

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION INTÉGRÉE DES PRODUITS EN CONTEXTE PLM

METODOLOGIE DE CONCEPȚIE INTEGRATĂ A PRODUSELOR ÎN CONTEXT PLM

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul Inginerie Industrială
de către

ing. Adrian ORIȚĂ

Conducător științific: prof. univ. dr. ing. George Drăghici

Referenți științifici: prof. univ. dr. ing. Nouraș Barbu Lupulescu
prof. univ. dr. ing. George Drăgoi
prof. univ. dr. ing. Tudor Iclănzan

Ziua susținerii tezei: 18 mai 2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S. Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2011

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Remerciements

Même si la place réservée aux remerciements se situe au début de ce travail, elle est synonyme de touche finale de ce rapport de thèse. Je voudrais commencer par remercier Monsieur le professeur George DRĂGHICI, qui m'a donné l'impulsion et le courage de m'engager dans cette belle aventure sous sa direction en tant que directeur de thèse. A part la confiance et la motivation qu'il a su me transmettre, j'ai particulièrement apprécié l'excellence de son encadrement scientifique, son sens pédagogique et sa manière structurée de transmettre ses connaissances. Travailler sous sa direction était un réel plaisir, aussi par ses qualités humaines, sa manière chaleureuse utilisée dans nos échanges, ainsi que pour la liberté qu'il m'a accordée dans ma planification opportuniste.

Je voudrais continuer par remercier vivement l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail de recherche. Merci donc aux Messieurs les professeurs Tudor ICLĂNZAN, Nouraș Barbu LUPULESCU et George DRĂGOI pour leurs rapports sur ce document, ainsi que pour avoir examiné mes travaux.

L'équipe de LI3C de la HEIG-VD d'Yverdon (Suisse) a été le cadre idéal pour pouvoir mener à bien l'ensemble de mes travaux. Elle m'a donnée la chance de pouvoir faire ce travail de recherche et je remercie particulièrement Monsieur le professeur Pierre REPETTI pour son soutien et Monsieur le professeur Jean-Luc BENEY pour ses encouragements.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont permis la réalisation de ce travail. En effet, toutes les indications, tous les commentaires et analyses scientifiques ont influencé positivement le fond et la forme de ce rapport.

Un grand merci à toute ma famille qui m'a soutenu et supporté avec beaucoup de patience pendant toutes ces années.

Timișoara, septembre 2011

Adrian ORIȚĂ

A mon épouse Alina Ștefania

ORIȚĂ, Adrian

METHODOLOGIE DE CONCEPTION INTEGREE DES PRODUITS EN CONTEXTE PLM
METODOLOGIE DE CONCEPȚIE INTEGRATĂ A PRODUSELOR ÎN CONTEXT PLM

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 40, Editura Politehnica, 2011, 225 pagini, 162 figuri, 57 tabele.

ISSN: 1842-8967

ISBN: 978-606-554-369-0

Cuvinte cheie:

inginerie integrată, PLM, concepție produs, concepție inovantă, concepție colaborativă, metodologie de concepție, epistemologie, ontologii, QFD, analiză funcțională, AMDEC/FMEA, TRIZ, costul ciclului de viață.

Rezumat:

Teza de doctorat răspunde cerințelor actuale ale industriei privind utilizarea unor metodologii de concepție inovantă a produselor care să răspundă imperativelor proprii unui context PLM.

Obiectivul lucrării este de a propune industriei o metodologie sistematică și integrată care să ghideze activitățile tuturor actorilor implicați în ciclul de viață al produsului.

Abordarea ciclului de viață al produselor prin prisma ingineriei integrate și a managementului informațiilor în context PLM care privesc sistemul-produs, constituie linia conductoare a acestei lucrări.

Noutatea adusă de metodologia propusă este constituită de integrarea unui pachet de metode de concepție în cadrul ciclului de viață cu scopul de a acompania activitățile desfășurate de toți actorii implicați în crearea de noi sisteme mecatronice începând de la idee și până la extincția produsului. Descompunerea fazelor principale ale ciclului de viață până la nivelul activităților elementare constituie un alt element atractiv pentru aplicarea metodologiei în proiectele industriale complexe.

Nu în ultimul rând menționăm că rezultatul cercetării a fost utilizat cu succes în cadrul mai multor proiecte reale dintre care am ales, în prezenta teză, să descriem numai două experiențe industriale spre exemplificare și validare.

TABLE DES MATIÈRES

SYMBOLES ABRÉVIATIONS	8
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX.....	12
1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	14
1.1 Problème de recherche	15
1.2 Les objectifs de la recherche	16
1.3 Le contexte des travaux de recherche	18
1.3.1 Contexte national suisse.....	18
1.3.2 Contexte international.....	19
1.3.3 Positionnement de notre projet	20
1.4 Construction de la démarche de recherche	21
1.5 La structure du rapport.....	24
2 LE STADE ACTUEL DES RECHERCHES	26
2.1 Introduction	26
2.2 Le contexte de l'entreprise	27
2.2.1 Caractéristiques de l'environnement de l'entreprise	28
2.2.2 Le client et le marché	30
2.2.3 Du produit industriel vers l'artéfact.....	30
2.2.4 Le projet industriel	33
2.3 Les principes de l'ingénierie intégrée et systémique.....	34
2.3.1 Du séquentiel au simultanée	34
2.3.2 L'ingénierie simultanée	35
2.3.3 L'ingénierie des systèmes.....	37
2.3.4 Le système Cycle de vie dans la perspective du PLM	40
2.3.5 Modèles de cycle de vie.....	42
2.4 Product Lifecycle Management - PLM	46
2.4.1 Introduction.....	46
2.4.2 Concepts du PLM	49
2.4.3 Produit.....	50
2.4.4 Processus	52
2.4.5 Standards de données	52
2.4.6 L'architecture du PLM.....	53
2.4.7 Les entités du PLM.....	53
2.4.8 Intégration du PLM avec les autres applications.....	54
2.4.9 Applications informatiques dans le contexte PLM	55
2.4.10 Conclusion.....	57
2.5 Le processus de conception	57
2.5.1 Intégration des besoins des clients dans la conception - QFD	57
2.5.2 L'importance de la conception	60
2.5.3 La place du processus de conception.....	63
2.5.4 Caractéristiques de la démarche de conception	64
2.6 Modèles du processus de conception	71
2.6.1 Modèle de Pahl et Beitz	72

2.6.2	Modèle de Ulrich et Eppinger	74
2.6.3	Modèle de Roozenburg et Eekels	75
2.6.4	Modèle de March	76
2.6.5	Modèle FBS	77
2.6.6	Modèle de Suh	79
2.7	Conclusions.....	81
3	LA SYNTHÈSE D'UN MODÈLE MÉTHODOLOGIQUE.....	82
3.1	Introduction	82
3.1.1	Nécessité d'une méthodologie	84
3.1.2	Difficultés de la modélisation	85
3.2	Pourquoi modéliser ?	87
3.3	Synthèse des méthodes de conception	88
3.3.1	Méthodes de recherches.....	92
3.4	L'épistémologie de la modélisation	93
3.4.1	L'investigation systémique.....	95
3.4.2	La modélisation qualitative (ou topologique)	96
3.4.3	La modélisation dynamique et la simulation	96
3.4.4	Le design des systèmes.....	98
3.5	Éléments d'une stratégie PLM	98
3.5.1	Inventaire de quelques problèmes dans le cycle de vie du produit	100
3.5.2	Product data	101
3.5.3	Product workflow.....	102
3.5.4	Gestion de la configuration	103
3.5.5	La systémique.....	104
3.5.6	Les ontologies dans une optique PLM	105
3.6	Modélisation	118
3.6.1	Le modèle « phases-activités »	119
3.6.2	Modélisation des entités génériques de conception	120
3.7	Le Plan qualité.....	126
3.7.1	Intégration des outils avec MSIC-PLM	127
3.7.2	Analyse et synthèse des besoins	128
3.7.3	Premier tri des besoins.....	130
3.7.4	Qualité demandée (QUOI)	133
3.7.5	Caractéristiques de la qualité	138
3.7.6	Matrice des interactions Objectifs-Fonctions (QUOI-COMMENT)	144
3.7.7	Validation des fonctions	145
3.7.8	Conclusions	146
3.8	Le modèle MSIC.....	146
3.8.1	Modélisation selon le formalisme flow-chart	147
3.8.2	Tableau de bord MSIC.....	154
3.9	Conclusions.....	158
4	APPLICATION INDUSTRIELLE	159
4.1	Introduction	159
4.2	Suivi du fil conducteur de la MSIC.....	160
4.2.1	Organisation du flux des travaux	162
4.2.2	Analyse et synthèse des objectifs	165
4.2.3	Analyse fonctionnelle	169
4.2.4	Recherche des priorités des efforts	180

4.2.5	Tests et essais	185
4.2.6	Recherche des solutions	186
4.3	Calcul des coûts.....	189
4.4	Processus de modification des documents	197
4.5	Application informatique de la méthodologie.....	199
4.5.1	Tableau de bord	199
4.5.2	Pilotage des activités	202
4.5.3	Edition-modification du modèle	205
4.5.4	Reporting	206
4.6	Vérification des résultats et conclusions	207
5	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	210
5.1	Rappel du cadre de la recherche	210
5.2	Validation de la méthodologie.....	212
5.3	Synthèse des contributions personnelles	213
5.4	Perspectives.....	215
	TERMINOLOGIE - GLOSSAIRE	216
	BIBLIOGRAPHIE	219

Symboles Abréviations

AD	Axiomatic Design
AF	Analyse Fonctionnelle
AMDEC	L'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité
ARIZ	Algorithm of Inventive Problem Solving
ASIT	Advanced Systematic Inventive Thinking
BOM	Bill of Materials
CAD	Computer Aided Design
CALS	Computer Aided Acquisition and Logistic Support
CCG	Conception pour un Coût Global
CCO	Conception à coût objectif
CE	Concurrent Engineering
CM	Configuration Management
CO	Coût Objectif
COD	Customer Oriented Design
CRO	Coût de Revient Objectif
DFA	Design for Assembly
DFM	Design for Manufacturing
DFR	Design for Recycling
DFSS	Design for Six Sigma
DFX	Design for X
DMU	Digital Mock-Up
DRM	Design Research Methodology
ERP	Enterprise Resource Planning
FAST	Function Analysis System Technic
FBS	Function Behavior Structure
FMEA	Failure Modes and Effect Analysis
FRs	Functional Requirements
IC	Ingénierie Concourante
IDEFO	Integration DEFinition Language
II	Ingénierie Intégrée
IIS	Ingénierie Intégrée et Systémique
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IS	Ingénierie des Systèmes
LCC	Life Cycle Cost
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PV	Prix de Vente
PVE	Prix de Vente Entreprise
PVM	Prix de Vente Marché
PVR	Prix de Vente Revendeur
QFD	Quality Function Deployment
SADT	Structured Analysis and Design Technic
SCM	Supply Chain Management
SGDT	Système de Gestion de Données Techniques
TRIZ	Teorija Reshenija Izobretateliskich Zadach
VOC	Voice of Customer
WBS	Work Breakdown Structure

Liste des Figures

Figure 1-1	DRM framework (Blessing et Chakrabarti, 2009)	21
Figure 1-2	DRM modifié, notre méthode de travail	23
Figure 2-1	L'environnement courant de l'entreprise	30
Figure 2-2	Les grandes phases d'un projet (Chvidchenko, 1974)	34
Figure 2-3	L'organisation linéaire du cycle de vie (Drăghici, 1999)	35
Figure 2-4	Gain de temps et de qualité par l'Ingénierie Simultanée (IS)	36
Figure 2-5	Les coûts engagés et réels (Drăghici, 1999)	37
Figure 2-6	Les entités des systèmes industriels	41
Figure 2-7	Cycle de vie vu par le fabricant (Stark, 2005)	41
Figure 2-8	Cycle de vie vu par l'utilisateur (Stark, 2005)	41
Figure 2-9	Cycle de vie générique (Stark, 2005)	42
Figure 2-10	Durées de vie des produits en 2003, selon (Stark 2005)	43
Figure 2-11	Product Life cycle Management - PLM (Dassault)	43
Figure 2-12	Démarche séquentielle vs. Simultanée (Drăghici, 1999)	44
Figure 2-13	Le cycle de vie d'un produit (Pahl et al, 2007)	44
Figure 2-14	La gestion du cycle de vie d'un produit (Pahl et al, 2007)	45
Figure 2-15	Le modèle spiral de cycle de vie (Boehm, 1988) et (Blanchard, 2004)	45
Figure 2-16	Le modèle générique en forme de « V » (Blanchard, 2004)	46
Figure 2-17	La gestion des entités du PLM	54
Figure 2-18	L'interaction PLM – autres applications (Saaksvuori et Immonen, 2004)	55
Figure 2-19	Analyse des exigences dans d'ingénierie des systèmes (SEF, 2001)	58
Figure 2-20	Relations entre les catégories d'exigences, selon la norme EIA-632	59
Figure 2-21	Les prestations et l'expression du besoin	59
Figure 2-22	QFD (Axiomatic Design Solutions, Inc.)	60
Figure 2-23	L'évolution du Cout Global du Cycle de vie selon (Blanchard, 2004)	61
Figure 2-24	L'engagement des coûts durant la conception, (Dieter et Schmidt, 2007)	62
Figure 2-25	L'impact des modifications sur le coût de la conception (Blanchard, 2004)	62
Figure 2-26	La position centrale de l'activité de conception (Dixon, 1966)	64
Figure 2-27	Le module de base du processus de conception (Asimow, 1962)	66
Figure 2-28	Comparaison entre les méthodes scientifique et de conception (Hill, 1970)	69
Figure 2-29	Le paradoxe de la conception (Dieter et Schmidt, 2007)	70
Figure 2-30	Les phases de conception (Pahl et al, 2007)	73
Figure 2-31	VDI2222 - Divergence et convergence (Roozenburg et Eekels, 1995)	74
Figure 2-32	Les phases du processus de conception (Ulrich et Eppinger, 2000)	74
Figure 2-33	Cycle élémentaire de conception (Roozenburg et Eekels, 1995)	75
Figure 2-34	La structure itérative de la conception (Roozenburg et Eekels, 1995)	76
Figure 2-35	Cycle de conception élémentaire de March	76
Figure 2-36	Le modèle FBS (Gero, 2006)	78
Figure 2-37	Le modèle FBS dans un environnement composé (Gero, 2006)	78
Figure 2-38	Le modèle Axiomatique (Suh, 1990)	79
Figure 2-39	Décomposition, zig-zagging et hiérarchie (Suh, 2005)	80
Figure 2-40	Les outils dans Axiomatic Design (http://www.axiomaticdesign.com/)	81
Figure 3-1	Matrice de classification Méthodes-Objectifs	85
Figure 3-2	Relations entre système et modèle	88
Figure 3-3	Exemple de relations entre système et modèle	88
Figure 3-4	Circularité de la relation sujet-objet	94
Figure 3-5	Les étapes de la démarche systémique (Donnadieu, 2008)	95
Figure 3-6	La triangulation systémique	96
Figure 3-7	Systèmes d'information dans le cycle de vie (Garetti & Terzi, 2007)	99
Figure 3-8	Stratégie PLM centrée sur le produit (Demoly, 2010)	100
Figure 3-9	Architecture d'un système de représentation de connaissances	107
Figure 3-10	L'échange d'informations entre les sous-systèmes dans l'IC	107

Figure 3-11	Ontologie commune – réduction du nombre de traducteurs.....	108
Figure 3-12	Le contexte culturel de l'ontologie (Gangemi, 2005).....	109
Figure 3-13	Collaboration comme un mécanisme d'intégration (Mostefai et al, 2005)	112
Figure 3-14	Concept de la hiérarchie de l'ontologie de produit (Mostefai et al, 2006)	112
Figure 3-15	Copie d'écran d'une hiérarchie d'une méthode de conception (Kumar, 2008)....	115
Figure 3-16	Le principe de la fusion d'ontologies	116
Figure 3-17	Concepts extraits de TOVE (Mostefai, 2001).....	117
Figure 3-18	Concepts extraits de l'ontologie Entreprise (Mostefai, 2001).....	117
Figure 3-19	Processus de fusion : PROMPT dans Protégé2000 (Mostefai, 2001)	118
Figure 3-20	Product Lifecycle Management	119
Figure 3-21	Les étapes de la modélisation d'un système (Geiger, 2000)	119
Figure 3-22	Le modèle phases-activités dans le cycle de vie.....	120
Figure 3-23	Basic module design process (Asimow, 1962).....	121
Figure 3-24	Le modèle eEPC.....	121
Figure 3-25	Elements of an Event-driven Process Chain.....	122
Figure 3-26	Les symboles EPC	122
Figure 3-27	Exemple d'un diagramme EPC.....	123
Figure 3-28	Le modèle oEPC.....	124
Figure 3-29	Modèle de description d'une activité élémentaire	125
Figure 3-30	La relation entre le Plan qualité et le QFD (Oriță et al, 2011).....	126
Figure 3-31	Intégration des « outils » dans MSIC-PLM.....	128
Figure 3-32	Le processus « Marketing » - vue partielle	129
Figure 3-33	I-ère étape : Etude du marché et définition des besoins (Oriță et al, 2011).....	129
Figure 3-34	Etape II : Analyse des besoins et spécifications (Oriță et al, 2011)	130
Figure 3-35	Exemple de classification des besoins (objectifs).....	131
Figure 3-36	Positionnement des produits primaire/secondaire	132
Figure 3-37	Gamme de transformation « en cascade »	136
Figure 3-38	Gamme de transformation « diagramme causes-effets »	137
Figure 3-39	Exemple d'une structure (architecture) du produit secondaire	137
Figure 3-40	La structure du but (Prat, 1999)	138
Figure 3-41	« Bête à cornes »	139
Figure 3-42	Verbe à l'infinitif et ses compléments.	139
Figure 3-43	Diagramme « pieuvre ».....	139
Figure 3-44	Analyse fonctionnelle FAST	140
Figure 3-45	Diagramme Fonctionnel.....	140
Figure 3-46	Principe de SADT	140
Figure 3-47	Niveau d'analyse descendante SADT	141
Figure 3-48	Bloc-diagramme fonctionnel.....	141
Figure 3-49	Faisabilité / Non-conformité	142
Figure 3-50	Les onglets du Plan qualité (I).....	146
Figure 3-51	Les onglets du Plan qualité (II).....	146
Figure 3-52	Les phases principales de MSIC	147
Figure 3-53	Organigramme simplifié de MSIC.....	147
Figure 3-54	Le premier niveau de MSIC.....	148
Figure 3-55	Organigramme simplifié de MSIC niveau II	148
Figure 3-56	Vue générale sur quatre niveaux de MSIC1 et MSIC2	149
Figure 3-57	Le deuxième niveau – détail de MSIC1 à MSIC3	150
Figure 3-58	Le deuxième niveau – détail de MSIC4 à MSIC7	150
Figure 3-59	Vue des troisièmes et quatrièmes niveaux de MSIC1.....	152
Figure 3-60	Vue des troisièmes et quatrièmes niveaux de MSIC2-a).....	152
Figure 3-61	Vue globale des flux différenciés de MSIC2	153
Figure 3-62	Vue partielle des flux différenciés de MSIC2	153
Figure 4-1	Exemples de produits finis	159
Figure 4-2	Matrice BCG.....	161
Figure 4-3	La positionnement de la BCG à travers le cycle de vie du produit.....	161
Figure 4-4	Positionnement de la gamme de produits par rapport aux marchés.....	162

Figure 4-5	MSIC1-Identification des activités spécifiques projet (détail)	163
Figure 4-6	Gestion du Tableau de bord (répertoires et fichiers).....	165
Figure 4-7	Vue générale des onglets (feuilles) du classeur Plan Qualité.....	166
Figure 4-8	Analyse Pareto des classes d'objectifs	169
Figure 4-9	Modèle du document de description d'une fonction	173
Figure 4-10	Répertoire des fiches de description fonctionnelle	173
Figure 4-11	Structure générale possible de ligne de conditionnement	174
Figure 4-12	Structure (architecture) de la ligne de conditionnement.....	174
Figure 4-13	L'organigramme technique selon le flux principal et la cinématique	175
Figure 4-14	Vue de détail de l'organigramme technique du produit - OTP.....	175
Figure 4-15	Vision systémique de l'architecture de la partie électrique.....	176
Figure 4-16	Les formats prévus de conditionnement du fromage fondu.....	176
Figure 4-17	La première phase de l'étude de la gamme de transformation	177
Figure 4-18	Gamme de transformation générale de l'emboîteuse (11 étapes).....	178
Figure 4-19	La gamme de transformation finale du produit primaire.....	178
Figure 4-20	Fonctions de l'emboîteuse.....	179
Figure 4-21	Synthèse confection des flans	179
Figure 4-22	Vue partielle de chaîne métallique de transfert	180
Figure 4-23	La fonction « Fixer le tirecel sur le flan »	187
Figure 4-24	Étude du moteur linéaire du tirecel	187
Figure 4-25	Esquisses variante 01.....	188
Figure 4-26	Éléments technologiques et de « design ».....	188
Figure 4-27	Concept « design » final avec les protections ouvertes	189
Figure 4-28	Rentabilité du cycle de vie	190
Figure 4-29	Vue générale de la structure du LCC dans la MSIC	191
Figure 4-30	Construction du Coût de Revient selon LCC	191
Figure 4-31	Fiche de calcul du Coût de revient de la machine	192
Figure 4-32	Les prix P1-P4 dans la MSIC1	193
Figure 4-33	Les coûts P5-P8 dans la MSIC2	193
Figure 4-34	Les coûts en aval du cycle de vie du système	194
Figure 4-35	Les coûts dans les MSIC3 et MSIC4.....	195
Figure 4-36	Calcul des coûts dans la MSIC2	196
Figure 4-37	Les courbes l'évolution du coût de revient pendant le projet.....	197
Figure 4-38	Le degré de l'avancement et le « status » des modifications	198
Figure 4-39	Vue partielle « Contrôle des normes »	198
Figure 4-40	Ecran de démarrage de LIPS	199
Figure 4-41	Liste des projets introduits dans LIPS	200
Figure 4-42	Tableau de bord (résumé) du projet.....	201
Figure 4-43	Les Références documentaires	201
Figure 4-44	La version du document	202
Figure 4-45	Actions critiques	202
Figure 4-46	Activités	203
Figure 4-47	Attributions.....	203
Figure 4-48	Phases modèle	204
Figure 4-49	Tâches modèle	204
Figure 4-50	Travaux méthode	205
Figure 4-51	Annuaire de documents.....	205
Figure 4-52	Choix d'un modèle	206
Figure 4-53	Libellés des sept phases de la MSIC	206
Figure 4-54	Rapport MSIC3	207
Figure 4-55	Avancement de la prestation	207
Figure 4-56	L'ensemble de la ligne de conditionnement avec l'emboîteuse	209
Figure 5-1	La convergence des 3 champs.....	212
Figure 5-2	Représentation synoptique de l'organisation de la thèse	214

Liste des Tableaux

Tableau 1-1	Structure des chapitres de la thèse	25
Tableau 2-1	Différentes vues d'un artéfact (Micaëlli et Forest, 2003)	31
Tableau 2-2	Synthèse des logiciels PLM/PDM	56
Tableau 3-1	L'évolution des modèles de conception (Micaëlli et Forest, 2003)	83
Tableau 3-2	Stratégie préfabriquées (convergence)	90
Tableau 3-3	Stratégie de contrôle (convergence)	90
Tableau 3-4	Méthodes d'exploration des situations de conception (divergence).....	91
Tableau 3-5	Méthodes de recherche d'idées (divergence et transformation)	91
Tableau 3-6	Méthodes d'exploration des structures des problèmes (transformation).....	91
Tableau 3-7	Méthodes d'évaluation (convergence)	92
Tableau 3-8	Cycle unitaire de conception (Roozenburg et Eekels, 1995)	92
Tableau 3-9	Les 3 flux au long du cycle de vie d'un système	103
Tableau 3-10	Le tableau du modèle eEPC.....	122
Tableau 3-11	Le tableau du modèle oEPC.....	124
Tableau 3-12	Le tableau du modèle de l'activité élémentaire MSIC.....	125
Tableau 3-13	L'onglet « Objectifs produit primaire/secondaire du Plan qualité	132
Tableau 3-14	L'onglet « Qualité demandée 1 »	133
Tableau 3-15	L'onglet « Qualité demandée » - histogrammes des objectifs	134
Tableau 3-16	La qualité demandée, décomposition des besoins à 3 niveaux (détail).....	135
Tableau 3-17	La qualité demandée - vue de détail.....	135
Tableau 3-18	La synthèse l'AF - onglet « Caractéristiques qualité » - vue générale.....	142
Tableau 3-19	AMDEC à partir du diagramme cause-effet (iGrafx Process 2011)	143
Tableau 3-20	AMDEC rapide avec import des fonctions depuis l'AF	143
Tableau 3-21	Matrice de la qualité	144
Tableau 3-22	Validation des fonctions	145
Tableau 3-23	Validation des fonctions (vue détaillée)	145
Tableau 3-24	Synthèse des phases MSIC3, MSIC4, MSIC5, MSIC6 et MSIC7	154
Tableau 3-25	Lignes et colonnes du tableau MSIC.....	155
Tableau 3-26	L'en-tête du tableau MSIC (vue partielle)	155
Tableau 3-27	MSIC1 en format Excel (Vue partielle de la première phase)	156
Tableau 3-28	Exemple du Tableau de bord MSIC	156
Tableau 3-29	En-tête du tableau MSIC	157
Tableau 3-30	L'en-tête du fichier MSIC	157
Tableau 3-31	La partie inférieure du fichier Excel avec les sept onglets MSIC	158
Tableau 4-1	Détail du Tableau de bord de la MSIC1 - Analyse du marché	163
Tableau 4-2	Vue partielle du Tableau de bord de MSIC11 à MSIC12	164
Tableau 4-3	Vue partielle du Tableau de bord de MSIC13.....	164
Tableau 4-4	Décomposition des classes ontologiques d'objectifs (vue partielle)	167
Tableau 4-5	Décomposition des classes d'objectifs (vue partielle, suite et fin)	167
Tableau 4-6	Critères de pondération des objectifs	168
Tableau 4-7	Pondération de la qualité cible	168
Tableau 4-8	L'onglet Qualité demandée (vue générale)	169
Tableau 4-9	Machine en porte-à-faux	170
Tableau 4-10	MSIC 121	170
Tableau 4-11	Tableau Caractéristiques de la Qualité (COMMENT) - I-ère partie	171
Tableau 4-12	Tableau Caractéristiques de la Qualité (COMMENT) - II-ème partie	171
Tableau 4-13	Tableau Caractéristiques de la Qualité (COMMENT) - III-ème partie	171
Tableau 4-14	Vue partielle de l'onglet Caractéristique de la qualité - COMMENT	172
Tableau 4-15	L'onglet « Caract_TRIZ ».....	180
Tableau 4-16	Identification de la tâche « Recherche des priorités des efforts ».....	181
Tableau 4-17	Matrice de la qualité (vue générale).....	182
Tableau 4-18	Matrice de la qualité (vue de détail).....	182

Tableau 4-19	Matrice de validation (vue partielle).....	183
Tableau 4-20	Matrice « Suivi du développement » (vue partielle)	184
Tableau 4-21	Onglet AMDEC	185
Tableau 4-22	MSIC213 Test, essais préliminaires du principe technologique.....	186
Tableau 4-23	Estimation des fonctions à partir du prix des constituants.....	194
Tableau 5-1	Validation du modèle de recherche DRM modifiée.....	213

1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Une des caractéristiques de notre époque postindustrielle est l'abondance et la variété des produits. L'exigence des consommateurs vis-à-vis de la triade : qualité, délais et coûts a augmenté ce qui détermine des profondes modifications économiques, techniques et sociales de la société contemporaine.

Les entités client, marché, entreprise, produit ont reçu des nouveaux sens et influencent d'une manière différente notre vie par rapport à quelques décennies en arrière. L'accélération des échanges modifie notre perception de la vie quotidienne à cause des modifications aux niveaux conceptuel et physique de la production des biens matériels. Nous vivons une époque dans laquelle « *le temps n'a plus de patience* »¹.

L'industrie a créé des produits pour les clients, d'une grande diversité, aux prix de plus en plus bas, et de la meilleure qualité. Ces avantages – du point de vue des clients – ne peuvent pas être obtenus, entre autres, que par une réduction significative des temps de conception et de production parce que, seule, la qualité des produits n'est plus suffisante. Dans le contexte de l'accroissement de la concurrence entre les entreprises, après la vente des produits, les entreprises continuent à avoir une activité (fournisseur de services) soutenue auprès des clients, pour s'assurer leur fidélité. Toutes les activités, depuis la conception et jusqu'au recyclage, ne peuvent pas être réalisées sans l'utilisation d'une démarche logique et unitaire obtenue par l'application d'une méthodologie complexe, mais articulé d'une manière intégrée dans le cadre d'une vision d'ingénierie systémique.

L'organisation des processus de conception, de fabrication, vente, mise en service, utilisation et recyclage des produits n'est pas une nouvelle idée. Cette recherche de l'efficacité se traduit par des profondes évolutions des modes de gestion des processus internes ainsi que par l'adoption des nouvelles formes d'organisation capables de répondre aux défis énoncés plus haut. Nous assistons à la création de nouveaux outils théoriques et de nouvelles méthodes de gestion et de conception de nouveaux produits qui modifient notre perception du tissu industriel et vont jusqu'aux modifications d'ordre social et politique.

Du point de vue historique, la recherche systématique d'efficacité a commencé par les concepts, bien connus, d'organisation scientifique du travail proposés par Frederick W. Taylor et appliqués par Henry Ford.

*« Henry Ford conçût la première ligne de montage pour la production en série, allant même jusqu'à imaginer la standardisation des pièces principales composant les divers modèles de ses voitures. Ce procédé, qui lui permit de fabriquer jusqu'à 250'000 Ford T par an, influença toute l'industrie mécanique jusqu'au milieu des années 50 »*².

Depuis, dans les milieux industriels on a bien compris que la conception n'est pas seulement l'utilisation des découvertes scientifiques, mais que dans

¹ « Timpul nu mai are răbdare », selon l'écrivain roumain Marin Preda.

² Widmer Mario, *Modèles mathématiques pour une gestion efficace des ateliers flexibles*, Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1991, 149 p., (collection META), (ISBN 2-88074-206-4), p. 3.

l'espace restée inoccupée entre la recherche scientifique et la production des biens matérielles se situe l'art de l'ingénieur concepteur.

Bien que Simon parle d'une science de la conception (*Science of Design*) dans son livre *Science of the Artificial* (Simon, 1981) beaucoup traitent avec un certain scepticisme le terme « *design science* » (Blessing et Chakrabarti, 2009). Même si les avis sur le sujet n'ont pas encore tranché si la conception « mérite » le statut de science on ne peut que remarquer : la relative jeunesse de la discipline, l'implication des chercheurs provenant des disciplines diverses et l'emploi des méthodes et outils créés et utilisés dans d'autres champs de recherches (Cantamessa, 2001). Par ceci, beaucoup d'auteurs ont remarqué que la science de la conception a, autant par rapport aux contours que par rapport au contenu, une identité qui reste à construire.

Le présent travail de recherche s'inscrit donc dans le domaine de la l'ingénierie industrielle et plus particulièrement à la conception et a comme but, en utilisant les termes généraux utilisés par Horváth, de « *générer des connaissances sur la conception et pour la conception* » (Horváth, 2001).

En même temps, du point de vue personnel, nous avons essayé pendant notre recherche de ne pas succomber complètement à une certaine « *euphorie terminologique* »³ qui caractérise la spécialisation à outrance couplée à une ambition méthodologique démesurée qui ne laissent plus de place à la créativité connecté à l'interrogation vivante de la réalité.

1.1 Problème de recherche

Par rapport à la situation décrite précédemment et dans le contexte des changements intervenus dans le contenu de l'activité de conception, depuis le XXème siècle - tendance de formalisation et de migration vers le domaine des sciences - l'activité de recherche développée dans cette thèse essaie de répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que les caractéristiques de l'activité de conception actuelle correspondent-elles aux contextes industriel, social et politique actuelles ?
- Quelles sont les tendances actuelles en matière de processus de conception et selon quelles caractéristiques communes peut-on les classer ?
- Comment peut-on modéliser le processus de conception innovante et intégrée adapté au cycle de vie d'un produit dans un contexte PLM ?
- Peut-on tester un modèle méthodologique de conception dans le cadre d'une application industrielle réelle : conception d'un système mécatronique ?

³ Andrei Pleșu, Firescul cercetării (La recherche naturelle), www.dilemaveche.ro.

1.2 Les objectifs de la recherche

Le projet s'inscrit dans le domaine de l'ingénierie industrielle et se positionne plus précisément sur les processus de conception innovante lancés dans chaque bureau d'étude ou d'une Ra&D d'une entreprise, lorsqu'un nouveau produit⁴ devrait être créé. Le pivot de l'activité de création de nouveaux produits est représenté par la phase de conception. Si nous voulons modéliser le cycle de vie complet des produits on doit s'intéresser, principalement, à l'activité créatrice de valeur qui est la conception. Beaucoup d'études indiquent, par exemple, que le coût d'un produit est défini en proportion d'environ 75% durant la phase de conception.

La conception (activité humaine) a, de tous temps, impliqué la mise en œuvre de modèles, méthodologies, méthodes et outils. L'histoire récente a vu l'attention portée à l'étude et au développement de ces modèles, outils et méthodes croître. Alors que les efforts dirigés vers le progrès industriel se sont longtemps adressés aux activités de production, l'importance de l'étape de conception sur la compétitivité des produits industriels en a fait un sujet d'étude privilégié, considéré comme le moteur de la réussite sur les trois plans : Qualité, Coûts et Délai de mise sur le marché. Les organisations industrielles ont changé afin de répondre à ces impératifs. Aux organisations séquentielles, cloisonnées par une hiérarchie professionnelle et culturelle, ont succédé les plateaux projets, la conception parallèle, l'ingénierie concurrente ou simultanée et le travail collaboratif (Roucoules et al, 2006). Ces nouvelles organisations se destinent à mettre en œuvre des processus de conception plus courts par la parallélisation des tâches en intégrant les acteurs de tout le cycle de conception et de fabrication au plus tôt dans le processus de conception. Dans un sens plus large, il s'agit, maintenant, d'intégrer les acteurs, actuels ou futurs de l'ensemble du cycle de vie du produit et les valeurs de tous ses acteurs, environnement et monde social compris. Pour cela il faut résoudre un problème de conception de plus en plus :

- **Complexe** : il faut intégrer les valeurs, les points de vues, les objectifs d'un nombre croissant d'acteurs. Cette intégration concerne aussi bien le produit (dont les performances sont techniques, économiques, environnementales...) ou le processus qui y mène (les tâches sont nombreuses, non indépendantes, les acteurs sont nombreux et doivent collaborer efficacement dans la résolution de ces tâches).
- **Mal défini** : la réactivité imposée par le marché, la rapidité de l'évolution du monde actuel font de la conception une activité nécessairement innovante. Il ne s'agit plus de répondre à un marché où la demande s'adapte à l'offre, mais de concevoir aussi bien le problème auquel le produit répond, le besoin qu'il remplit que la solution qui va être vendue. Les problématiques du développement durable ont de plus fait surgir la nécessité de répondre à des problèmes intrinsèquement inconnus : comment optimiser un produit pour sa fin de vie alors que les procédés de traitement des produits ne sont pas encore inventés ?
- **Ouvert** : les nouvelles technologies et matériaux visent des domaines de

⁴ Le même processus de conception innovante doit être utilisé aussi dans le cas du re-engineering des produits existants.

plus en plus larges.

D'autre part, dans une approche PLM (*Product LifeCycle Management*) nous constatons qu'il manque, un véhicule, porteur du sens des exigences du client et de la conception (transformation des données en information et en connaissance, selon Jongho Shin entre les clients et les métiers marketing, conception et industrialisation (Shin, 2009). Cette communication doit démarrer très tôt, en amont, dans le projet de création d'un nouveau système industriel mécatronique (produit) et elle doit être maintenue et enrichie (avec des informations à jour) pendant tout le cycle de vie du produit. Selon notre analyse, dans le contexte décrit ci-dessus, parmi les causes principales de l'insuccès des projets industriels de conception⁵ figurent :

- L'inadéquation entre les besoins des clients (exigences), les spécifications techniques (les fonctions) et les solutions proposées pour résoudre les problèmes posés. En effet, les attentes du client sont mal « traduites » en termes de solutions sur le produit. On constate une mauvaise communication entre le client, le marketing, et les départements de conception et d'industrialisation. D'où un réajustement coûteux des objectifs des clients.
- Le manque d'outils méthodologiques pour la pérennisation et la transmission structurée du savoir entre les métiers et entre les membres, plus ou moins informés, des équipes de projets.

Nous pensons que la bonne direction de résolution de la problématique énoncée plus haut est à rechercher dans le contexte spécifique du processus de conception innovante où chaque métier possède ses propres méthodes. Dans le cadre des équipes pluridisciplinaires, on ressent le besoin de faire communiquer les spécialistes en utilisant le même outil méthodologique intégré de conception innovante, porteur des informations justes du futur produit. Offrir aux concepteurs des modèles, méthodes et outils qui supportent de façon efficace et efficiente leur travail dans un contexte de conception intégrée relève donc d'une problématique très large.

L'évolution soulevée plus haut (celle des organisations industrielles) pose la question de la représentation, la description, la modélisation des processus de conception dans un contexte d'ingénierie intégrée et nous incite à poser une question liminaire : *Peut-on créer un outil transversal qui puisse concilier les exigences du client avec les contraintes de la conception et de l'industrialisation ?*

Dans le cadre du présent projet nous nous proposons donc de répondre à cette question, à caractère novateur, et nous nous fixons les objectifs généraux suivants :

- Analyse de l'état actuel des recherches méthodologiques dans le domaine de l'ingénierie intégrée.
- Représentation, description et modélisation des processus de conception dans un contexte mécatronique.

⁵ D'après les études du Standish Group - Chaos (2009) le taux de réussite moyen d'un projet reste assez faible :

32% - projets terminés dans les temps, respectant le budget et livrés complets ;
44% - projets livrés en retard et/ou avec dépassement budgétaire et/ou avec ajustements ;
24% - projets annulés ou non utilisés après livraison.

- Proposition d'un modèle méthodologique d'ingénierie intégrée.
- Intégration des outils d'innovation dans le cadre du modèle créé, en ne considérant pas l'innovation comme un phénomène influant, mais comme un objet d'étude à part entière (Le Masson et al 2006).
- Création des méthodes de définition et validation des paramètres d'industrialisation.
- Test et validation de l'outil méthodologique trouvé dans une application industrielle.

