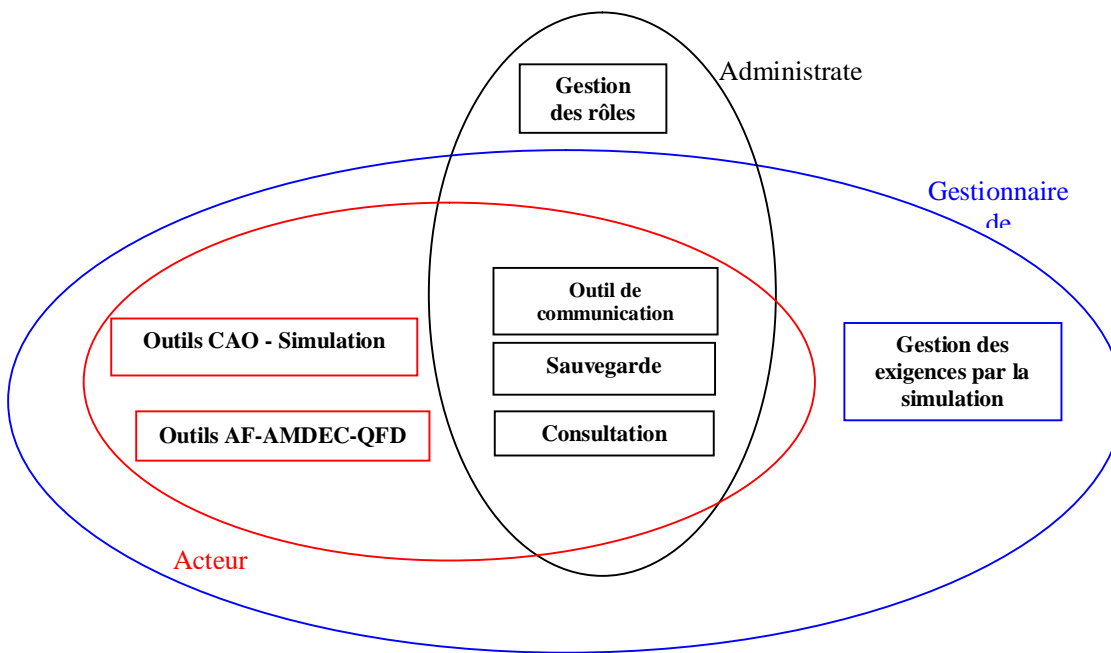


Figure 3 : Les fonctionnalités par rôle

Fonctionnalités communes :

Pour l'ensemble des rôles, le support informationnel doit avoir les fonctionnalités suivantes :

Ø **Accès aux informations relatives au produit, à ses composantes et aux exigences**

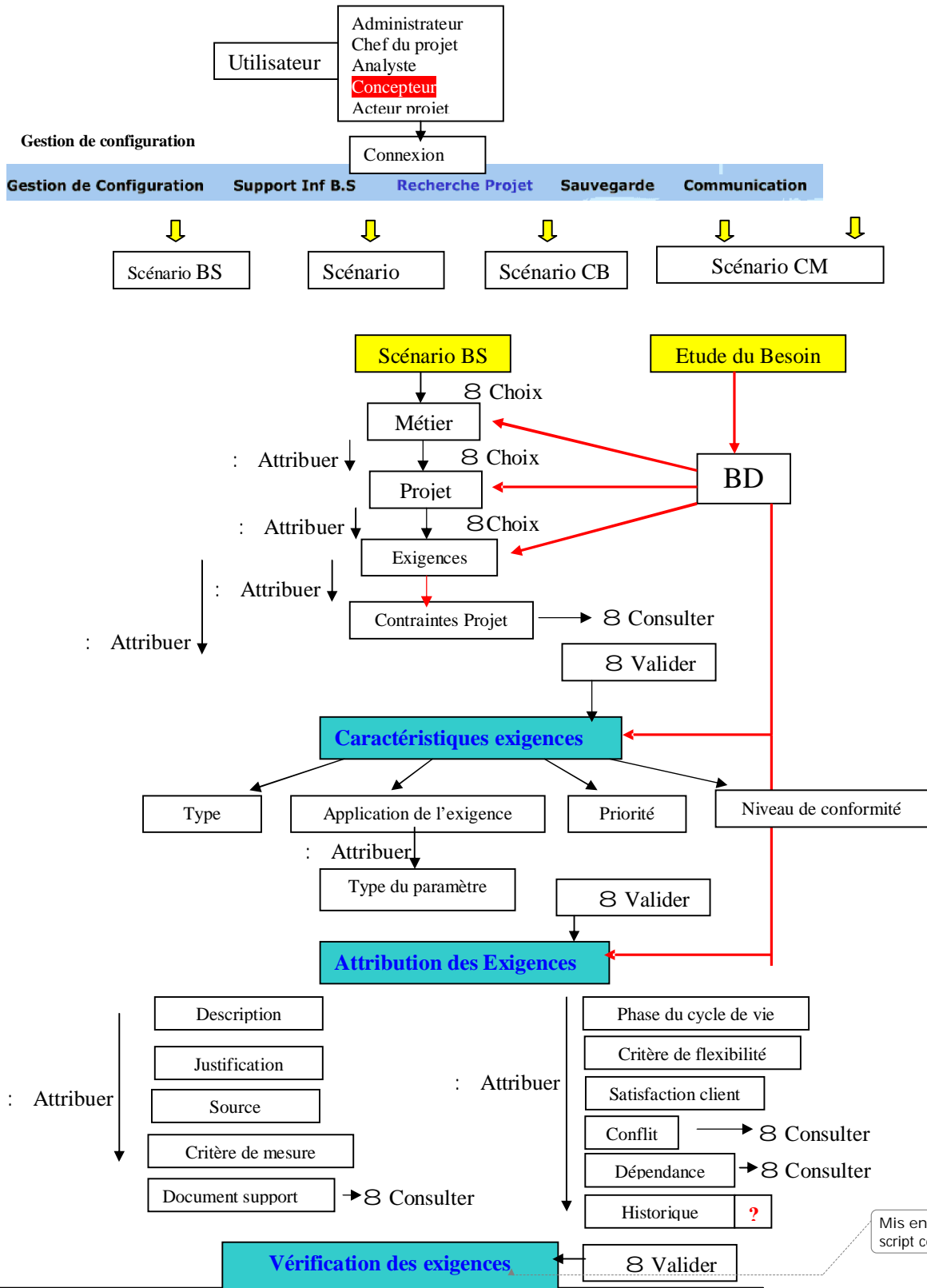
Une fonctionnalité permettant la consultation d'un projet afin de connaître :

- Les liens.
- L'historique du projet : son cycle de conception mais aussi les exigences qui ont été affectées ou identifiées.
- Les attributs et les documents associés.

Ø **Outil de communication :**

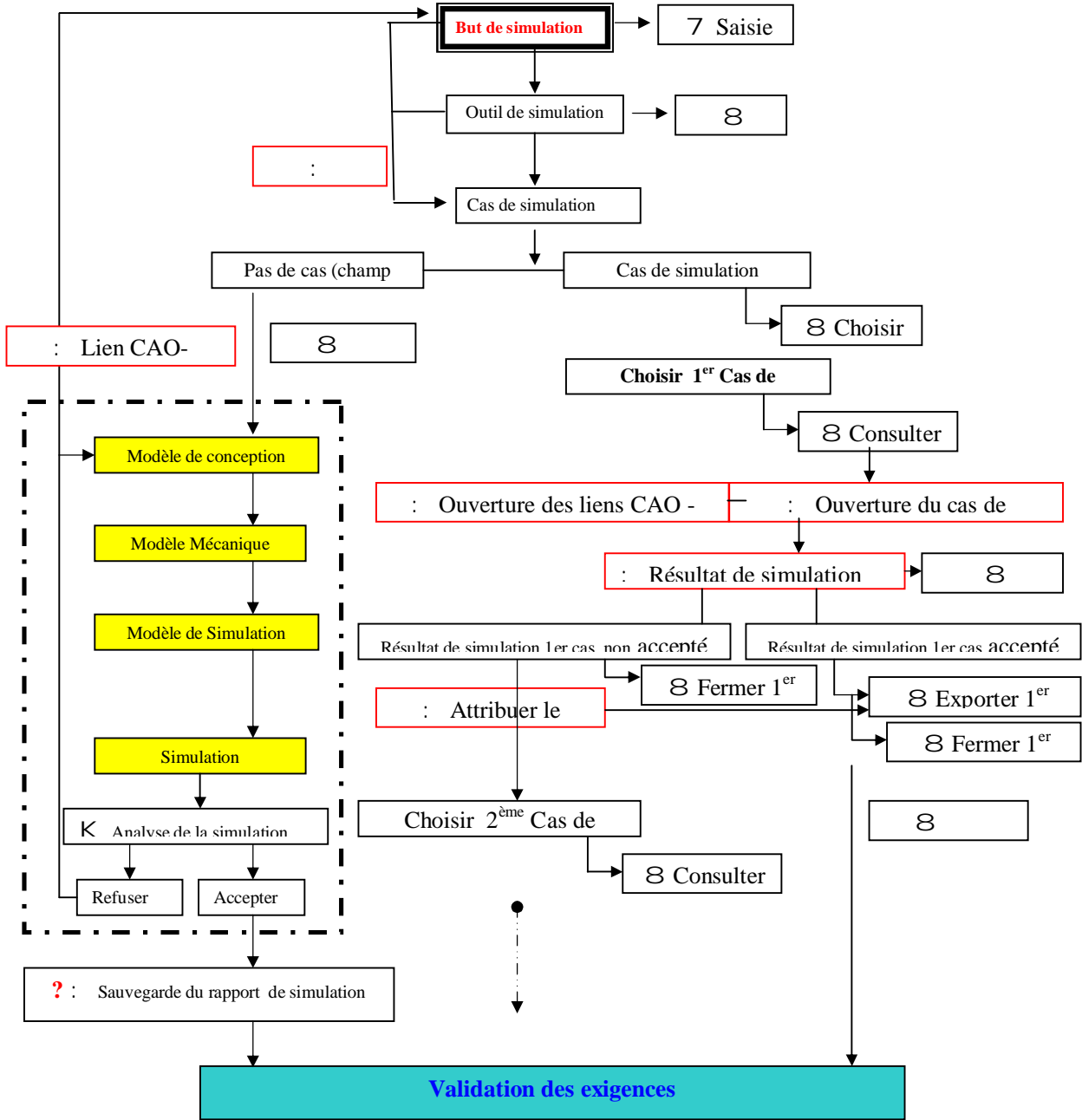
Le support informationnel doit permettre aux concepteurs ou l'analyste de discuter les modifications qui ont affectées les exigences produit dans un projet déterminé ainsi que la possibilité des modifications futures. De plus il doit mettre à la disposition de l'utilisateur des moyens d'échanges entre les différents acteurs (mails ou forum).

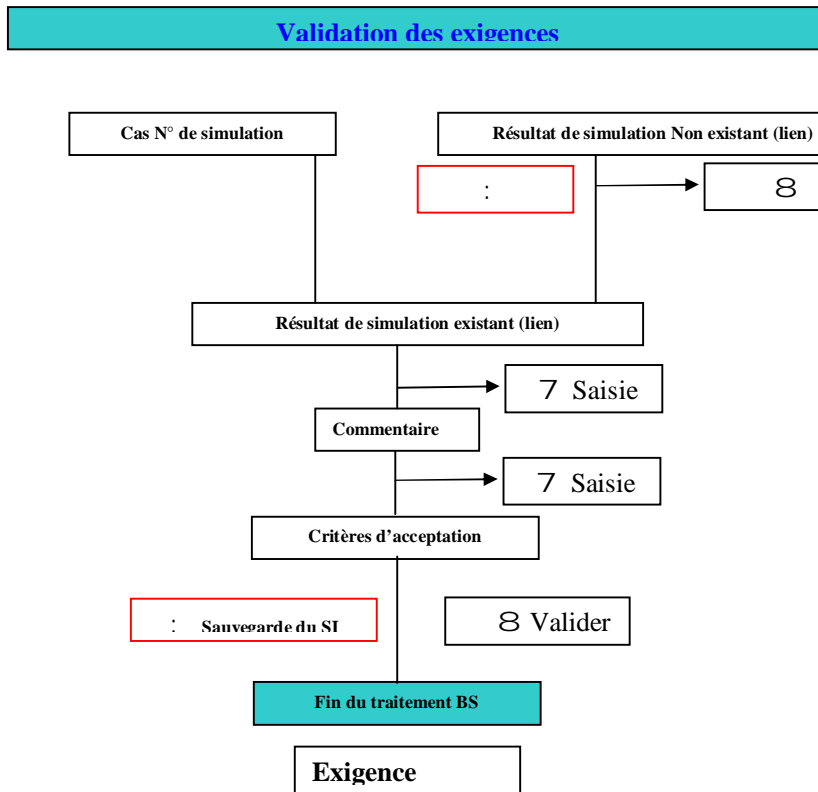
Scénario d'utilisation du support informationnel :