Les contributions novatrices de ce projet seront de type théorique et méthodologique. La modélisation de ce processus et la création d'un outil méthodologique – de type mixte prescriptif et descriptif - qui intégrerait les techniques de créativité (pour trouver les solutions qui correspondent au mieux aux fonctions trouvées) constituent, pour nous, la nouveauté et, en même temps, le problème à résoudre dans le cadre du présent projet. Ceci éviterait, aussi, la discontinuité dans le transfert des compétences entre les acteurs et garantirait, ainsi, la pérennité du savoir. Contrairement à d'autres méthodes existantes qui visent l'enchaînement des actions à faire le modèle proposé peut être utilisé plus tôt dans la conception, quand les alternatives de conception d'un système mécatronique sont définies d'une manière imprécise.

1.3 Le contexte des travaux de recherche

Ce doctorat a été réalisé dans le cadre des travaux effectués au sein du laboratoire LI3C de la Haute École d'Ingénieurs et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) d'Yverdon – Suisse et de collaboration avec le Centre de Recherche en Ingénierie Intégrée de l'Université Polytechnique de Timisoara – Roumanie. Le dénominateur commun de ces travaux est constitué par la recherche méthodologique ayant comme but principal l'optimisation des activités de conception innovante et intégrée des systèmes industriels mécatroniques. Cette recherche se concentre sur la vie du produit vu comme système dans le cadre général de son cycle de vie. En même temps, nous analysons le changement de paradigme : la demande du client évolue du système *produit-processus* vers le système *produit-services*. Notre contribution s'inscrit aussi dans le cadre général du domaine de l'Ingénierie Intégrée et Systémique (IIS) et du Product LifeCycle Management (PLM).

1.3.1 Contexte national suisse

« *La recherche de nouvelles idées originales est indispensable au développement d'une entreprise. Mais beaucoup d'entrepreneurs n'y consacrent pas assez de temps, ou s'y prennent mal.* » [Portail PME de la Confédération Helvétique, 2006]⁶

⁶ Portail PME de la Confédération, (2006). Comment générer les bonnes idées. [Document online]. <http://www.kmu.admin.ch/aktuell/00305/00430/00477/index.html?lang=fr>. Page consultée le 25.01.10.

Les travaux de notre thèse s'inscrivent aussi dans les recherches commencées par V. Hubka et W. Ernst Eder (de l'EPFZ) avec la référence « *Theory of technical systems – A total concept theory for engineering design* » (1984). Les auteurs cités ont apporté une importante contribution à la constitution d'un « *co-ordinated and codified body of knowledge* » avec l'accent sur la mise en évidence d'une méthodologie du processus de conception de systèmes industriels. L'ouvrage *Design Science* (1996) de Hubka et Eder constitue un « état de l'art » de ce qu'est aujourd'hui la science de la conception : ses fondements, ses domaines, ses principaux auteurs ; il faut noter qu'Hubka est un des fondateurs des *International Conferences on Engineering Design* (ICED) et qu'il est directeur à Zürich d'une structure de recherche sur la conception : « *WDK – Workshop Design – Konstruktion* ».

Nous signalons aussi les travaux dans le même domaine effectués par le professeur Paul Xirouchakis à l'EPFL.

1.3.2 Contexte international

(Perrin, 2001) cite J. de Vries (Vries, 1993) qui note dans son ouvrage *Design Methodology and Relationships with Science*, qu'il y a deux cultures dans le champ de recherche qu'est la méthodologie de conception :

- a. La prescription des activités de conception en fonction des étapes nommément repérées ; l'auteur défend l'idée qu'il est possible de développer un modèle du processus de conception, quel que soit le problème de conception à résoudre et la nature des connaissances utilisées.
- b. Le deuxième courant s'intéresse plus aux aspects philosophiques de la conception et focalise ses travaux sur l'environnement social et scientifique qui structurent et orientent les activités de conception.

Le présent projet de recherche s'inscrit plutôt dans le premier courant qui considère un système industriel comme un artéfact dans le sens donnée par Herbert Simon dans l'ouvrage « *The Science of the Artificial* » (1969). Ainsi, la modélisation du processus de conception recherchée dans ce projet se situe dans le domaine des sciences de l'artificiel par opposition aux sciences naturelles.

Un des modèles très connu est celui de (Pahl et al, 2007) ou le processus de conception systématique présenté comme une succession de phases. Nous signalons aussi l'importante contribution de Suh connue sous le nom d'*Axiomatic Design* (Suh, 2005). La conception axiomatique est une méthodologie de conception de systèmes utilisant des méthodes matricielles pour analyser systématiquement la transformation de besoins clients dans des exigences fonctionnelles, des paramètres de conception et des variables de processus. Cette méthodologie de conception aborde aussi des questions fondamentales des méthodes Taguchi (plans d'expériences) dans le domaine des variables de processus. La méthodologie a été développée par docteur Suh Nam Pyo au MIT (au Massachusetts Institute of Technology), le Département de Construction mécanique depuis les années 1990. La Conférence Internationale la plus récente de la Conception Axiomatique (ICAD) a été tenue en 2011 en Corée.

Nous ne pouvons pas terminer cette courte et non-exhaustive incursion dans le contexte international de notre problématique⁷ sans mentionner le modèle unifié de la conception ou « *théorie C-K de la conception* » (Hatchuel et al, 2004). L'approche de ce modèle est caractérisée par le fait que l'identité de l'objet (produit) ne soit pas donnée dès le départ, la production des connaissances n'est pas restreinte mais accepte aussi des formes plus restrictives de conception, plus routinières.

1.3.3 Positionnement de notre projet

Grâce à une nouvelle méthodologie interdisciplinaire interconnectant marketing, ingénierie et industrialisation, nous proposerons un nouveau modèle pour améliorer les activités principales afin de générer une meilleure traduction des besoins des clients et rendre les systèmes industriels conformes aux exigences du client (par la définition du produit nous entendons le processus de transformation des besoins client en fonctions du produit). Dans la pratique des bureaux d'études on confond trop souvent fonctions et objectifs et plongent trop vite sur des solutions techniques analogues. Au niveau marketing il manque une intégration plus précise des informations venant du marché, souvent très floues. Selon les résultats de l'enquête menée auprès de l'industrie il résulte le manque de méthodologie de conception et de modélisation (fil conducteur) du processus de déroulement de projets innovateurs de conception.

Le projet se situe dans le contexte plus général des recherches sur la modélisation de la conception des produits industriels et la reconnaissance du rôle de la conception dans les activités d'innovation. Par « modèle » nous désignons « *une abstraction de la réalité qui ressemble suffisamment à l'objet modélisé pour qu'il soit possible de répondre à certaines questions concernant cet objet, en consultant le modèle* ». On qualifie le modèle de « bon » s'il permet de trouver les réponses à « *l'ensemble de questions avec une bonne tolérance* » (Lissandre, 1990). Ainsi par exemple, « *les modèles de conception sont des représentations des philosophies et des stratégies proposées pour montrer ce qu'est la conception et comment elle peut être mise en œuvre* » (Evbuomwan et al, 1996). Concernant les modèles qui guident et organisent l'action des agents mobilisés en innovation, Perrin avertit qu'« *il est impossible de rendre compte à partir d'un seul modèle de la diversité des caractéristiques des processus d'innovation* » (Perrin, 2001).

A la suite de la publication des travaux de (Kline et Rosenberg, 1986) et (Aoki et Rosenberg, 1987), la recherche fondamentale comme première force d'impulsion de l'innovation a commencé à être remise en question au profit des activités de conception. La reconnaissance du rôle stratégique de ces dernières dans les processus d'innovation est confirmée par plusieurs études et enquêtes menées principalement en Grande-Bretagne durant les années 1970-1980, et plus récemment aux Etats-Unis. Il est alors possible d'identifier une grande partie des modèles de processus d'innovation aux processus de conception et de développement de produit.

On peut résumer ceci par un axiome : « *pas d'innovation sans conception, pas d'innovation sans entreprise, pas d'innovation sans sanction par le marché* »

⁷ L'état de l'art des modèles méthodologiques sera développé plus amplement dans le chapitre 2.

(Perrin, 2001). Dans ce contexte, l'utilisation des techniques de créativité dans le processus de conception à travers des outils qui permettent de produire des solutions créatives est encore à ces débuts. A notre avis les outils existants n'ont pas encore atteint un degré convenable de « compatibilité » entre les métiers. Ainsi, les méthodes existantes, comme KANO⁸, QFD, TRIZ, Plans d'expériences, et les articulations et passerelles entre elles, etc. constituent encore des « citadelles » difficiles à conquérir par le concepteur habitué plutôt à manier les outils de calcul, CAO ou autres. Ainsi les outils méthodologiques sont assez fermés entre eux et aussi par rapport aux domaines externes propres aux concepteurs.

1.4 Construction de la démarche de recherche

Selon (Blessing et Chakrabarti, 2009) la recherche dans le domaine de la conception a deux objectifs :

- La formulation et la validation des modèles et théories sur la conception,
- Le développement et la validation des outils trouvés sur la base de ces modèles et théories dans le but d'améliorer la pratique de la conception.

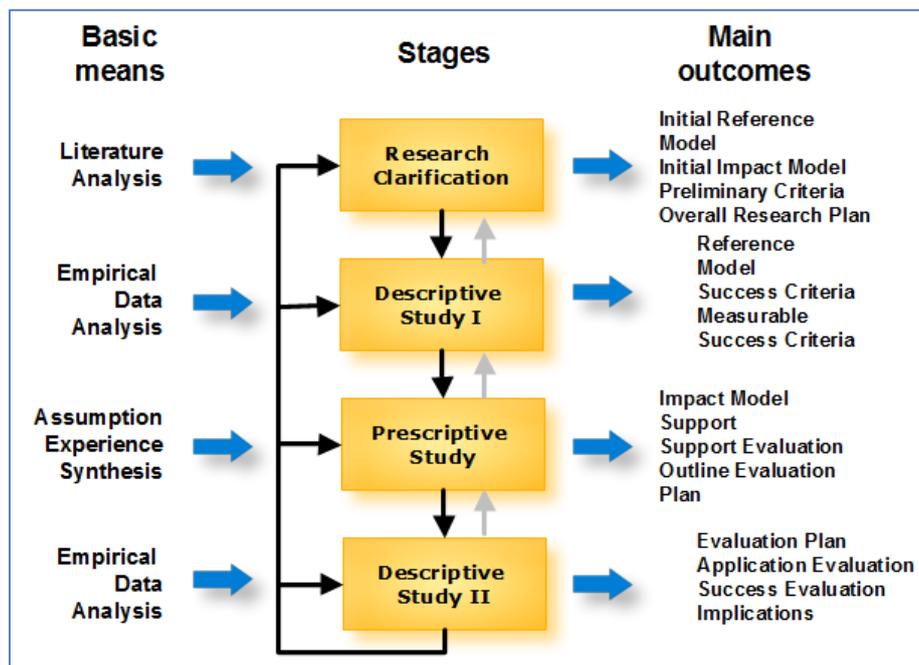


Figure 1-1 DRM framework (Blessing et Chakrabarti, 2009)

Les auteurs cités précédemment ont synthétisé un modèle de recherche

⁸ La méthode Kano permet de comprendre en quoi les différents éléments composants un produit contribuent à la satisfaction de l'utilisateur.

appelé DRM (Figure 1-1). Celui-ci représente une approche méthodologique à utiliser comme un « *framework* » par ceux qui font de la recherche dans le domaine du « *design* ». Le terme anglais a été utilisé ici en vertu de son contenu plus étendu et complexe que sa traduction française « *conception* ». Le flux de recherche du modèle DRM est constitué par quatre étapes :

- *Research Clarification* (RC)
- *Descriptive Study I* (DS-I)
- *Prescriptive Study* (PS)
- *Descriptive Study II* (DS-II)

Dans le cadre de notre travail, étant donnée sa complexité, le modèle de recherche DRM ne peut pas être utilisé d'une manière rigide et linéaire. C'est aussi le souhait exprimé par les auteurs dans l'ouvrage cité plus haut. Pour la partie de recherche et pour atteindre les objectifs, énoncés plus haut, pour ce type (méthodologique) de projet nous envisageons l'utilisation des méthodes de recherche scientifique suivantes :

- Clarification des objectifs, questionnaires, entretiens avec les acteurs du domaine.
- Établissement de l'état de l'art des méthodes de conception innovante.
- Établissement des critères et des étapes d'analyse des outils méthodologiques de détection des exigences clients ; utilisation rationnelle de méthodes de pondération et de hiérarchisation des besoins du client ; formalisation et traçabilité des documents avec des outils tels que les matrices et la « Maison de la qualité ».
- Tests d'hypothèses : validation du modèle par la confrontation auprès des pairs.
- Constitution d'un modèle théorique, tests du modèle, validation selon des critères sélectionnés.
- Validation de l'outil au travers de focus groups spécifiques.

Et les formes canoniques de raisonnement :

- Analyses et validation d'un modèle de résolution de problèmes⁹ adapté à l'environnement industriel.
- Synthèse d'un modèle théorique d'outils méthodologiques.

Les types de raisonnements¹⁰ et d'inférences utilisés dans ce projet de recherche seront :

- Divergence : pour élargir les frontières de la situation de conception pour élargir l'espace de recherche de solutions.
- Transformation : l'action de construire, à partir des résultats de la logique

⁹ Selon les travaux de Herbert Simon, nous adoptons l'hypothèse simplificatrice (en étant conscient de ses limitations qui peuvent être enlevés par une approche de type C-K de la conception) de restreindre la spécificité d'une théorie de la conception en affirmant qu'elle sera proche d'une théorie de la résolution de problèmes. Ainsi, « *When we study the process of design we discover that design is problem solving. If you have a basic theory of problem solving then you are well on your way to a theory of Design* » (Simon, 1991).

¹⁰ Selon (March, 1984) : « *Déduction prouve que quelque chose doit être, induction montre que quelque chose est opérant (opérative), abduction suggère simplement que quelque chose peut être* ».

de divergence, une structure, un modèle, une solution (phase de découverte et de créativité).

- Convergence : réduction progressive de l'incertitude due à la multiplicité des solutions possibles afin de sélectionner la solution la plus satisfaisante.

Dans la Figure 1-2 nous avons fait la synthèse de la méthode utilisée dans ce projet en intégrant les éléments provenant de (Blessing et Chakrabarti, 2009) au contexte propre de recherche. Nous avons intégré les types de logique et les formes canoniques de raisonnement utilisés dans la succession des étapes du projet. Néanmoins, cette succession présente un caractère flexible et au fur et à la mesure du déroulement du projet la méthode s'adaptera aux situations spécifiques de recherche et surtout aux itérations inhérentes à ce type d'activité.

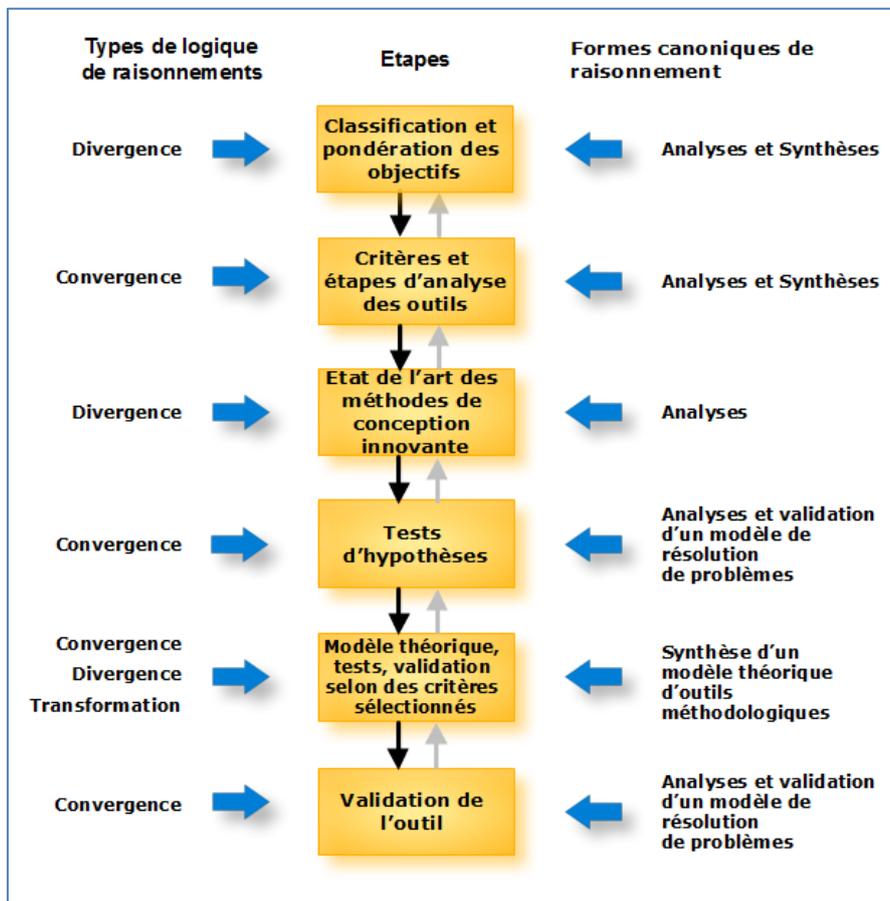


Figure 1-2 DRM modifié, notre méthode de travail

1.5 La structure du rapport

Le rapport de thèse est structuré en 5 chapitres principaux complétés par une annexe et la bibliographie (voir, plus loin, le Tableau 1-1).

Le **chapitre 1** introduit le problème et les objectifs de recherche dans le contexte national suisse et international. De cette analyse on distingue clairement le positionnement de notre projet de recherche ce qui permet de construire la démarche de recherche et d'identifier la méthode appropriée pour atteindre les objectifs proposés.

Selon la méthode adoptée au premier chapitre nous allons nous consacrer, dans le **chapitre 2**, à l'analyse du stade actuel des recherches sur les méthodologies de conception dans le domaine de l'ingénierie intégrée. Le chapitre débute avec l'analyse du contexte économique-social de l'entreprise et continue avec la description des notions clés comme l'ingénierie intégrée, le « *PLM – Product Lifecycle Management* » et le cycle de vie de vie du produit. Ensuite, ces concepts seront traités dans le cadre du processus de conception considérée comme l'activité principale dans le cadre de la création des produits-système. Dans la dernière partie du chapitre 2, l'inventaire des modèles existants du processus de conception innovante constitue le but principal du travail d'analyse de type convergent (conformément à la Figure 1-2).

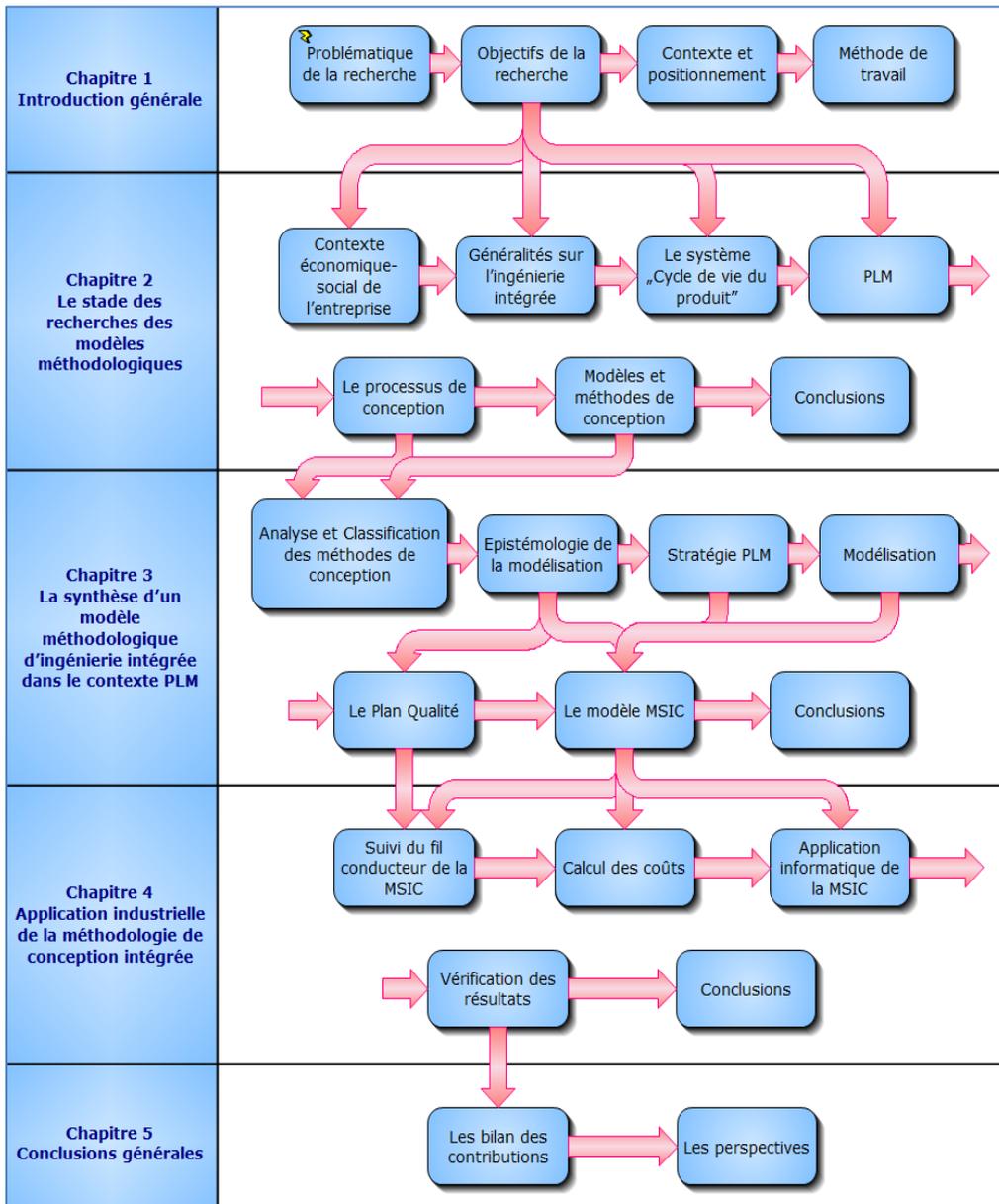
En accord avec la méthode de travail que nous nous sommes imposée, le **chapitre 3** débute avec une activité de type convergent, de synthèse, par la classification des méthodologies de conception. Ensuite un sous-chapitre entier est consacré à l'épistémologie de la modélisation dans le but de faire « *l'étude de la constitution des connaissances valables* » dans un contexte épistémologique. Dans le cadre de notre recherche nous avons appliqué la méthode « *d'observation participante* » (Donnadieu, 2008) en impliquant le sujet dans le processus d'observation de l'objet. Pour nous l'objet (ou le modèle) est représenté par la multitude de processus appartenant au cycle de vie du produit. En adoptant l'approche systémique on peut identifier, dans le processus de modélisation, trois grandes étapes : investigation systémique (construction de l'objet), modélisation qualitative, modélisation dynamique et simulation. Nous avons continué le chapitre en faisant l'analyse (divergence, selon notre méthode de travail) de quelques éléments indispensables pour la création d'un modèle intégrée représentant le cycle de vie : le *product data*, le *product workflow* et la gestion de la configuration. Comme ces éléments ne peuvent pas être intégrés sans une bonne compréhension de la systémique et de l'ontologie des systèmes nous avons abordé également ces notions dans des sous-chapitres séparées. Suite à ces acquis nous adoptons les éléments de modélisation (dans la phase de transformation) qui constitueront la base de la construction de notre modèle. Le chapitre fini avec la description du modèle MSIC et de quelques outils qui font partie intégrante du cycle de vie.

Ayant besoins de montrer la validité du modèle créé précédemment nous présentons dans le **chapitre 4** l'application du modèle méthodologique dans le cadre d'un projet industriel. Nous mettons l'accent dans cette présentation sur la manière de suivre le fil conducteur de la méthodologie dans le cadre du projet industriel choisi et nous ajoutons encore quelques éléments importants qui ont fait le succès de cette application : les coûts, l'innovation et la circulation de l'information. Pour montrer la capacité de la méthodologie de s'adapter à des outils de travail variés nous décrivons succinctement l'application informatique de la MSIC.

Le **chapitre 5** conclut le présent rapport de thèse en faisant le bilan des contributions et en esquissant les perspectives ouvertes par les résultats de notre recherche.

Une annexe dédiée à la terminologie et à la bibliographie est présentée à la fin de ce rapport de thèse.

Tableau 1-1 Structure des chapitres de la thèse



2 LE STADE ACTUEL DES RECHERCHES

2.1 Introduction

La raison d'exister du présent chapitre se trouve dans la ligne des objectifs fixés dans le Chapitre 1.4 : analyse divergente du stade des recherches sur la modélisation des processus de conception dans le contexte PLM et de l'état de l'art des méthodes de conception innovante.

Nous constatons aujourd'hui que les sources de richesse des pays les plus développés sont : la taille de leur population, l'abondance de leurs ressources naturelles et l'efficacité de leurs techniques de production. A ceci s'ajoutent « l'efficacité du système de gouvernement, l'art local d'administrer les choses et les gens » (Perrin, 1991). Mais, en plus de ces éléments, on cite, parfois avec beaucoup de respect, les systèmes de « techniques » de pointe qui se manifestent dans la conception de produits et qui donnent l'avantage concurrentiel à l'Occident et au Japon.

Nous assistons à une prolifération de ces concepts (ou de ces « techniques »), encore plus accentuée dans le contexte de la globalisation –visible par des acronymes plus ou moins « initiatiques » - visant l'organisation scientifiques des activités de création de produits. Ces concepts ont accompagné le développement des outils visant à améliorer, d'abord l'appareil de production, et ensuite, en remontant le cycle de vie des produits, les domaines de la conception et du marketing. Suivant cette évolution, les préoccupations se sont matérialisées dans la création des outils, méthodes ou méthodologies qui ont le rôle – souhaité, du moins - d'améliorer la productivité des entreprises. Nous citons dans cette multitude de concepts, dans le désordre : CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), CAD/CAM (*Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing*), TRIZ (l'acronyme russe de la Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs - *Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch* (Теория Решения Изобретательских Задач - ТРИЗ)), GMP (*Good Manufacturing Practices*), FMS (*Flexible Manufacturing System / Flexible Machining System*), DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*), TQC (*Total Quality Control*) etc.

Tous ces concepts sont mis au service de l'effort de produire plus vite des produits de meilleure qualité et moins chers que la concurrence. Ceci représente aussi la raison d'être d'une entreprise. En effet, le client, le bénéficiaire ultime du produit, est celui qui, par ses choix dans un marché varié et complexe, permet à l'entreprise d'exister. Le degré de satisfaction du client constitue une garantie et une confirmation pour le travail qui s'effectue à l'intérieur de l'entreprise. Le client va acquérir les produits qui correspondent le mieux à ses besoins et qui viennent de l'entreprise dans laquelle il a le plus de confiance. En réponse à ces contraintes, les entreprises ont su répondre, dès le début du développement industriel, par l'introduction de nouvelles méthodes et outils qui ont augmenté la compétitivité et la capacité de répondre d'une manière appropriée à l'évolution changeante des marchés. Un des grands pas en avant dans cette direction a été constitué par l'application du concept de « *concurrent engineering* ». L'objectif principal visé par

cette introduction a été de réduire les délais de mise sur le marché des produits (*Time to market*) et d'assurer le suivi des produits pendant tout le leur cycle de vie. Les concepts de cycle de vie et de l'approche holistique connectent et intègrent entreprise et marché, acteurs du processus de conception et clients, monde économique et société : « ...société holiste, intégrant individus et traditions. » (Baconsky, 1996).

L'activité de conception peut être caractérisée par :

- une incidence sur presque tous les domaines de la vie humaine,
- l'utilisation des lois de la science,
- l'appui sur une expérience particulière,
- l'apport des conditions nécessaires à la réalisation physique des solutions,
- l'exigence de l'intégrité professionnelle et de la responsabilité.

Dixon et Penny (Pahl et al, 2007) ont placé le travail des concepteurs au centre de l'intersection de deux flux : culturel et technique (voir la Figure 2-26).

Dans ce qui suit nous essayons de décrire quelques éléments de la compétitivité : l'entreprise, le cycle de vie des systèmes dans le cadre du concept de PLM, la conception et le concept d'ingénierie intégrée.

2.2 Le contexte de l'entreprise

Si à la fin du XIX^{ème} et au début du XXI^{ème} siècle les efforts d'amélioration portaient sur la rationalisation et la standardisation de la production¹¹, à partir des années '50, grâce à l'apparition de l'informatique, nous voyons comment l'ordinateur devient l'interface privilégiée entre l'homme et l'environnement de son travail¹². Dans ce contexte, nous voyons la prolifération de « techniques » ayant pour but d'améliorer les premières phases du cycle de vie du produit. Nous constatons donc une couverture beaucoup plus large de la vie du produit, avec un intérêt certain pour les phases en amont où l'information sur le produit est plus volatile. On voit l'apparition de concepts tels que : CALS (*Computer Aided Acquisition and Logistic Support*), CE (*Concurrent Engineering*), SE (*Simultaneous Engineering*), IPD (*Integrated Product Development*) etc. L'évolution de ces concepts a abouti dans le syntagme d'*Integrated Engineering* (IE), qui englobe les notions citées auparavant. Nous pouvons citer encore d'autres concepts dans le même contexte : Conception distribuée, Conception collaborative, etc.

Du point de vue sémantique, nous allons adopter, pour les termes « concepts » ou « techniques » utilisés plus haut, le mot « méthodologie ». Ce

¹¹ Henry Ford doit notamment son succès au fordisme, un mode de développement inspiré du taylorisme basé sur la rationalisation et la standardisation. La rationalisation, ou plus simplement la décomposition de l'activité de l'ouvrier en tâches élémentaires conduit à une simplification et une normalisation ainsi qu'une augmentation conséquente de la productivité. La standardisation quant à elle permet « l'utilisation de pièces standards parfaitement interchangeable dans la construction et la maintenance du véhicule ». (http://fr.wikipedia.org/wiki/Henry_Ford#La_Ford_T_ou_un_mode_de_production_r.C3.A9volutionnaire).

¹² La CAO est née aux États-Unis à la fin des années 50, quand General Motors et le Massachusetts Institute of Technology ont imaginé de dialoguer avec un ordinateur; il est possible de situer les débuts de cette application vers les années '65 avec, malgré tout, un caractère très exceptionnel. (<http://z.mecanoman.13.fr/cao-meth-concep.pdf>)

terme exprime, en général, la branche de la logique étudiant les méthodes des différentes sciences. Dans notre recherche le mot désigne l'ensemble des règles et des démarches adoptées pour conduire les processus d'ingénierie intégrée engagée par rapport au cycle de vie d'un produit. Dans ce sens, l'II (l'Ingénierie Intégrée) peut être défini comme « *une méthodologie qui permet une conception intégrée et simultanée des produits et de leurs processus associés* » (Drăghici, 1999).

Une autre caractéristique de l'évolution industrielle est représentée par l'arrivée à la maturité de la relation entre le client et l'entreprise et leur positionnement par rapport aux produits. Dans ce sens, le statut du client est passé de celui d'un acheteur passif à celui d'un partenaire (Perrin, 1991), consulté, surtout, avant et pendant la conception du produit¹³. Par conséquent, le client devient un acteur à part entière faisant partie du cycle de vie du produit et nous pouvons mentionner, parmi les méthodes qui intègrent les besoins des consommateurs le plus tôt possible dans la conception, celle de COD (*Customer Oriented Design*). Le marché de la consommation en rapide évolution a encouragé de nombreux concepteurs à créer des produits qui sont étroitement liés aux besoins psychologiques du consommateur. Plusieurs méthodes ont été introduites, pour aider à la fixation des objectifs de conception, mais la plus remarquable est la KE (*Kansei Engineering*). Celle-ci aide à la traduction et à l'introduction des sentiments de l'Homme dans les paramètres de conception.

Dans une économie globale, l'entreprise a évolué, depuis les débuts de l'application du concept CIM, vers une entité « *...fractale-étendue-virtuelle-concurrente, dans laquelle la conception des produits se réalise sur la base des principes de l'ingénierie intégrée* » (Drăghici, 1999).

2.2.1 Caractéristiques de l'environnement de l'entreprise

La compréhension du contexte global de l'entreprise est une condition *sine qua non* de l'application des concepts de l'ingénierie intégrée dans la conception de nouveaux produits. Ces dernières années, nous constatons une accélération de l'apparition des divers phénomènes – assez souvent contradictoires – qui interviennent dans la vie des entreprises. Les essais de description de l'entreprise et de son environnement sont souvent dépassés par la vitesse de changement des facteurs qui agissent sur l'entreprise en tant que système en interaction avec d'autres systèmes : politique, législatif, économique, social etc. Mais, malgré cet environnement complexe et en continue mutation nous pouvons dégager une caractéristique qui régit l'existence même d'une entreprise : toutes les activités d'une entreprise se développent autour d'une entité qui est le produit. L'acceptation de celui-ci par les marchés garantit la pérennité de l'entreprise. Voici quelques caractéristiques de l'environnement de l'entreprise selon (Blanchard, 2004) (Figure 2-1):

1. La demande est changeante. La demande de nouveaux systèmes change constamment à cause de l'évolution dynamique des marchés et de

¹³ Jean-Pierre Vernant - historien et anthropologue français, spécialiste de la Grèce antique et plus spécialement des mythes grecs – analyse « ce qu'étaient les « Technai » en Grèce où l'utilisateur d'un produit était conçu comme supérieur à l'artisan qui l'avait fabriqué parce qu'il avait connaissance exacte de son usage. Donc de son essence. » (Selon l'ouvrage coordonné par Jacques Perrin « Construire une science des techniques », page 9).

l'introduction continue de nouvelles technologies.

2. Plus d'accent sur le « système ». L'importance du système dans sa « totalité » est plus grande que les composants du même système.
3. Complexité croissante de système. La structure de nombreux produits est devenue plus complexe avec l'évolution constante des nouvelles technologies. Il s'impose la prise en compte, très tôt dans le processus de conception, du potentiel de changement : les changements doivent être rapidement intégrés sans provoquer un impact négatif sur la configuration du système.
4. Extension du cycle de vie des systèmes vs diminution du cycle de vie des technologies. Le cycle de vie des systèmes – pour des raisons diverses – est plus long que la durée de vie des technologies. Il est donc nécessaire de concevoir des systèmes avec une architecture ouverte pour pouvoir englober à tout moment des modifications. (voir aussi le point 3, ci-dessus).
5. Produits disponibles immédiatement (*commercial off-the-shelf products* – COTS). Sortie rapide sur le marché. Processus d'achat plus efficaces, acquisition de produits plus performants. Utilisation de bonnes pratiques commerciales. Coût objectif bas imposé au début de la conception. Nécessaire d'avoir une bonne définition initiale du produit, l'accent est mis sur la conception du système vs. conception des composants du système.
6. Globalisation. « *The world is becoming smaller* ». Interdépendances fortes entre les pays. Besoins : communications, méthodes de transports, commerce électronique (EC) etc.
7. Concurrence accrue au niveau international. Dans le contexte de la globalisation accentuée, la concurrence au niveau international a augmenté. Ceci est facilité par les améliorations de la communication, les méthodes nouvelles de transport, le nombre croissant de partenariats, fusions etc.
8. Outsourcing. Utilisation à grande échelle de la sous-traitance à tous les niveaux : équipement, software, processus. Demande une très bonne définition du produit dès le début de la conception. Les fournisseurs de ressources sont très divers. Demande une synergie accrue dans le pilotage des programmes de réalisation des systèmes.
9. Érosion de la base industrielle. Diminution du nombre de fabricants de plusieurs produits. Dans la conception, il faut sélectionner les fournisseurs des composants selon des critères de stabilité, pérennité, maintien de la qualité dans le temps etc. pour une durée d'au moins la durée du cycle de vie du produit.
10. Globalité croissante du Coût du Cycle de vie (LCC). Toutes les décisions prises dans la conception doivent être rapportées au Coût Global de Cycle de vie du produit, en tenant compte des risques associés.

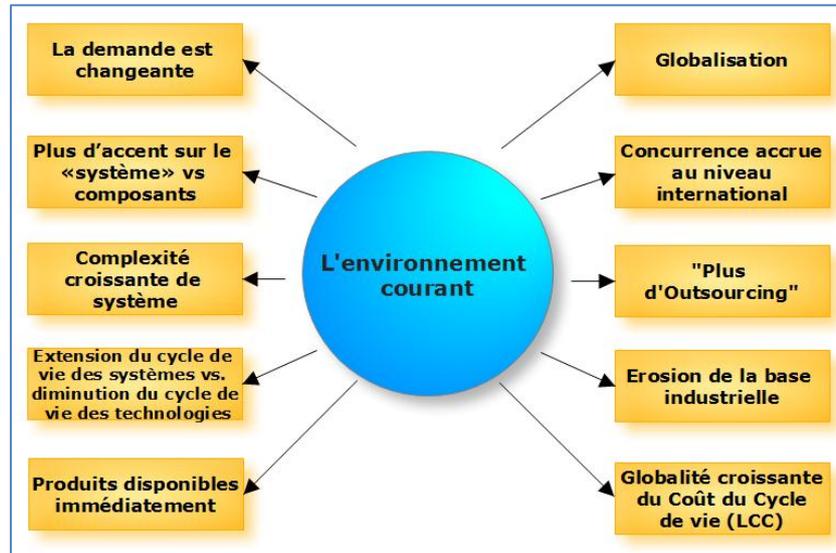


Figure 2-1 L'environnement courant de l'entreprise

2.2.2 Le client et le marché

La notion client désignée dans cette recherche s'étend d'un ou plusieurs petits groupes d'individus à des organisations de type industriel, commercial, académique etc. Le client peut être « *the ultimate user* » (Blanchard, 2004) d'un système technique, ou peut être un réseau de vente appartenant à un marché qui procure les produits pour ses clients. Ce réseau de vente, connu aussi comme fournisseur ou comme client intermédiaire, est souvent utilisé par les grandes organisations étatiques ou militaires. Par exemple, aux USA, dans le domaine militaire il existe des agences qui sont responsables des contrats et de la procuration des systèmes pour les groupes opérationnels appartenant aux diverses armes. Ces agences fournissent aussi de la maintenance et du support pour les systèmes pendant le cycle de vie planifié.

2.2.3 Du produit industriel vers l'artéfact

Un produit a des attributs physiques et symboliques, il correspond à tous ce qui peut être offert sur un marché de façon à satisfaire un besoin, un client.

La notion de produit a été redéfinie à travers l'évolution des méthodologies de conception et de la « tendance holonique » de plus en plus présente lorsque l'on traite dans la littérature la triade produit-client-marché. Du simple produit, la notion a englobé le processus, ce qui a donné le syntagme « produit-processus », et ensuite le produit-processus a été remplacé par le « système produit ». Depuis quelques années, dans le monde industriel, on parle de plus en plus de « artéfact » une notion beaucoup plus générale. Le nom est né de la contraction des mots latins *ars*, *artis* (artificiel) et *factum* (effet). Le terme artéfact désigne à l'origine un phénomène créé de toutes pièces par des conditions expérimentales, un effet

indésirable, un parasite, mais d'une manière générale, aujourd'hui nous entendons un objet fait de la main de l'homme.