Vérification des exigences

Le but de simulation sera : Validé Estim Vérifi → 8





Automate d'état de l'application

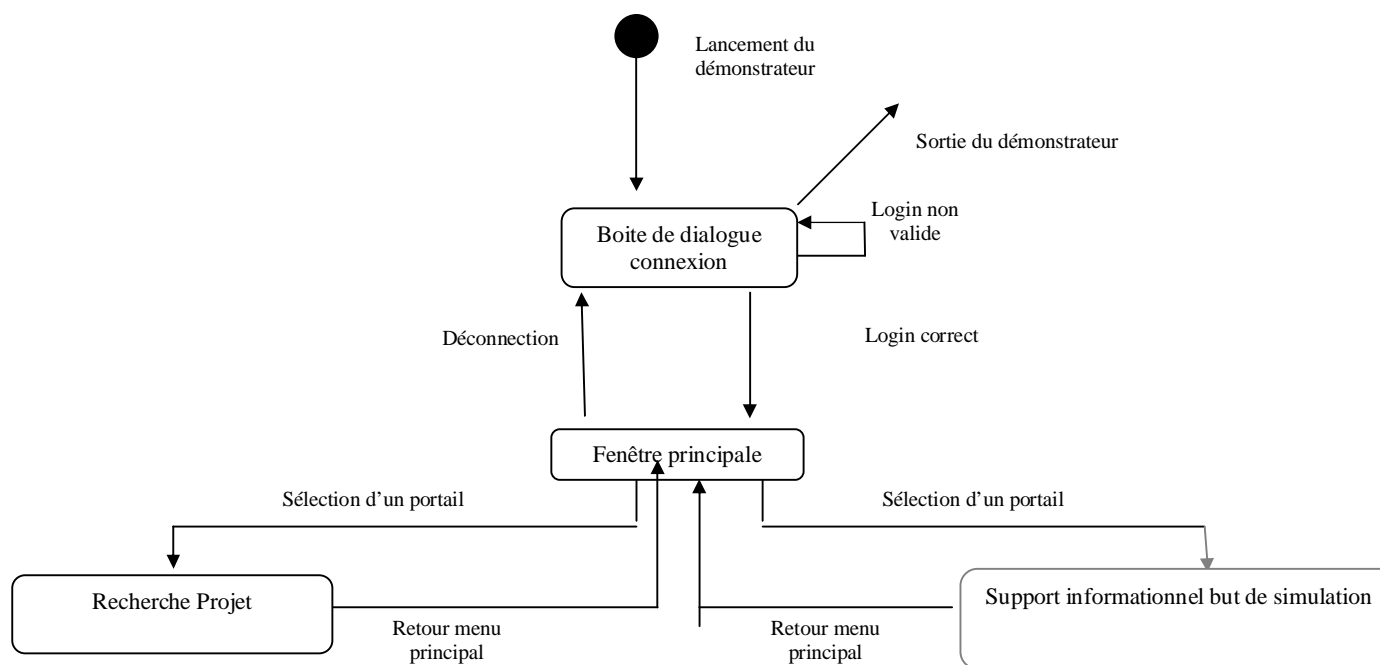


Figure 4 : automates d'état du démonstrateur

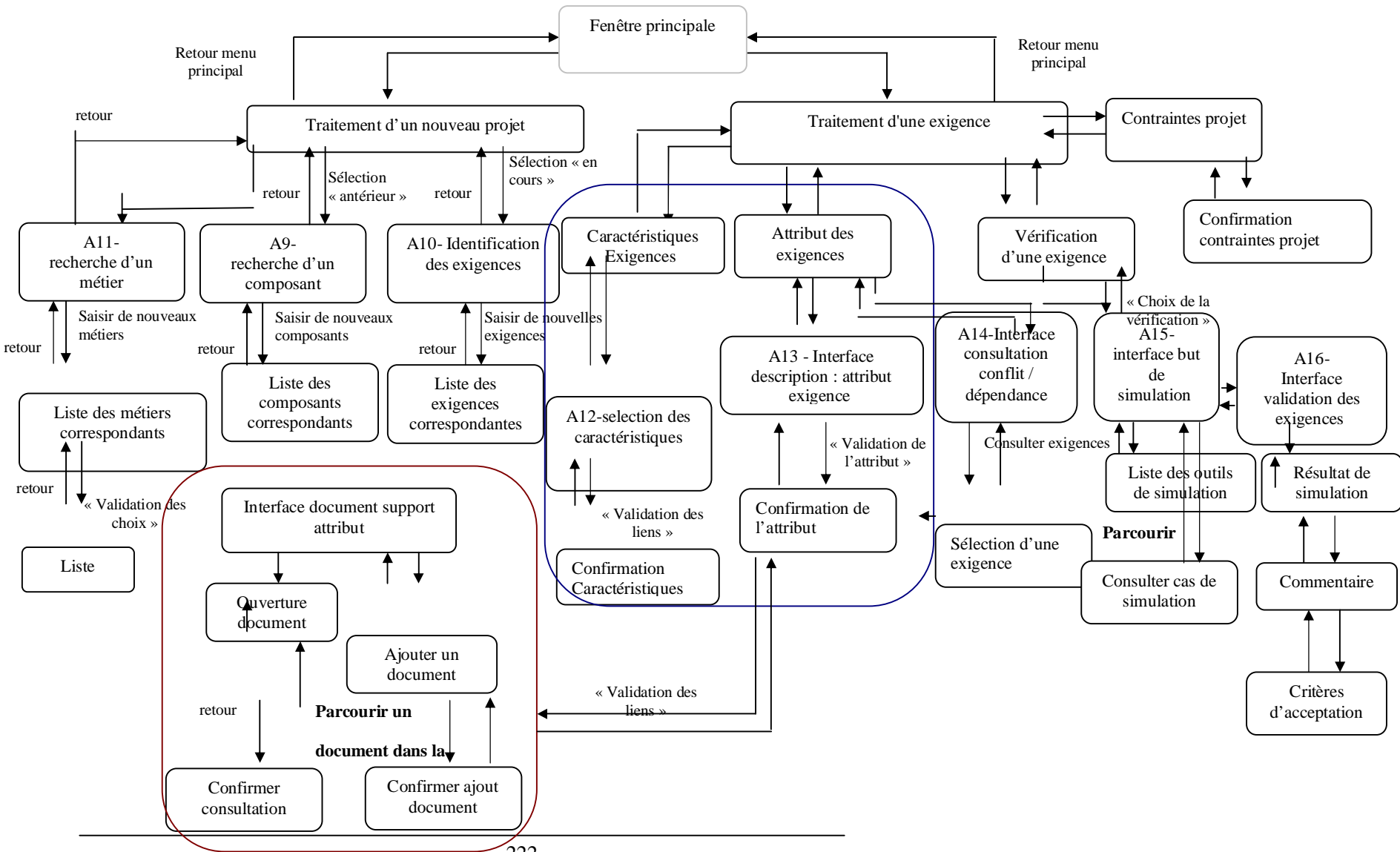


Figure 5 : automates d'état du démonstrateur pour un gestionnaire de configuration

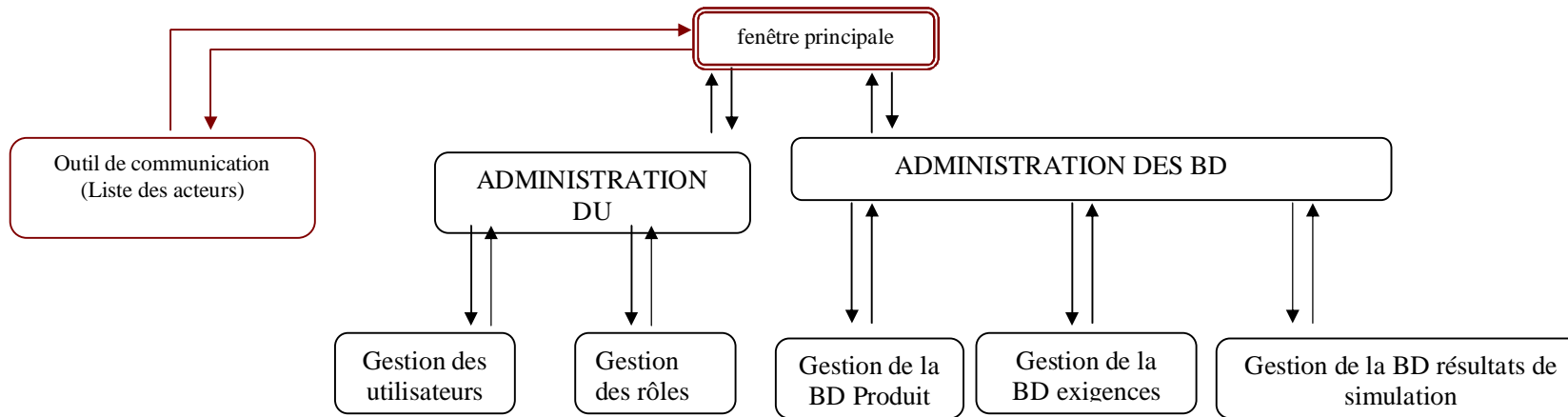


Figure 6 : automates d'état du démonstrateur pour l'administrateur

ANNEXE 4

Etude Analyse Fonctionnelle Interne « TDC Structure »

Analyse Fonctionnelle

Détail des Phases

Phase : utilisation du système

Liste des fonctions

(Fi 1) assurer le freinage de la roue

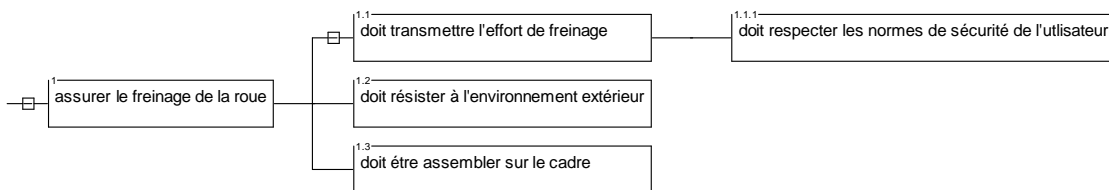
(Fi 1.1) doit transmettre l'effort de freinage

(Fa 1.2) doit résister à l'environnement extérieur

(Fi 1.1.1) doit respecter les normes de sécurité de l'utilisateur

(F 1.3) doit être assemblé sur le cadre

Arbre fonctionnel



Caractérisation des fonctions

(Fi 1) assurer le freinage de la roue

(Fi 1.1) doit transmettre l'effort de freinage

(Fi 1.1.1) doit respecter les normes de sécurité de l'utilisateur

Caractérisation

Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
réglementation sur produit VTT	conformité intégrale	F0	Essais sue proto

(Fa 1.2) doit résister à l'environnement extérieur

Caractérisation

Critère	Niveau	Flex	Contrôle
corrosion	milieu acide	F1	essais
oxydation	milieu oxydant	F1	essais

(F 1.3) doit être assemblé sur le cadre

Caractérisation

Critère	Niveau	Flex	Contrôle
rigidité d'assemblage	contrainte > 280 MPa	F1	calcul par simulation

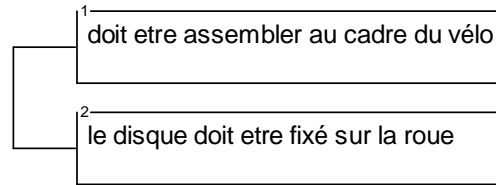
Phase : Assemblage des composants

Liste des fonctions

(Fa 1) doit être assemblé au cadre du vélo

(Fa 2) le disque doit être fixé sur la roue

Arbre fonctionnel



Caractérisation des fonctions

(Fa 1) doit être assemblé au cadre du vélo

Caractérisation

Critère	Niveau	Flex	Contrôle
assemblage facile	temps d'assemblage	F1	essais sur proto

(Fa 2) le disque doit être fixé sur la roue

Caractérisation

Critère	Niveau	Flex	Contrôle
rfer			

Solution

Liste des solutions

Frein hydraulique

Détail des solutions

Frein hydraulique

Liste des composants

(C 1) support d'étrier

(C 2) cylindre porte piston

(C 2.1) piston

(C 2.1.1) patins

(C 2.2) ressort

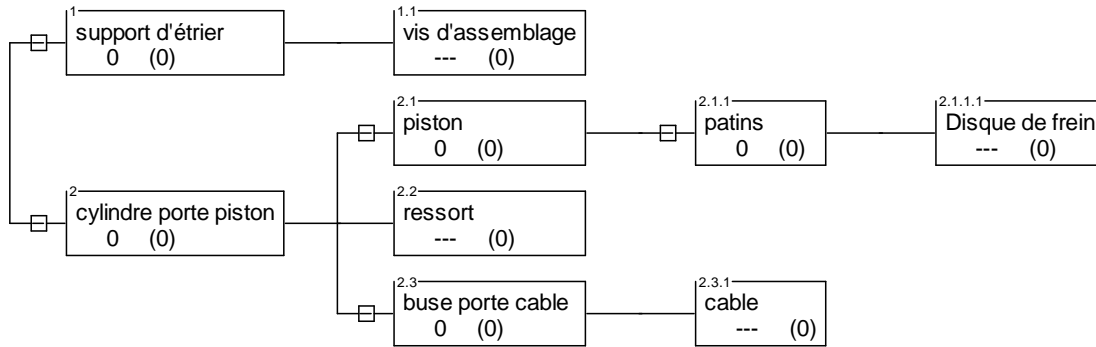
(C 1.1) vis d'assemblage

(C 2.3) buse porte câble

(C 2.3.1) câble

(C 2.1.1.1) Disque de frein

Arbre des composants



Caractérisation des composants

(C 1) support d'étrier

Caractérisation

Nom de la caractéristique	N°	Classification	Valeur nominale	D :	GB :	Tolérance Moins	Moyen de vérification	Etendue de l'échantillonnage	Fréquence de l'échantillonnage	Méthode de contrôle	Plan de réaction
dimensionnelle	1		30x23x80	m m	en valeur absolue	0.1	contrôle dimension	10 pièces	2 fois pour 100 pièces produites	Dim	Arrêt production