L'artéfact n'est pas le produit d'une création spontanée et insensée. Sa réalisation est le résultat d'une activité finalisée pendant laquelle le concepteur s'est imaginé l'utilisation future de cet artéfact. L'artéfact comprend donc une fonction d'anticipation ajoutée explicitement ou implicitement par le concepteur. L'instrument est l'artéfact en situation, inscrit dans un usage (Rabardel, 1995). Le mot admet encore plusieurs significations issues du sens originel. Dans les sciences humaines, en psychologie, le mot désigne un fait psychique artificiel, produit par les techniques employées dans l'exploration de la conscience; en archéologie et en anthropologie artéfact correspond à un objet fabriqué par l'homme et en management un artéfact représente tout document (règlement, graphique, procédure, ...) identifié au sein d'un processus. Dans plusieurs domaines scientifiques, un artéfact est un phénomène ou un signal artificiel dont l'apparition, liée à la méthode utilisée lors d'une expérience, provoque une erreur d'analyse.

Le nombre élevé de contraintes hétérogènes sont réunies, dans le domaine de la conception, au sein de classes, appelées « vues de l'artéfact » (Tableau 2-1) avec l'avantage d'être plus facilement manipulables « *car renvoyant à un même univers sémantique* » (Micaëlli et Forest, 2003).

Tableau 2-1 Différentes vues d'un artéfact (Micaëlli et Forest, 2003)

Vue	Contenu	Exemple de support
Axiologique	Ça correspond aux valeurs...	Code déontologique
Comptable	Ça coûte... ça rapporte...	Méthodes comptables
Conative	C'est bon pour... c'est mauvais pour	Posologie
Conceptuelle	Ça porte pour nom... et ça a pour qualités...	Cahier des charges conceptuel
Dimensionnelle	Ça a comme taille...	Modèle géométrique
Environnementale	Ça interagit avec...	Pieuvre
Evaluative	Ça pour objectif... indicateur... et critère...	
Événementielle	Ça perçoit l'événement...	Objets réactifs, règles
Fabricatoire	C'est fait par...	Gamme opératoire
Factorielle	Pour... il faut les ressources...	Simulateur de flux
Fonctionnelle	C'est fait pour...	SADT
Généalogique	Ça date de... ça a duré...	Fresque généalogique
Génétique	Ça vient de... ça devient...	Arbre phylogénétique
Morphologique	Ça relie... avec... sous forme de...	Carte
Nominaliste	Ça s'appelle...	Dictionnaire
Ontologique	C'est un(e)...	Lexique
Processuelle	C'est suivi de... à côté de...	Flowchart
Structurelle	C'est composé de...	Nomenclature
Typologique	Ça s'apparente à... ça se différencie de...	Matrice typologique

En conclusion, l'artéfact représente une structure ou un phénomène d'origine artificielle ou accidentelle rencontré au cours d'une observation ou d'une expérience portant sur un phénomène naturel. Les artéfacts sont aussi des restes d'origine humaine, par exemple un fragment de céramique. Dans ce qui suit, nous désignerons par artéfact le résultat d'une activité de conception où sa nature peut être matérielle ou virtuelle.

Herbert Simon (Simon, 1996) définit l'artéfact comme un objet structuré (objet, environnement, réalité virtuelle) conçu et agencé intentionnellement par l'homme dans le but de répondre à ses besoins (fonctions de service ou missions du système). La classe des artéfacts a une frontière mobile selon l'évolution de ce que l'on considère comme l'archétype de la classe : le bâtiment, l'automate régulé ou selon Simon le système de traitement de symboles (Forest, 2007). Simon attribue à l'artéfact une dynamique à cause des boucles de conception(s) successives induites par son usage. A partir de l'objet technique Simon va vers le processus de conception, objet des sciences de l'artificiel (Forest, 2007). C'est dans cette voie que nous dirigerons nos recherches en identifiant, à partir de l'artéfact (produit ou système produit) son processus de conception générateur. Un autre enseignement déduit de l'œuvre de Simon est le fait que l'artéfact, étant conçu pour répondre aux besoins, (celui-là) doit englober les fonctions qui le font apte à répondre aux buts pour lesquels il a été créé : « *Le bon concepteur, le concepteur idéal, n'est pas celui qui cherche à exprimer son habilité dans la perfection, mais l'ajustement fonctionnel.* » (Forest, 2007).

La méthode de classification des produits tient compte de leur nature (tangible ou intangible), de leur durée de vie (durable, semi-durable ou non durable), du le comportement d'achat des individus (fréquence, implication, degré d'impulsion), de leur degré de nouveauté, de leur destination (ménages, entreprises). Du point de vue économique il existe plusieurs classifications des produits. On distingue les produits selon 3 grandes catégories. Ces classifications sont loin d'être exhaustives et les économistes font d'autres distinctions.

A) Produits de consommation et produits industriels

1. Les produits de consommation : ce sont les biens consommés par les particuliers comme par les entreprises.
2. Les produits industriels : ce sont des biens consommés uniquement par les entreprises :
 - a. Les biens d'équipement : ils servent à l'activité de l'entreprise (ex : les machines, les locaux, les véhicules)
 - b. Les matières premières ou produits semi-finis : ils sont transformés au cours du cycle de production de l'entreprise.
 - c. Le petit outillage consommable (ex : les pièces de rechange d'une machine)

B) Les produits durables et non durables

Les produits durables ou semi durables : ce sont des biens dont la durée d'utilisation est longue (vêtements, livres, meubles, maison,...).

Les produits non durables : ce sont des biens dont la destruction est immédiate ou très rapide (produits alimentaires, mouchoirs en papier, dentifrice,...).

C) Les produits banaux et anomaux

Les produits banaux : ce sont des produits de consommation courante dont l'achat est fréquent et la consommation rapide.

Les produits anomaux : ce sont des biens dont l'achat est peu fréquent et dont la consommation s'étale sur une période assez longue. En ce qui nous concerne, nous retiendrons le critère de nouveauté du produit par rapport aux produits existants dans l'entreprise et sur le marché (produits concurrents). En même temps les notions de gamme de produits (produits liés entre eux : mêmes fonction, clients, points de vente et prix) et de familles de produits (notion plus restreinte que la gamme) seront prises en compte lors de l'analyse de l'architecture (structure) d'un système-produit par la différenciation entre les modules

fonctionnels de base et les modules optionnels (dans le Chapitre 4).

2.2.4 Le projet industriel

Les normes qualité ISO9000-version 2000 définissent un projet comme un « processus unique (particulier) qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques telles que les contraintes de délais, de coûts et de ressources ». Le projet représente l'instanciation et la réalisation d'un processus unique (Roucoules et al, 2006).

La norme AFNOR X 50-105 : « Le management de projet – Concepts » précise cette définition du projet : « Un projet se définit comme une démarche spécifique, qui permet de structurer méthodiquement une réalité à venir. Un projet est défini et mis en œuvre pour élaborer la réponse au besoin d'un utilisateur, d'un client ou d'une clientèle et il implique un objectif et des actions à entreprendre avec des ressources données ». Selon (Cazaubon et al, 1997) l'introduction de la logique de projet dans une organisation marque le passage d'une organisation traditionnelle par fonctions (marketing, ventes, R&D, production) à un mode de fonctionnement transversal, basé sur le regroupement de moyens, de ressources et de compétences ad hoc partagés avec d'autres activités de l'entreprise ou spécifiquement dédiés au projet. Les difficultés liées à la gestion de la complexité du projet sont de plusieurs ordres :

- mise en place d'une structure de projet et coordination d'activités hétérogènes et nombreuses,
- intégration de la structure du projet dans l'organisation de l'entreprise,
- adaptation à des modifications fréquentes et importantes,
- prise de décision dans un contexte caractérisé par une forte incertitude,
- arbitrage des situations conflictuelles,
- recherche d'une juste équilibre entre trois facteurs (technique, coûts, délais) et optimisation des ressources disponibles.

Le découpage en phases d'un projet (Chvidcenko, 1974), considéré comme une opération classique dans le management de projet, aboutit à une séquence de quatre ou cinq phases avec des objectifs bien identifiés, marquées par un jalon de contrôle (Figure 2-2). Ce découpage en phases relève autant d'une logique de contrôle que d'une logique de développement. Cette progression en phases (processus) nous renvoie vers la notion de cycle de vie, et la modélisation reprise et simplifiée par AFITEP¹⁴ constitue une bonne base pour aborder le découpage du cycle de vie dans un contexte d'ingénierie intégrée. Dans notre recherche l'aspect séquentiel sera remplacé par la simultanéité ou le parallélisme des activités.

Lié à l'aspect processus nous mentionnons aussi la notion de plan d'action comme étant l'organisation préalable retenue par un acteur pour mener à bien un projet.

¹⁴ Association Francophone de Management de Projet, Paris, <http://www.afitep.org/>.

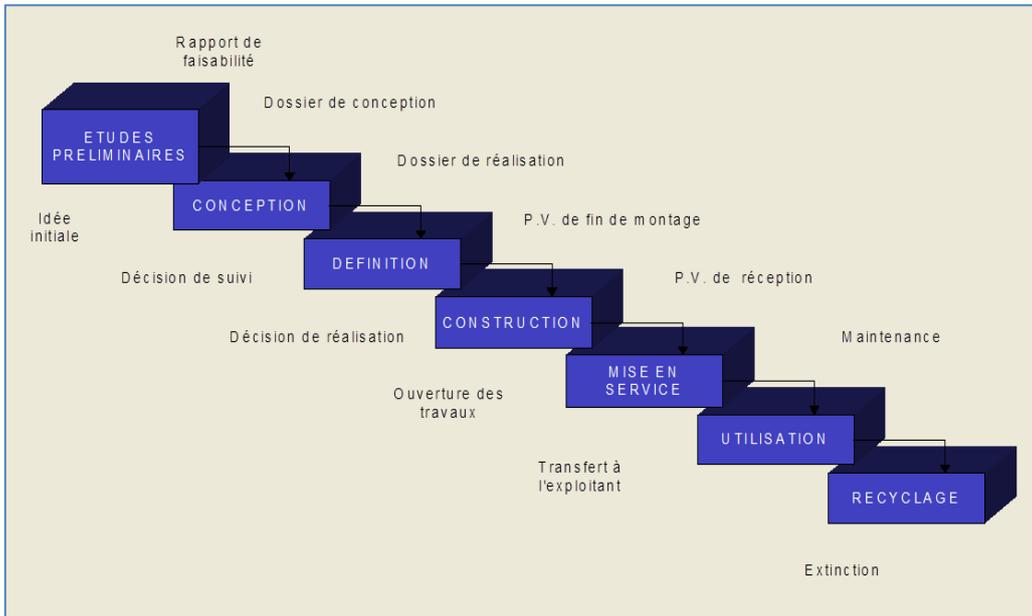


Figure 2-2 Les grandes phases d'un projet (Chvidchenko, 1974)

Le plan d'action dépend de trois facteurs (Roucoules et al, 2006) :

- L'instanciation du processus propre au projet,
- La mention des ressources et des méthodes à suivre,
- La planification des revues de projet.

Nous retenons, pour l'activité d'un concepteur, l'importance des aspects : instanciation du processus, la définition des ressources et des méthodes à utiliser ainsi que la planification des jalons. L'intégration de ces aspects est nécessaire lors du pilotage des activités de conception : choisir la meilleure « trajectoire » par rapport à un objectif défini préalablement. Il est bien entendu évident que la trajectoire, soumise à des contraintes diverses, sera optimisée, de même que la définition initiale des objectifs.

2.3 Les principes de l'ingénierie intégrée et systémique

2.3.1 Du séquentiel au simultanée

Avant les années '70 les activités d'ingénierie se déroulaient d'une manière séquentielle. Le Bureau d'études passa le dossier de conception « *par-dessus le mur* » vers le département d'Engineering et Fabrication. Celui-ci analysa et proposa beaucoup de modifications et renvoya le dossier en arrière vers le Bureau d'Études. Dans la figure suivante (Figure 2-3) nous pouvons observer l'avancement du produit à travers les services ainsi que l'évolution des informations qui l'accompagnent.

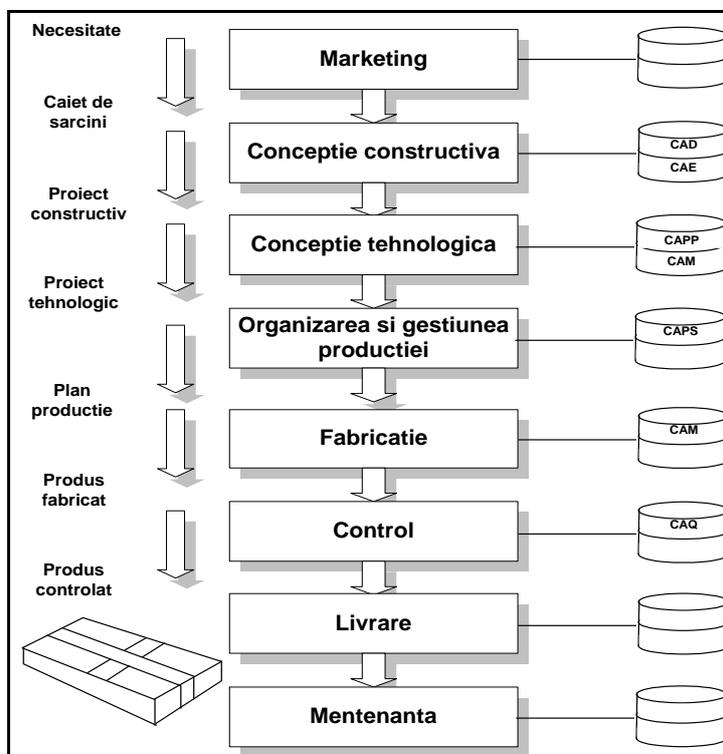


Figure 2-3 L'organisation linéaire du cycle de vie (Drăghici, 1999)

Dans les années '80 les entreprises commencèrent à implémenter un nouveau concept, celui de « *concurrent engineering* » (CE) ou d'ingénierie congruente comme une nouvelle forme d'organisation en conception, dans le but d'éliminer les problèmes causés par les activités séquentielles déroulées entre les départements et les métiers. Si le problème de faire passer la conception « *par-dessus le mur* » entre les départements d'une entreprise a été, en partie, résolu, persistaient encore les problèmes liés à faire passer la conception « *par-dessus le mur* » de l'entreprise. Ce dernier aspect constitue la préoccupation du PLM qui, en abordant le cycle de vie du système, essaie de concentrer les activités autour du produit et de son environnement (par environnement nous entendons l'ensemble des informations et des processus liés au produit).

2.3.2 L'ingénierie simultanée

La tradition taylorienne de l'organisation du travail en services qui travaillent successivement, étape par étape, diminue les responsabilités vis-à-vis de l'échec ou de la réussite d'un projet (Petitdemange, 1991). Il est fondamental, si l'on veut construire la vraie qualité d'un produit-système, d'associer les concepteurs-développeurs-producteurs aux deux phases clés du cycle de vie : la recherche des besoins et la mise en service, et l'utilisation du produit-système. L'introduction du concept de l'ingénierie simultanée (ou de « *concurrent engineering* ») répond à ces ambitions en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie d'un produit-système,

depuis sa définition jusqu'à son démantèlement. Ainsi, par exemple, le concepteur doit prendre en considération, dès les premières étapes de la conception, les contraintes de fabrication, de maintenance, de recyclage etc. Les caractéristiques de la simultanéité sont la constitution des organisations concourantes (équipe multidisciplinaires, intégration des aspects métiers et organisationnels dans le cadre du travail de type collaboratif) et le déroulement en parallèle des activités, tout au long du cycle de vie, qui convergent vers les mêmes objectifs.

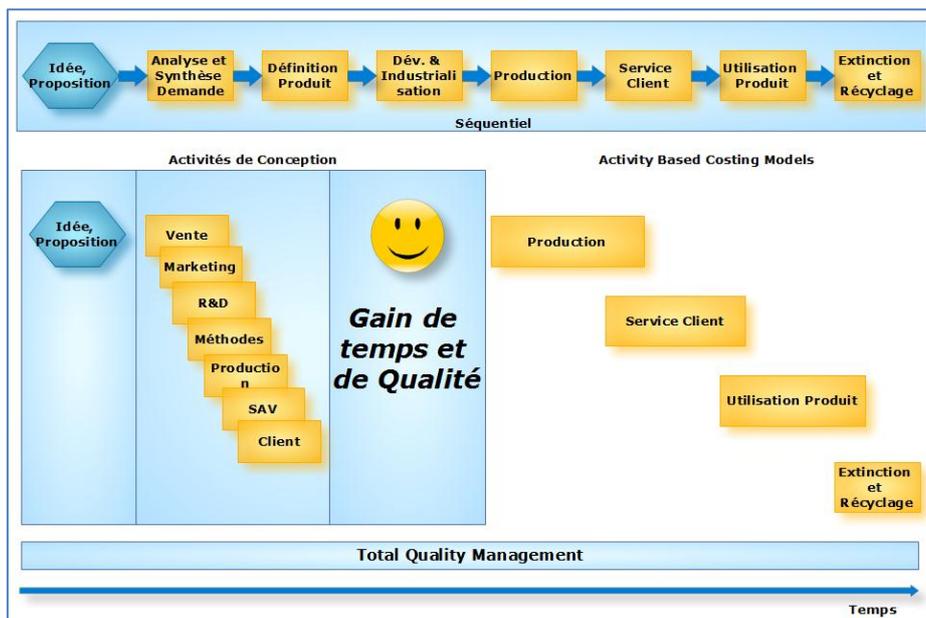


Figure 2-4 Gain de temps et de qualité par l'Ingénierie Simultanée (IS)

Il est clair que le management de l'ingénierie simultanée diffère profondément de celui de l'ingénierie de type séquentiel. Si le second indique, d'une manière presque rigide, la séquence de tâches à accomplir, le premier implique des nouveaux modes de travail qui sont le résultat d'une vision plus systémique. Ainsi, le processus d'un système complexe est lui-même complexe et se construit graduellement en fonction de contraintes très variées, évolutives et incertaines. Dans ce cas, le comportement des acteurs du projet est moins déterministe que dans le cas d'un parcours séquentiel du projet. Le pilotage des activités de conception, dans un contexte de CE, « ne doit pas se manifester uniquement par une nature prescriptive mais doit prendre en compte au mieux les réactions possibles des acteurs selon leur situation réelle et leurs compétences. » Le système de pilotage devient complexe et prend en compte l'évolution de trois paramètres : les produits, les projets et les acteurs (Roucoules et al, 2006). L'impact de cette problématique a comme conséquence, selon certains auteurs, la conception des organisations en tant qu'artéfacts (Micaëlli et Forest, 2003) ou le développement des logiques d'apprentissage collectif, pour mieux répondre au pilotage dans un contexte évolutif et incertain (Verzat, 2000).

Dans la Figure 2-4 sont comparées les deux démarches : séquentielle et simultanée. La parallélisation des tâches amène un gain de temps et de qualité du,

surtout, aux activités de conception. Les décisions prises pendant celle-ci figent 80% du coût final du produit (Figure 2-5).

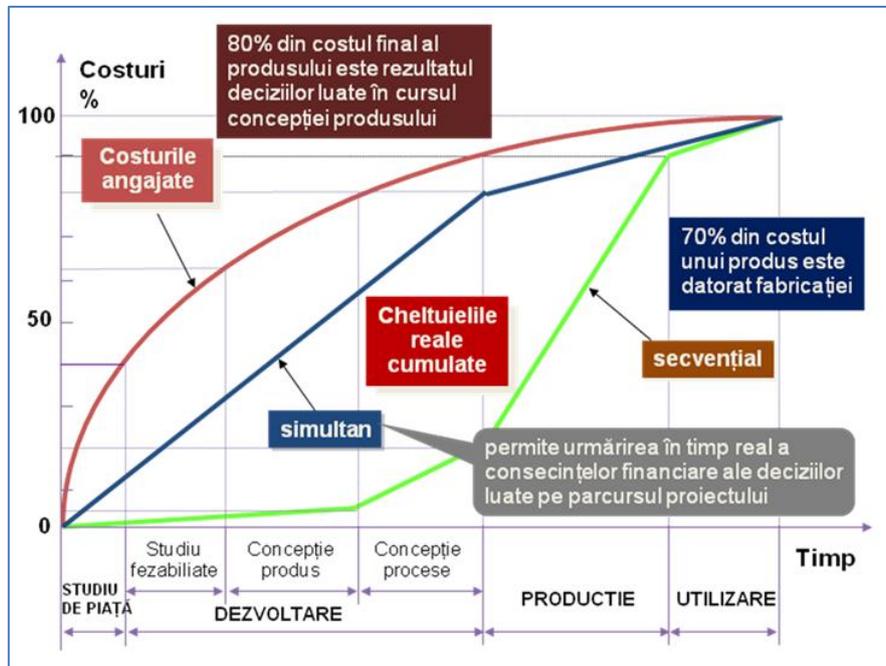


Figure 2-5 Les coûts engagés et réels (Drăghici, 1999)

2.3.3 L'ingénierie des systèmes

L'ingénierie des systèmes (IS) est une démarche méthodologique scientifique et interdisciplinaire qui a comme buts la maîtrise de la conception et l'intégration de systèmes complexes (produits, systèmes de production, ressources humaines) dans l'ensemble du cycle de vie du système. Selon (Roucoules et al, 2006) : « *L'ingénierie système est une démarche méthodologique développée pour maîtriser la conception et l'intégration des systèmes complexes (produits, systèmes de production etc.).* » Les principes de l'ingénierie simultanée peuvent être mis en œuvre dans le cadre de cette démarche. Les domaines d'applications de l'IS est l'acquisition des connaissances techniques des systèmes complexes et la gestion de la mise en œuvre de ces connaissances.

Du point de vue historique nous mentionnons l'apparition en 1991 du premier organisme mondial d'ingénierie des systèmes : INCOSE (*International Council on Systems Engineering*). On constate maintenant une évolution dans le sens où les travaux de recherche se tournent vers la mise en application des concepts développés, plutôt que sur le développement de nouveaux concepts.

L'IS utilise la technique de la décomposition (divergence) d'un système complexe sur différents niveaux, afin de permettre l'identification et l'organisation des activités techniques propres à chaque métier et l'assemblage (convergence) de ces activités dans un tout cohérent permettant l'avancement avec assurance tout au long du cycle de vie. L'IS considère tout le cycle de vie du système, de la définition

des exigences client au retrait de service en passant par la conception, la réalisation et la mise sur le marché. Elle définit des méthodes et des moyens permettant de satisfaire au mieux les besoins techniques et organisationnels qui se heurtent en pratique à des contraintes de coûts, de délais et de productivité (Rochet, 2007).

2.3.3.1 Principes de l'IS

En ayant comme but la réalisation des systèmes complexes, l'IS se propose :

- De développer des techniques-outils d'ingénierie pour la réalisation de ces systèmes complexes,
- De rechercher des méthodologies (niveau méta-techniques) pour la coordination des activités d'ingénierie.

La complexité du système ne réside pas seulement dans la création des outils de type « métier » mais aussi dans l'organisation des connaissances, des données diverses accumulées pendant le cycle de vie.

2.3.3.2 Les avantages de l'ingénierie intégrée et systémique

Nous citons quelques avantages obtenus par l'utilisation de l'IS :

- Intégration de tous les métiers (approche interdisciplinaire) en prenant en compte, le plus tôt possible, les contraintes et les exigences issues de l'instanciation des besoins des clients par rapport au spécifique de chaque discipline ; la conception et la réalisation du système complexe se fait en considérant les exigences sur l'ensemble de son cycle de vie (approche holistique),
- Diminution du nombre d'itérations par la mise en œuvre systématique et coordonnée des processus génériques par les équipes multidisciplinaires,
- Maîtrise des informations nécessaires à la réalisation du système
- La réduction des délais et coûts de développement.

2.3.3.3 Le concept de système dans l'ingénierie

Selon la norme militaire américaine MIL-STD-499 (Blanchard, 2004) le système est « *un ensemble d'équipements, connaissances et techniques capables de remplir un rôle opérationnel. Un système complet inclut tous les équipements, l'infrastructure, les softwares, les services et le personnel nécessaires du point de vue opérationnel et support, à un degré qui peut être considéré comme auto-suffisant dans l'environnement donné du système* ».

Définition de INCOSE (*International Council on Systems Engineering*) : « *Un système est une construction ou collection d'éléments différents qui produisent ensemble un résultat non-obtenable par les mêmes éléments seuls. Les éléments ou les parts sont : des hommes, hardware, software, équipements, règles, politiques, documents. Les résultats incluent : niveau de qualité du système, propriétés, caractéristiques, fonctions, comportements, performances. La valeur ajoutée fournie par le système comme un tout, et par les parts indépendamment, est créée premièrement par les relations entre les parts ; c'est-à-dire, comment ils sont reliés* ».

ensemble ». ¹⁵ En résumé, un système est constitué des composants (éléments) en corrélation qui travaillent ensemble et qui ont un objectif commun pour satisfaire des besoins désignés.

La définition précédente a un degré d'abstraction assez élevé. Pour mieux comprendre les principes et les concepts nous mentionnons quelques caractéristiques principales (Blanchard, 2004) d'un système d'ingénierie :

1. Un système est constitué d'une combinaison complexe de ressources : humaines, matérielles, équipements, software, informations, financières etc. Ces ressources doivent être combinées d'une manière efficace (pilotées) pour atteindre le but proposé.
2. Un système est contenu dans une certaine forme de hiérarchie. Un avion fait partie d'une compagnie aérienne. Celle-ci fait partie d'un groupe (holding, par exemple) et ainsi de suite. Le comportement d'un système est influencé par les performances du système de niveau supérieur et par conséquent les facteurs externes doivent toujours être évalués.
3. Un système peut être décomposé dans des sous-systèmes et des composants relatifs. Diviser un système en des unités plus petites permet de mieux comprendre le fonctionnement et de décrire le comportement des interfaces. Les unités élémentaires interagissent les unes avec les autres. Le schéma est le suivant : décomposer le système en composants, étudier les des composants et les interrelations et ensuite refaire le système en remettant les composants (modifiées) ensemble (dans le système).
4. Un système doit avoir un but (objectif). Ce but peut être une fonction qui remplit la mission à un coût objectif donné. Il peut y avoir des conflits entre les fonctions de niveaux hiérarchiques différents et la résolution passe par la recherche du compromis technique, économique, etc.

Un système doit répondre à un besoin fonctionnel (objectif, besoin). Par conséquent, un système doit inclure non seulement les éléments qui concurrencent directement à l'accomplissement de la mission principale du système mais, aussi, les éléments de logistique et maintenance, d'infrastructure, etc., absolument nécessaires pour assurer ladite mission principale. Nous pouvons tracer une parallèle entre le fonctionnement du système économique et le corps humain : « *Le système économique est comparable au corps humain. L'argent circule, le marché respire, l'État contrôle, l'entreprise produit et les consommateurs assimilent. Il faut parvenir à l'équilibre de tous ces éléments.* » (Petitdemange, 1991). Afin de mieux comprendre le cycle de vie d'un système nous allons décrire dans le chapitre suivant les catégories d'un système.

2.3.3.4 Les catégories d'un système

Selon (Blanchard, 2004) il y a plusieurs différents types de systèmes. Nous produisons ici seulement une liste partielle des catégories :

- Systèmes naturels et créés par l'homme. Ce sont les systèmes qui sont

¹⁵ INCOSE, 2150 N. 107th Street, Suite 205, Seattle, WA 98133. La définition a été donnée en automne 2001.

fabriqués à travers des processus naturels. Exemples : le système rivière et le système énergétique.

- Systèmes physiques et conceptuels. Les systèmes physiques sont composés d'éléments réels qui occupent un certain volume dans l'espace. Les systèmes conceptuels peuvent être un système organisé d'idées, les spécifications techniques d'une machine, une série de concepts abstraits etc. Souvent les systèmes conceptuels mènent vers les systèmes physiques.
- Systèmes statiques et dynamiques. Les systèmes statiques ont une structure mais pas d'activité (observé dans un court laps de temps). Un système dynamique est celui qui combine la structure avec une activité.
- Systèmes en boucle fermée et ouverte. Un système fermé est celui qui n'interagit avec aucun environnement. Contrairement au système fermé, un système ouvert interagit avec l'environnement. L'environnement fournit le milieu dans lequel le système travaille ; en fonction du type de système (fermé ou ouvert) l'impact sur l'environnement peut être nul ou très important.

Notre travail se réfère aux systèmes physiques créés par l'homme, dynamiques du point de vue opérationnel et en boucle ouverte. Nous représentons ici-bas un système (Figure 2-6), basé sur le formalisme SADT, avec les caractéristiques qui ont été énumérées plus haut.

2.3.4 Le système Cycle de vie dans la perspective du PLM

PLM est une activité de gestion du produit à travers son cycle de vie. Certains auteurs considèrent comme axes principales du PLM le produit et son cycle de vie (Stark, 2005). Le concept selon lequel un produit possède un cycle de vie est assez ancien, et particulièrement présent dans les industries ayant des produits avec une durée de vie assez longue (industrie aérospatiale, par exemple). Parfois les fabricants et les utilisateurs ne s'accordent pas quant au contenu du cycle de vie. Ils ont des vues différentes et une certaine confusion se manifeste aussi entre les notions de durée de vie du produit et de cycle de vie du produit. Ainsi, à l'intérieur d'une entreprise, suivant le département en question, la vision sur le sujet change. Le marketing a une vision du cycle de vie orientée « market » : introduction, croissance, maturité et déclin. D'un point de vue global, en prenant en compte les ressources, il existe un cycle de vie de produit environnemental dans lequel une ressource (le pétrole, un minéral) est extraite de la terre et traitée, utilisée dans le processus de fabrication d'un produit; le produit est vendu et mise en service, ensuite il est utilisé et quand il n'est plus nécessaire la ressource ou le rebut est, dans le meilleur des cas, réutilisé, recyclé ou éliminé.

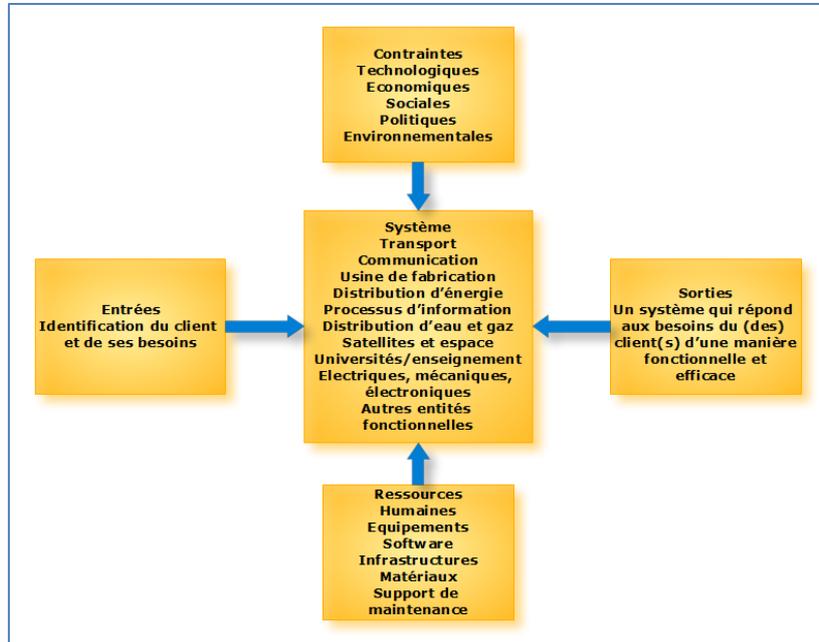


Figure 2-6 Les entités des systèmes industriels



Figure 2-7 Cycle de vie vu par le fabricant (Stark, 2005)

Du point de vue du fabricant, le cycle de vie du produit peut être divisé en 5 phases principales, comme indiqué dans la Figure 2-7, et sa vision ne concorde pas entièrement avec celle de l'utilisateur du produit. Dans la Figure 2-8 le cycle de vie « vu » par l'utilisateur diffère par les deux dernières phases : à la phase « Support » du fabricant correspond la phase « Utilisation » de l'utilisateur et à la phase « Retraite » du fabricant, l'utilisateur est confronté aux problématiques de l'élimination et du recyclage du produit.



Figure 2-8 Cycle de vie vu par l'utilisateur (Stark, 2005)

Nous remarquons aussi qu'il n'y a pas de synchronisation entre les phases fabricant-utilisateur comme, par exemple, l'utilisateur peut arrêter d'utiliser le

produit que le fabricant continue à le produire. On note aussi qu'entre les phases de chaque type de vision peuvent exister des chevauchements, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas un caractère séquentiel. Cette propriété¹⁶ s'avère fort utile lorsqu'on veut donner un caractère collectif, concurrent et intégré à la gestion des activités faisant partie du cycle de vie d'un produit. Nous pouvons décrire, à titre générique, le cycle de vie selon la Figure 2-9 qui montre que les deux dernières phases peuvent être communes aux fabricants et aux utilisateurs. Mais cette vue générique du cycle de vie cache beaucoup de différences entre les points de vue.



Figure 2-9 Cycle de vie générique (Stark, 2005)

Les différences entre le producteur et le consommateur se manifestent aussi dans la perception de la notion de « durée de vie ». Pour un producteur la durée de vie d'un produit se situe entre les dates de lancement et de fin de production et celles de lancement du produit de remplacement. Pour l'utilisateur (le consommateur) la durée de vie ne représente que la période de temps d'utilisation du produit. Cette période ne coïncide pas, quant à sa fin, avec celle du fabricant : l'utilisateur peut continuer l'utilisation du produit même après l'arrêt de sa production.

Ainsi, du point de vue du producteur, le Ford T a eu une durée de vie de 18 ans. Il a été remplacé par le Ford A qui, lui, a eu une durée de vie de 4 ans. La Figure 2-10 montre que 75% des produits analysés en 2003 avaient une durée de vie de moins de 10 ans alors que seulement environ 10% des produits avaient une durée de vie de moins d'une année (Stark 2005). Par rapport à 2003 la tendance aujourd'hui est inversée : le pourcentage des produits avec une durée de vie courte a augmenté au détriment de ceux à une longue durée de vie.

2.3.5 Modèles de cycle de vie

Le cycle de vie inclut toutes les activités liées à l'existence d'un système, en commençant par l'identification des besoins (Blanchard, 2004), en continuant avec le développement et la production et en finissant avec l'utilisation, la maintenance, le support et le recyclage. Parce que les activités dans chaque phase interagissent avec les activités présentes dans d'autres phases, il est impératif de considérer toutes les phases dans un tout unitaire. Celui-ci porte le nom générique de cycle de vie.

L'importance accordée aux modèles de cycle de vie vient de la nécessité de piloter, de contrôler et de modifier les processus présents tout au long de l'existence d'un produit. Selon (Drăghici, 1999) il existe deux approches : séquentielle et simultanée (Figure 2-12).

¹⁶ Nous allons développer cette propriété dans le troisième chapitre lorsque nous allons modéliser le cycle de vie d'un produit.

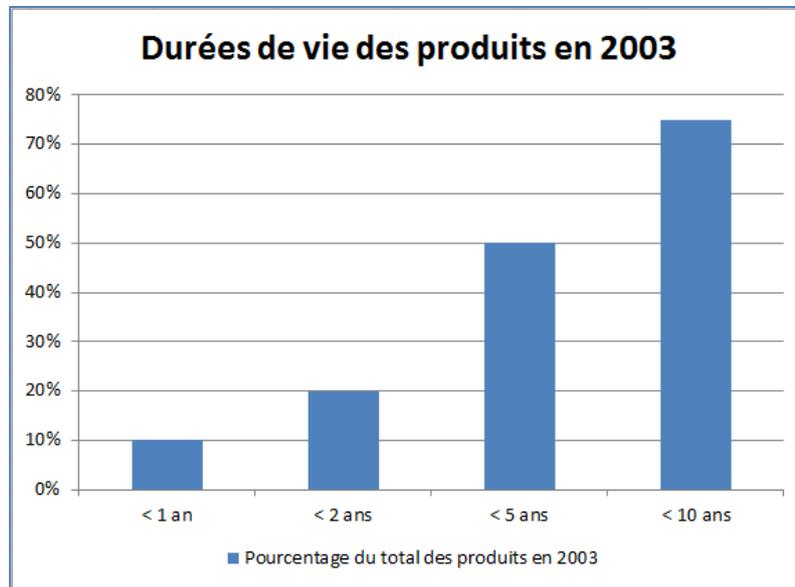


Figure 2-10 Durées de vie des produits en 2003, selon (Stark 2005)

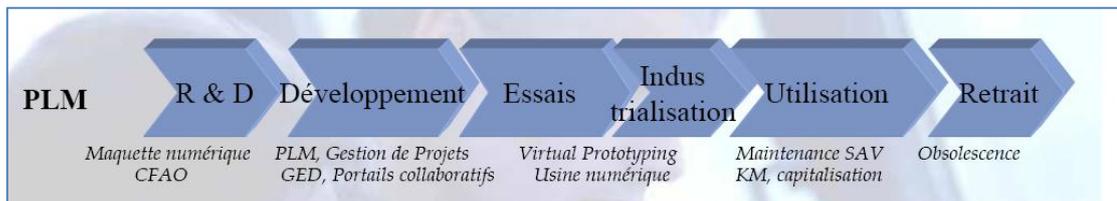


Figure 2-11 Product Life cycle Management - PLM (Dassault)

Chaque produit a un cycle de vie (Pahl et al, 2007). Cette assertion est basée sur un point de vue économique la Figure 2-13 met en évidence le retour de l'investissement en tant que profit net ou perte. Pahl et al remarquent aussi que le cycle de vie devient plus court mais que sa durée dépend du domaine de l'ingénierie.

Ce constat a comme conséquence une adaptation continue des processus de conception et de développement ainsi que des outils et méthodes utilisés pendant la durée de vie du système. La représentation graphique tient compte essentiellement du facteur temps, ce qui détermine l'enchaînement séquentiel des phases du cycle de vie. A part la représentation du cycle de vie en fonction des facteurs économiques (Pahl et al, 2007) mettent en évidence la gestion du cycle de vie (Figure 2-14) mais la séquence des phases est toujours la même.

A part ce modèle simplifié présenté précédemment nous mentionnons encore le « *spiral model* » apparu dans le milieu des années '80 (Figure 2-15). Ce modèle a été conçu pour le développement des systèmes software. Le système développé résulte après plusieurs itérations, l'équipe de projet examine continuellement les objectifs, la stratégie, les alternatives constructives et les méthodes de validation.