(C 2) cylindre porte piston

Caractérisation

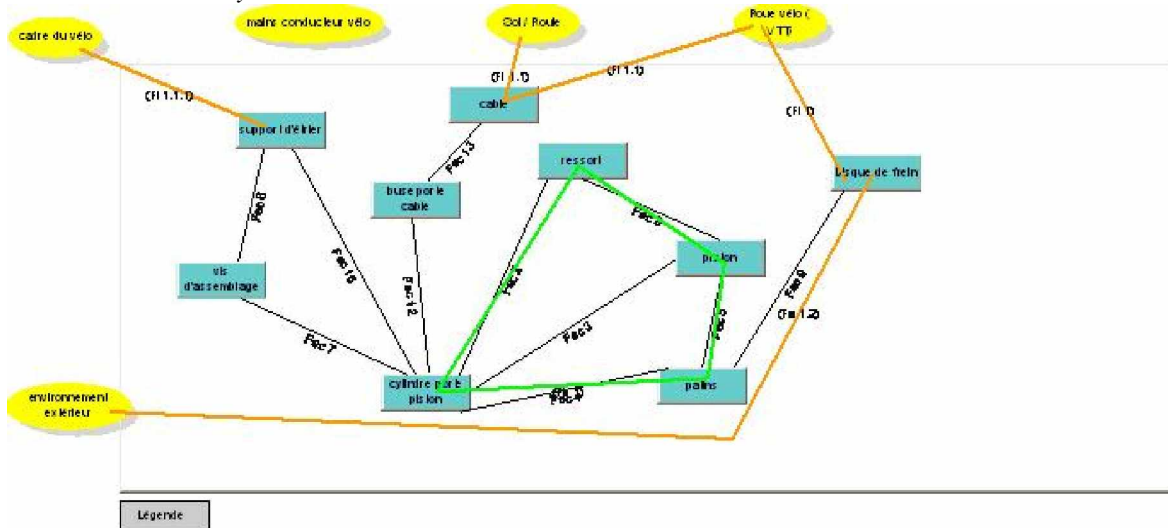
Nom de la caractéristique	N°	Classification	Valeur nominale	D :	GB :	Tolérance Moins	Moyen de vérification	Etendue de l'échantillonnage	Fréquence de l'échantillonnage	Méthode de contrôle	Plan de réaction
mécanique	2		280	M Pa	en valeur absolue	1	essais	2 pièces	2 fois par jour	Prélèvement + mesure	Suivi de NC

(C 2.1) piston

Caractérisation

Nom de la caractéristique	N°	Classification	Valeur nominale	D :	GB :	Tolérance Minimums	Moyen de vérification	Etendue de l'échantillonnage	Fréquence de l'échantillonnage	Méthode de contrôle	Plan de réaction
mécanique	21										

B.D.F.utilisation du système



Liste des fonctions de contact

- (Fec 1) Contact cadre du vélo support d'étrier
- (Fec 2) Contact cylindre porte piston ressort
- (Fec 3) Contact cylindre porte piston piston
- (Fec 4) Contact cylindre porte piston patins
- (Fec 5) Contact piston patins
- (Fec 6) Contact support d'étrier vis d'assemblage

- (Fec 7) Contact vis d'assemblage cylindre porte piston
- (Fec 8) Contact ressort piston
- (Fec 9) Contact Disque de frein patins
- (Fec 10) Contact buse porte cable cylindre porte piston
- (Fec 11) Contact buse porte cable cable
- (Fec 12) Contact buse porte cable cylindre porte piston
- (Fec 13) Contact buse porte cable cable
- (Fec 14) Contact cadre du vélo support d'étrier
- (Fec 15) Contact mains conducteur vélo cable
- (Fec 16) Contact support d'étrier cylindre porte piston

Caractérisation fonctions de contact

(Fec 1) Contact cadre du vélo support d'étrier
Caractérisation

Critère	Niveau de performance	Flex	Contrôle
contact plan	23 cm2	F1	simulation de contact

(Fec 2) Contact cylindre porte piston ressort

Caractérisation

Critère	Niveau de performance	Flex	Contrôle
centrage long	avec jeux	F3	simulation

(Fec 3) Contact cylindre porte piston piston

(Fec 12) Contact buse porte cable cylindre porte piston

Caractérisation

Liste des fonctions élémentaires de flux

(Fi 1) assurer le freinage de la roue

(Fef 1) Fct elt flux Disque de frein Roue vélo (VTT)

(Fi 1.1) doit transmettre l'effort de freinage

(Fef 2) Fct elt flux Roue vélo (VTT) cable

(Fef 3) Fct elt flux utilisateur cable

(Fa 1.2) doit résister à l'environnement extérieur

(Fef 4) Fct elt flux Disque de frein environnement extérieur

(Fi 1.1.1) doit respecter les normes de sécurité de l'utilisateur

(Fef 6) Fct elt flux support d'étrier cadre du vélo

Caractérisation des fonctions élémentaires de flux

Caractérisation des flux bouclés

T.A.F. simplifié

	P 1				P 2		P 1	P 1	
	Fi 1	Fi 1.1	Fi 1.1.1	Fa 1.2	F 1.3	Fa 1	Fa 2	Fb 1	Fb 2
(C 1)			X						
└ (C 1.1)	X								
(C 2)	X	X						X	
└ (C 2.1)								X	
└ (C 2.1.1)								X	
└└ (C 2.1.1.1)	X			X					
└ (C 2.2)	X							X	
└ (C 2.3)									
└└ (C 2.3.1)		X							

-Fonctions de contact et composant destination

- * Fec 16 Contact support d'étrier cylindre porte piston connecté à C 1 support d'étrier
- * Fec 12 Contact buse porte cable cylindre porte piston connecté à C 2.3 buse porte cable
- * Fec 7 Contact vis d'assemblage cylindre porte piston connecté à C 1.1 vis d'assemblage
- * Fec 4 Contact cylindre porte piston patins connecté à C 2.1.1 patins
- * Fec 3 Contact cylindre porte piston piston connecté à C 2.1 piston
- * Fec 2 Contact cylindre porte piston ressort connecté à C 2.2 ressort

- Fonctions de service utilisant le composant
 - * Fi 1.1 doit transmettre l'effort de freinage
 - * Fi 1 assurer le freinage de la roue
- Flux bouclé utilisant le composant
 - * Fb 1 ensemble vérin hydraulique

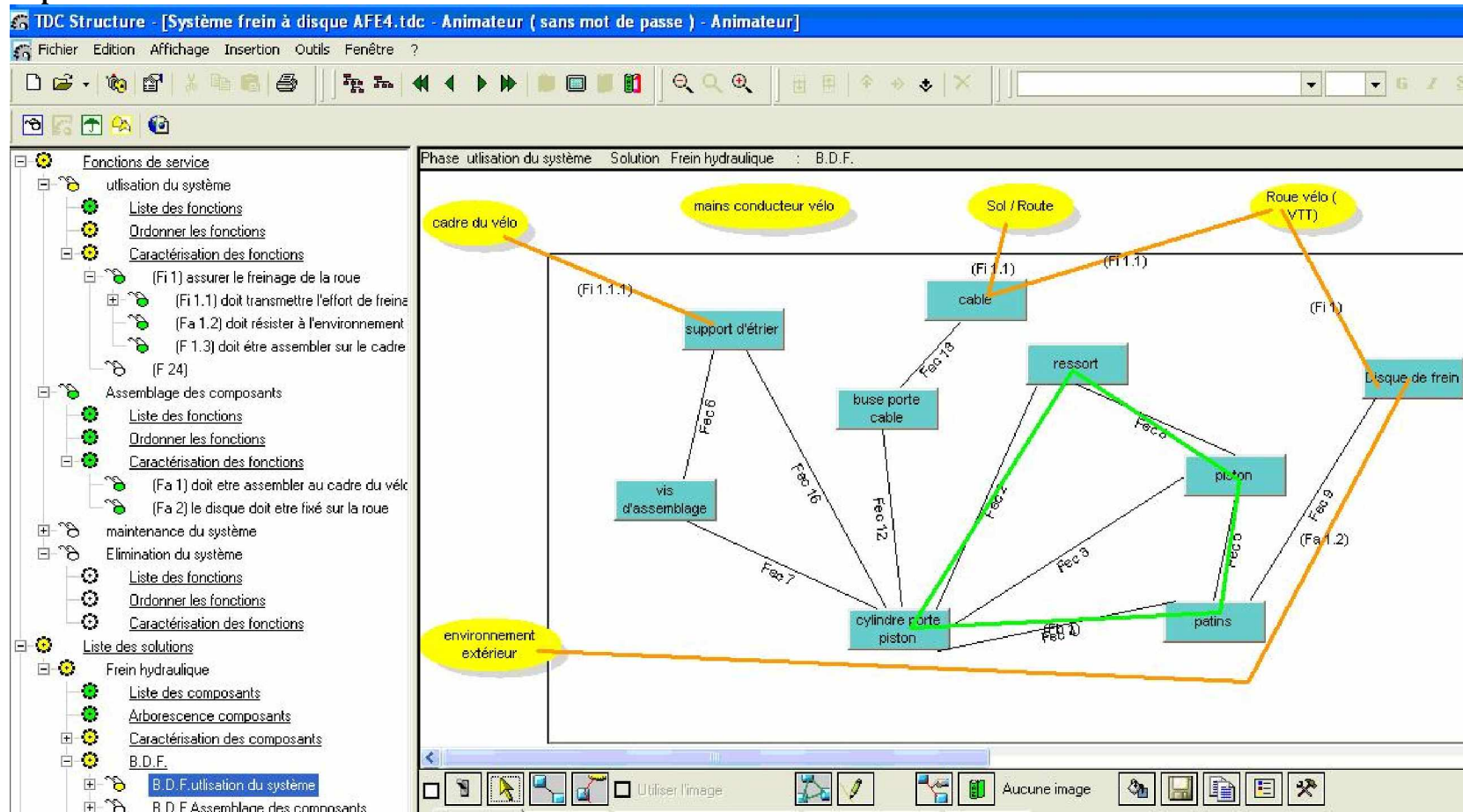
C 2.1 piston

- Fonctions de contact et composant destination
 - * Fec 8 Contact ressort piston connecté à C 2.2 ressort
 - * Fec 5 Contact piston patins connecté à C 2.1.1 patins
 - * Fec 3 Contact cylindre porte piston piston connecté à C 2 cylindre porte piston
- Flux bouclé utilisant le composant
 - * Fb 1 ensemble verin hydraulique

C 2.1.1 patins

- Coût du composant :
- Fonctions de contact et composant destination
 - * Fec 9 Contact Disque de frein patins connecté à C 2.1.1.1 Disque de frein
 - * Fec 5 Contact piston patins connecté à C 2.1 piston
 - * Fec 4 Contact cylindre porte piston patins connecté à C 2 cylindre porte piston
- Flux bouclé utilisant le composant
 - * Fb 1 ensemble vérin hydraulique

Copie d'écran TDC Structure :



TDC Structure - [Système frein à disque AFE4.tdc - Animateur (sans mot de passe) - Animateur]

Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Phase utilisation du système : Caractérisation de (Fi 1.1) doit transmettre l'effort de freinage

	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	résistance des composants	déformation limite < à 0,04mm	F1	calcul par simulation

Fonctions de service
 utilisation du système
 Liste des fonctions
 Ordonner les fonctions
 Caractérisation des fo
 (Fi 1) assurer le fre
 (Fi 1.1) doit tra
 (Fa 1.2) doit ré
 (F 1.3) doit être

TDC Structure - [Système frein à disque AFE4.tdc - Animateur (sans mot de passe) - Animateur]

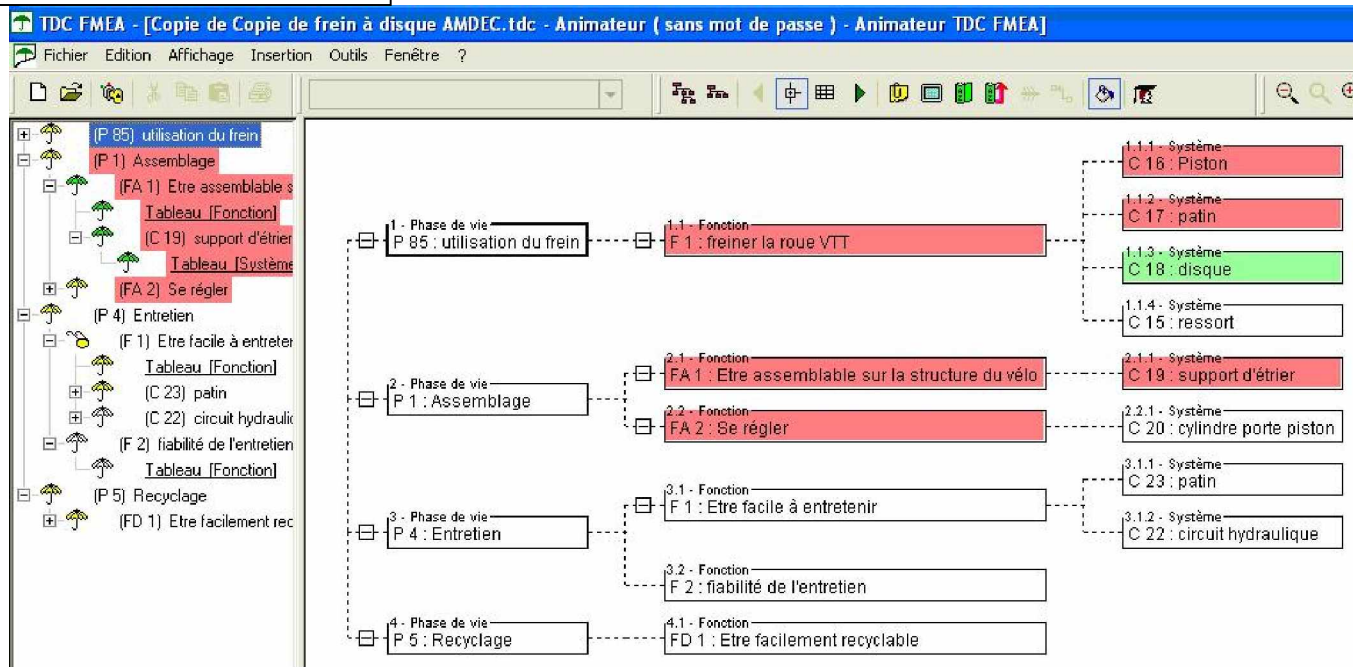
Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Phase utilisation du système : Caractérisation de (F 1.3) doit être assembler sur le cadre