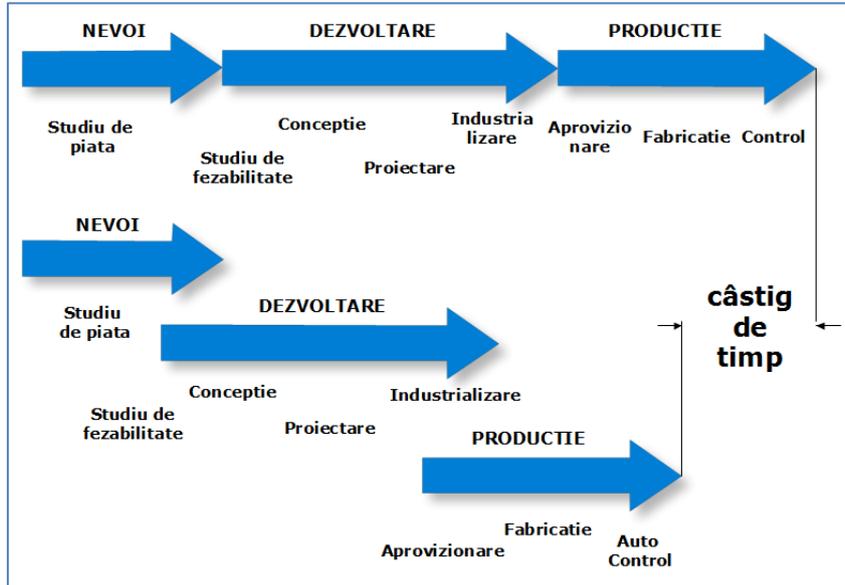


Figure 2-12. Démarche séquentielle vs. Simultanée (Drăghici, 1999)

Le « *spiral model* » est particulièrement bien adapté dans les développements à haut risque parce que la conception se redéveloppe parfois selon l'apparition des nouvelles exigences.

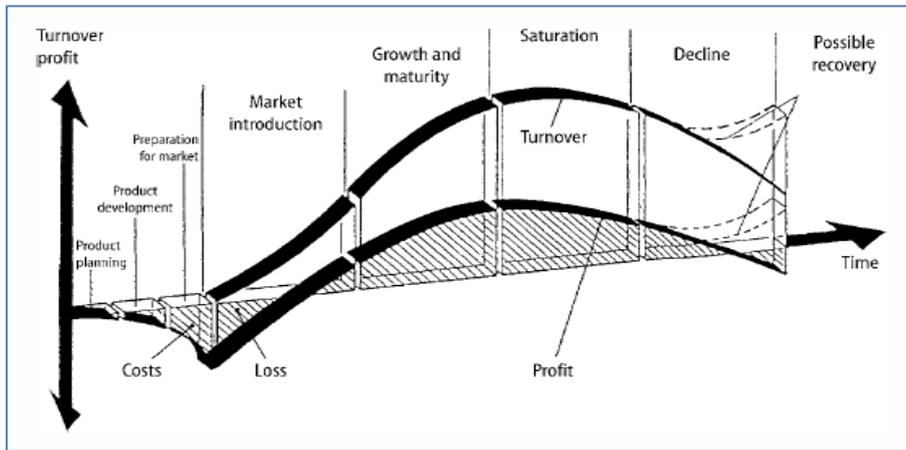


Figure 2-13. Le cycle de vie d'un produit (Pahl et al, 2007)

Le modèle en « V », introduit dans les années '90, reflète l'approche de développement de type *top-down* et *bottom-up* (Figure 2-16). La branche gauche montre l'évolution des spécifications jusqu'au développement du système et la branche de droite représente l'intégration des composants fabriqués dans le système fini et les vérifications, ainsi que la production, l'utilisation, la maintenance jusqu'en fin de cycle de vie.

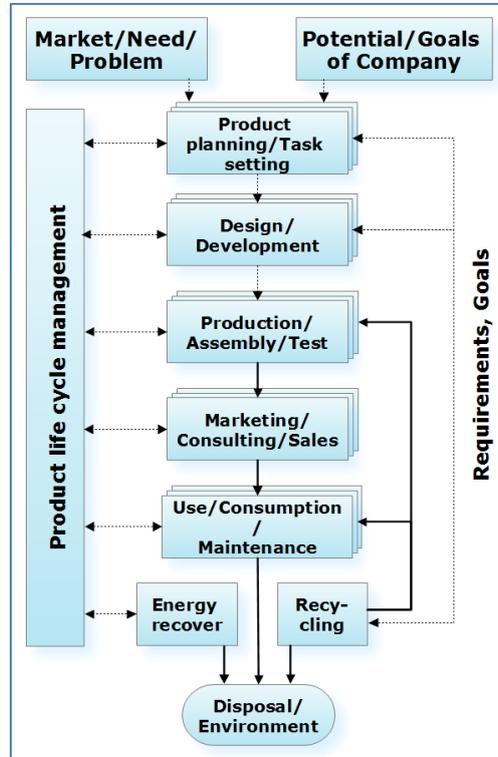


Figure 2-14. La gestion du cycle de vie d'un produit (Pahl et al, 2007)

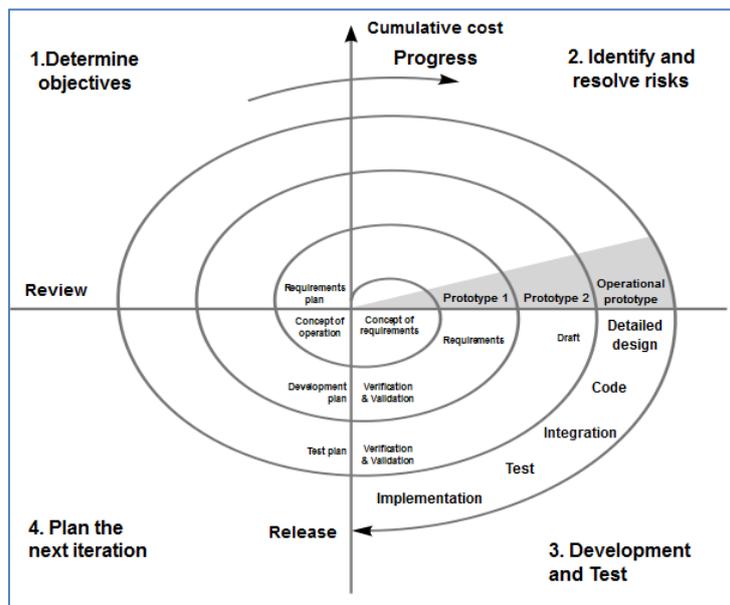


Figure 2-15. Le modèle spiral de cycle de vie (Boehm, 1988) et (Blanchard, 2004)

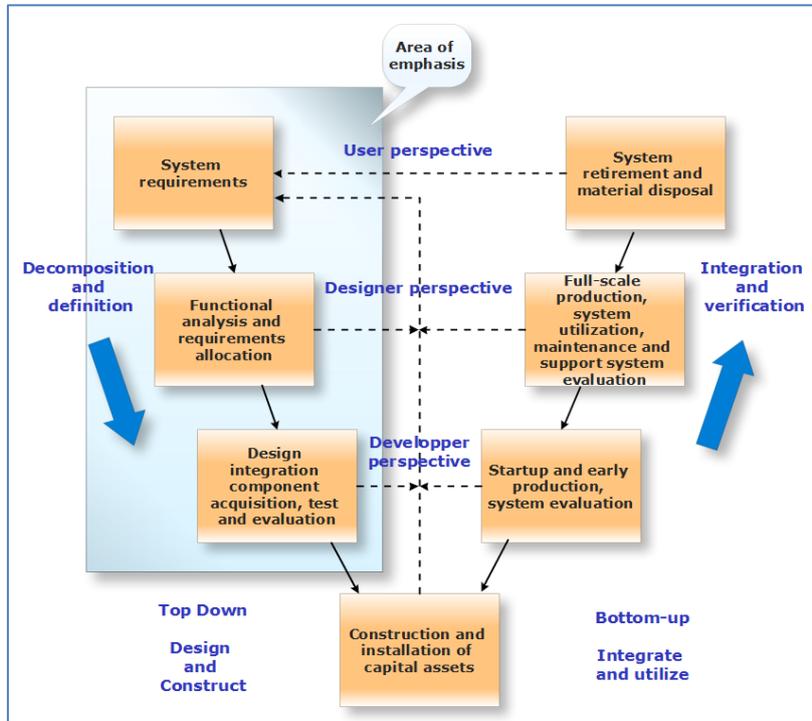


Figure 2-16. Le modèle générique en forme de « V » (Blanchard, 2004)

2.3.5.1 Conclusion

Des nombreux modèles ont été introduits dans le but de fournir une approche logique d'intégration des processus partiels dans le cycle de vie complet. Les modèles montrés dans ce chapitre sont assez représentatifs par rapport à l'ensemble des modèles et peuvent fournir de bons résultats s'ils sont correctement utilisés. Une autre caractéristique des modèles est un certain degré de complémentarité, car ils mettent l'accent sur un ou l'autre aspect de la logique de représentation des processus présents dans le cycle de vie. Une partie de modèles existants dans la littérature se réfère seulement à un sous-système d'ingénierie comme, par exemple, le software. En effet, même s'il est prédominant pour un système donnée nous considérons que le software, ne peut pas représenter à lui seul le système complet avec toutes ses fonctionnalités. Nous remarquons aussi que même si les modèles ont été conçus pour un système donné ils contiennent des éléments qui les font utiles pour la modélisation des systèmes complets.

2.4 Product Lifecycle Management - PLM

2.4.1 Introduction

Le concept de PLM fait partie du champ de recherche des systèmes

d'information capables de prendre en charge la totalité du cycle de vie du produit (Roucoules et al, 2006). Ces *Systèmes d'Information Produit* – SIP – représentent une extension des *Systèmes de Gestion de Données Techniques* – SGDT (ou *Product Data Management* - PDM). PLM, acronyme de *Product Lifecycle Management*, est une discipline qui s'intéresse à l'intégralité du cycle de vie des produits manufacturés, depuis les études préliminaires jusqu'à la maintenance et la fin de vie. Le PLM est une extension du PDM qui est un système se chargeant uniquement de la gestion des données techniques du produit (fichiers CAO, plans, documentation etc.) lors de la phase de conception. Le PLM est un concept plus vaste permettant également la gestion des processus de l'entreprise (ou Workflows) en relation avec cette documentation. Le PLM est parfois intégré avec un ERP¹⁷ (*Enterprise Resource Planning*) pour échanger des informations en temps réel entre le département de conception et les départements de gestion et de fabrication. (CIMdata, 09) définit PLM comme :

- Une approche stratégique d'affaires qui applique un ensemble cohérent de solutions d'affaires qui soutiennent la création, la gestion, la diffusion, et l'utilisation de collaboration d'information de définition de produits ;
- Un support de l'entreprise élargie (les clients, partenaires associés dans la conception et l'approvisionnement etc.) ;
- Une vision du concept à la fin de la vie d'un produit ou d'une usine ;
- Une intégration des personnes, processus, systèmes d'affaires, et information.

PLM est une manière systématique de concevoir, gérer et contrôler toute l'information nécessaire pour documenter la trace du produit-système à travers tout le cycle de vie, de la conception jusqu'au démantèlement (Saaksvuori et Immonen, 2004). Selon (Stark, 2005) « *PLM est le nouveau paradigme des entreprises d'aujourd'hui. Comme son nom l'indique PLM permet aux entreprises de gérer leurs produits pendant leur cycle de vie – de l'idée du produit tout au long jusqu'en fin de vie. Ceci est une des plus importantes activités déployées dans n'importe quelle entreprise.* »

Il est important de retenir que le PLM n'est pas simplement une technologie et qu'il n'est pas une définition d'un morceau, ou des morceaux de technologie. C'est une solution donnée au difficile problème de gestion de l'ensemble complet d'informations de définition du produit : créer cette information, la contrôler pendant toute sa durée de vie et la disséminer et l'employer tout au long du cycle de vie du produit. PLM est une approche dans laquelle les processus sont aussi importants, ou plus importants que les données. Il est important de noter que PLM s'intéresse autant à « *la façon dont les affaires fonctionnent* » qu'à « *ce qui est créé.* » (CIMdata, 09). Il est aussi souligné le caractère holistique du PLM. Il prend ensemble et gère : les ressources, le produit, les services, les activités, les connaissances, les données, les informations, les technologies, les normes etc.

Selon (Saaksvuori et Immonen, 2004) le *Product Lifecycle Management* (PLM) est idéalement une méthodologie systématique et contrôlée pour la gestion et la conception des produits industriels et de l'information liée à ces activités. Le cœur de PLM est la création, la conservation et le stockage des informations reliées aux produits et activités de l'entreprise. Ces informations deviennent un capital

¹⁷ Voir dans l'annexe la Terminologie.

exploitable à l'intérieur l'entreprise par tous ses employés. Les mêmes (Saaksvuori et Immonen, 2004) associent à la définition du PLM la notion de « *product structure* », qui est définie comme un modèle qui analyse l'information sur le produit et comment cette information est reliée, hiérarchiquement, à d'autres « *pieces of information* ».

Le terme de PLM, pour désigner la gestion de la définition des produits, met l'accent sur le fait que cette définition évolue sous l'influence de modifications tout au long de la « vie » des produits, c'est-à-dire depuis leur conception initiale jusqu'à leur mise à la retraite (démantèlement, recyclage...). Il a été popularisé par les vendeurs de systèmes d'information dans leur surenchère pour proposer des solutions qui, selon eux, soutiennent de façon plus ou moins complète les processus d'entreprise de ce domaine. Pourtant, le besoin de PLM n'est plus à démontrer aujourd'hui. Bien que les raisons de l'adoption de PLM diffèrent en fonction des zones géographiques, des cultures d'entreprises etc. nous pouvons, tout de même, dresser quelques besoins communs. (Stark, 2005) décrit brièvement et dans un ordre aléatoire quelques raisons pour lesquelles le PLM est nécessaire. Nous pensons qu'une classification de ces raisons va nous aider dans notre recherche et nous les avons donc classées en prenant comme références l'entreprise et le produit. Facteurs externes à l'entreprise :

- Les clients veulent, de plus en plus, des produits « à la carte » - qui sont plus difficiles à concevoir et pour lesquels il est assez laborieux à assurer les services – que des produits standards.
- Les clients veulent des services plus étendus, difficiles à assurer par des entreprises qui offrent seulement des services pour la vente.
- Le vieillissement de la population – surtout dans les pays occidentaux – conduit aux besoins de nouvelles catégories de produits.
- La mondialisation a mené à la disponibilité de centaines de millions d'ouvriers en Asie avec des salaires loin au-dessous des niveaux occidentaux. Par conséquent des nouvelles approches managériales sont nécessaires pour coordonner leurs efforts.
- La prise de conscience sur l'importance de l'environnement mène à l'augmentation des efforts pour la réduction de la pollution de la fabrication et de la logistique.
- Le développement durable est nécessaire pour assurer le fait que les ressources soient encore disponibles pour les générations futures – ce qui signifie que les sociétés doivent prendre soin des ressources existantes.
- Les normes, comme la Directive 2002/96/EC DEEE/WEEE (WEEE, 2002) du Parlement Européen¹⁸ (à préserver, protéger et améliorer la qualité de l'environnement, protéger la santé humaine et utiliser les ressources naturelles prudemment et rationnellement), qui ont comme première priorité la prévention de la production de déchets d'équipements électriques et électroniques superflus, peuvent mener à des changements majeurs de règles de gestion et des modèles.
- Développement géopolitique – par exemple, l'apparition de la Chine comme un exportateur majeur de produits finis, de l'Inde comme un

¹⁸ http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm

producteur principal de logiciels et de développeurs de logiciels et de la Russie comme un producteur principal de pétrole et de gaz - mène à beaucoup de changements.

Facteurs internes à l'entreprise :

- La difficulté de gérer les activités délocalisées. Les entreprises recourent de plus en plus à l'outsourcing pour les activités de conception, fabrication, support etc. disséminées dans des différents continents et différentes organisations.
- Le démantèlement de grandes entités – avec des responsabilités bien définies – et leurs remplacements par des plus petites compagnies et un réseau de sous-traitants – avec des responsabilités moins claires.
- La rapide émergence des nouvelles technologies fournit beaucoup d'opportunités - mais aussi les difficultés de leur industrialisation et l'assurance de leur sûre utilisation.
- Une mentalité de Bourse, avec managers plus intéressé par les résultats trimestriels que la pérennité de leurs produits et services.

Facteurs inhérents au produit :

- La complexité des produits. Les fonctions des produits augmentent et ceux-ci deviennent de plus en plus compliqués et difficiles à gérer.
- La pression de la concurrence engendre une pression toujours plus accrue qui a comme effet une diminution du temps de mise sur le marché des produits.
- Étant donné que les entreprises offrent des « solutions complètes » plutôt que des produits individuels, les solutions sont plus complexes, plus difficiles à développer et à assurer le support.
- Plus de services sont offerts le long du cycle de vie des produits. Parfois il semble que ces services sont plus importants que le produit lui-même. Pour développer et offrir ces services l'entreprise doit acquérir de nouvelles compétences et connaissances.
- La durée de vie de quelques produits est maintenant si courte que le développement d'une génération future doit commencer avant que le développement de la génération précédente n'ait été fini.
- Le paradigme systémique conçoit à la fois le produit, le marché et l'entreprise comme les éléments indissociables d'un processus évolutif qui se développe de façon non-linéaire dans un système complexe.

2.4.2 Concepts du PLM

Le noyau ou les concepts fondamentaux de PLM sont (CIM 01) :

- Gestion globale et sécurisée de l'accès et de l'utilisation de l'information liés à la définition du/des produit(s) ;
- Maintien de l'intégrité de la définition du produit et de l'information y relative pendant toute la vie du produit ou de l'usine ;
- La gestion et la maintenance des processus utilisés pour créer, contrôler, diffuser, partager et employer l'information.

Nous supposons que l'information véhiculée dans le cadre du PLM est, tout d'abord, celle qui se trouve sous forme électronique. Le « produit » dont nous parlons plus haut est le terme général qui désigne une large palette d'objets : produits manufacturés (automobiles, computers, téléphones, avions etc.), organisations distributrices de services (télécommunications, gaz, eau, électricité etc.), équipements (usines). D'autres types de produits peuvent être, par exemple, les projets civils d'infrastructures. Tous ces « produits » ont utilisés les applications de PLM dans le but de gérer l'information sur le produit tout au long de son cycle de vie.

Dans les années 1990, nous constatons une évolution du concept de cycle de vie. Il s'est étendu de gérer principalement les éléments mécaniques de la définition d'un produit pour inclure l'électronique et les éléments logiciels qui sont devenus une partie plus grande de beaucoup de produits. PLM inclut la gestion de toutes les informations concernant le produit, à partir des exigences des clients, en passant par la conception, la fabrication, le déploiement, l'utilisation et en finissant par le recyclage. Ces informations s'étendent d'exigences marketing, du cahier des charges (les spécifications) du produit et des instructions de test et des données, aux données de configuration du produit. La solution PLM lie des informations de beaucoup d'outils différents et d'autres systèmes à la configuration de produit en évolution. En même temps, le cycle de vie a commencé à inclure des informations liées à la production.

Aujourd'hui, PLM englobe les secteurs significatifs de processus. Ce n'est pas juste des processus de gestion de projets ou de programmes. C'est aussi les processus exigés pour fabriquer le produit ou l'usine, pendant tout le cycle de vie du produit. Les solutions PLM définissent, exécutent, mesurent et gèrent des processus commerciaux concernant le produit clé. La fabrication et les plans opérationnels de processus sont aussi maintenant vus comme une partie intégrante de PLM. Les processus et les *workflow* qui les contrôlent assurent le retour d'information numérique complète aux utilisateurs et aux systèmes d'affaires dans chaque étape du cycle de vie. A partir des travaux sur l'ingénierie des PLM (Roucoules et al, 2006) identifient trois axes de modélisation : le Produit, le Processus et l'Organisation. Nous allons, donc, nous attarder sur les premiers deux axes dans les chapitres suivants.

2.4.3 Produit

Le produit peut être considéré, dans le sens le plus général, comme faisant partie de la classe des artéfacts¹⁹, c'est-à-dire des objets créés par l'homme.

Lorsqu'on parle de « produit » le sens attribué est différent suivant le point de vue exprimé. Ainsi le client considère l'objet physique qu'il est en train d'utiliser. Rarement le client considère les services²⁰ associés au produit comme en faisant partie de lui. Si on passe en face du client, on trouve l'entreprise qui a une vision

¹⁹ Objet plus ou moins complexe ou phénomène créé par l'homme. Le sujet sera approfondi dans le chapitre 3.

²⁰ Les services associés au produit sont aussi des « produits » qui sont gérés par le PLM. Par exemple, une société peut offrir la maintenance annuelle pour le produit physique vendu. Le service après-vente a besoin des informations concernant le produit pour être capable de fournir ses services. C'est le PLM qui offrira ces informations.

plus complexe vis-à-vis du même objet. L'entreprise associe d'autres notions au sens primaire du mot produit, comme par exemple : les cahiers de charges qui contiennent les spécifications du produit, les dossiers techniques rédigés par le bureau d'études, les plans de maintenance et encore d'autres représentations du produit – on peut parler de représentations du produit si on prend en considération les informations qui décrivent l'état d'un produit à un moment donné de son cycle de vie - créés avant qu'il n'existe physiquement dans sa version de série. On peut parler dans ce sens d'une existence virtuelle du produit avant sa production physique. On peut ajouter ici la vision du produit exprimée par les organismes tiers, comme les organisations de qualité, d'homologation, d'état etc. caractérisée par l'approche service ou la capacité du produit de répondre aux réglementations et normes.

Lorsqu'on parle de produit dans le contexte PLM nous entendons tous les produits fournis par tous les types d'industries : bâtiment, métallurgie, machines-outils, horlogerie, software, agriculture etc. Dans le contexte PLM la notion « produit » est vue à travers la définition des produits correspondant à l'ensemble des spécifications élaborées par les équipes de développement de l'entreprise et sert de référence vis-à-vis de ses clients et du marché, ainsi que pour les équipes de production et de maintenance. La caractéristique principale de cette définition est sa virtualité²¹. Cette définition contient généralement :

- La nomenclature du produit (*Bill of Materials* - BOM), résultat de la décomposition de ce produit en composants centrés sur les métiers du développement (conception, études, industrialisation, besoins, ...) ;
- Des représentations de ce produit et de ses composants : documents, plans, modèles issus de la CAO et de la simulation numérique, maquette numérique, conservés dans une « armoire électronique » ou « coffre » (traduction littérale de l'expression « *vault* » en anglais).

La définition des produits est construite, validée et publiée par les équipes de développement selon des règles précises (dites *workflows* en anglais). Cette définition évolue au cours de la vie (*lifecycle* en anglais) du produit sous l'effet des modifications (*change* en anglais) demandées par le client et par les autres départements de l'entreprise. L'historique des différentes versions de la nomenclature est également appelée « configuration ».

2.4.3.1 Structure du produit/système

Un modèle de produit – l'unité de base de la structure d'un certain produit individuel – représente l'information organisée et enregistrée en accord avec le modèle informationnel du produit. Par exemple, la structure produit (le modèle informationnel d'un module unitaire de produit) de deux produits similaires, mais « customisés », peut être différente même si les produits paraissent similaires à un niveau générique du modèle informationnel du produit. En pratique, une même machine-outil a des composants électriques différents suivant le marché de destination : européen ou américain (220V ou 110V).

²¹ Selon http://fr.wikipedia.org/wiki/Product_Lifecycle_Management.

2.4.3.2 Gestion de la configuration

En anglais, le terme *Configuration Management* (CM), comprend (Blanchard, 2004) :

- La gestion de l'identification, de la documentation et de l'audit des caractéristiques fonctionnelles et physiques d'un article,
- La traçabilité de la configuration d'un article,
- Le contrôle des changements opérés sur un article ainsi que la documentation associée.

Le but final de la gestion de la configuration est de fournir un moyen complet de vérification de la traçabilité des décisions de conception et des modifications du système. Ce desiderata devient tangible dans un contexte PLM, le CM étant un des processus principaux des progiciels existant sur le marché (voir le chapitre 2.4.9 ci-dessous).

2.4.4 Processus

Le PLM, en tant que gestionnaire des processus de développement, fait partie des quatre piliers de l'entreprise numérique appliquant la stratégie e-business. : Le CRM (*Customer Relationship Management*) pour le recueil des besoins client et l'analyse des tendances pour l'innovation continue. Le SCM (*Supply Chain Management*) qui gère la chaîne logistique pour délivrer le produit au client. L'ERP (*Enterprise Resource Planning*) pour la gestion des processus de production. Les processus du PLM sont traditionnellement segmentés en fonction de progiciels qui arrivent sur le marché. Ces progiciels se réfèrent aux domaines suivants :

- La Conception Assistée par Ordinateur (CAO, CAD pour *Computer Aided Design* en anglais) ;
- La Gestion de la Maquette Numérique (DMU pour *Digital Mock-Up* en anglais), au moyen de modèles 3D créés et modifiés par des systèmes de CAO internes ou externes à l'entreprise ;
- La Simulation Numérique ou Ingénierie Assistée par Ordinateur (IAO, CAE pour *Computer Aided Engineering* en anglais)
- La Gestion de la Documentation Technique (GED, *Document Management* en anglais)
- La Gestion de Configuration (*Configuration Management* en anglais)
- La Gestion des Modifications (*Change Management*, en anglais)
- La Gestion des Connaissances Métier (KM pour *Knowledge Management* en anglais)
- La Gestion des Projets (*Project Management* en anglais)

2.4.5 Standards de données

Un exemple de modèle générique informationnel peut être STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*). Il utilise une description des informations produites à un niveau de modèle conceptuel. Nous citons comme standards de

données :

- ISO 10303 - *STEP the Standard for the Exchange of Product Model Data*;
- AP214 pour les standards automobiles.

2.4.6 L'architecture du PLM

Représente l'information sur le produit lui-même et l'information reliée au produit sous la forme du concept de *Product Data Model*, ou plus court, le *Product Model*. Le *Product Data Model* représente un modèle conceptuel du produit/système dans lequel l'information sur : a) le produit et b) les connexions entre divers éléments d'information sur des objets divers sont analysées à un niveau générique (Saaksvuori et Immonen, 2004). L'information sur le produit peut être divisée en trois grands groupes :

- a. Informations relatives (spécifications) à la définition du produit, qui déterminent les propriétés physiques et fonctionnelles du produit physique ;
- b. Informations à caractère technique, abstraites et conceptuelles, par exemple concernent les objectifs des clients, les spécifications techniques, les fonctions du produit et de ses composants, les fichiers CAO, les enjeux commerciaux et financiers etc. ; toutes ces informations sont stockées dans le *File Vault* (le coffre-fort) ;
- c. Les données concernant le cycle de vie du produit ; les informations liées aux recherches technologiques, la conception, l'industrialisation, la fabrication, l'utilisation, la maintenance, le recyclage du produit sont organisées d'une certaine manière ; ce sont les méta-données qui décrivent ce mode d'organisation du produit et des données du cycle de vie ; c'est les informations sur l'information qui décrivent les données produit, où elles sont stockées, enregistrées et comment elles peuvent être utilisées ; les méta-données sont nécessaires pour maintenir la structure du système tout entier.

Dans l'architecture du PLM les trois groupes cités plus haut sont organisés selon des critères informatiques : *File Vault*, *Metadata base*, *Applications*.

2.4.7 Les entités du PLM

Nous donnons ici les définitions de quelques entités complémentaires à l'intérieur de PLM (Figure 2-17).

Le Coffre Fort (*File Vault*). C'est un système central (serveur) de fichiers de type CAO, Microsoft Office, etc. Il exécute la sauvegarde et la restauration des fichiers, contrôle les versions des fichiers, maintient la base des données des événements, donne les privilèges des utilisateurs etc.

Gestion des Documents. Contient l'index des informations sur les fichiers contenu dans le coffre-fort du système PLM. Il s'agit d'un des aspects des méta-données : c'est l'information sur le type d'information et où est-elle stockée.²²

²² « *Information about what information is located where* », en original.

Gestion des Structures Informationnelles des Produits. Le PLM identifie les informations individuelles du produit et leurs connexions avec d'autres domaines d'informations grâce à la Structure Informationnelle du Produit. C'est un réseau d'Articles connectés hiérarchiquement.

Gestion des Configurations. Gère les variations des propriétés physiques de produits similaires et commute entre les assemblages et les composants interchangeables.

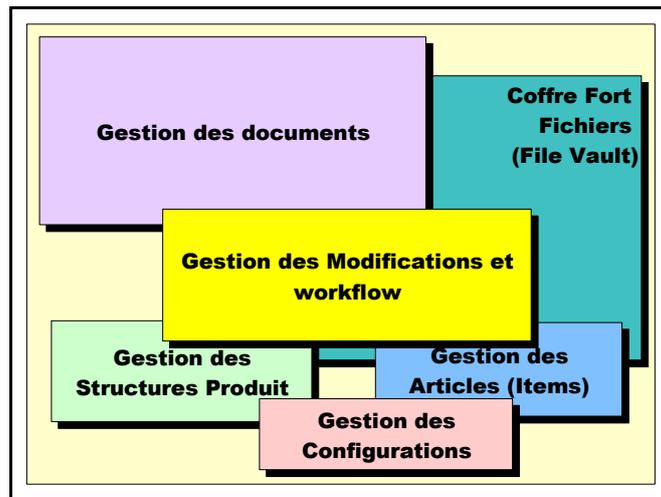


Figure 2-17. La gestion des entités du PLM

Gestion des Articles (*Items*). Représente une des fonctions basiques d'une PLM. Le système contrôle les informations concernant les Articles et leur Cycle de vie. Il gère aussi la création et la maintenance des Articles.

Gestion des Modifications et *workflow*. La gestion des modifications est un outil qui prend en compte la dernière information valide sur les modifications d'un article, comme la version etc. Il enregistre les modifications des documents et des articles et les met ensuite à disposition au bon moment et à la bonne place dans le cadre du cycle de vie.

La gestion des Tâches/Messages (ou *workflow*) est aussi une propriété de base d'un PLM. La communication et la division des tâches sont réalisées à travers des graphiques qui illustrent les chaînes de tâches, par e-mail ou par une liste de tâches.

2.4.8 Intégration du PLM avec les autres applications

A part les entités décrites dans le paragraphe précédent, dans une société, ils existent bien d'autres applications qui interagissent entre elles et avec les entités de PLM (Figure 2-18). Dans la figure ci-dessous nous donnons seulement les plus importantes applications informatiques utilisées en relation avec le PLM :

- PLM – *Product Lifecycle Management*,
- ERP – *Enterprise Ressource Planning* (correspond à l'ancienne GPAO),

- CRM – *Customer Relationship Management* (applications dans le domaine de la vente),
- CAO – *Conception Assistée par Ordinateur*.

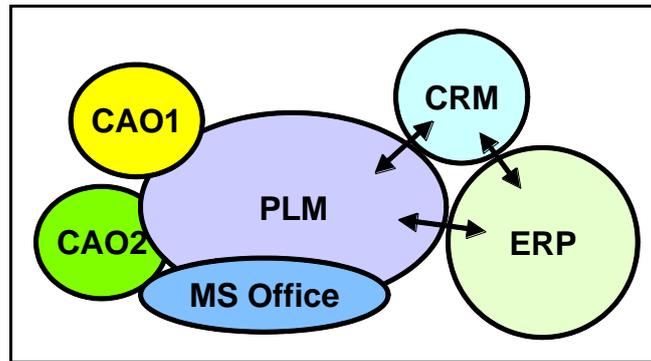


Figure 2-18. L'interaction PLM – autres applications (Saaksvuori et Immonen, 2004)

2.4.9 Applications informatiques dans le contexte PLM

Le marché PLM est assez large et comporte de nombreux acteurs, termes associés à des niveaux différents. Il convient de les préciser afin de ne pas mélanger les entreprises et les compétences.

Le nom de l'éditeur est l'entreprise qui crée et vend le logiciel PLM. Il propose des solutions adaptées pour les utilisateurs d'outils CAO 2D/3D. Soit il fait une intégration complète et transparente de son logiciel PLM au logiciel CAO, soit il offre une intégration partielle applicable à un ensemble de systèmes CAO. Un éditeur CAO peut s'associer à un éditeur PLM afin d'intégrer au mieux leurs logiciels, c'est le cas de Smarteam pour Dassault Système. Le nom du logiciel est le nom du produit PLM : PDMWorks, TeamCenter, Windchill PDMLink etc. L'intégrateur est la société informatique qui s'occupe de l'implémentation d'un logiciel PLM en prenant en charge l'analyse et l'étude de la meilleure solution par rapport aux besoins de l'entreprise client.

Quelques grands groupes se partagent la majorité du marché PLM. Nous présentons dans le chapitre suivant quelques repères dans le domaine.

2.4.9.1 Siemens PLM Software

Leader des logiciels CAO/PLM, il propose plusieurs produits adaptés aux besoins et à la taille de l'entreprise. L'offre pour les grandes entreprises est TeamCenter® qui permet une gestion multi-CAO. L'offre pour les PME est le tout nouveau produit baptisé Velocity Series® basé sur TeamCenter® Express (version rationalisée, préconfigurée et modulable de TeamCenter®). L'intégration la plus forte est faite sur Solid Edge®. TeamCenter® s'intègre également à Catia, SolidWorks, Pro/Engineer, etc.

2.4.9.2 PTC

Un des « *leaders* » du marché PLM est le logiciel qui se nomme Windchill PDMLink. L'intégration la plus forte est faite sur Pro/Engineer®/Wildfire; les autres

logiciels de CAO sont compatibles.

2.4.9.3 DASSAULT SYSTÈME

PDMworks est intégré à SolidWorks®. Pour CATIA, il propose en particulier plusieurs outils : SMARTEAM (gestion des données des produits), DELMIA (définition et simulation des processus de fabrication numériques) et enfin ENOVIA (gestion de l'information liée au cycle de vie des produits). DS axe sa stratégie sur 4 principes :

- L'approche du marché orienté processus.
- Les espaces de travail collaboratif, la communication, la collaboration via un environnement 3D commun.
- Le modèle PPR (Produit, Procédé, Ressources) pour relier les représentations du produit, les ressources de fabrication (outillage, usine, opérateurs) et les procédés de production.
- La connaissance, pour conserver, partager et réutiliser les données de l'entreprise, le savoir-faire.

D'autres éditeurs sont présents sur le marché PLM, comme Assetium qui propose Audros PLM, Softech qui propose ProductCenter, Lascom qui commercialise Advitium et bien d'autres. Le tableau récapitulatif suivant permet de voir les différentes possibilités selon le logiciel CAO utilisé (Tableau 2-2) :

Tableau 2-2 Synthèse des logiciels PLM/PDM

CAO	PLM/PDM	Editeur
CATIA	Smarteam	Smarteam
	Enovia	
	Windchill	PTC
	Drawing Data Manager	
	TeamCenter Express	Siemens
	CENTRIC Open PLM	
SolidWorks	Audros PLM	Assetium
	PDM Works	
	TeamCenter Express	Siemens
	ProductCenter	Softech
Pro/ENGINEER	PDM Link	PTC
	Windchill	PTC
	Wildfire	Spring Technologie PTC
Unigraphics	UGS TeamCenter Engineering	
AutoCAD	ImageSite® Doc Management	
	ProductCenter	Softech
	ImageSite® Archive	
	Windchill	PTC

	Audros PLM	Assetium
	Advitium	Lascom
Solid Edge	UGS velocity series	UGS
Autodesk	Streamline	
	Audros PLM	Assetium
	SSA PLM	SSA Global
Inventor	Advitium	Lascom
	ProductCenter	Softtech
Mechanical Center	ProductCenter	Softtech

2.4.10 Conclusion

Malgré les efforts consentis par les éditeurs de logiciels, les retours sur les investissements (ROI) – en termes de réduction des délais ou de maîtrise des coûts - restent assez difficilement mesurables. Nous pouvons noter aussi que les démarches de déploiement de tels systèmes sont très complexes et que les temps d'implémentation et de formation du personnel sont conséquents. L'évolution dans le temps de tels produits pose des problèmes de suivi et de pilotage qui nécessitent des ressources disponibles supplémentaires.

Une des réponses possibles serait de définir des modèles intégrés facilitant la conception des systèmes produit/processus/organisation ayant comme noyau la conception et le développement innovateurs. Ceci favoriserait la conservation et l'exploitation optimales du patrimoine technique de l'entreprise ayant comme objectif la maîtrise des coûts et des délais par la capitalisation du savoir-faire. « *Les systèmes de PLM sont par nature des outils de capitalisation, ... ont comme vocation à intégrer la connaissance.* » (Roucoules et al, 2006).

2.5 Le processus de conception

2.5.1 Intégration des besoins des clients dans la conception - QFD

La compétitivité d'une entreprise est donnée, surtout, par sa capacité « *d'écouter la voix du client* » (en anglais, *Voice of Customer* - VoC) et à l'intégrer dans la conception de ces produits. Le non-respect de cette assertion est pénalisé par des coûts et des délais supplémentaires qui mettent en péril l'existence de la société. Jusqu'à une certaine période (avant les années '80) la découverte des besoins des clients était une tâche assurée par le Marketing avec peu d'implication de la part des concepteurs. L'analyse des exigences reste une tâche critique pour le succès de la conception d'un système. Les exigences doivent être documentées, passibles de poursuites judiciaires, mesurable, testable, claires, liées aux besoins identifiés et définies à un niveau de détail suffisant pour la conception du système. Les exigences peuvent être de nature : architecturale, structurelle, comportementale, fonctionnelle et non-fonctionnelle. Dans la première phase de définition du système (Figure 2-19) elles sont couplées à l'AF (Analyse Fonctionnelle).

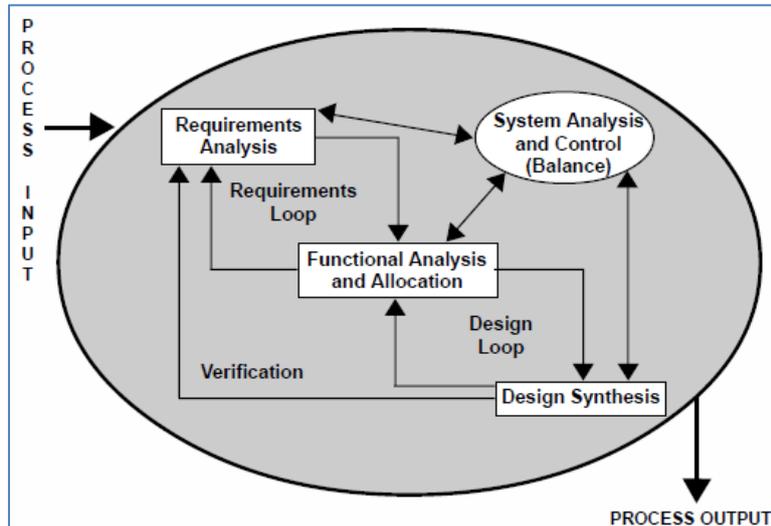


Figure 2-19 Analyse des exigences dans d'ingénierie des systèmes (SEF, 2001)

Il existe, par exemple, la norme EIA-632 qui donne quelques recommandations sur les relations entre les exigences, en fonction de leur provenance (Figure 2-20).

- Exigences de l'acquéreur (*Acquirer requirements*),
- Exigences client,
- Exigences d'une autre partie prenante (*Stakeholders requirements*).

La recherche des exigences, leur utilisation et leur maîtrise se fait à travers les recommandations de la norme concernant le processus et la structuration du système. Ces exigences vont être traitées de manière à obtenir un tout cohérent avec le processus (modèle) de conception souhaité. L'avancement de celui-ci sera validé en fonction du système des exigences.