	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	rigidité d'assemblage	contrainte > 280 MPa	F1	calcul par simulation

Fonctions de service
 utilisation du système
 Liste des fonctions
 Ordonner les fonctions
 Caractérisation des fo
 (Fi 1) assurer le fre
 (Fi 1.1) doit tra
 (Fa 1.2) doit ré
 (F 1.3) doit être
 (F 24)

Copie d'écran de l'outil TDC FMEA



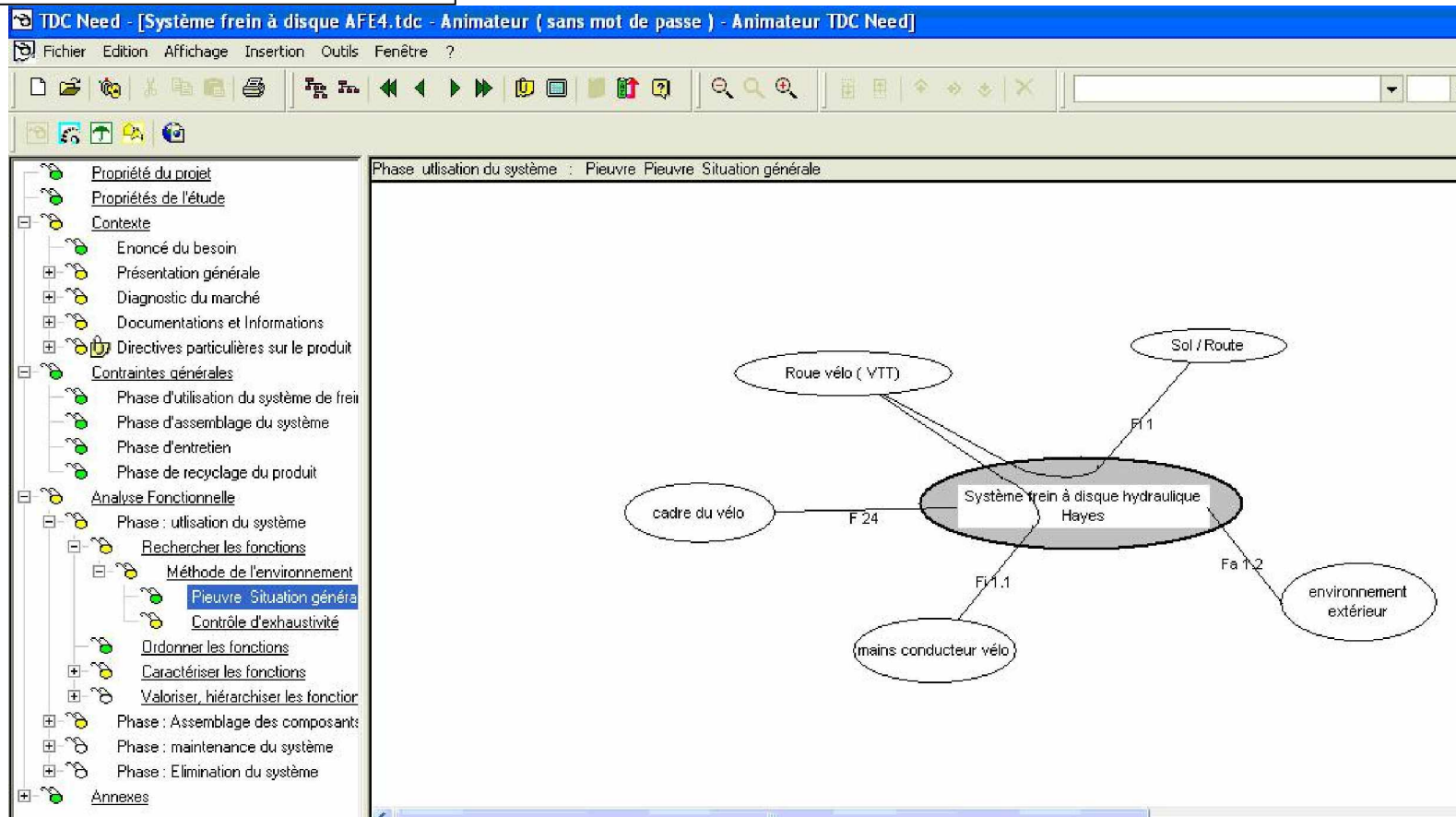
TDC FMEA - [Copie de Copie de frein à disque AMDEC.tdc - Animateur (sans mot de passe) - Animateur TDC FMEA]

Amdec:Produit

Système : support d'étrier

Fct ?	Mode de défaillance	Effets	S	Classe	Causes de défaillance	0	Contrôle Conception Prévention	Contrôle Conception Détection	D	IPFI	Actions recommandées	Responsable
1	Fonctionnement irrégulier	CLIENT ASSEZ MECONTENT	3	YS	mode d'assemblage	6	Essai prototype	Détection lors de tests laboratoire	9	432	Expérience sur des produits comparables	
2	Cassure	GRAND MECONTENTEMENT	3	YS	Matière fragile	4	simulation numérique	Détection lors de tests de simulation	3	108	Calculs résistance des matériaux	

Copie d'écran de l'outil TDC Need



TDC Need - [Système frein à disque AFE4.tdc - Animateur (sans mot de passe) - Animateur TDC Need]

Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	Technologie	système hydraulique	F1	Etude
2		Système mécanique	F1	Etude
3	Liste des normes et réglementations à respecter	Sécurité	F0	Essais physique

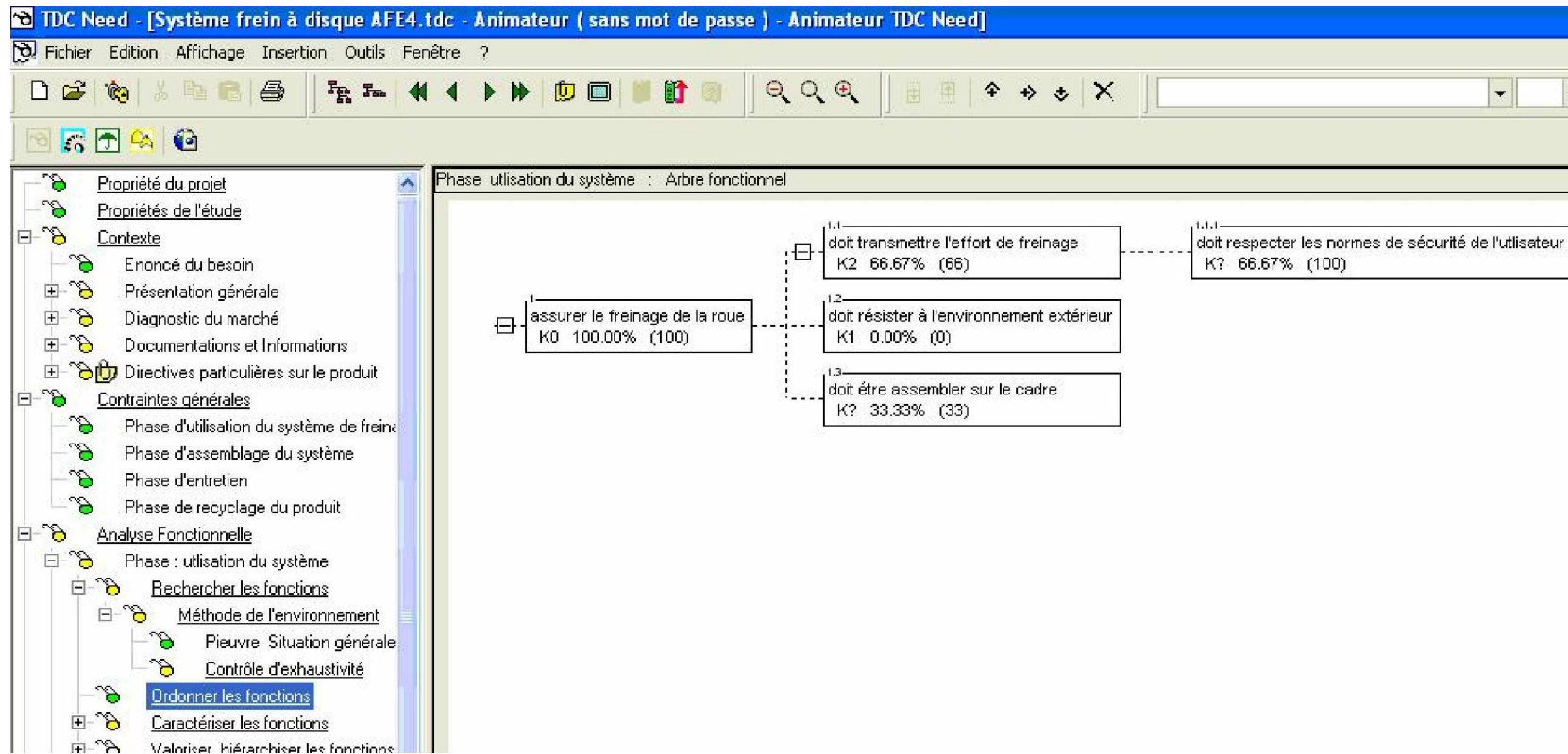
TDC Need - [Système frein à disque AFE4.tdc - Animateur (sans mot de passe) - Animateur TDC Need]

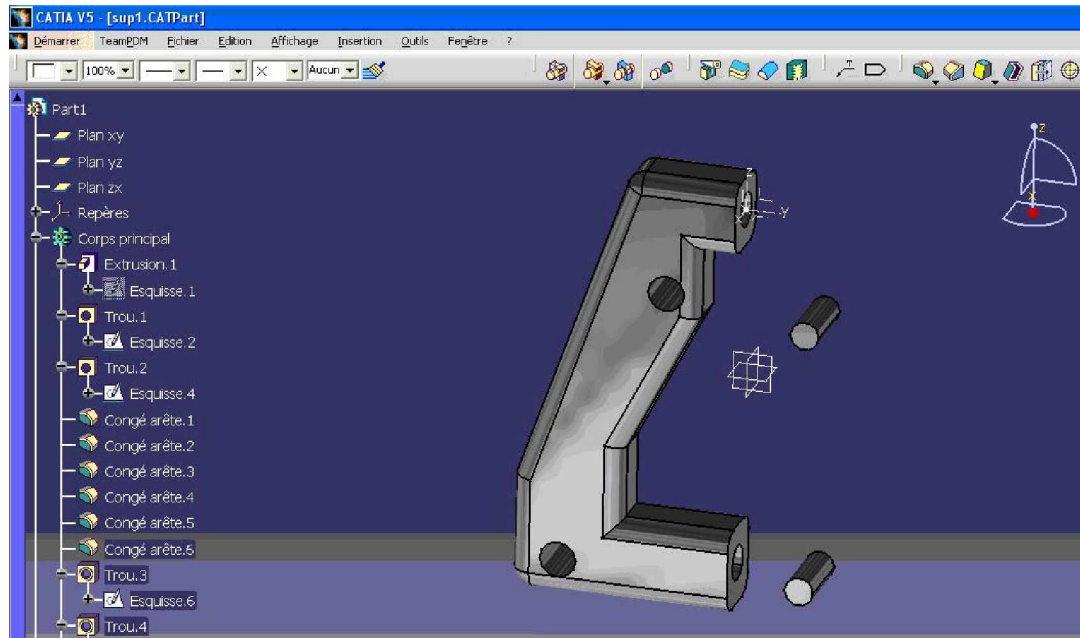
Fichier Edition Affichage Insertion Outils Fenêtre ?

Caractérisation de Phase d'entretien				
	Critère	Niveau	Flexibilité	Contrôle
1	Maintenabilité	Coût composants	F2	Analyse fonctionnelle
2		maintenance facile	F2	Essais sur prototype

Project Tree:

- Propriété du projet
- Propriétés de l'étude
- Contexte
 - Enoncé du besoin
 - Présentation générale
 - Diagnostic du marché
 - Documentations et Informations
 - Directives particulières sur le produit
- Contraintes générales
 - Phase d'utilisation du système de freinage
 - Phase d'assemblage du système
 - Phase d'entretien
 - Phase de recyclage du produit





Modèle de conception

Modèle de simulation