Nous pouvons définir le besoin comme la capacité de l'information provenant du client à indiquer des actions spécifiques à prendre afin d'atteindre les objectifs souhaités par l'entreprise. Le produit doit répondre à la question « Pourquoi faire », c'est-à-dire, les prestations doivent répondre aux mieux aux besoins identifiés (Figure 2-21). Une autre définition tient compte de la verbalisation du besoin à travers un outil « bête à corne » : le produit rend service au client en agissant sur la matière d'œuvre pour satisfaire le besoin. Au fond, le besoin exprimé, une fois caractérisé, est une prestation du produit. On cherche une optimisation de deux paramètres : la satisfaction du client et la profitabilité de l'entreprise.

Le problème posé était surtout d'élaborer une méthode utilisable dans le processus de conception de nouveaux produits. Von Hippel (Hippel, 1978) a proposé, via *Customer-Active Paradigm* (CAP), une méthode pour l'intégration des spécifications des clients dans le processus de développement des produits (Saffarpour A., 2009). Ali Saffarpour cite encore Griffin (Griffin et al, 1993) qui a défini *Voice of Customer* (VoC) comme un set de spécifications avec des priorités données par le client. VoC représente une forme évoluée d'influence des besoins sur les décisions stratégiques et opérationnelles de l'entreprise.

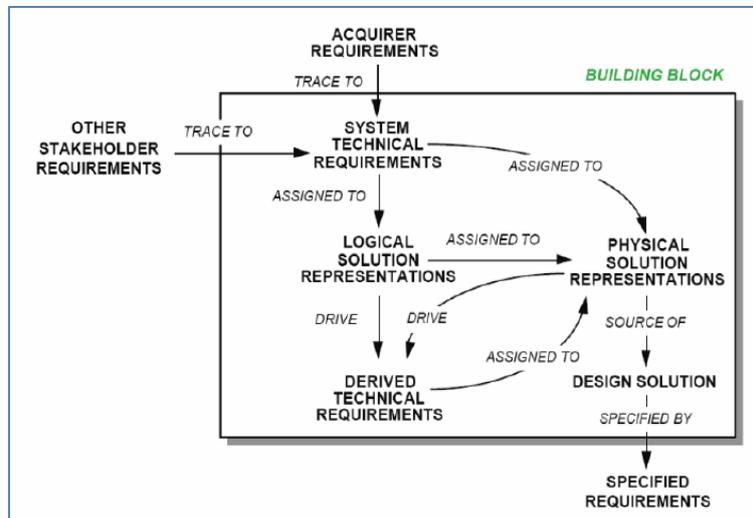


Figure 2-20. Relations entre les catégories d'exigences, selon la norme EIA-632

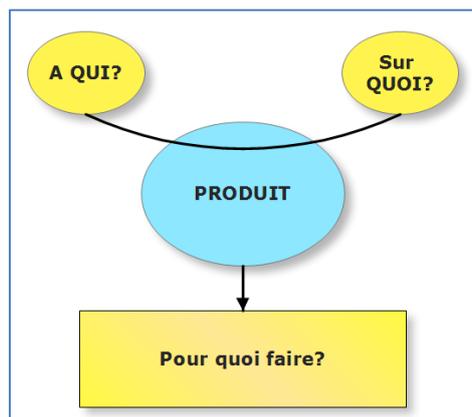


Figure 2-21 Les prestations et l'expression du besoin

Nous pouvons encore citer, dans la littérature, une multitude de méthodes appartenant au marketing, comme : *Customer Requirement Management* (CRM), *Customer Profitability Management* (CPM), *Mass Customization* (MC) etc. Ces concepts fixent les points clés de la réponse qu'une entreprise apporte aux demandes des clients :

- Satisfaction de clients,
- Bonne traduction des besoins en attributs métiers du produit,
- Permanente adaptation (flexibilité) de la réponse spécifique apportée à la demande, etc.

Un excellent outil pour aider le passage des besoins ou des attentes des clients vers les concepteurs est la méthode QFD (*Quality Function Deployment*) inventée en 1966 par Yoji Akao. Selon son créateur, le but du QFD est d'intégrer la demande du client tout au long de la conception. Le dr. Akao a joué un rôle

fondamental dans le développement de la Qualité Totale et dans l'application des principes de l'assurance qualité à la conception et à la fabrication par le QFD (Figure 2-22).

La méthode QFD consiste en une procédure structurée (en « cascade ») qui commence par l'identification des attentes du client, qui continue avec la définition des fonctions qui traduisent ces attentes, et ensuite avec la déduction des moyens nécessaires à l'application de ces fonctions.

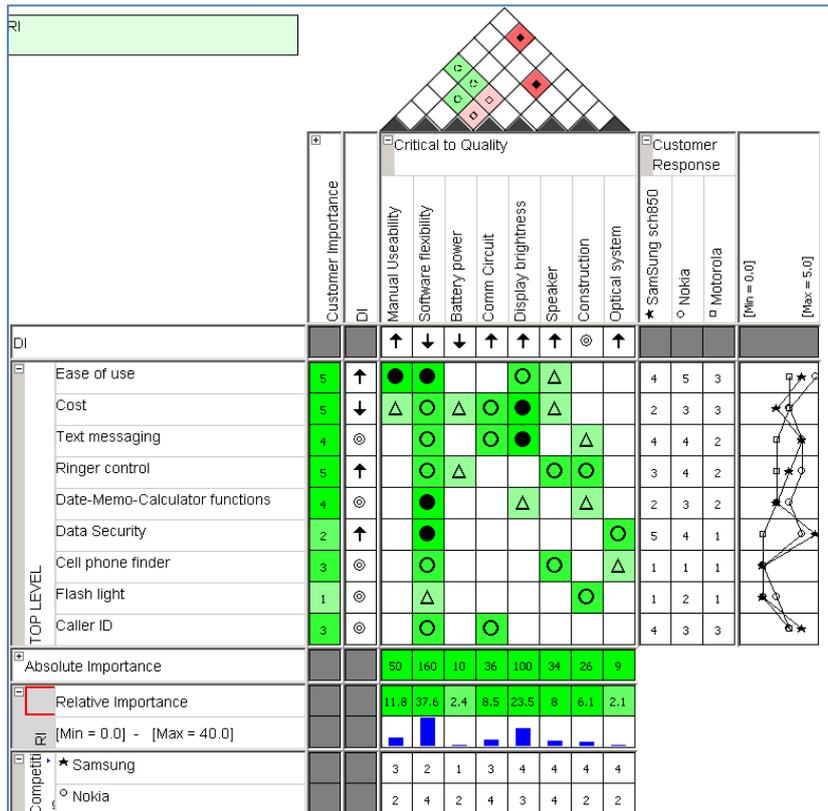


Figure 2-22 QFD (Axiomatic Design Solutions, Inc.)

2.5.2 L'importance de la conception

Depuis le début de l'ère de globalisation, nous avons pu constater le phénomène de délocalisation de la production manufacturière vers les régions du globe où le coût de la main d'œuvre était beaucoup plus bas. Les entreprises ont remarqué, en même temps, que le gain de compétitivité dépendait d'une nette amélioration de la qualité du processus de conception des produits. Ainsi, aux USA, le *National Research Council* (NRC, 1991) a publié une étude majeure sur cette problématique qui a déterminé une meilleure approche vis-à-vis de la démarche de conception. Dans notre recherche, nous situons le processus de conception au cœur du cycle de vie du système-produit. C'est pour cette raison que la modélisation du

cycle de vie commence par l'étude comparée des modèles existants du processus de conception.

2.5.2.1 Impact sur le coût du produit

Plusieurs études montrent que 75% du coût total de cycle de vie (Lotter, 1986) est déterminé pendant la phase de conception. Selon certains auteurs (Drăghici, 1999) ce pourcentage monte jusqu'à 80% (Figure 2-5). En effet, les décisions prises pendant cette phase influencent plusieurs facteurs comme : le coût, les performances, la fiabilité, la sécurité et l'impact sur l'environnement du produit. La figure ci-dessous (Figure 2-23) nous montre que la plus grande opportunité d'influencer le coût total du cycle de vie est située en amont, dans la phase de conception (définition et développement) du produit. En d'autres termes, les décisions de conception devraient être prises en prenant en compte le coût total de cycle de vie du produit.

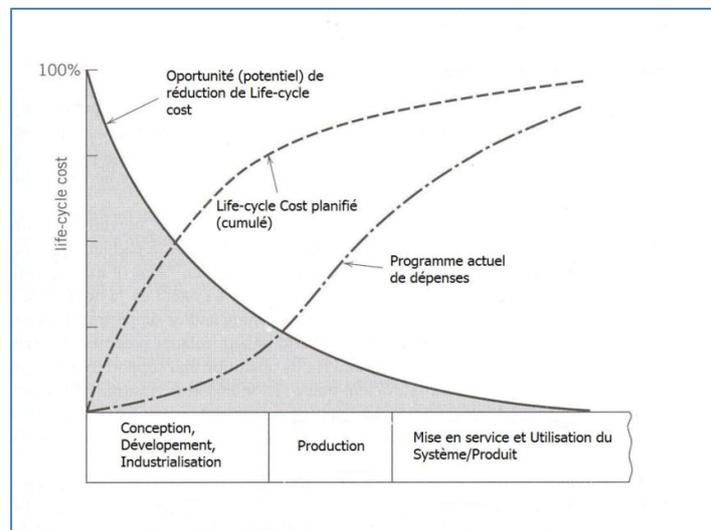


Figure 2-23 L'évolution du Coût Global du Cycle de vie selon (Blanchard, 2004)

Selon (Dieter et Schmidt, 2007) seulement environ 5% du coût total du produit est représenté par les dépenses des travaux de conception (Figure 2-24), tandis que le reste de 95% est consommé par les dépenses en matière, capital, main d'œuvre etc. Pourtant, les décisions prises pendant la conception affectent environ 70-80% du coût de revient du produit. En d'autres termes, les décisions prises en dehors de la phase de conception influencent environ 25% du coût total du produit. Si l'on constate une erreur de conception sur le produit juste avant son lancement sur les marchés, il va falloir déboursé une grosse somme d'argent pour corriger le problème.

Un autre indicateur qui montre l'importance de la conception est représenté par les coûts des modifications (Figure 2-25). Le montant de ces coûts varie en fonction du positionnement des modifications par rapport aux phases principales de conception. Ainsi, comme le montre la figure ci-dessous, les coûts des modifications faites en aval du cycle de vie sont beaucoup plus importants que ceux effectués en

amont.

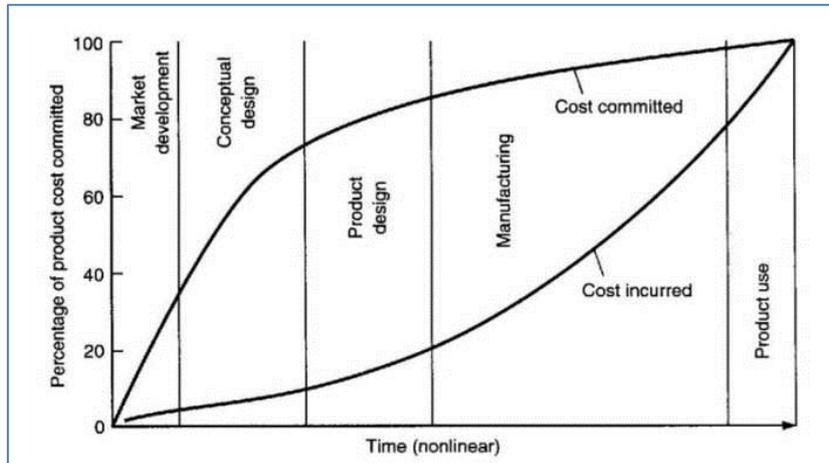


Figure 2-24 L'engagement des coûts durant la conception, (Dieter et Schmidt, 2007)

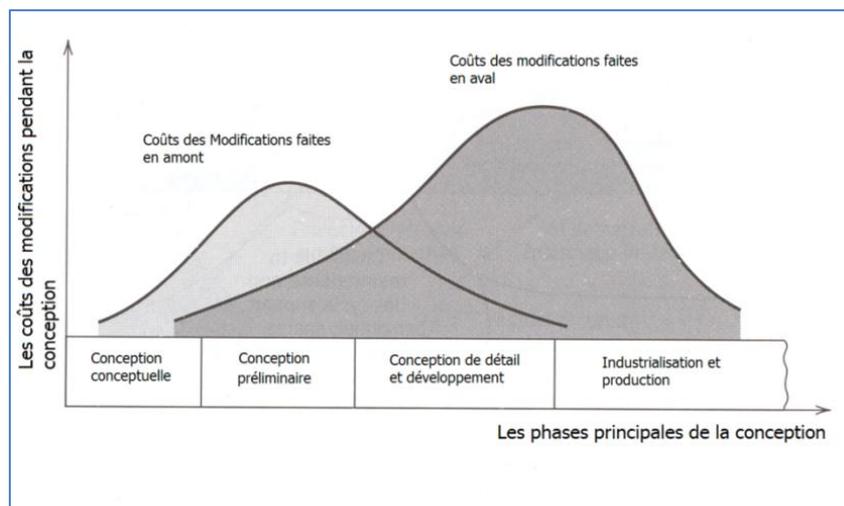


Figure 2-25 L'impact des modifications sur le coût de la conception (Blanchard, 2004)

La tendance globale de déplacer la production des pays industrialisés vers des pays émergents a accentué l'importance donnée par les premiers à l'innovation et à la conception pour garder les bénéfices du savoir et ajouter de la valeur aux produits. Par conséquent, les chercheurs ont développé des outils et techniques dans le but d'aider les activités de conception. Ainsi ont été créées des méthodologies de conception capables d'assister les concepteurs pendant les diverses phases de création de nouveaux produits. Il a été démontré qu'une activité d'étude conceptuelle de faible qualité n'a jamais pu être rattrapée, même par un développement de détails d'excellente facture.

En conclusion, nous pouvons affirmer que les décisions prises pendant le

processus de conception coûtent très peu par rapport au coût total du cycle de vie, mais qu'elles ont une influence majeure sur le coût final du produit.

2.5.2.2 Impact sur la qualité

Le second impact majeur de la conception est celui exercé sur la qualité du produit (Dieter et Schmidt, 2007). Selon l'ancienne conception, la qualité du produit était perçue lors du contrôle effectué à la sortie de la ligne de production. Les contrôles intermédiaires faisaient partie du même concept de qualité. Aujourd'hui, nous constatons une évolution du concept de qualité dans le sens de son intégration et réalisation, faites très tôt, dans le processus de conception. Un autre aspect important de la qualité intégrée dans la phase de conception est l'incorporation des besoins et performances effectivement souhaités par les clients qui achèteront le produit. De plus, la conception doit être effectuée sans erreurs pour que le produit soit fabriqué sans défauts à un coût compétitif. Nous pouvons conclure qu'une entreprise ne peut pas compenser pendant la phase de fabrication les défauts introduits durant la phase de conception.

2.5.2.3 Impact sur le temps de cycle de vie

Le troisième domaine où la conception peut déterminer la compétitivité d'une entreprise est le temps de cycle de vie. Celui-ci se réfère au temps de développement nécessaire pour introduire un nouveau produit sur le marché. L'utilisation des nouvelles méthodes d'organisation, des « *Computer Aided X* », des outils de « *prototyping* » et, surtout, des méthodologies de conception contribuent à la réduction des temps de cycles. En général, ces méthodes ne déterminent pas seulement la réduction du temps de cycle mais réduisent aussi le coût de développement du produit. Par conséquent, la conception doit être gérée pour augmenter la qualité et la compétitivité en termes de coûts, et ceci dans les plus bref délais possibles (Dieter et Schmidt, 2007).

2.5.3 La place du processus de conception

AFNOR (FD X50-127, 2002) décrit la conception comme une activité créatrice ayant comme objectif la définition d'un produit industriellement réalisable, en partant des besoins définis par le client dans un champ de connaissances existantes. Par extension, l'usage du mot conception s'étend au cycle de vie complet du produit, à partir de l'idée jusqu'à l'extinction (recyclage). Ici, par produit nous entendons tout objet physique (équipement) ou conceptuel (services ou techniques). Certains auteurs, comme (Dixon, 1966), placent le travail de l'ingénieur concepteur à l'intersection entre deux directions : culturelle et technique (Figure 2-26).

La conception est une activité créatrice qui appelle à une bonne formation en mathématiques, physique, chimie, mécanique, thermodynamique, hydrodynamique, ingénierie électrique, génie de la production, technologie des matériaux, éléments de machine et de la théorie du design etc., ainsi qu'à des connaissances et à de l'expérience dans le domaine d'intérêt. L'initiative, la résolution, la vision économique, la ténacité, l'optimisme et le travail d'équipe sont des qualités indispensables aux concepteurs.

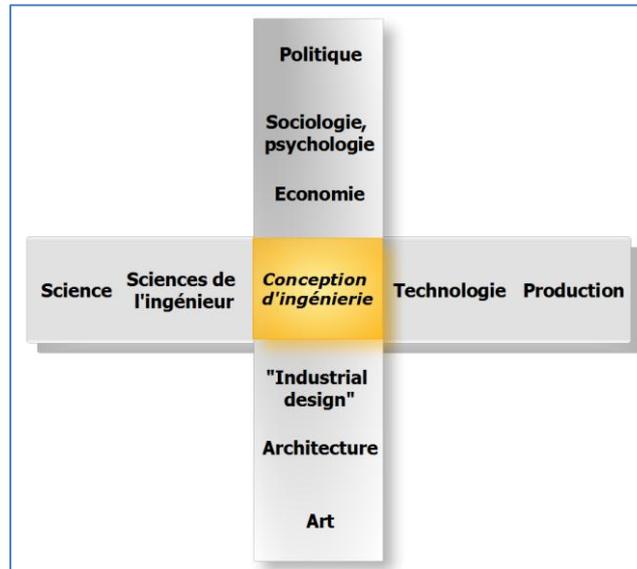


Figure 2-26 La position centrale de l'activité de conception (Dixon, 1966)

Selon (Blanchard, 2004), la conception est une activité qui :

- touche presque tous les domaines de la vie humaine,
- utilise les lois et les connaissances de la science,
- s'appuie sur une expérience particulière,
- prévoit les conditions préalables à la réalisation physique de la solution des idées,
- exige de l'intégrité professionnelle et des responsabilités.

La conception est l'optimisation des objectifs donnés par rapport à un champ de contraintes. Les exigences changent avec le temps, de sorte qu'une solution ne peut être optimisée que pour un ensemble particulier de circonstances.

2.5.4 Caractéristiques de la démarche de conception

Selon (Perrin, 2001), la rationalisation de la démarche de conception conduit à la constitution des méthodes de conception (procédures, techniques ou autres aides utilisées par les concepteurs). Les origines de ces méthodes de conception sont assez diverse : formalisation des activités des concepteurs, recherche opérationnelle, théorie de la décision, management de la qualité, analyse de la valeur etc.

L'analyse du cycle de vie des produits ne peut pas commencer sans mettre en évidence le processus clé de création de nouveaux produits, c'est-à-dire la conception. Le processus de conception a une nature très complexe parce qu'il englobe d'autres processus et activités intellectuelles qui présentent des caractéristiques assez variés et, apparemment, contradictoires. Dans un travail de synthèse sur les activités de conception (Perrin, 2001) a recensé les principales caractéristiques d'une démarche de conception selon (Evbuomwan et al. 1996) :

- La conception est une activité d'énonciation de problèmes (*problem forming*) ;
- La conception est un processus de résolution de problèmes (*problem solving*) ;
- La conception est une activité « opportuniste » en utilisant à la fois une approche *top-down* et *bottom-up* ;
- La conception est activité créatrice qui fait appel à l'imagination et à des activités de mise en relation, de reconnaissance d'analogies et plus généralement de reconnaissances de structures (*patterns*) ;
- La conception utilise des raisonnements logiques, des calculs, des simulations, des expérimentations pour faire sortir des solutions et pour les faire évaluer ;
- La conception est un processus de prise de décisions (*decision making*) qui s'appuie sur des activités d'évaluation ;
- La conception est un processus itératif qui nécessite souvent des retours en arrière pour préciser ou revoir des spécifications ou des solutions déjà retenues.

Dans le processus de conception d'un artéfact nous retrouvons toutes ces caractéristiques dans des proportions assez variables. Leur poids dépend de la complexité du système, du type de système, du domaine de la technologie utilisée. Elles sont aussi complémentaires et la démarche de conception peut être caractérisée par l'objectif d'intégrer au mieux ces caractéristiques. Du point de vue organisationnel, la conception est une phase essentielle faisant partie du cycle de vie du produit. Celui-ci est démarré par un besoin du marché ou par une idée. Il commence par la planification du produit et se termine par le recyclage ou la mort du produit. Le cycle de vie est un processus de transformation de la matière première en un produit avec une importante valeur rajouté.

Il existe plusieurs définitions de la conception (*design* en anglais) qui dépendent fortement de l'aire culturelle à laquelle appartient l'auteur ainsi que de son « *background* » (Blessing et Chakrabarti, 2009). Lorsque nous abordons le thème de la conception, nous la plaçons dans le contexte plus large des activités qui génèrent un produit à partir d'un besoin, d'une idée ou d'une technologie, produit qui satisfait les besoins des usagers ou autres parties prenantes. La nature du besoin perçu peut appartenir du social à l'économique en passant par le domaine émotionnel. Selon (Blessing et Chakrabarti, 2009) l'impulsion pour commencer un processus de création de produit peut venir :

- Du marché - besoins des utilisateurs ou de la concurrence ;
- Des besoins de développement internes à l'entreprise - stratégie de développement, réduction des coûts, objectifs d'automatisation ou de diversification ;
- D'autres sources - législation, environnement, société, sphère politique etc.

2.5.4.1 Types de raisonnements dans la conception

Dans (Perrin, 2001), on cite les trois logiques d'action de conception (Asimow, 1962) comme moyen de dépasser la dichotomie un peu grossière entre la démarche de conception qui serait synthétique et la démarche scientifique qui serait

analytique selon (Simon, 1991). Asimow propose les trois logiques d'action qui ont un rôle structurant dans le processus de conception :

- **Divergence** : dans le sens de l'élargissement de l'espace de recherche de solutions ; à caractère prédominant analytique ;
- **Transformation** : c'est la phase d'innovation, de créativité, - à partir des résultats de la phase de divergence on construit une structure, un modèle, et une solution ; à caractère prédominant synthétique ;
- **Convergence** : réduction progressive de l'incertitude causée par la multitude des solutions possibles, dans le but de trouver la solution optimale ; à caractère prédominant synthétique.

2.5.4.2 Modèle itératif simplifié

Il n'existe pas une description universellement reconnue d'une séquence de pas de conception. Un des premiers à identifier le noyau du processus de conception a été Maurice Asimow. Selon lui, le processus de conception consiste en une séquence élémentaire d'opérations de conception, comme le montre la Figure 2-27.

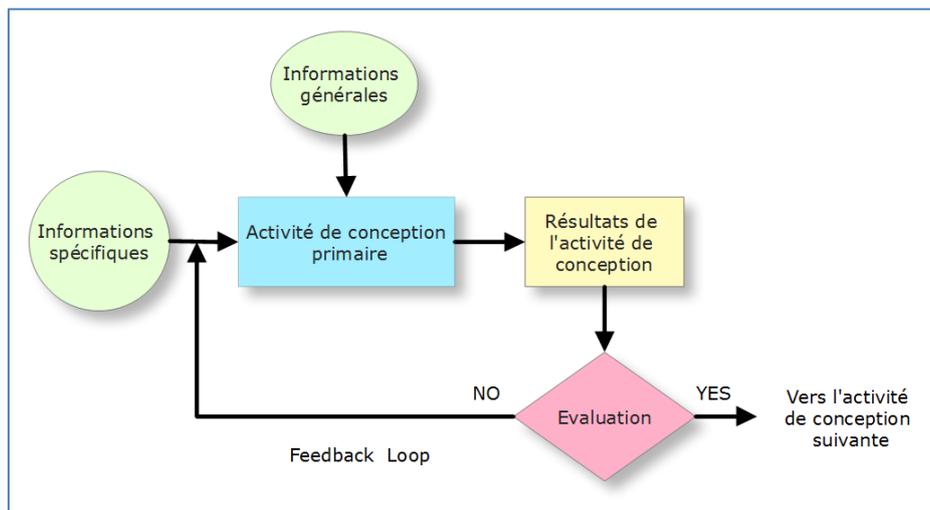


Figure 2-27. Le module de base du processus de conception (Asimow, 1962)

Les opérations élémentaires peuvent être, toujours selon (Asimow, 1962) :

1. Exploration des solutions alternatives qui satisfont les spécifications des besoins.
2. Formulation d'un modèle mathématique du meilleur concept de système.
3. Spécification des composants d'un sous-système.
4. Choix des matériaux.

Pour chaque activité de conception, on recherche de l'information générale technique et commerciale et aussi de l'information spécifique en fonction des tâches à effectuer en vue de l'obtention d'un résultat spécifique. Par exemple, pour l'obtention d'un catalogue de roulement, tables des propriétés des polymères composites, etc., l'acquisition de l'information est une étape vitale et souvent

difficile, mais qui avec le temps (et l'expérience) devient plus facile. Une fois l'acquisition de l'information terminée, l'équipe de conception entame (à l'aide des connaissances techniques spécifiques et des outils de conception sur ordinateur) les activités proprement-dites de conception. Le résultat obtenu se présente soit sous la forme d'un modèle mathématique, soit sous celle d'un prototype virtuel (maquette CAO) ou physique (par prototypage rapide). On produit une ou plusieurs alternatives et on teste les solutions selon un set de critères mis en place. Si l'évaluation est positive, on passe à l'étape suivante, sinon, on entame une nouvelle boucle (*feedback*). On appelle ceci une « itération ». Le résultat final de cette activité de conception peut être non seulement l'obtention d'une collection d'objets qui forment un système (ou sous-système) physique mais aussi le développement d'une nouvelle information qui peut être utilisée ailleurs dans l'organisation.

Ce module de base peut s'enchaîner avec un autre module dans le cadre d'un processus de conception plus complexe. Mais il peut être stoppé si les objectifs techniques et commerciaux ne peuvent être atteints. Même dans cette situation, les informations obtenues sont utilisables plus tard en tant que base des données techniques représentant l'expérience (*know-how*) de l'organisation dans son domaine. La Figure 2-27 met en évidence un nombre importants d'aspects liés au processus de la conception :

- Le modèle (système) le plus complexe peut être décomposé en une séquence élémentaire selon l'objectif de la conception.
- Chaque objectif nécessite une évaluation et un certain nombre d'itérations. Le fait d'effectuer plusieurs itérations ne peut pas constituer une faiblesse de l'organisation ou une défaillance personnelle.
- La conception est un processus intellectuel et elle est le résultat d'erreurs et de validations. L'aspect itératif de la conception constitue une opportunité d'améliorer la solution sur la base des résultats antérieurs. L'itération est en concordance avec les méthodes d'optimisation.

Les itérations engendrent un effort de recherche de compromis dans le domaine : technique, économique, social etc. On peut soulever ici le caractère non-linéaire de cette démarche et la présence de paramètres non-techniques dans la recherche du compromis dans la conception.

2.5.4.3 Typologies de processus de conception

Selon (Dieter et Schmidt, 2007) il existe cinq types de processus de conception :

Conception innovatrice. Elle emploie un concept innovateur, et original pour satisfaire un besoin. Le besoin peut être lui-même original. Une conception originale aboutit aux inventions. Quand une conception innovatrice remporte le succès, les marchés peuvent être « perturbés » par l'apparition d'une nouvelle technologie (par exemple, l'apparition du microprocesseur).

Conception adaptative. Quand le concepteur adapte une solution connue pour satisfaire un besoin différent pour un nouveau produit. Cette démarche de conception utilise la synthèse comme type de raisonnement.

Re-conception. Les concepteurs s'emploient souvent pour améliorer une conception existante. On améliore un composant défaillant ou on améliore la conception d'un module pour en diminuer le coût. Souvent l'amélioration n'est pas accompagnée par une modification du principe technologique ou du concept de la conception originale. Ce type de conception est aussi appelé variante paramétrique

quand la conception consiste en la modification de certains paramètres.

Conception sélective. L'utilisation d'éléments standards, comme : les roulements, les moteurs, les pompes par les concepteurs impose la sélection (le bon choix) parmi les produits offerts par les fournisseurs.

« **Design** » **industriel.** Cette forme de conception s'occupe de l'amélioration de l'attrait d'un produit exercé sur les sens humains. Ce type de conception était considéré, jusqu'à il n'y pas si longtemps, plus apparenté au domaine artistique qu'à celui de l'ingénierie, mais la vision a changé dans le sens d'une intégration fonctionnelle plus forte avec le produit et le client. Il donne la mesure de comment l'utilisateur interagit avec le produit.

2.5.4.4 Méthode de conception versus méthode scientifique

Hill, dans (Hill, 1970), compare les deux méthodes: scientifique et de conception (Figure 2-28). Selon lui, la méthode scientifique est caractérisée par l'existence, au point de départ, d'un corpus de connaissances basé sur l'observation des phénomènes naturels. Le scientifique s'interroge avec curiosité et formule une hypothèse. Celle-ci fait l'objet d'une analyse logique (et/ou une expérimentation) qui infirme ou confirme l'hypothèse de départ. Souvent l'analyse révèle des défauts ou inconsistances, ce qui oblige le scientifique à effectuer plusieurs itérations. Finalement, quand la nouvelle idée est confirmée, elle est acceptée et communiquée à la communauté des scientifiques, qui l'intègre dans le corpus existant du savoir.

La démarche de conception est similaire à la méthode scientifique, si nous ne tenons pas compte des différences de points de vue. La méthode de conception est aussi basée sur une base de connaissances scientifiques, mais elle ajoute à celle-ci d'autres connaissances comme sur les composants, les matériaux, les méthodes de fabrication, les conditions de marketing et économiques, etc. Plutôt que la curiosité, le besoin de la société constitue le moteur de la démarche. Le besoin est conceptualisé sous la forme d'un modèle qui est soumis à divers tests de faisabilités. Ces opérations peuvent être « bouclées » (itérations) plusieurs fois jusqu'à ce que l'on décide l'arrêt ou la poursuite du projet. La conception est complètement terminée quand le produit est accepté comme part de la technologie existante et fait progresser l'état de l'art d'un domaine particulier de la technologie.

Une différence philosophique entre les deux méthodes a été avancée par l'économiste Herbert Simon. Il indique que la science est concernée par la création de connaissances sur les phénomènes naturels arrivants à des objets, tandis que le « *design* » (la conception) est concerné par la création des connaissances sur les phénomènes et les « objets de l'artificiel ». Les objets de l'artificiel sont ceux créés par l'homme plutôt que par la nature. Ainsi, la science est basée sur des études de l'aire observée²³ tandis que la conception est basée sur des concepts artificiels caractérisés en termes de fonctions, besoins et optimisation.

²³ Cette différence sera discutée plus en détail dans les chapitres suivants.

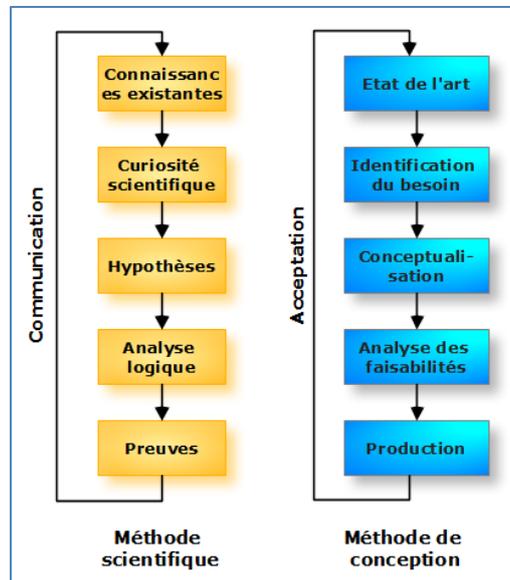


Figure 2-28 Comparaison entre les méthodes scientifique et de conception (Hill, 1970)

(Dieter et Schmidt, 2007) insiste sur le rôle important, dans la conception, de l'identification des besoins des clients. Les besoins sont identifiés à plusieurs niveaux et dans des moments différents dans une entreprise et dans le cadre d'un projet. Il existe deux vecteurs qui introduisent les besoins du marché dans le processus de conception : les clients et les services d'après-vente. D'autres besoins sont générés par les organisations de toute sorte, les associations publiques et de commerce etc. En général, les besoins expriment un désaccord, une insatisfaction par rapport à la situation existante ce qui génère un processus de résolution de problème. C'est d'ailleurs celui-ci qui est identifié par certains auteurs avec le processus de conception. Ainsi les phases d'un processus de résolution de problème deviennent, par analogie, les étapes du processus de conception.

2.5.4.5 Paradoxe connaissance du problème - liberté de conception

Nous pouvons établir un lien entre l'établissement d'une courbe d'apprentissage et la mesure des connaissances accumulées sur une problématique de conception. Une courbe d'apprentissage décrit le degré à succès obtenu pendant l'apprentissage au cours du temps. Il est un diagramme en ce que l'axe horizontal représente le temps passé et l'axe vertical le nombre de succès obtenus dans ce temps. La courbe d'apprentissage est une courbe de type logarithmique qui, en général, a la forme suivante :

$$Et_x = K \cdot x^{\log_2 b}$$

où :

- Et_x - est le nombre d'heures pour produire la x -ième unité,
- K - nombre d'heures pour produire la première unité,
- x - nombre d'unités,
- b - pourcentage d'apprentissage.

Historiquement, le concept de courbe d'apprentissage provient du psychologue allemand Hermann Ebbinghaus (1850 – 1909) qui, en 1885, a utilisé pour la première fois ce terme en son monographie « *Über donnes Gedächtnis* ».

Dans la psychologie s'utilise aussi sans une définition stricte des coordonnées x et y , de telle sorte que la question de la pente de la courbe s'apprécie dans le cas spécial envisagé. La première définition pour l'usage dans la gestion des entreprises a été faite par Theodore Paul Wright en 1936.²⁴

Ce qui caractérise la conception est le fait que l'avancement dans la connaissance du problème et des technologies est associé à la recherche de solutions alternatives au problème posé initialement. L'équipe de conception avance selon une « *learning curve* ». En même temps, on prend des décisions concernant la conception de détail, sur les technologies possibles, où on conclue des contrats sur l'acquisition des équipements etc.

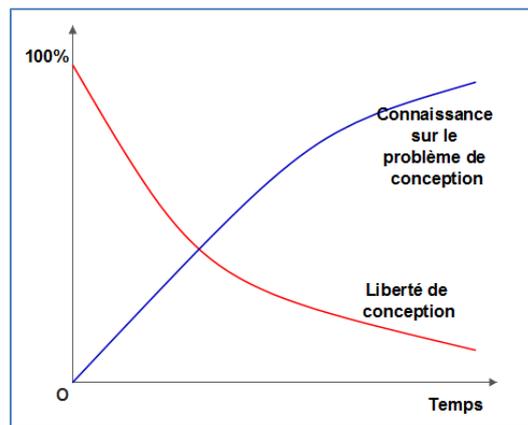


Figure 2-29. Le paradoxe de la conception (Dieter et Schmidt, 2007)

Ainsi, comme la Figure 2-29 le montre, la possibilité de l'équipe de conception de revenir sur les décisions déjà prises est de plus en plus diminuée au fur et à la mesure de l'avancement dans le projet ce qui nous amène à constater la présence du paradoxe de la conception : l'avancement dans la connaissance du problème et la diminution de la marge de liberté dans l'amélioration de conception.

Au début, les concepteurs avaient la possibilité d'effectuer des modifications sans trop de pénalités financières mais, par contre, ils ne connaissaient peut-être pas très bien la manière de faire une meilleure conception. Le paradoxe s'installe quand l'équipe maîtrise bien son problème mais quand la conception est essentiellement figée parce que le coût des modifications est prohibitif.

La solution consiste à décaler dans le temps les deux courbes, c'est-à-dire que l'équipe de conception devrait travailler, autant que possible, très tôt dans le projet, sur la définition du problème.

Par conséquent, les concepteurs doivent apprendre (« *learning curve* ») à travailler d'une manière autonome vers un but commun, à être habiles dans la collecte des informations et à apprendre à communiquer les connaissances

²⁴ http://fr.wikilingue.com/es/Courbe_d%27apprentissage.

importantes aux autres membres de l'équipe de conception.

2.5.4.6 Le processus d'innovation dans la conception

Le schéma de pensée, prégnant dans les années 1980, voulant que le processus d'innovation soit linéaire et descendant directement de la recherche fondamentale à la production via le développement, pour intégrer le marché, a été sérieusement mis en cause. Selon (Kline et Rosenberg, 1986), les activités de conception jouent un rôle central dans le succès ou l'échec du processus d'innovation : « *La conception est essentielle pour initier une innovation technologique... Le processus central de l'innovation ... est la conception* ». Dans la littérature, de nombreux auteurs associent également méthodes de créativité (qualité du concepteur) et innovation (processus de « production industrielle » de l'innovation) (De Brabandere, 2004), (Jakobiak, 2005), sans trop préciser où ils sont positionnés vis-à-vis du processus de conception.

La méthode ASIT (acronyme *Advanced Systematic Inventive Thinking*), une extraction de la méthode TRIZ, a été imaginée par Horowitz (Horowitz, 2003). Elle utilise deux concepts nouveaux par rapport à la méthode TRIZ : la condition du « Monde Clos » et celle du « changement qualitatif ». Le fait de poser cette dernière condition permet de « casser » les contradictions, ces mêmes contradictions que l'on essaie de résoudre dans TRIZ.

2.6 Modèles du processus de conception

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'étude des modèles de cycle de vie des systèmes complexes commence par l'analyse des processus de conception. L'étude de la démarche de conception a un caractère complexe et difficile à modéliser mais ce processus (la conception) constitue le « cœur » de la vie d'un produit.

Depuis que le statut épistémologique du processus de conception a été reconsidéré, la littérature technique nous livre une multitude de modèles. Nous mentionnons que notre attention sera portée sur les modèles de l'ensemble du processus de conception ou de cycle de vie et non sur les outils utilisés ponctuellement.

Selon les travaux de (Dixon, 1987 et (Evbuomwan et al, 1996) les typologies principales des modèles de conception se classent en trois catégories :

- a. Les modèles **prescriptifs** ont pour objectif de proposer une procédure de conception : le modèle de *Engineering Design* (Pahl et al, 2007) met en avant la convergence comme logique principale d'action de conception ;
- b. Les modèles **descriptifs** ou cognitifs ont comme objectif de rendre compte des activités des concepteurs : séminaire *Research in the Design Thinking* (Cross et al, 1992) ;
- c. Les modèles **computationnels** intègrent les techniques numériques et qualitatives de l'intelligence artificielle : séminaire *Research in the Design Thinking* (Cross et al, 1992).

Reyman (Reyman, 2001) précise seulement les premières deux modèles de conception.

Nous mentionnons encore une autre typologie (Perrin, 2001) qui part du

principe que le processus de conception est lui-même le résultat d'un processus de conception. Suite à l'application de cette hypothèse il est possible de retrouver les modèles mentaux qui ont été appliqués pour la construction du modèle de conception et ainsi les *conceptual designs* (ci-après le modèle de Pahl et Beitz). La diversité des modèles de conception peut s'expliquer par la liberté de choix des concepteurs de mettre l'accent sur l'une des trois logiques d'action de conception : divergence, transformation et convergence (Asimow, 1962) et (Jones, 1970).

Voici les cinq principaux *conceptual designs* selon (Perrin, 2001) :

- La démarche de conception comme une succession hiérarchique de phases différentes (Pahl et Beitz, Ulrich et Eppinger, VDI 2222 et AFNOR X50-127) ;
- La démarche de conception comme itération d'un cycle élémentaire de conception (Rozenburg et Eekels, March) ;
- La démarche de conception comme phénomène émergeant d'auto-organisation se construisant à partir des interactions d'un groupe de conception ;
- La démarche de conception comme processus cognitif ;
- La démarche de conception comme forme de conversation.

Dans la suite de notre « inventaire » nous allons présenter seulement quelques modèles de conception utilisés ayant un rapport direct avec notre propre synthèse.

2.6.1 Modèle de Pahl et Beitz

C'est l'un des modèles prescriptifs les plus connus, organisé par phases ayant comme logique d'action dominante la convergence.

Au départ de tout nouvel artéfact nous nous confrontons à un problème technique à résoudre et à des objectifs à atteindre. Les phases suivantes correspondent au passage des fonctions et sous-fonctions (formes abstraites) à une solution finale (forme physique, concrète). Dans la phase de *conceptual design* on applique les méthodes de définition des objectifs et d'analyse fonctionnelle pour définir les solutions alternatives disponibles. Dans la phase suivante (*embodiment design*) on détermine les formes et les dimensions de l'artéfact. Dans la phase *detail design* sont élaborés les documents nécessaires à l'achat, à la mise en fabrication, à l'assemblage, à la maintenance etc. des composants et sous-ensembles qui composent l'artéfact (Figure 2-30). Nous remarquons que dans le modèle proposé par (Pahl et al, 2007), à chaque phase correspond un métier et à chaque fin de phase on attend un résultat spécifique à la phase : situation de prescription contractuelle entre les phases. Nous voyons aussi que l'organisation des phases est de type hiérarchique (planification hiérarchique) descendantes du problème défini initialement. Au fur et à mesure du déroulement de la conception l'artéfact est de mieux en mieux défini.

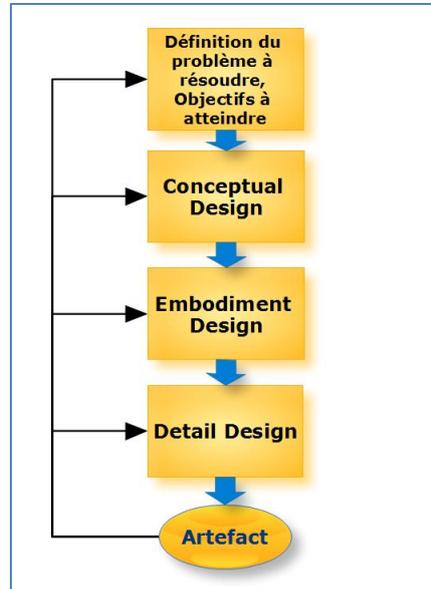


Figure 2-30 Les phases de conception (Pahl et al, 2007)

En plus du flux principal descendant il existe une multitude de *feed-backs* qui ont le rôle d'affiner et de modifier les solutions, les cahiers de charges etc. L'avancement du processus de conception est validé selon la mesure de la satisfaction des besoins des clients dans les conditions de délai et coûts spécifiés. Pour avoir l'assurance que le processus va bien aux buts fixés, il existe des procédures de sélection, élimination et évaluation des solutions qui ne remplissent pas les cahiers de charges. On peut remarquer que cette modélisation a un caractère opérationnel non-ouvert, qui impose, en plus de la planification du processus (projet), la décomposition du problème global en sous-problèmes propre à chaque phase (convergence). Un des points faible du modèle proposé par (Pahl et al, 2007) est l'absence des méthodes capables d'évaluer du point de vue quantitatif et qualitatif les multiples solutions alternatives générées tout au long du processus de conception. Le comité « conception » de l'Association des ingénieurs allemands (VDI) a proposé une modélisation du processus de conception (voir la Figure 2-31) selon deux logiques d'action de conception (VDI 222) :

- Divergence : élargir l'espace de recherche de solutions dans chaque étape de conception ;
- Convergence : choisir la solution la plus adéquate par rapport aux critères²⁵ sélectionnés (coût objectif, performances etc.).

²⁵ Du grec *kritêrion*, de *krinein*, juger. Principe, élément considéré pour évaluer, analyser, juger quelque chose.

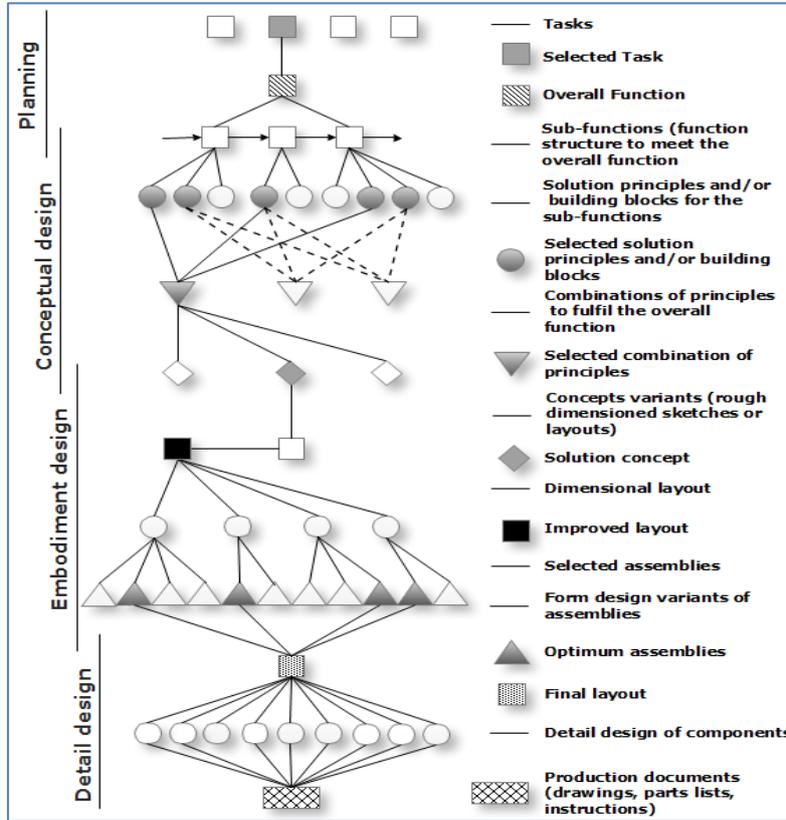


Figure 2-31 VDI2222 - Divergence et convergence (Roozenburg et Eekels, 1995)

Dans l'application en pratique de ce modèle, nous soulignons la parallélisation des activités pour réduire l'impact du caractère séquentiel (impact négatif sur les délais et les coûts) des successions des phases.

2.6.2 Modèle de Ulrich et Eppinger

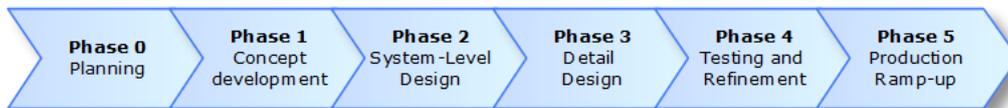


Figure 2-32 Les phases du processus de conception (Ulrich et Eppinger, 2000)

Le modèle décrit l'évolution en parallèle de la définition du produit et des processus d'industrialisation. Chaque niveau d'évolution est validé par des revues de conception qui acceptent le passage à la phase suivante (voir la Figure 2-32).

2.6.3 Modèle de Roozenburg et Eekels

(Roozenburg et Eekels, 1995) proposent une modélisation de la conception comme une succession de cycles de résolution de problèmes. A partir des travaux du psychologue cognitif De Groot (Groot, 1969), (Roozenburg et Eekels, 1995) proposent un processus de conception comme itération d'un « cycle élémentaire de conception » (*basic design cycle*) – selon la Figure 2-33.

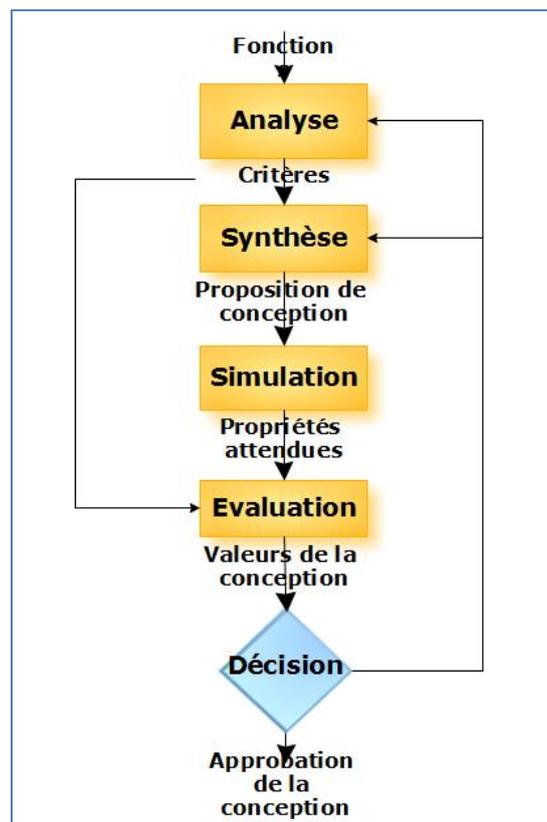


Figure 2-33 Cycle élémentaire de conception (Roozenburg et Eekels, 1995)

Par rapport au modèle proposé dans la Figure 2-30, dans la structure itérative de (Roozenburg et Eekels, 1995), les solutions de conception et les spécifications évoluent simultanément. Dans une étape de la conception C_i de la conception, un ensemble de spécifications E_i détermine une solution S_i de conception qui, à son tour, contribuera à définir un nouvel ensemble de spécifications E_{i+1} (Figure 2-34).

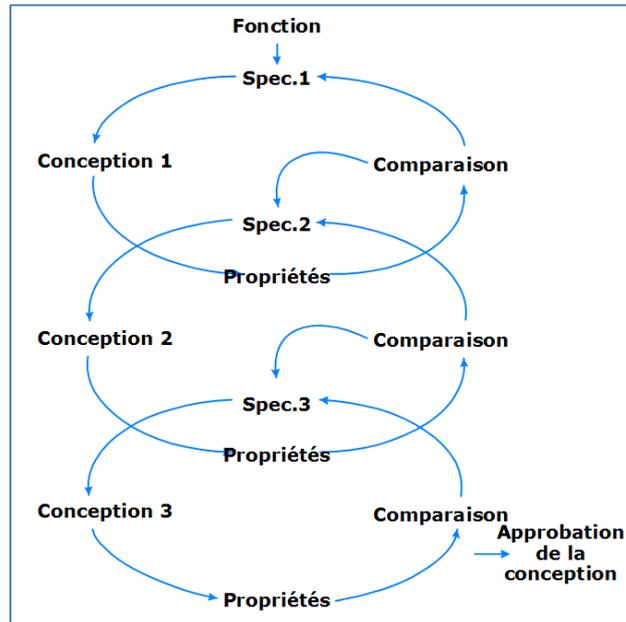


Figure 2-34 La structure itérative de la conception (Rozenburg et Eekels, 1995)

2.6.4 Modèle de March

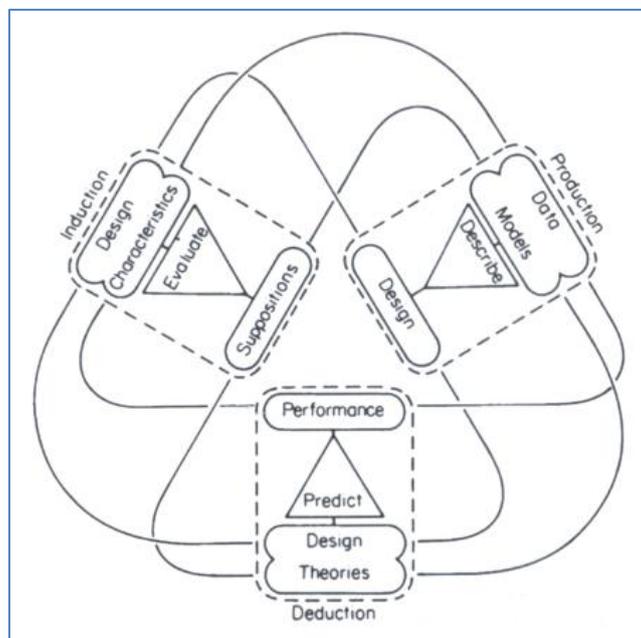


Figure 2-35 Cycle de conception élémentaire de March

Dans la même démarche de conception comme itération d'un cycle élémentaire de conception, nous citons aussi le cycle de conception élémentaire de March (Figure 2-35). Son modèle est construit à partir des trois modes d'inférence : l'abduction (crée), la déduction (prévoit) et l'induction (évalue). Le modèle est appelé PDI (production, déduction, induction).

La conception commence par la présomption (abduction) d'une première proposition de solution. Dans la deuxième phase, à partir de cette première solution et de l'état de l'art et sciences de l'ingénieur, sont déduites les principales performances attendues de la solution. A partir de ces performances il est possible d'évaluer, par induction, les différentes variantes de conception (suppositions). Le cycle redémarre à nouveau à partir d'une révision des caractéristiques due à un approfondissement de la solution de conception ou à partir d'une nouvelle proposition de solution de conception.

2.6.5 Modèle FBS

Modèle basé sur la notion de domaine. Étant donné que le problème de conception est un processus de résolution avec les caractéristiques :

- Complexe,
- Mal défini/structuré, et
- Ouvert.

Les modèles qui considèrent que les informations sur le produit sont connues et figées depuis le début de la conception ont rencontré des difficultés à cause de la sous-estimation du volume des modifications apparues au cours de la conception. Le modèle FBS apporte une solution en essayant de décrire le processus de conception comme une navigation entre les domaines fonctionnels, structurels et comportemental aux travers lesquels le produit est défini. Les interactions entre les domaines sont décrites par des variables qui décrivent des activités de transformation (flèches simples) ou de comparaison (flèche double).

La figure ci-dessous (Figure 2-36) montre les interactions entre les trois domaines. (Gero, 2006) fait la distinction entre les le comportement réel de la structure (*structure behaviour*) et le comportement attendu (*expected behaviour*).

- Fonction (*fonction*) : elle décrit, d'une manière abstraite, les finalités d'un artefact (processus, système, ressources etc.). Les fonctions de service ne dépendent pas d'une solution particulière (indépendamment d'une structure), tandis que les fonctions techniques représentent le choix d'une solution.
- Comportement (*behavior*) : exprime la dynamique de l'artefact. Sa nature est continue (lois et règles) ou discrète (suite séquentielle d'états) représentant l'évolution d'une structure suite à une stimulation arrivée dans un processus donné.
- Structure (*structure*) : exprime la composition de l'artefact ainsi que les attributs des composants du système.

Nous avons, grâce à ce modèle, huit types d'activités :

1. La formulation du problème : exprime les fonctions en terme de **Be** (*expected behaviour*) ;

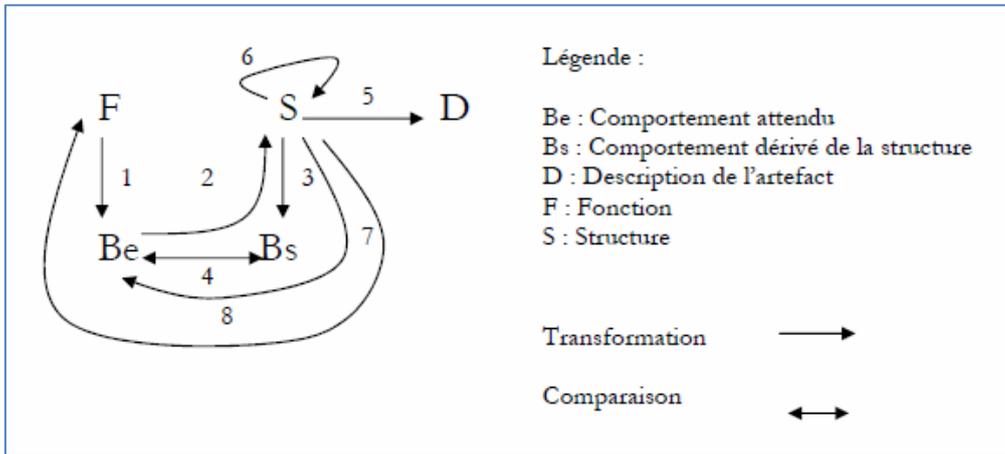


Figure 2-36 Le modèle FBS (Gero, 2006)

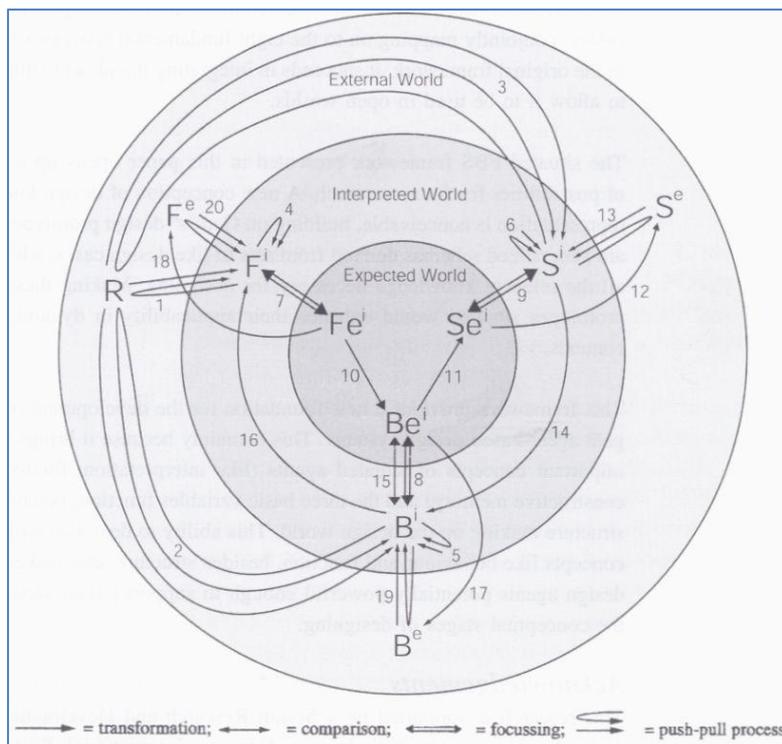


Figure 2-37 Le modèle FBS dans un environnement composé (Gero, 2006)

2. La synthèse du comportement : transforme le **Be** en **S** (structure de solution) prévue ;
3. L'analyse du comportement **Bs** de la structure **S** ;
4. L'évaluation par comparaison des deux comportements ;

5. La documentation **D** du produit conçu ;
6. La reformulation de certaines variables de la structure ;
7. La reformulation du comportement attendu **Be** ;
8. La reformulation des fonctions visées.

En mettant le concepteur dans un environnement composé de trois mondes : externe, interprété et attendu, les auteurs ont enrichi le modèle original avec le positionnement des activités déroulées dans cet environnement composé (Figure 2-37).

2.6.6 Modèle de Suh

Axiomatic Design est l'un des modèles les plus représentatifs basés sur la notion de domaine, décrit par les travaux de Nam P. Suh au MIT. C'est un modèle à caractère analytique étant moins bien utilisé dans une phase de la conception à fort caractère innovant. Le modèle considère le processus de conception comme une suite de transformations des besoins (domaine des besoins) en fonctions (domaine fonctionnel), de celles-ci en paramètres de conception (domaine des paramètres) et de ceux-ci en variables des procédés (domaine procédés). Le principe de transformation s'appelle *mapping* et a la représentation suivante (Figure 2-38) :

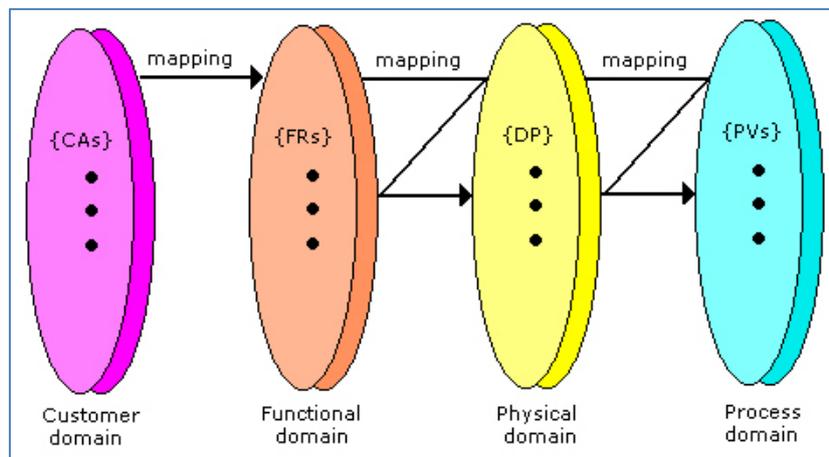


Figure 2-38 Le modèle Axiomatique (Suh, 1990)

La signification des domaines est la suivante :

- *Customer Domain* : les besoins du client (*Customer Needs - CNs*);
- *Functional Domain* : le nombre minimum de conditions indépendantes qui caractérisent les besoins fonctionnels (*Functional Requirements - FRs*) du produit ; chaque **FR** est indépendante des autres ;
- *Physical Domain* : les paramètres de conception (*Design Parameters - DPs*) clés qui caractérisent le design que doit satisfaire la **FR** spécifique ;
- *Process Domain* : les variables de processus (*Process Variables - PVs*) clés qui caractérisent le procédé que doit générer le **DP** spécifique.

Les relations entre les différents domaines sont exprimées sous forme matricielle :

$$\{FR_S\} = [A]\{DP_S\}$$

où : **[A]** étant une matrice design qui permet de voir tout de suite les relations entre les **FRs** et les **DPs**.

$$\{DP_S\} = [B]\{PV_S\}$$

où : **[B]** étant une matrice design similaire à **[A]** et qui définit les caractéristiques du procédé de design. Le processus de transformation n'est pas unidirectionnel mais correspond, graphiquement, à une succession de zigzags entre les quatre domaines (Figure 2-39).

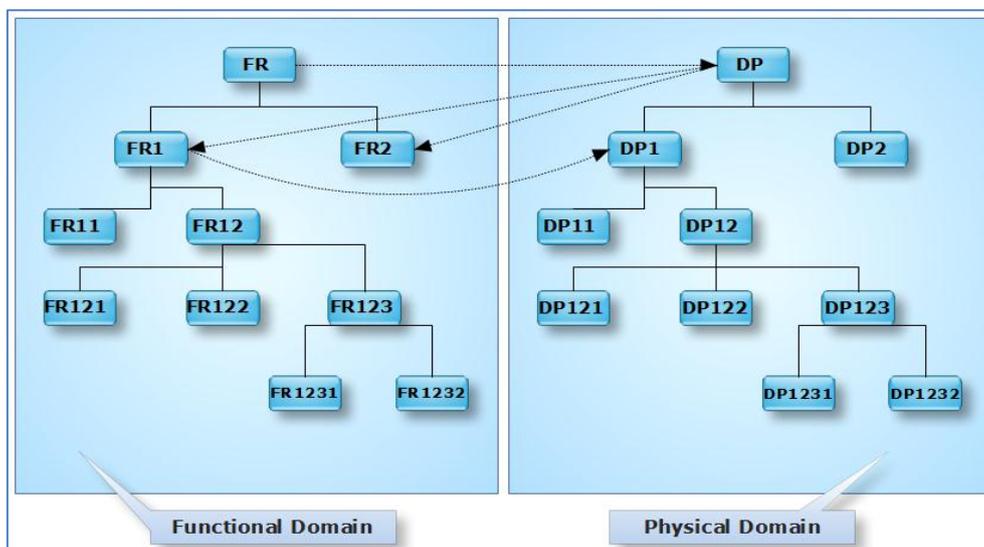


Figure 2-39 Décomposition, zig-zagging et hiérarchie (Suh, 2005)

Faiblesses :

- Ne donne pas la meilleure solution pour une conception mais seulement un panel de solutions ;
- Il faut tout décrire pour être rigoureux, ce qui engendre des matrices gigantesques, d'où l'impossibilité de prendre tous les paramètres en compte ;
- Difficultés d'apprentissage, méthode très complexe, difficile d'application et peu employée, car tous les paramètres d'une étude de conception doivent être pris en compte.

Forces :

- Permet de voir d'un seul coup d'œil si le modèle de conception est bon grâce, aux matrices diagonales ;
- Méthode rigoureuse et mathématique donc logique et non contestable ;
- Utilisation des autres outils dans le cadre du concept (Figure 2-40).

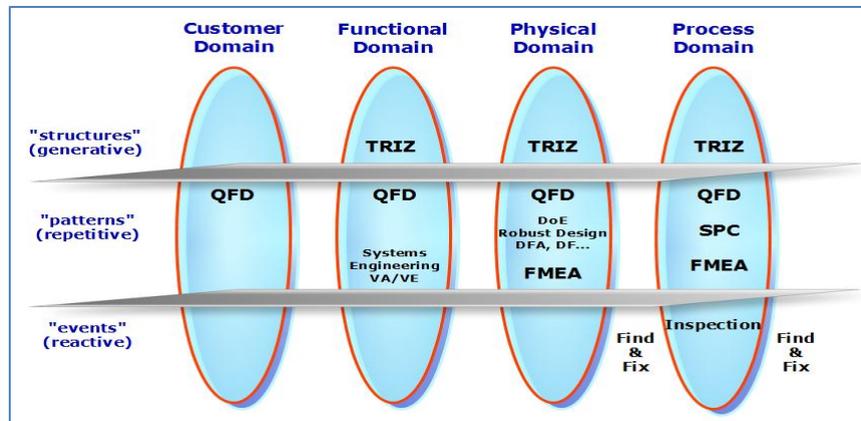


Figure 2-40 Les outils dans Axiomatic Design (<http://www.axiomaticdesign.com/>)

2.7 Conclusions

La plus importante conclusion qui se dégage de ce chapitre est celle que le but de la conception est de satisfaire le/les besoin(s) du/des client(s) ; par cette assertion nous reconnaissons la position centrale de la conception dans le cycle de vie d'un système. Nous pouvons déduire que pour la construction d'un nouveau modèle méthodologique nous devons commencer par le bon bout : le processus de conception. Par ailleurs, pour démarrer correctement le travail de création d'un processus de conception on ne peut pas s'en passer d'une bonne méthode de recherche d'information.

Dans ce chapitre nous avons déterminé les caractéristiques les plus importantes du processus de conception. Nous en citons quelques-unes :

- La conception peut être assimilée à une activité de résolution de problèmes donc, de la définition du problème de conception dépend le résultat de cette activité ;
- La conception a un caractère itératif : s'établit une boucle entre les solutions partielles et le retour vers la définition du problème ;
- La génération des solutions alternatives utilise la capacité créative des concepteurs ;
- Les concepteurs doivent apprendre à travailler d'une manière paradoxale : autonome et collectivement ;
- L'évaluation des alternatives et prise de décisions ;
- Le résultat de la conception doit être communiqué dans une manière propre : le concepteur passe 60% de son temps en discussions et préparation de documents liés à la conception et 40% seulement dans des activités d'analyse, de tests et de conception proprement dite ;
- Les activités de conception doivent être documentées en vue d'enrichir la base de connaissances dans le but d'augmenter l'expérience et implicitement le savoir-faire ;
- La recherche d'information doit être subordonnée à la définition du problème de conception.

3 LA SYNTHÈSE D'UN MODÈLE MÉTHODOLOGIQUE

3.1 Introduction

Nous poursuivons les objectifs exposés au Chapitre 1.4 - Construction de la démarche de recherche et la Figure 1-2 et réalisons la synthèse d'un modèle méthodologique d'ingénierie intégrée dans le contexte PLM en adoptant la convergence, la divergence et la transformation comme méthodes de recherche.

La création d'un modèle méthodologique systémique et intégré de conception (MSIC) du cycle de vie en contexte PLM s'avère une entreprise complexe, caractérisée par la prise en compte de multiples domaines : économiques, techniques, organisationnels, humains, etc. Chacun de ces domaines apporte des informations qui doivent être prises en compte dans un contexte de type PLM. Ces domaines nécessitent des méthodes de recherche spécifiques. Dans leur ouvrage (Blessing et Chakrabarti, 2009) soulèvent le manqué des méthodes de recherche dans le domaine de la conception. Dans ce chapitre nous appliquons la démarche de recherche inspirée par la méthode DRM (*Design Research Methodology*) proposée par (Blessing et Chakrabarti, 2009) pour trouver un modèle méthodologique qui correspond aux objectifs énoncés dans le chapitre 1. Le DRM a été conçu pour les recherches menées dans la phase de la conception mais nous l'avons enrichi avec des résultats obtenus de notre propre expérience et adapté pour tout le cycle de vie du produit en considérant que la démarche de conception reste la phase la plus représentative.

Selon (Perrin, 2001) le concept de méthodologie peut avoir un sens étroit : les procédures et les prescriptions à suivre pour atteindre un certain but ; il peut avoir aussi un sens plus large de réflexion (*logos*) sur des pratiques. Ce dernier sens fait appel à un domaine connexe, celui de l'épistémologie des connaissances sur les méthodologies de la conception.

En partant du deuxième sens du concept de méthodologie nous montrons ci-dessous, selon J.P. Micaëlli et J. Forest, le tableau synthétique des modèles de conception (Tableau 3-1). Nous remarquons que, par rapport à l'origine de l'artéfact, le rationalisme et l'artificialisme se trouvent dans un antagonisme apparent : le besoin doit être perçu et satisfait (artificialisme) mais pour être traduit en fonctionnalités du système il doit aussi être « traduit », « codifié », donc, d'une certaine manière, explicité (rationalisme). En général, nous pensons qu'il n'existe pas une frontière figée entre les doctrines (qui n'ont pas un contour délimité, mais plutôt vague, les délimitations sont relatives), parce que la manière de réfléchir et d'agir des concepteurs reste assez souple et opportuniste. Où la doctrine reste un système fermée la liberté du participant humain (le concepteur) sera entravée.

Tableau 3-1 L'évolution des modèles de conception (Micaëlli et Forest, 2003)

Doctrine	Rationalisme	Traditionalisme	Artificialisme
Origine de l'artéfact	besoin explicite et calcul d'une solution hors contexte	tradition	intention (besoin perçu que l'on veut satisfaire)
Résultat	d'un choix binaire instantané (Rationalisme fort) ou séquentiel, avec attente d'information et révision des croyances (Rationalisme faible)	de l'application de routines héritées de la tradition	d'une conception (action créative et proactive)
Figure emblématique	le décideur	je juge	le concepteur
Dynamique	choix séquentiel	sélection inintentionnelle de long terme	conception et rationalisation
Agir-type	« rationnel »	« normatif »	« créatif »

Avant de classer les méthodes de conception nous essayons de délimiter notre objet de recherche. Par méthodologies de conception nous entendons les processus utilisés par les concepteurs pour atteindre le but principal, celui de création des artéfacts. Bien entendu, pendant ce processus des techniques diverses sont utilisées, plus ou moins rationnelles, ayant un degré de complexité variable, avec des origines diverses. Certaines sont issues de la formalisation des processus cognitifs identifiés chez les concepteurs, d'autres sont empruntées de domaines aussi divers que : les mathématiques (la recherche opérationnelle, modélisation des processus de prise de décisions), le marketing, le management, les recherches spécifiques concernant l'activité de conception (analyse de la valeur). Tous les travaux vont dans le sens de la rationalisation de la démarche de conception, essayant même de lui attribuer le titre de « science de la conception ».

Nigel Cross donne un sens plus élargi du concept de méthodologie (Cross, 1992) : « *La méthodologie de conception est l'étude des principes, pratiques et procédures de conception. Son objet d'étude est la conception et la manière dont une démarche de conception doit être conduite. Elle inclut : l'étude des façons de travailler et de penser des concepteurs ; la mise en place des structures appropriées pour le processus de conception ; le développement et l'application de nouvelles méthodes, techniques et procédures ; des réflexions sur la nature et les domaines d'application des connaissances de conception et leurs applications à la résolution de problèmes de conception* ».

Les critères de classification varient selon les divers points de vue utilisés par les auteurs étudiés. (Perrin, 2001) a identifié les principales typologies focalisées sur le processus de conception que nous allons présenter dans ce chapitre. Dans la première partie du chapitre 3 nous faisons la synthèse des modèles de conception étudiés dans le chapitre 2. Ensuite, nous nous intéresserons aux définitions des concepts utilisés plus loin : connaissance, gestion des connaissances, modélisation, épistémologie, artificiel, etc. Dans la dernière partie du chapitre 3 nous présenterons la proposition d'un modèle de méthodologie systémique et intégrée dans un contexte PLM.

3.1.1 Nécessité d'une méthodologie

Nous avons vu dans les chapitres précédents comment les facteurs produit, marché, entreprise s'entremêlent dans le cadre du cycle de vie du produit, et que le produit constitue le résultat d'une réalisation industrielle. Cette réalité correspond à un effort de conception en vue de satisfaire les besoins des clients, donc elle englobe aussi la dimension humaine. Une des caractéristiques du produit, et un avantage concurrentiel en même temps, est représenté par sa stabilité (il délivre le plus longtemps les fonctionnalités pour lesquelles il a été acheté) pendant le cycle de vie. Par contre, les marchés possèdent un haut degré d'instabilité à cause des facteurs économiques, politiques et historiques en continu changement (Petitdémange, 1991). Pour résoudre, au moins en partie, cette contradiction entre le produit stable et le marché instable, il semble évident que les modèles, les méthodes et les outils (qu'on peut définir en un seul mot comme des méthodologies) sont capables d'offrir des solutions cohérentes et un langage commun pendant les trois grandes phases de la vie du produit/système : conception, industrialisation et commercialisation, pour atteindre les objectifs de compétitivité par la satisfaction des besoins de l'utilisateur. Un autre avantage de l'utilisation des méthodologies est constitué par le besoin de faciliter les rapports génériques entre les clients et les fournisseurs par l'intermédiaire d'un « contrat » avec délais, coûts, performances à obtenir (par exemple, l'Analyse fonctionnelle, TRIZ, CCO - *Conception à coût objectif*, CCG - *Conception pour un coût global*, DFX-*Design for X*, etc.). Il reste à mentionner que l'utilisation des méthodologies s'effectue à tous les niveaux de gestion : stratégique, organisationnel, opérationnel et d'exécution, ainsi qu'aux plusieurs niveaux d'abstraction dans la conception : fonctionnel, technologique, géométrique, architectural-structurel, et couvre en totalité le cycle de vie du produit/système. Le besoin d'intégrer dans les phases préliminaires de la conception les informations disponibles dans la partie aval du cycle de vie nécessite d'aborder les questions de la gestion intégrée des informations sur le produit/système. C'est dans ce sens que nous allons évoquer, dans notre travail de recherche, l'intégration des méthodes et outils de conception dans un contexte PLM.

La recherche d'un paradigme (nouveau modèle méthodologique d'ingénierie intégrée) qui puisse rendre compte de la complexité du processus de conception peut apporter des éléments de réponse dans le but de permettre une meilleure intégration des informations dans les phases de l'amont du cycle de vie. La conséquence de cette tendance nous mène logiquement vers l'énonciation de l'un des objectifs principaux des recherches dans le domaine de l'ingénierie intégrée : la modélisation du processus de conception en vue d'établir une plateforme de conception intégrée et collaborative des produits dans le contexte PLM. Dans ce contexte, la Figure 3-1 présente la relation qui existe entre le risque d'échec et l'existence de méthodes et objectifs bien définis, et permet d'orienter le sens de nos recherches dans les chapitres suivants.

Par rapport à ces enjeux, la valeur ajoutée de notre travail par l'introduction d'une méthodologie intégrée consiste en :

- a. Une meilleure utilisation du flux d'informations de la partie aval du cycle de vie dans le processus de conception dans le cadre d'une méthodologie intégrée de conception ;
- b. Une intégration des méthodes et outils existants dans le cadre du PLM ;

- c. Une application informatique qui offre un tableau de bord de l'avancement de la conception du système à travers son cycle de vie.

La modélisation d'un système est requise lorsque l'on a l'intention de le comprendre ou d'agir sur lui, que ce soit pour le concevoir, le structurer, le piloter ou l'améliorer.

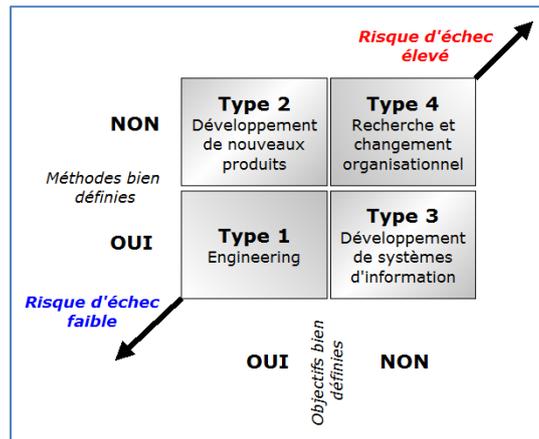


Figure 3-1 Matrice de classification Méthodes-Objectifs

3.1.2 Difficultés de la modélisation

Réussir une activité aussi complexe que la modélisation peut paraître un objectif surtout ambitieux. D'autant plus que l'objet de la modélisation reste un domaine très complexe avec beaucoup de variables : la pluridisciplinarité, l'ambiguïté, les processus non-linéaires, la multi-dimensionnalité, l'instabilité, etc. Nous allons citer quelques difficultés de modélisation, en rapport avec notre travail, énoncées dans (Rosca, 1999) :

La complexité excessive. Si on essaie de prendre en compte tous les éléments qui influencent l'explication, on obtient un modèle trop complexe pour être opérationnel. Les multiples acteurs, les multiples rapports, le « *feed-back* », les évolutions non-linéaires et dynamiques, mènent à un « système d'équations » difficile à exprimer et encore plus à résoudre.

La pluridisciplinarité d'une réalité unitaire. Cette spécialisation est nécessaire pour diviser raisonnablement et focaliser la recherche. Mais le résultat doit être réintégré si l'on veut comprendre le métabolisme de l'ensemble, car il est en réalité un processus unitaire. C'est le réalisme qui oblige à la synthèse systémique. Or cette fusion n'est pas simple.

La non-mesurabilité. Il y a une longue distance de la construction du modèle qualitatif jusqu'à la construction du « système d'équation » qui l'exprime quantitativement. La possibilité d'appliquer la théorie mathématique des systèmes (grandeurs d'état, entrées, sorties, fonctions d'état et d'entrée - sortie, etc.) pour percevoir le flux d'information dans un cycle de vie (transport des connaissances) comme une propagation des signaux reste fort problématique.

L'ambiguïté. Cela veut dire que l'on ne dispose même pas d'un système de

« règles qualitatives » claires. Nos concepts sont de type « *fuzzy* », chaque « entité qualitative » de notre modèle est fluide, sans contour délimité. Les « instanciations » des « concepts généraux » peuvent s'éloigner de leur classe, qui ne les englobe que pour une certaine similitude, jamais absolue.

La « multi-dimensionnalité » dense. Les « objets » et les « grandeurs » qui participent à notre système ne sont pas seulement nombreux, à multiple liens, non-mesurables et vagues, ils sont aussi multidimensionnels. La représentation des objets spatiaux par la projection sur des surfaces ou des droites ne peut les refléter que partialement, avec la perte de leur essence profonde tridimensionnelle. La représentation d'un concept a des limites analogues.

L'instabilité et la faible reproductibilité dans le temps. La dynamique des réalités, la dynamique des méthodes, la dynamique des outils, la dynamique des acteurs, rendent le design du « dynamique » difficile. La diminution de la reproductibilité par les changements trop fréquents est un facteur prohibitif sérieux. Dans ce sens, le processus de conception est ouvert et mal défini.

Les influences « externes » imprévues. Sans s'assurer de la « fermeture » du système traité par rapport à son monde externe les résultats sont arbitraires, car les influences externes non-modélisées peuvent produire des déviations imprévisibles. Si les influences externes ne sont pas saisies (ou non-modélisées), la situation devient incontrôlable : observer un sujet pour le comprendre, c'est le modifier.

Le libre arbitre et la probabilité. La réalité du phénomène de la décision humaine libre et créative a des conséquences fondamentales pour la conception innovante car elle limite la « solubilité » déductive. Le langage des probabilités semble plus opportun, car même s'il n'exprime pas bien l'acte de la décision libre, il décrit ses résultats extérieurs. On n'a pas la solution mais une solution possible. Le concepteur ne peut que chercher une variante probablement meilleure. L'incertitude vient avec la liberté.

Les structures et les processus non-linéaires et circulaires. L'espoir d'un analyste est de trouver une « linéarisation » raisonnable du système, les relations topologiques « en boucle » et « en étoile », les dépendances non-linéaires étant des difficultés redoutables. La « modélisation » d'un cycle de vie a des limites car c'est un phénomène essentiellement non-linéaire (processus parallèles, boucles, rétroaction, dépendances non- proportionnelles, etc.).

La désynchronisation entre la théorie et la pratique. La théorie peut faire une organisation systémique et systématique des observations de l'expérience, pour offrir un outil d'orientation au praticien. On attend qu'elle modélise jusqu'à synthétiser les observations dans une structure élégante et économique, jusqu'à permettre la prévision des résultats non-observés encore, jusqu'à pouvoir déduire les remèdes, par raisonnement. Une manifestation typique de « l'évasion théorique » est la déconsidération du coût des solutions. Pour la recherche appliquée, l'absence du critère d'efficacité (rapport effort/résultat) est anormale, surtout dans une démarche technologique.

Et enfin, **l'explosion conceptuelle et le pseudo-systémisme.** Un autre obstacle significatif pour une modélisation opérationnelle est « l'explosion descriptive » ou l'inflation informationnelle. Un million d'alternatives peuvent bloquer autant que leur absence. Obligés d'être « au courant » dans ce fleuve informationnel, les chercheurs doivent rétrécir leur cône d'intérêt de plus en plus. Cela diminue les chances d'une vision globale, synthétique, intégrée dans une pensée humaine. Paradoxalement, l'avancement de la science collective peut faire reculer la

science individuelle à cause du refus de doubler la recherche de la nouveauté par l'organisation des acquis.

Dans le chapitre suivant nous présenterons un essai de hiérarchisation et systématisation des méthodes de conception. Ceci représente un petit effort d'organisation des acquis et, en même temps, la suite logique de l'analyse effectuée dans le Chapitre 2.

3.2 Pourquoi modéliser ?

Un **modèle** est une représentation abstraite et simplifiée (i.e. qui exclut certains détails), d'une entité (phénomène, processus, système, etc.) du monde réel en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir. Modèle est synonyme de théorie, mais avec une connotation pratique : un modèle, c'est une théorie orientée vers l'action qu'elle doit servir.²⁶

Modéliser un système avant sa réalisation permet de mieux comprendre le fonctionnement du système. C'est également un bon moyen de maîtriser sa complexité et d'assurer sa cohérence. Un modèle est un langage commun, précis, qui est connu par toutes les personnes impliquées dans le domaine donné et il est donc, à ce titre, un vecteur privilégié pour communiquer. Cette communication est essentielle pour aboutir à une compréhension commune aux différentes parties prenantes (notamment entre la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre) et précise d'un problème donné. Le modèle, comme résultat de la modélisation, représente le véhicule qui permette de mieux répartir les tâches et d'automatiser certaines d'entre elles. C'est également un facteur de réduction des coûts et des délais. Le modèle est enfin indispensable pour assurer un bon niveau de qualité et une maintenance efficace du système pendant les phases de mise en service et d'exploitation. En effet, une fois mise en production, le système va devoir être maintenu, probablement par une autre équipe et, qui plus est, pas nécessairement de la même société que celle ayant créée le produit.

Minsky (Minsky, 1965) exprime que « pour un observateur B , M est un modèle de l'objet O , si M aide B à répondre aux questions qu'il se pose sur O ». Cette définition est basée sur l'intention de représenter un comportement particulier, dépendant d'un contexte d'usage. De l'étude de la relation entre un modèle, le système étudié et de leur complémentarité ressort principalement deux aspects : les relations entre les éléments du modèle (par exemple : les relations d'héritage, cardinalité, ...) et les relations inter-modèle (par exemple : un modèle est une représentation de, un modèle est conforme à...). La prise en compte de ces deux aspects peut nous aider à comprendre comment utiliser des modèles (pour raisonner et analyser des systèmes) et comment utiliser les méta-modèles pour spécifier les langages de modélisation (Medina, 2010). Pour J.M. Favre un modèle est une représentation simplifiée d'un système (Favre, 2004), modélisée sous la forme d'un ensemble de faits construits dans une intention particulière. On déduit de cette définition la première relation entre le modèle et le système qu'il représente, appelée : « *représentation De* », et notée avec le symbole μ sur la Figure 3-2. Cette représentation (modèle) est utilisée pour répondre à des questions

²⁶ Selon <http://laurent-audibert.developpez.com/Cours-UML/html/Cours-UML005.html>

sur le système modélisé. Par exemple, la Figure 3-3 illustre qu'un modèle est une représentation d'un système (cf. : un système bancaire) selon un point de vue particulier (diagramme de classes, diagramme d'objets, diagramme de séquence).

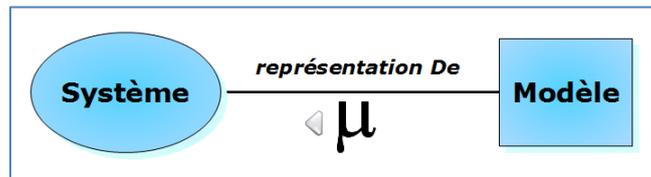


Figure 3-2 Relations entre système et modèle

Notons dans la figure précédente qu'un modèle est exprimé dans un langage particulier décrit par un méta-modèle.

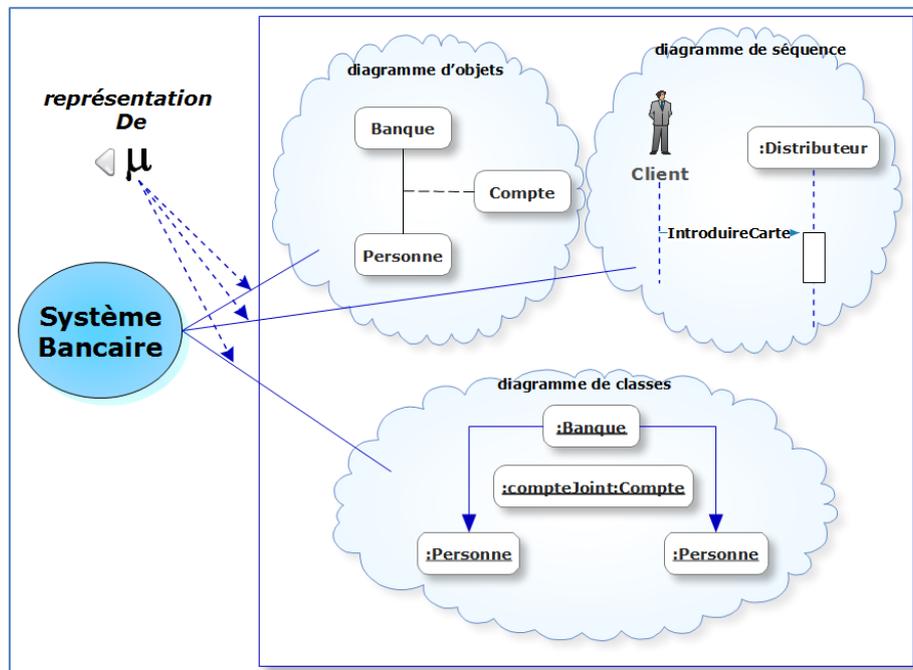


Figure 3-3 Exemple de relations entre système et modèle

3.3 Synthèse des méthodes de conception

Dans (Perrin, 2001) on cite (Vries et al, 1993) sur les deux grandes cultures existantes dans le champ de recherche qu'est la méthodologie de conception :

- a. La première utilise souvent le modèle du « computer » comme modèle de représentation de la manière de penser des concepteurs, et par conséquent, la description et la prescription des activités de conception

se fait en fonction d'étapes nommément repérées ; dans le cadre de ce courant on a admis l'idée qu'il est possible de développer un modèle du processus de conception quel que soit le problème de conception à résoudre et la nature des connaissances utilisées ; ce courant est associé à la revue *Design Studies*.

- b. Le deuxième courant s'intéresse plus aux aspects philosophiques de la conception et notamment à l'environnement social et scientifique qui représente le facteur structurant et formateur des activités de conception ; c'est dans le journal de l'association américaine de l'histoire des techniques, *Technology and Culture*, que l'on peut trouver les publications se référant à ce deuxième courant de pensée.

Dans la suite de ce chapitre nous allons utiliser la classification des typologies des méthodes de conception (taxinomie), proposées par (Perrin, 2001), dans le but de mettre en évidence l'acte de rationalisation du processus de conception. Par méthodes de conception, nous reprenons la définition donnée par (Perrin, 2001) : « ... toutes procédures, techniques ou aides diverses utilisées par les concepteurs. ».

Typologie de Nigel Cross

Dans *Engineering Design Methods* (1989 et 1994), Nigel Cross relève les deux fonctions importantes des méthodes de conception :

- a. Formalisation des processus de conception, et
- b. Formalisation des manières de penser des concepteurs.

Par rapport à ces fonctions, il propose deux grandes classes :

- a. Les méthodes de créativité, et
- b. Les méthodes de rationalisation.

L'auteur prend en compte dans son classement seulement deux méthodes de créativité : le brainstorming et le Synectics. Les processus de conception appartenant à la deuxième classe sont analysés selon les étapes d'avancement dans le processus de conception. Parmi les méthodes de conception inventoriées dans l'ouvrage susmentionné nous pouvons citer : arbre des objectifs, analyse fonctionnelle, spécifications des performances, QFD (*Quality Function Deployment*), carte morphologique, pondération des objectifs, analyse de la valeur. La typologie proposée par Nigel Cross identifie les méthodes de conception sans les placer dans une succession logique de phases d'avancement ou dans le contexte d'une méta-méthode (ce qu'on pourrait nommer en tant que « méthodologie ») qui pourrait les englober. L'auteur ne mentionne pas non plus explicitement le point d'entrée de chaque méthode et leur interaction dans la succession des phases de conception. D'ailleurs, Nigel Cross reconnaît lui-même l'absence d'un « ... *paradigme simple mais efficace* » qui pourrait décrire la complexité du processus de conception, comme par exemple « *ces paradigmes simples qui ont conduit à comprendre la conception comme un processus de résolution de problème, comme un processus de prise décision, de reconnaissance d'analogies ou de modèles...* ». Il reconnaît l'échec de cette démarche à cause « ...de la complexité des processus de pensée en conception. »²⁷

²⁷ Conclusions de Nigel Cross dans la présentation des travaux de la conférence « Research in Design Thinking », (1992).

Typologie de John Jones

L'originalité de l'ouvrage *Design Methods*, publié en 1972 et réédité plusieurs fois, consiste dans l'introduction du concept de stratégies de conception définies comme une suite organisée ou préprogrammée d'actions de conception, ces actions pouvant être elles-mêmes des méthodes de conception. Jones a recensé trente-cinq méthodes de conception qu'il classe dans six grandes catégories. Celles-ci sont extraites des trois logiques d'action de conception d'Asimow : divergence, transformation, convergence :

- a. Stratégie préfabriquées (convergence) (Tableau 3-2) ;
- b. Stratégie de contrôle (convergence) (Tableau 3-3) ;
- c. Méthodes d'exploration des situations de conception (divergence) (Tableau 3-4)
- d. Méthodes de recherche d'idées (divergence et transformation) (Tableau 3-5) ;
- e. Méthodes d'exploration des structures des problèmes (transformation) (Tableau 3-6) ;
- f. Méthodes d'évaluation (convergence) (Tableau 3-7).

La démarche décrite dans l'ouvrage *Design Methods* est complétée par de nombreux exemples d'applications où sont évalués les difficultés d'apprentissage, les coûts de mise en œuvre de la méthode et les références sur les publications traitant de la méthode concernée.

Tableau 3-2 Stratégie préfabriquées (convergence)

Méthodes	But
Recherche systématique	Éviter des choix arbitraires et fournir une méthode rationnelle d'exploration des possibles (arbres de décision)
Analyse de la valeur	Réduire les coûts d'un produit par confrontation des aspects conception et production
Systems engineering	Parvenir à une plus grande compatibilité entre composants d'un système et son environnement
Relations homme/machine	Parvenir à une plus grande compatibilité entre homme et machine
Définition des frontières	Définir les limites au sein desquelles les solutions seront acceptables
<i>Page's cumulative strategy</i>	Augmenter les efforts de conception dans les phases d'analyse et d'évaluation (qui sont cumulatives et convergentes) et les diminuer dans les phases de synthèse
<i>CASA (Collaborative Strategy for Adaptable Architecture)</i>	Permettre pour toute personne concernée avec la conception d'un bâtiment d'influencer les décisions

Tableau 3-3 Stratégie de contrôle (convergence)

Méthodes	But
Changement de stratégie	Permettre l'émergence de points de vue sur la stratégie suivie et les enregistrer
<i>Matchett's fundamental design method (FDM)</i>	Permettre à un concepteur d'explicitier et de contrôler ses modèles de pensée et de relier plus étroitement ses modèles à la situation de

conception

Tableau 3-4 Méthodes d'exploration des situations de conception (divergence)

Méthodes	But
Établissement des objectifs	Identifier les conditions externes avec lesquelles la solution de conception doit être compatible
Recherche de littérature	Trouver les informations publiées qui peuvent influencer positivement le travail du concepteur
Recherche d'anomalies visuelles	Trouver des idées pour améliorer la conception
Interviews d'utilisateurs	Faire émerger des informations seulement connues des utilisateurs
Questionnaire	Collecter des informations auprès d'une population donnée
Recherche sur le comportement des utilisateurs	Explorer les modèles de comportements et prévoir les utilisateurs potentiels d'une nouvelle conception
<i>Systemic testing</i>	Identifier les actions qui seraient susceptibles d'apporter des changements non souhaités mais qui sont trop difficiles à comprendre
Sélection d'une échelle de mesure	Relier les mesures et les calculs sur les incertitudes des observations au coût de la collecte des informations et aux objectifs de conception
<i>Data logging and data reduction</i>	Faire émerger les modèles de comportement sur lesquels reposent des décisions critiques de conception

Tableau 3-5 Méthodes de recherche d'idées (divergence et transformation)

Méthodes	But
Brainstorming	Simuler un groupe pour produire rapidement beaucoup d'idées
Synecitics	Susciter l'exploration de problèmes de conception par l'utilisation d'analogies
<i>Removing</i>	Trouver de nouvelles directions de recherche
Cartes morphologiques	Élargir l'espace de recherche de solutions

Tableau 3-6 Méthodes d'exploration des structures des problèmes (transformation)

Méthodes	But
Matrice d'interactions	Permettre une recherche systématique des relations entre les éléments au sein d'un problème de conception
Réseau d'interactions	Mettre en avant les types de relations entre les éléments au sein d'un problème de conception
<i>AIDA (Analysis of Interconnected Decision Areas)</i>	Identifier et évaluer tous les ensembles de sous-solutions compatibles pour un problème de conception
Transformation de système	Trouver des manières de transformer un système de façon à éliminer ses défauts
Innovation par changement des limites ou frontières	Changer les frontières d'un problème de conception non résolu
Innovation fonctionnelle	Trouver une conception radicalement

	nouvelle
Méthodes Alexander pour la définition des composants	Trouver le composant adéquat pour une structure physique tel que chaque composant puisse être changé indépendamment
Classification des informations de conception	Transformer un problème de conception en parties qui soient mangeables

Tableau 3-7 Méthodes d'évaluation (convergence)

Méthodes	But
Check-lists	Permettre au concepteur d'utiliser les connaissances accumulées sur les exigences à satisfaire dans des situations similaires
Sélection des critères	Décider de la façon dont une solution de conception sera reconnue comme acceptable
Hiérarchiser et pondérer	Comparer un ensemble de solutions alternatives en utilisant une même échelle de mesures
Spécifications écrites	Décrire une solution acceptable pour une solution à concevoir
Index de satisfaction de Quirk	Permettre à des concepteurs inexpérimentés d'identifier des composants non satisfaisants

Typologie de Roozenburg et Eekels

De nouveau les auteurs focalisent leur intérêt sur le cycle unitaire de conception : analyse, synthèse, simulation, évaluation. Dans l'ouvrage *Product Design : Fundamentals and Methods* (1995), Roozenburg et Eekels, de l'Université technologique de Delft, classent les méthodes de conception en fonction des quatre phases mentionnées (Tableau 3-8).

Tableau 3-8 Cycle unitaire de conception (Roozenburg et Eekels, 1995)

Analyse	<i>Ckeck-list</i> <i>Quality function deployment</i>
Synthèse	Brainstorming Synectics Analyse fonctionnelle, méthode morphologique Analyse des aires de décision interconnectées
Simulation	Construction de modèles (structurels, analogiques, mathématiques)
Évaluation	Décisions multicritères

3.3.1 Méthodes de recherches

Les pratiques de conception sont très diverses et difficilement observables, ce qui rend complexe le processus de transmission du savoir et des connaissances à l'intérieur des entreprises. Un des premiers qui ont effectué des travaux sur les méthodes d'observation concernant les pratiques de conception a été Marples en

1960 dans le cadre de l'Institute of Engineering Designers, London (Marple, 1960). Selon (Perrin, 2001) les méthodes de recherche sur les pratiques de conception qui ont été utilisées jusqu'à maintenant sont :

- Interviews de concepteurs. On attend comme résultat les réflexions sur les processus suivis par les concepteurs et les procédures utilisées.
- Observations et étude de cas. Les observations sont faites sur des projets réellement ou artificiellement construits.
- Études de protocoles. La méthode consiste dans l'analyse des enregistrements de ce que les concepteurs disent en réfléchissant à haute voix pendant le processus de conception. L'étude des « protocoles » a fait l'objet du deuxième séminaire de Delft sur les méthodes de conception (Cross et al, 1996). Cette méthode est surtout applicable aux projets artificiels.
- Tests contrôlés. Les sujets (concepteurs ou étudiants) sont priés d'exécuter (dans des conditions de laboratoires de psychologie) une tâche spécifique et les données de leurs performances sont enregistrées et analysées.
- Essais de simulation. Utilisation de l'intelligence artificielle pour simuler la manière de penser en conception.
- Réflexions et théories. Les théories et réflexions sur la nature de la conception peuvent également engendrer de nouvelles méthodes de recherche.

En ce qui nous concerne, nous avons eu l'avantage d'utiliser les méthodes de l'interview de concepteurs et de l'observation et étude de cas effectués dans un environnement de conception réel (dans le cadre d'un projet réel, directement à l'intérieur de l'entreprise).

3.4 L'épistémologie de la modélisation

La construction d'un nouveau modèle est accompagnée par la constitution d'une épistémologie de plus en plus éloignée du rationalisme positiviste qui depuis deux siècles tient lieu de philosophie à la plupart des scientifiques. L'arrivée de la systémique a provoqué un changement profond de paradigme, une rupture épistémologique. « *Le systémicien sait qu'il sait, mais surtout sait comment il sait, c'est-à-dire quelles sont les "cartes" (ou modèles) qu'il a utilisées pour produire ce savoir* » (Donnadieu, 2008). Nous sommes devant la tâche de la modélisation de l'acte (vu dans ses interactions et relations mais en se focalisant sur sa finalité) en combinant des points de vue multiples : économique, technique, organisationnel, etc. Selon Jean Piaget l'épistémologie est l'outil théorique qui permet : « *l'étude de la constitution des connaissances valables* ». Dans le cadre de l'épistémologie, les connaissances sont caractérisées par : leur nature, les origines, les contenus, les moyens et les limites.

Le mot « *modelling* » (apparu en 1965 – « *Cybernetique Modelling* » par Kir & Valach) a été traduit en français par « *modélisation* ». Pour certains scientifiques (mathématiciens) une modélisation scientifique devrait être construite en formalisme logico-mathématique. A cette vision restrictive s'oppose une conception, non moins légitime, appelée la modélisation pragmatique ou la modélisation

heuristique (Le Moigne, 2002). Dans le cadre de notre recherche nous avons appliqué la méthode « *d'observation participante* » (Donnadieu, 2008). Dans son article, Gérard Donnadieu cite Edgar Morin (Morin, 2005) : « *La science occidentale s'est fondée sur l'élimination positiviste du sujet à partir de l'idée que les objets, existant indépendamment du sujet, pouvaient être observés et expliqués en tant que tels...* » en se posant la question « *Comment connaissons-nous ?* ». Aujourd'hui, on considère que l'élimination du sujet du processus d'observation de l'objet peut entraîner de graves malentendus. Pour éviter ce piège et inclure la subjectivité de l'observateur dans le processus de construction de l'objet observé, les ethnologues ont imaginé la méthode d'observation participante. Mais la représentation de cette réalité, c'est-à-dire l'objet, n'est pas indépendante de celui qui observe: les objets prennent les caractéristiques que nous leur donnons en fonction de notre vision du monde, de nos intentions du moment et du contexte dans lequel tout cela se déroule. "*Le jugement du sujet forme l'objet qui l'informe*" écrit Jean-Louis Le Moigne (Moigne, 2003). L'objet est inconnu en soi, mais il est "*construit* " par le sujet sous forme d'une représentation nécessairement limitée et partielle. Quant au sujet, il se construit par sa rencontre avec l'objet qui le provoque et lui résiste. Voici près d'un siècle, Gaston Bachelard remarquait (Bachelard, 1934) : « *Si l'objet m'instruit, il me modifie* ». En conclusion, dans le processus d'observation, le sujet et l'objet rentrent dans une boucle de rétroaction (Figure 3-4) : positiviste du côté de l'objet, idéaliste et transcendantal du côté du sujet. D'un côté, le déterminisme des corps, de l'autre, l'absolue liberté des sujets. Pour Edgar Morin, il s'agit là de l'erreur majeure commise par la pensée occidentale depuis Descartes (Donnadieu, 2008).

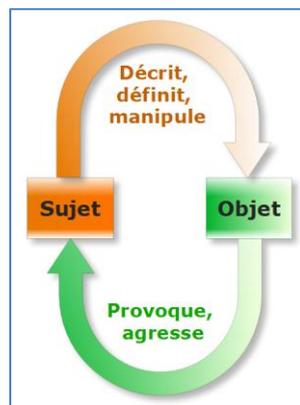


Figure 3-4 Circularité de la relation sujet-objet

Les systémiciens utilisent la métaphore de la « carte et du territoire » pour caractériser la nature complexe de la connaissance :

- la « carte » n'est pas le territoire : elle ne pourra jamais en exprimer la complexité ;
- mais la « carte » n'est pas sans rapport avec le territoire : une bonne carte routière me permettra de retrouver facilement ma route à travers le territoire.

La carte est donc une représentation "opératoire" du territoire, représentation qui reste cependant limitée et partielle. Elle est en effet dépendante de l'objectif des futurs utilisateurs. Le rapport carte/territoire/utilisateur retrouve ainsi la question de la relation entre l'observateur et l'objet observé, la relation du sujet avec l'objet. L'observateur, qui au final est toujours aussi un utilisateur, se projette inéluctablement dans la démarche d'observation. La construction du modèle est une démarche interdisciplinaire, systémique. En adoptant l'approche systémique on peut identifier, dans le processus de modélisation, trois grandes étapes, chacune apportant un niveau croissant de précision : investigation systémique (construction de l'objet), modélisation qualitative, modélisation dynamique et simulation (Figure 3-5).

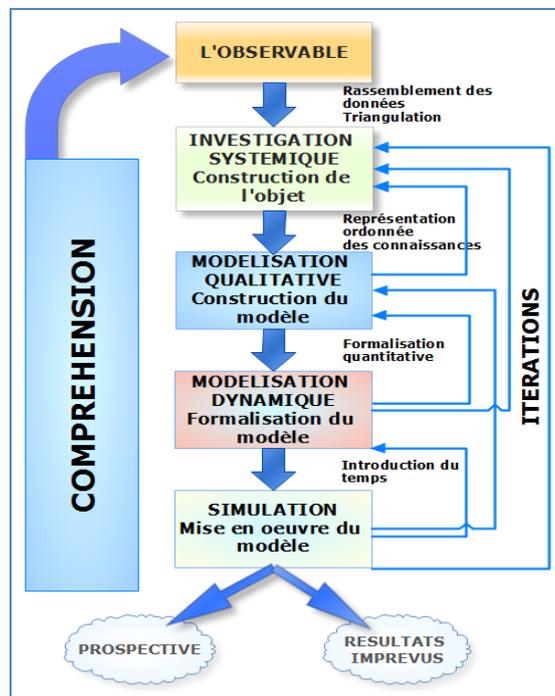


Figure 3-5 Les étapes de la démarche systémique (Donnadieu, 2008)

3.4.1 L'investigation systémique

Elle consiste à définir les limites de l'objet, à le situer dans son environnement et à faire l'inventaire des échanges entretenus avec ce dernier ; l'objet est délibérément construit comme un système selon la définition donnée par Joël de Rosnay : « *ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé en fonction d'un but* ». L'étape de la construction de l'objet met en évidence l'architecture du système, identifie les composants et leurs relations ainsi que leurs évolutions dans le temps. Un outil décrit par Jean-Louis Le Moigne (Moigne, 1984), appelé « *la triangulation systémique* » permet, dans la phase d'investigation d'un système complexe, d'observer celui-ci sous trois aspects différents mais complémentaires (multi-vues) :

- a. L'aspect fonctionnel - lié à la finalité du système : Que fait le système dans son environnement ? A quoi sert-il ?
- b. L'aspect structural - décrit la structure du système en utilisant la démarche analytique du positivisme avec quelques différences : l'accent est mis sur les relations entre les composants et leur structure plutôt que sur les composants eux-mêmes.
- c. L'aspect historique (ou générique ou dynamique) - l'accent est mis sur la nature évolutive du système ; celui-ci est capable d'auto-organisation, il a une mémoire et un projet ; l'histoire est capable, bien souvent, de rendre compte de certains aspects fonctionnels.

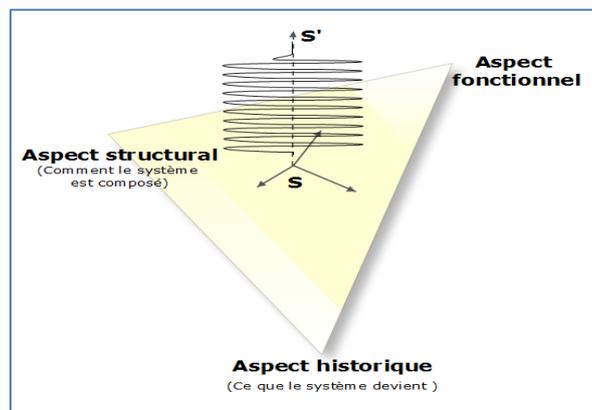


Figure 3-6 La triangulation systémique

La triangulation systémique (Figure 3-6) se développe en combinant les trois vues : fonctionnelle, structurale et historique, d'une manière complémentaire. L'hélice signifie le déplacement de l'observateur d'une vue à une autre pour gagner en approfondissement et en compréhension.

3.4.2 La modélisation qualitative (ou topologique)

A la suite de la première étape, on construit un schéma graphique basé sur les interactions entre les principaux composants du système ainsi qu'avec son environnement. Le but de cette analyse est la mise en évidence des flux et des boucles de régulation (de rétroaction stabilisatrices ou explosives).

Le modèle construit n'a que de faibles qualités prédictives. Son rôle est de fournir des informations sur l'objet complexe étudié et de se constituer en un outil d'analyse.

3.4.3 La modélisation dynamique et la simulation

Le modèle qualitatif offre des informations sur les relations entre les composants du système à travers le formalisme mathématique et la dynamique des systèmes. L'utilisation de la variable temps permet la construction des modèles à des fins prospectives, par la constitution de scénarios alternatifs. Si La simulation

sur ordinateur est beaucoup plus courante pour les systèmes économiques, biologiques ou écologiques, elle l'est beaucoup moins quand il s'agit du domaine des sciences humaines et sociales et encore moins pour les systèmes technico-économiques.

Étant donné que le modèle constitué est une représentation de la réalité, mais pas de la réalité en elle-même, on peut se poser la question : quel serait le degré de confiance de l'approximation de cette réalité, ceci, du moins, du point de vue statistique ? La réponse à cette question implique l'existence à deux critères permettant de départager les modèles : le critère d'opérativité et celui d'enseignabilité.

3.4.3.1 Le critère d'opérativité

Se base sur la notion d'action qui se manifeste, en plus de son sens propre, comme choix et décision. L'action, et non le cogito cartésien, se trouve au fondement de toute connaissance. On fait la distinction entre acte connaissant et acte anormal. Le critère d'opérativité juge de la "vérité" du modèle selon sa capacité à saisir l'action dans sa complexité, à l'orienter, à la rendre plus efficace. Dans ce sens, le vrai modèle est celui qui fonctionne, qui atteint l'objectif du modélisateur.

3.4.3.2 Le critère d'enseignabilité

Ce critère complète le précédent : il faut que le modèle « fonctionne » et qu'il puisse être communiqué aisément. "*Nous ne communiquons que par des modèles*" a pu dire Gregory Bateson et Paul Valéry écrivait également : "*Nous ne raisonnons que sur des modèles*". L'aptitude à répondre à ce critère représente une valeur pratique qui peut passer au premier plan dans certaines situations. L'introduction de la vision des autres (aspect multi-métiers) est appelé le principe de spécularité : se comprendre soi-même comme les autres nous comprennent, et représente une condition de succès du modèle. Il faut remarquer que cette condition devient plus difficile à tenir lorsqu'il s'agit d'un modèle en rupture avec la pensée dominante. A part l'intégration des points de vue des autres, le modèle doit vérifier les conditions d'une bonne théorie scientifique (Donnadieu, 2008) :

- économie de pensée : le modèle permet de répondre à un grand nombre de questions à partir d'un nombre restreint de concepts et de données ;
- cohérence : grâce à sa logique interne, le modèle unifie efficacement différents champs disciplinaires ;
- élégance : le modèle provoque dans l'esprit une perception esthétique d'unité et d'évidence.

Selon (Donnadieu, 2008) : « *Les deux premières conditions ont à voir avec la raison, la troisième avec le sentiment de beauté. Elle renvoie à l'œuvre d'art dont un bon modèle (beau modèle?) peut, à sa manière, se recommander. La reconnaissance de la place éminente de l'invention et de l'imagination dans le travail de modélisation ne dispense donc aucunement de l'obligation d'avoir à exprimer le modèle dans un discours de rationalité. Mais il s'agit d'une rationalité ouverte, qui reconnaît ses limites en même temps qu'elle se veut quête indéfinie de la connaissance du réel.* »

3.4.4 Le design des systèmes

Dans ce chapitre, nous abordons la création de la forme de l'artéfact et nous utilisons le terme « *design* » dans le sens de conception de la forme. Par rapport à ces caractéristiques nous pouvons établir des analogies avec les propriétés de l'activité de conception de l'artéfact dans le domaine de l'ingénierie et nous en tiendrons compte lors de la modélisation de l'activité de conception.

Nous pouvons parler du langage du design (Dong, 2009) et dans ce sens, dans l'étude « *A Disciplined Conversation* » publiée dans *Design Research*, Nigel Cross propose une description du design à travers quelques caractéristiques :

- Le Design est rhétorique. La forme de l'artéfact est censée évoquer une histoire que le designer voudrait communiquer.
- Le Design est émergent. Des caractéristiques émergentes de la solution choisie du design suggèrent les possibles pas suivants (l'évolution).
- Le Design est opportuniste. Ce n'est pas possible, a priori, de connaître et de synthétiser toutes les informations concernant la forme potentielle. Les designers identifient les opportunités pour les solutions possibles en cours de route.
- Le Design est abductif. Le type de raisonnement abductif avance à travers des hypothèses explicatives, qui sont formées et évaluées. Le raisonnement abductif permet au designer d'expliquer la motivation des décisions prises à chaque étape du processus de création.
- Le Design est réflexif. Le Designer s'engage dans une « conversation » avec la matière (design représentations) durant ces activités.
- Le Design est risqué. Il n'y a pas de garantie de succès !

Nous remarquons quelques similitudes avec l'activité de conception dans le domaine des systèmes industriels.

3.5 Éléments d'une stratégie PLM

Nous commençons par évoquer un paradoxe: « *It is used to be that people needed products to survive. Now products need people to survive.* »²⁸. En effet, une des contraintes les plus sévères du contexte économique actuel de l'entreprise est la réactivité pour offrir des produits toujours plus diversifiés et attractifs, qui satisfassent les plus exigeantes attentes des consommateurs.

Pour améliorer la compétitivité des entreprises, la gestion du cycle de vie des produits, ou plus communément appelée PLM (*Product Lifecycle Management*), est une stratégie de gestion intégrée de l'ensemble des informations et des processus liés au produit sur l'ensemble de son cycle de vie, en contexte d'entreprise étendue, allant de la phase de « définition du besoin » jusqu'à la phase de « fin de vie » de celui-ci (Stark, 2005) (Sääksvuori & Immonen, 2004) (CIMdata, 2009). De ce fait, la définition du PLM acquise par la communauté associée peut être exposée ci-

²⁸ Autrefois, les gens avaient besoin de produits pour survivre. Aujourd'hui, ce sont les produits qui ont besoin des gens pour survivre.

dessous (Amann, 2002): « *A strategic business approach that applies a consistent set of business solution in support of the collaborative creation, management, dissemination, and use of product definition information across the extended enterprise from concept to end of life - integrating people, processes, business systems, and information.* »²⁹. Selon la Figure 3-7 nous pouvons constater la diversité des systèmes d'information accompagnant le cycle de vie du produit. Ainsi, les problèmes de compatibilité et de cohérence des informations échangées entre ces plateformes logicielles font l'objet de nombreux travaux dans les domaines :

- Intégration et cohérence des structures de données,
- Interopérabilité,
- Échanges de données,
- Déploiement et implémentation des données,
- Capitalisation et réutilisation des connaissances,
- Gestion des processus métiers dans l'entreprise.

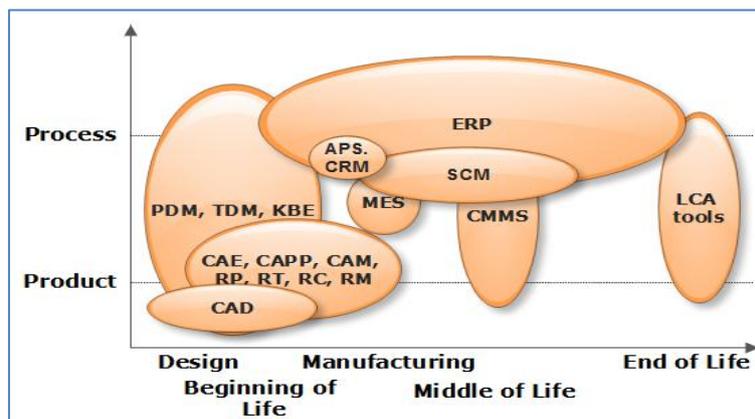


Figure 3-7 Systèmes d'information dans le cycle de vie (Garetti & Terzi, 2007)

Cette approche stratégique a été lancée au début des années 2000 comme solution intégratrice entre les courants intégrés, collaboratifs et les méthodes associées aux outils de XAO (X Assisté par Ordinateur), tels que les applications de CAO (CAD - *Computer Aided Design*), CAPP (*Computer Aided Process Planning*) et CAM (*Computer Aided Manufacturing*), les systèmes de gestion des données techniques de type PDM (*Product Data Management*), EDM (*Engineering Data Management*), etc., en connexion avec les systèmes SCM (*Supply Chain Management*) et ERP (*Enterprise Ressources Planning*), dans une chaîne numérique unique où tous les services fonctionnels de l'entreprise ont un rôle à jouer (Stark, 2005) (Danesi et al, 2007) (voir la Figure 3-8). Les travaux de recherche actuels, dans le domaine du PLM, sont principalement ciblés sur la gestion des informations dans les phases de début (*Beginning of Life - BOL*), de milieu (*Middle of Life - MOL*)

²⁹ Une approche d'affaires stratégique qui applique un ensemble cohérent de solutions d'affaires à l'appui de la création collaborative, de la gestion, de la diffusion et de l'utilisation des informations de définition de produit, à travers l'entreprise étendue du concept à la fin de vie - intégration des personnes, des processus, des systèmes d'entreprise, et de l'information .

et de fin du cycle de vie (*End of Lifecycle - EOL*) des produits (Kiritsis et al, 2003), plus particulièrement autour des systèmes PDM et ERP.

Devant la complexité du domaine investigué, nous concentrons notre recherche sur la gestion des informations du système produit-processus, dans le but de construire notre modèle de cycle de vie.

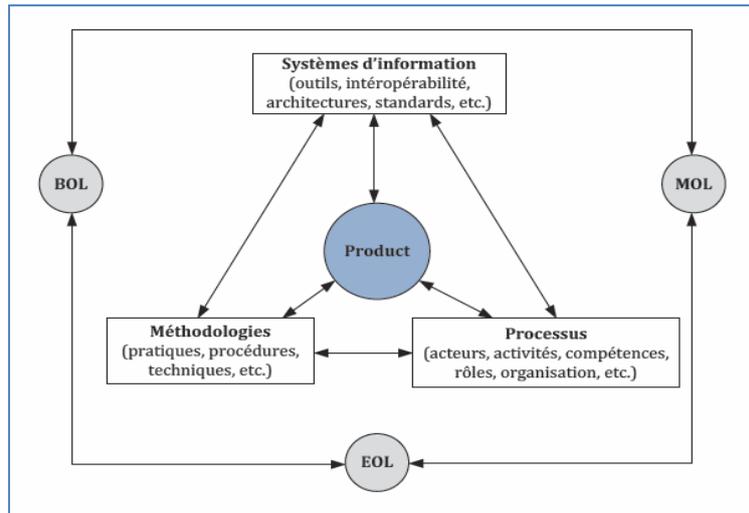


Figure 3-8 Stratégie PLM centrée sur le produit (Demoly, 2010)

3.5.1 Inventaire de quelques problèmes dans le cycle de vie du produit

Dans l'environnement du cycle de vie du produit, nous pouvons citer, au niveau bas de gestion³⁰, quelques problèmes identifiés selon (Stark, 2005) :

- L'historique de la conception n'est pas tenu à jour ou il n'est pas du tout formalisé, ce qui a comme conséquence l'impossibilité de pouvoir s'appuyer sur les expériences passées.
- Incapacité de trouver l'information sur le produit, ou bien celle-ci ne correspond pas à l'état réel du produit, par exemple, un plan d'un ensemble de pièces ne correspond pas à la disposition des composants matérielles se trouvant sur la chaîne de production.
- Perte de temps pour les concepteurs lorsqu'ils ne trouvent pas rapidement la maquette 3D dans la masse d'informations existante. L'implémentation d'un « *Knowledge Management System* » peut contourner ce problème, mais dans la pratique l'introduction d'un tel système s'avère plus que fastidieuse.
- Complexité de la gestion des données : recherche et localisation des

³⁰ L'expression n'est pas péjorative mais elle indique les activités de conception et de gestion administrative technique.

données, gestion des accès, maintien « up-to-date » de la configuration du produit, etc. En 2004, UGS PLM Solutions a annoncé que la PLM de MTU Aero Engines a couvert la gestion de plus de 10 millions de documents, éléments et objets accessibles pour plus de 5'000 utilisateurs.

- e. Transfert manuel de données entre plusieurs applications, ce qui produit des erreurs et une perte de temps et d'argent pour leur correction. Par exemple, transmission manuelle des nomenclatures entre les systèmes CAO et ERP. Un autre problème s'ajoute : celui de la synchronisation des données entre la CAO et le ERP.
- f. Plusieurs copies de l'information décrivant le même objet doivent être maintenues sans savoir laquelle est le master. Il en résulte beaucoup de confusion lorsque les informations s'échangent entre les utilisateurs.
- g. La gestion du projet et des ressources n'est pas liée aux informations de conception. Des chevauchements involontaires des données et des résultats de flux de travail causent une perte de temps et d'argent. Dans ces conditions, la solution de dérouler en parallèle les phases du projet mène au chaos.
- h. Le coût des composants est difficile à estimer. Les informations ne sont pas exactes.
- i. Le manque de coordination des modifications. La gestion des modifications est de type bureaucratique, complexe et lente. Des données non mises à jour arrivent dans les ateliers, produisant confusion et rebuts. Parce que les produits sont tout de même fabriqués, en attendant l'introduction des modifications, il manque la traçabilité des modifications mineures introduites directement dans le processus de fabrication.
- j. La configuration de la documentation ne correspond plus au produit réel. Des différences non-expliquées apparaissent entre les plans et les nomenclatures. La gestion des pièces détachées devient un vrai défi.
- k. Les manuels de l'utilisateur sont difficiles à comprendre, ils sont apparemment écrits par des personnes n'ayant jamais vu ou utilisé le produit.
- l. Le service de la Qualité ne maîtrise plus ni les produits ni les processus, ceci malgré les investissements et les programmes de qualité mis en place.

La liste est longue et elle peut continuer mais nous arrêtons ici l'inventaire des problèmes rencontrés dans une entreprise sans avoir un système de gestion de type PLM. Les problèmes identifiés ci-dessus sont en relation avec les concepts de « *product data* » (données sur les produits) et de « *product workflow* » (flux de production de produit) (Stark, 2005).

3.5.2 Product data

Nous avons trouvé une définition du « *product data* » (données sur les produits) dans (Stark, 2005) : « le terme « *product data* » inclut toutes les données concernant à la fois le produit et tous les processus associés à sa conception, à sa

fabrication, à son utilisation et à son support. « Product data » est créé et utilisé tout le long du cycle de vie du produit ».

Les données sur les produits peuvent être localisés à des endroits différents et stockés sur des supports hétéroclites, et ont des formes variées : numérique, graphique, alphanumérique, etc., et les utilisateurs, suivant leurs position (à l'intérieur de l'entreprise : clients, fournisseurs, organismes de réglementation, etc.) ont besoin des vues différentes du produit. Stark a dressé une liste des attributs des données des produits (Stark, 2005), comme : définition, champ d'application, support de l'information, type et format de l'information, représentations, échanges des données, structure d'information, options et variantes, version, statut, source, utilisateurs, utilisations, vues, volume, appartenance, sécurité, archivage.

3.5.3 Product workflow

C'est le flux du travail à travers les activités qui créent ou utilisent les données sur les produits. Il commence au début du cycle de vie et fini avec l'extinction du produit. Ici nous jugeons l'extinction du produit du point de vue de l'entreprise et non du point de vue client. En effet, le produit peut être utilisé même après l'arrêt de la fabrication des pièces de rechange par le fabricant. On voit, par conséquent, que la notion de fin de cycle de vie est assez peu précise imprécise. Le flux du travail s'établit dans l'entreprise mais aussi à l'extérieur de celle-ci, à travers le réseau des fournisseurs, des clients, des organismes de réglementations, etc. On peut aussi remarquer que l'enchaînement des activités peut être en série ou en parallèle, et on peut noter la présence de boucles d'itérations qui confèrent à l'ensemble un caractère assez complexe.

Le « *product workflow* » est spécifique pour chaque entreprise. Il dépend de plusieurs facteurs, dont nous pouvons citer dans le désordre : les différents cycles de vie, le taux d'introduction de nouveaux produits, les régulations spéciales, la taille et la structure organisationnelle de chaque entreprise, etc. Une des causes du non-respect des délais et des dépassements des budgets est le manque de structure de flux de travail, parce qu'il est impossible de préciser les coûts et les temps dépensés sur des activités non-prévues. Le flux de travail traditionnel est mieux décrit dans la phase de production du cycle de vie. Pourtant, même dans cette phase il est faiblement défini et structuré (Stark, 2005). Les autres phases sont moins bien structurées, ce qui a comme conséquences une grande difficulté de trouver les informations vitales pour certaines activités ou d'introduire dans un système cohérent et structuré des informations nécessaires dans un autre processus. Par exemple, les spécifications de maintenance ne sont pas prises en compte lors du déroulement de l'étude conceptuelle (*conceptual design*). Dans un mode de travail traditionnel, personne ne peut faire des prédictions exactes au début des processus quant aux délais, qualité ou coûts : on se base sur des hypothèses et quand on constate un écart par rapport à une situation normale, on corrige. Peut-être existe-t-il une gestion du flux de travail dans des phases isolées, mais s'il n'y pas un contrôle global du flux sur tout le cycle de vie du produit, on ne peut pas avoir une bonne estimation du coût final des produits dans les phases initiales de conception.

En prenant comme modèle le cycle de vie selon le modèle Pahl & Beitz, nous avons systématisé les flux des informations, mais aussi des matières et des ressources (financières, humaines, etc.) tout au long de la vie du produit (Pahl et

Beitz, 2007). Les deux derniers flux seront associés dans notre travail au flux d'informations pour la modélisation d'un nouveau cycle de vie (Tableau 3-9).

Nous voulons mettre en évidence le fait que même dans une organisation avec un flux de travail peu structuré, les informations, matières et ressources seront partagées dans toutes les phases du cycle de vie, même si celui-ci est formalisé ou non.

Tableau 3-9 Les 3 flux au long du cycle de vie d'un système

Flux de :	Marché, Objectif interne à l'entreprise	Planification du produit	Conception et Développement	Production, Assemblage et Tests	Mise en service	Utilisation et Maintenance	Récupération et Recyclage de l'énergie	Elimination
Information	←-----→							
Matière	←-----→							
Ressources	←-----→							

La différence est que dans un flux contrôlé et structuré, tous les événements (informations, matières, ressources) sont censés être connus à l'avance (du moins c'est souhaitable) et formalisés, ce qui déterminent l'initiation des actions d'anticipation (proactive) et non de correction tardive avec des surcoûts majeurs. L'introduction de concepts tels que « *concurrent engineering* » va de pair avec la maîtrise du flux du travail et du contrôle des données du produit. Dans une organisation qui ne contrôle pas ces derniers aspects, il est impossible d'impliquer toutes les compétences de l'aval du cycle de vie (production, mise en service, support, marketing) au le début de la conception.

3.5.4 Gestion de la configuration

La gestion de configuration consiste à gérer la description technique d'un système (et de ses divers composants), ainsi qu'à gérer l'ensemble des modifications apportées au cours de l'évolution du système. La gestion de configuration est utilisée pour la gestion de systèmes complexes dans les domaines : aéronautique, automobile, informatique, etc. Proprement dit, la gestion de la configuration est composée d'un ensemble de pratiques :

- Identification des articles de configuration. Cette activité recouvre notamment :
 - le type des informations (ex : formats de fichiers),
 - l'organisation des informations (ex : arborescence),
 - les règles de nommages,
 - le cycle de vie des informations,
 - l'identification des relations entre les articles.
- Contrôle des changements :
 - cycle de vie d'une demande de modifications,
 - comité de contrôle des modifications.
- Comptabilité analytique de la configuration :
 - métriques

- Audit et revue, à savoir un audit physique & fonctionnel recouvrant :
 - la gestion des sauvegardes,
 - la vérification de l'intégrité du référentiel de configuration,
 - la matrice de couverture entre les exigences et les réalisations.

3.5.5 La systémique

Le terme système vient du grec « *systema* », qui signifie « *un tout organisé* ». Merriam-Webster's Collegiate Dictionary définit le système comme étant « *un groupe homogène d'éléments interdépendants qui agissent les uns sur les autres dans un tout unitaire* ». ³¹ L'intérêt de l'approche systémique dans le domaine des sciences dites « molles » peut s'expliquer par l'approche holistique qui a permis de trouver des solutions - par l'utilisation d'outils intellectuels spécifiques - aux problèmes insolubles par une approche analytique.

Le biologiste de formation von Bertalanffy ³² est considéré comme le fondateur de la systémique. Il participe à l'émergence de la théorie « holiste » de la vie et de la nature et s'intéresse tôt à la conception de l'organisme comme système ouvert. Sa théorie de la biologie est à la base de sa théorie générale des systèmes. Ce nouveau paradigme systémique constitue, selon les propres termes de Bertalanffy, « une nouvelle philosophie de la nature », opposée aux lois aveugles du mécanisme, au profit d'une vision du « monde comme une grande organisation ». C'est dans ce cadre que l'ingénieur chercheur est amené à explorer les divers champs d'application de sa théorie - PLM, cycle de vie, management de la conception, - comme autant de niveaux d'organisation. Dans le cadre de notre recherche nous nous intéresserons aux deux niveaux d'analyse ³³. La **science des systèmes**, consistant à la fois dans une étude des systèmes particuliers et dans une théorie générale des systèmes comme ensemble de principes s'appliquant à tous les systèmes. L'idée essentielle ici est que l'identification et l'analyse des *éléments* ne suffisent pas pour comprendre une totalité (comme un organisme ou une société) ; il faut encore étudier leurs *relations*. Bertalanffy s'est attaché à mettre en lumière les correspondances et les isomorphismes des systèmes en général : c'est tout l'objet d'une théorie générale des systèmes. Par exemple, dans notre cas, la théorie générale des systèmes cycle de vie peut constituer un ensemble de principes s'appliquant à tous les produits/systèmes industriels. Comme conséquence de cet axiome nous nous proposerons (dans le chapitre 3) de : a) identifier, b) analyser et c) mettre en évidence les relations existantes entre les éléments qui composent le système, objet de notre étude. Le deuxième niveau qui présente un intérêt particulier pour notre recherche est celui de la **technologie des systèmes**. Celle-ci concerne les propriétés des hardwares et les principes de

³¹ « *A regularly interacting or interdependent group of items forming a unified whole* ».

³² Karl Ludwig von Bertalanffy (19 septembre 1901, Atzgersdorf près de Vienne, Autriche - 12 juin 1972, Buffalo, New York, États-Unis) était un biologiste d'origine autrichienne connu comme le fondateur de la théorie générale des systèmes grâce à son œuvre General System Theory. Von Bertalanffy a d'abord travaillé à Vienne puis à Londres, le Canada et les États-Unis.
(http://fr.wikipedia.org/wiki/Ludwig_von_Bertalanffy)

³³ <http://www.institutdelafamillegeneve.org/introductionsystem.htm>

développement des softwares³⁴. Les problèmes techniques, notamment dans l'organisation et la gestion des cycles de vie ou des processus de conception, peuvent trouver leurs solutions dans les théories « globales », comme la théorie cybernétique, la théorie de l'information, la théorie des jeux et de la décision, la théorie des circuits et des files d'attente, etc. L'attrait de telles théories consiste dans leur caractère non-fermé et non-spécifique, mais au contraire interdisciplinaire. L'application de cette dernière caractéristique est très utile dans la constitution des équipes pluridisciplinaires et de l'ensemble de règles qui régissent leur fonctionnement.

Un méta-niveau qui s'ajoute aux premiers deux cités plus haut est représenté par un nouveau paradigme systémique qui complète le paradigme analytique de la mécanique classique. Conformément à ce méta-niveau systémique, on distingue les systèmes réels (un atome, une espèce, un individu), qui existent indépendamment de l'observateur, les systèmes conceptuels (théories rationnelles, physique), qui sont des constructions symboliques, et les systèmes abstraits (les théories expérimentales). La délimitation entre les systèmes réels et conceptuels est loin d'être établi.

En conclusion, la systémique est ainsi un nouveau paradigme qui : 1) regroupe des démarches a) théoriques, b) pratiques, c) méthodologiques ; 2) pose des problèmes concernant les modes a) d'observation, b) de représentation, c) de modélisation, d) de simulation ; enfin, 3) se donne pour objectifs de préciser la notion de système : a) ses frontières, b) ses relations internes et externes, c) ses structures, d) ses lois ou propriétés émergentes.

3.5.6 Les ontologies dans une optique PLM

Le PLM nécessite une approche holistique mêlant les applications liées aux produits – les systèmes, les données, les processus, les techniques et les compétences. La connaissance est considérée comme "la source" d'innovation et de croissance pour les entreprises impliquées dans le développement de produits. Une question cruciale dans ce contexte est de savoir comment modéliser, gérer et utiliser la connaissance du produit à travers l'ensemble du produit cycle de vie d'une manière efficace et efficiente. Dans (Ackerman & Eichelberg, 2004), les auteurs insistent sur la nécessité pour les entreprises d'avoir une vue unifiée sur la connaissance des produits, afin de mieux soutenir et synchroniser les activités simultanées. Les entreprises se sont éloignées des vues unilatérales, de l'optimisation locale des données de produits, pour aller vers des modèles de produits unifiés qui favorisent l'édition et l'accès à l'information produite pour les employés, partenaires et clients à travers tous les processus d'affaires.

Une des solutions qui peuvent apporter la clarté tant nécessaire dans la manipulation d'une grande quantité de données dans les systèmes PLM serait les ontologies³⁵. Le mot « *ontologie* » vient des mots grecs *ontos* qui signifie

³⁴ Les notions de hardware et software sont prises dans leur sens « cybernétique » anglo-saxon et ne représentent pas seulement les composants matériels et logiciels d'un ordinateur.

³⁵ L'ontologie en tant que domaine est la partie de la philosophie qui s'intéresse à la nature et l'organisation a priori de la réalité. La réalité, dans notre contexte, est le monde industriel et plus précisément le PLM. Une autre définition, selon le Dico du Net : "*Organisation hiérarchique de la connaissance sur un ensemble d'objets par leur regroupement en sous-catégories suivant leurs caractéristiques essentielles.*" Notion liée au web sémantique sur la représentation des connaissances :

« *existence* » et *logia* qui signifie « *étude* ». Elles sont devenues rapidement très populaires dans des domaines variés. Le terme « *ontologie* » a une signification philosophique, mais en gestion des connaissances, il représente la forme probablement la plus évoluée de représentation sémantique des connaissances. Il s'agit d'une sorte de "super thésaurus" destiné à indexer toutes les productions documentaires, stockées, entrantes ou sortantes dans un groupe social donné, typiquement une entreprise. Ainsi, un courrier électronique, un ouvrage de référence, un document de travail partageant les mêmes thèmes seront automatiquement mis en lien, donc mis en contexte, dégageant ainsi des connaissances sémantiques³⁶.

En représentation des connaissances, le terme ontologie fait référence à un module constitué d'un vocabulaire spécifique utilisé pour décrire un modèle d'un domaine particulier du monde réel, vocabulaire auquel est associé un ensemble d'hypothèses ou assertions sur le sens qui doit être attaché aux éléments de l'ontologie. Le vocabulaire et les assertions qui composent l'ontologie sont censés apporter une aide aux « agents », agents logiciels ou agents humains, pour résoudre des problèmes ou partager des connaissances (Napoli, 2005). Le système de représentation de connaissances peut être représenté comme dans la Figure 3-9. Nous remarquons une certaine analogie avec la démarche de résolution de problèmes dans TRIZ où le même concept de navigation entre les plans réel et abstrait est utilisé pour trouver la/les solutions au problème posé. Comme dans le TRIZ nous ne pouvons pas trouver les connaissances à l'intérieur du domaine réel sans passer par un univers formel. La conceptualisation correspond à un modèle abstrait d'une partie du monde réel sur lequel doit travailler le système considéré qui se présente comme un ensemble de définitions de concepts munis de propriétés et de relations entre ces concepts.

Par exemple, comme le montre la Figure 3-10, un projet d'ingénierie concurrente peut exiger des échanges d'informations entre les systèmes de CAO, analyse de performance, d'analyse fabricabilité, système de gestion des données produit, planificateur processus, un système de gestion de production, conception, et un système de simulation, etc.

réseaux sémantiques, cartes conceptuelles, graphes conceptuels.

³⁶ Le mot sémantique est dérivé du grec σημαντικός (semantikos), « signifié » lui-même formé à partir de σημαίνω (semaino), « signifier, indiquer » ou σήμα (SEMA), « signe, marque ». Dans le contexte ontologique nous nous intéressons à l'application de la sémantique : a) le tableau ; b) le graphe (réseau maillé d'objets, de concepts, etc.) et c) l'arbre (cas particulier de graphe nécessitant une théorie et une exploitation spécifiques). Ce sont des signifiants, au sens où ils représentent les connaissances.

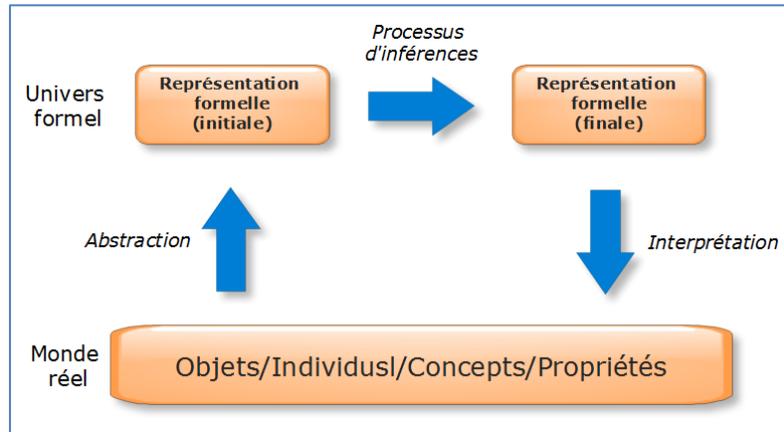


Figure 3-9 Architecture d'un système de représentation de connaissances

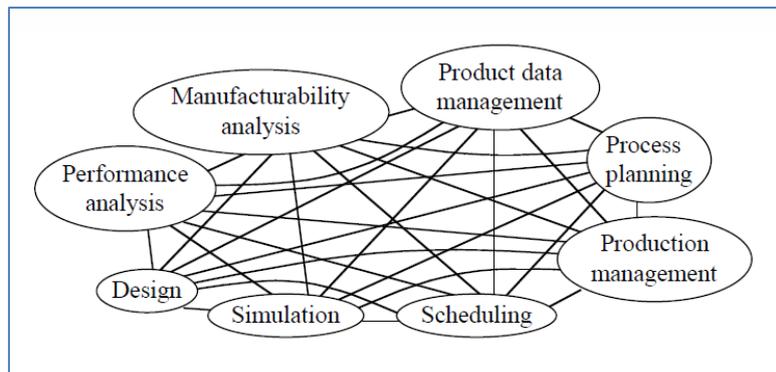


Figure 3-10 L'échange d'informations entre les sous-systèmes dans l'IC

Les approches actuelles pour intégrer de tels systèmes, il faudrait écrire « *point-to-points* » traducteurs pour chaque paire de systèmes qui ont besoin de partager l'information. Par ailleurs, pour chaque paire de tels systèmes, l'échange d'informations entre eux pourrait exiger la résolution de conflits sémantiques. Pour relever ces défis, depuis plusieurs années, ont été développés des modèles partageables et réutilisables appelés **ontologies**. Toutes les ontologies se composent d'un vocabulaire avec des spécifications sur la signification (ou la sémantique) de la terminologie utilisée dans le vocabulaire. Ce faisant, les ontologies supportent l'interopérabilité en fournissant un vocabulaire commun avec une machine partagée ayant le rôle d'interpréter la sémantique. Plutôt que de développer des traducteurs point-à-point pour chaque paire d'applications comme le montre la Figure 3-10, on a besoin seulement d'écrire des traducteurs entre la terminologie utilisée dans chaque application et l'ontologie commune, comme le montre la Figure 3-11. Par conséquent, une ontologie commune réduit drastiquement le nombre de traducteurs nécessaires.

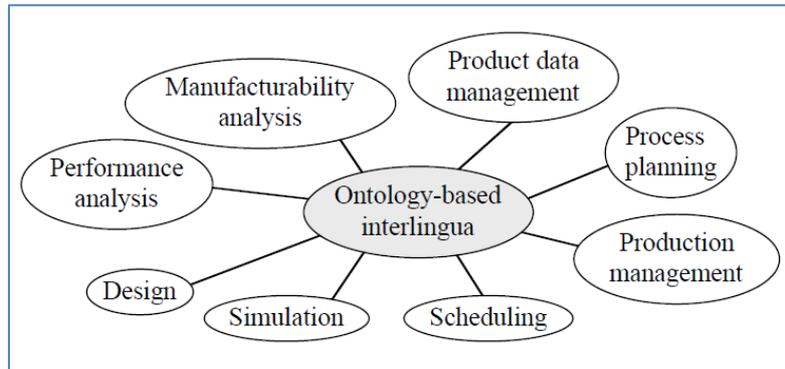


Figure 3-11 Ontologie commune – réduction du nombre de traducteurs

Nous distinguons généralement deux entités globales au sein d'une ontologie. La première, à objectif terminologique, définit la nature des éléments qui composent le domaine de l'ontologie en question, un peu comme la définition d'une classe en programmation orientée objet définit la nature des objets que l'on va manipuler par la suite. La seconde partie d'une ontologie explicite les relations entre plusieurs instances de ces classes définies dans la partie terminologique. Ainsi, au sein d'une ontologie, les concepts sont définis les uns par rapport aux autres (modèle en graphe de l'organisation des connaissances), ce qui autorise un raisonnement et une manipulation de ces connaissances. En conclusion, le monde est constitué d'objets, dont les propriétés ou attributs peuvent prendre des valeurs. Les objets peuvent être associés par des relations, par exemple être composés de parties. Propriétés et relations peuvent varier au cours du temps. Ces variations mettent en jeu des événements et des processus, éventuellement associés par la relation de causalité.

Dans la philosophie l'ontologie étudie l'existence de l'être plus précisément, les catégories des objets qui existent ou qui peuvent exister dans un certain domaine³⁷. Un domaine d'ontologies décrit les types d'objets appartenant à ce domaine. Formellement, l'ontologie d'un certain domaine s'occupe de sa terminologie, des concepts essentiels présents dans ce domaine, de leurs classifications, de leurs taxinomies, de leurs relations et axiomes de domaine. L'ontologie est une part extrêmement importante de la connaissance sur un domaine. En essence, l'ontologie est une part fondamentale de la connaissance et toutes les autres connaissances qui s'y réfèrent sont reliées à elle. Une des définitions les plus citées de l'ontologie est « *Ontology is a specification of a*

³⁷ En substance, l'ontologie est l'exploration de la nature fondamentale des choses qui existent dans le monde. L'enquête ontologique est étroitement liée à ses modes d'étude. L'épistémologie est l'étude critique de la nature, des terrains, des limites et des critères de validité de la connaissance humaine. Il provient du grecque l'épistème - la connaissance et logia - étude. La méthodologie est la science de la méthode, et provient du grec *methodos* - méthode et *logia* - étude. La *méthodologie* est l'évaluation de techniques d'investigation philosophique, dans une discipline. Le plus abstrait des trois est l'ontologie. Le plus concret est la méthodologie. L'épistémologie lie l'ontologie et la méthodologie à travers leur rôle dans l'étude de la façon dont la réalité est représentée par la théorie créée à la suite de l'application de méthodes de recherche. Les définitions de l'ontologie, de l'épistémologie et de la méthodologie ont varié au fil du temps. Les définitions ci-dessus ont été tirées de Websters Dictionnaire complète et Collins Dictionnaire de sociologie (Jary & Jary, 1991; Marckwardt, Cassidy, et McMillan, 1986).

conceptualization »³⁸. (Gasevic et al, 2006). Le contexte culturel de l'ontologie est situé par Aldo Gangemi de *Laboratory for Applied Ontology*, ISTC-CNR, Rome, Italie, dans un point nodal entre la philosophie, la logique, les sciences cognitives et sociales, la linguistique et sémiotique, les sciences computationnelles et les sciences empiriques (Figure 3-12). Gangemi définit le « *problem space* » d'un projet d'ontologie, c'est-à-dire celui qui répond aux questions « *What* », « *Why* » et « *Where* » (Gangemi, 2005) :

- *What are we talking about?*
- *Why do we want to talk about it?*
- *Where to find reusable knowledge?*

Tandis que dans le « *solution space* » nous devons chercher les solutions à nos problèmes dans le cadre d'un processus qui n'est pas du tout trivial. Le but d'un projet de développer un ensemble d'ontologies intégrées pour la modélisation des entreprises publiques et/ou commerciales est de créer des modèles susceptibles de répondre à des questions relatives aux informations disponibles mais également donner des réponses à des requêtes.

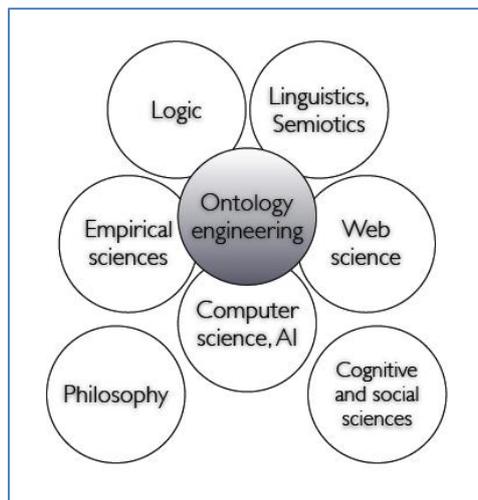


Figure 3-12 Le contexte culturel de l'ontologie (Gangemi, 2005)

3.5.6.1 Différents niveaux d'ontologies

Indépendamment des formalismes retenus, on distingue différents niveaux d'ontologies selon le domaine modélisé et éventuellement les tâches pour lesquelles elles sont conçues :

- Les ontologies d'application ont un domaine de validité restreint et correspondent à l'exécution d'une tâche.
- Les ontologies de domaine ont un faisceau plus large, une bonne précision

³⁸ Une conceptualisation est une vision du monde simplifiée et abstraite que nous voulons représenter à certaines fins.

et ne sont pas propres à une tâche particulière.

- Les ontologies générales ne sont pas propres à un domaine. Leur précision est moyenne.
- Les ontologies supérieures (*upper, level ontologies*) représentent des concepts généraux comme l'espace, le temps ou la matière. Elles sont universelles. Les concepts des trois autres types d'ontologie peuvent y faire référence. Exemples : SUMO, BFO.

Par rapport à un domaine, une ontologie possède des composants dont les plus importants sont : concepts, relations, attributs, instances and axiomes. Si dans le domaine considéré les connaissances ont une nature structurée alors il est possible d'extraire les composants nommés plus haut et après plusieurs étapes d'affinage ils peuvent être exploitables sur les computers. Nous pouvons citer parmi les rôles les plus représentatifs d'ontologies :

- Interopérabilité et partage d'informations à travers un vocabulaire contrôlé et bien organisé,
- Indexation d'informations complexes, et
- Diminution des explosions combinatoires.

3.5.6.2 Le processus de construction d'une ontologie

Ils existent plusieurs méthodes traitées dans la littérature. Pratiquement, toutes ces techniques s'accordent dans la définition des étapes générales pour les processus de construction de l'ontologie:

- a. Capture de l'ontologie: c'est l'identification et la définition des concepts clés et des relations dans le domaine considéré et les termes qui se réfèrent à ces concepts ;
- b. Codification de l'ontologie: traite de la formalisation, c'est-à-dire la traduction des définitions et des relations dans un langage formel ;
- c. Intégration de l'ontologie : fusion des principaux concepts et termes associés dans l'ontologie considérée avec les concepts et termes des autres ontologies ; c'est le processus d'incorporation des concepts et termes des autres domaines dans le domaine considéré.

La première étape est généralement commencée par une phase abstraite d'identification des éléments pertinents de la connaissance appartenant à un domaine. Ces éléments de connaissance sont soumis à une série d'améliorations dans les étapes ultérieures afin de les rendre plus formelle et de dériver les concepts, les relations et les attributs de l'ontologie correspondante (Mostefai et al, 2006). L'éditeur le plus utilisé pour la construction d'une ontologie est Protégé-OWL Editor (dans sa version ultime 4.1)³⁹. L'éditeur Protégé-OWL permet aux utilisateurs

³⁹ L'éditeur Protégé-OWL est une extension de Protégé qui supporte le langage d'ontologie Web (OWL). OWL est le plus récent développement dans le domaine des langages standards d'ontologies, approuvé par le World Wide Web Consortium (W3C) pour promouvoir la vision du Web sémantique. "Une ontologie OWL peut inclure des descriptions des classes, des propriétés et de leurs instances. Compte tenu d'une telle ontologie, la sémantique formelle OWL indique comment déduire les conséquences logiques, à savoir des faits non pas littéralement présents dans l'ontologie, mais entraîné par la sémantique. Ces inférences peuvent être fondé sur un document unique ou plusieurs documents distribués qui ont été combinés en utilisant les mécanismes OWL définis."(voir le site Web OWL Ontology Language Guide).

de:

- Charger et sauvegarder des ontologies OWL et RDF.
- Éditer et visualiser des classes, propriétés et les règles SWRL.
- Définir les caractéristiques de classes logiques comme les expressions OWL.
- Exécuter les raisonneurs comme les classificateurs logiques de description.
- Modifier les individus OWL pour le balisage du Web sémantique.

Plusieurs exemples d'ontologies construites avec l'outil susmentionné se trouvent à l'adresse <http://edesign.ecs.umass.edu/index.php?n=Research>. Ontologies. D'autres « *engineering ontologies* » ayant comme auteur Tania Tudorache (tudorache@stanford.edu) peuvent être trouvées à l'adresse http://protegewiki.stanford.edu/wiki/Engineering_ontologies.

La construction d'une ontologie dédiée au PLM est une tâche des plus complexes à cause de la quantité très importante de connaissances produites (Mostefai, 2001). La grande complexité et le volume immense de données à traiter pendant toutes les phases du cycle de vie ont retardé l'apparition des ontologies dédiées partiellement ou complètement au PLM (Figure 3-13).

3.5.6.3 Construction d'une ontologie de produit

Dans la construction d'une ontologie produit un rôle important est joué par le concept de « *feature* », ou dans une traduction approximative, « caractéristique » ou « fonction ». Dans ce qui suit nous retenons le sens de caractéristique. Ce concept est surtout lié à la forme géométrique du produit. Au fur et au mesure de la prise en compte du cycle de vie étendu du produit, la notion de « *feature* » englobe des contenus sémantiques plus riches et plus complexes liés au produit : fonctionnels, structurels, comportementaux, techniques, etc. L'ontologie du produit peut être exprimée sous la forme d'un concept d'arbre hiérarchique, nommée taxinomie⁴⁰, où certains domaines spécifiques peuvent être omis dans le but d'obtenir un niveau de généralité et de portabilité assez élevé. Nous avons, choisi comme illustration de la construction d'une ontologie produit (Figure 3-14), le concept publié par (Mostefai et al, 2006). Celui-ci contient dans la classe *Pmaster*, à caractère abstrait, toutes les autres sous-classes spécialisées. La classe *Pmaster* possède aussi les attributs communs qui caractérisent toutes les classes du produit : *name*, *type* et *generic_info*.

<http://protege.stanford.edu/overview/protege-owl.html>.

Le Web sémantique est un «web de données" qui facilite les machines à comprendre la sémantique, ou signification, de l'information sur le World Wide Web.

⁴⁰ Nous préférons cette forme au lieu de taxonomie. Pour de plus ample explications nous recommandons, parmi d'autres sources, le lien : <http://www.btb.termiumplus.gc.ca/chroniq-srch?lang=eng&srchtxt=taxonomie&i=&i=1&lettr=&cur=1&nbr=&comencsrch.x=0&comencsrch.y=0>.

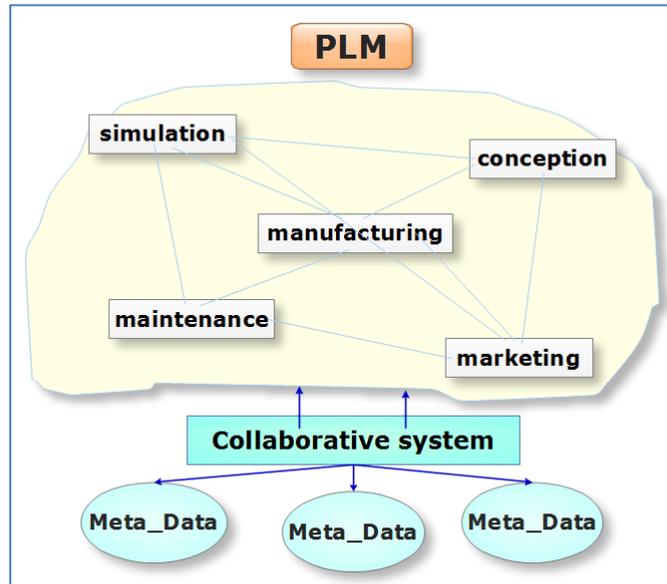


Figure 3-13 Collaboration comme un mécanisme d'intégration (Mostefai et all, 2005)

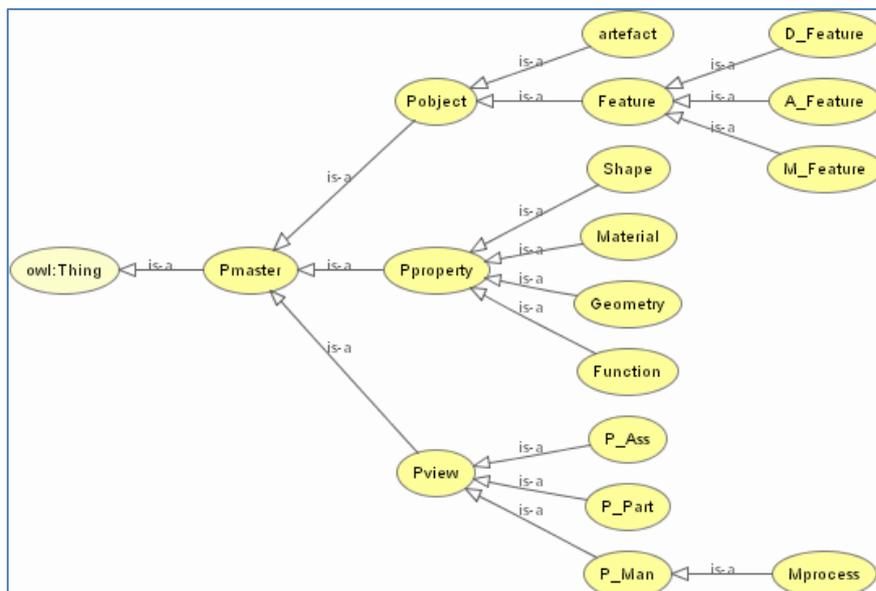


Figure 3-14 Concept de la hiérarchie de l'ontologie de produit (Mostefai et all, 2006)

Au deuxième niveau de la hiérarchie se trouvent trois catégories du produit qui représentent les spécialisations (ou les instances) de la classe *Pmaster* : *Pproperty*, *Pview* et *Pproject*. Voici une brève description de ces sous-classes :

- *Pproperty* est une classe abstraite destinée à décrire certaines propriétés importantes du produit : les matériaux, les classes de fonctions, la forme

et la géométrie (*Material, Function, Form* et *Geometry*).

- *Pview* : décrit différentes vues du produit et elle est instanciée, à son tour en trois classes : *P_Part*, *P_Ass* et *P_Man*. *P_Part* est destinée à la description des produits possédant un seul article à l'aide de *Material* et *Function*. La sous-classe *Function* est représentée par les associations *has_material* et *has_Pfunction*. *P_Ass* décrit les produits constitués par plusieurs composants. Cette information est visible à travers deux liens d'agrégation : une relation *sub-assembly/sub-assembly-of* définie sur la classe *P_Ass* elle-même et une association *consists-of* entre *P_Ass* et *P_part* dans le sens que l'assemblage est constitué de pièces uniques. *P_Man* décrit le processus de fabrication à travers l'usinage et une collection d'éléments géométriques liés qui correspondent à une méthode particulière de production ou à un procédé, ou qui peut être utilisé pour raisonner sur une méthode de production ou processus adaptée pour la création d'une nouvelle géométrie.
- *Pobject* : est synonyme de classe de l'objet produit, c'est une classe abstraite qui a deux sous-classes : *Feature* et *Artéfact*. La première est une classe générique et a différentes significations dépendantes de la représentation du produit : la classe *D_Feature* qui décrit les caractéristiques du « *design* » présentes sur la vue « *part* », la classe *M_Feature* qui décrit les caractéristiques de la fabrication (« *manufacturing features* ») des vues de type fabrication et la classe *A_feature* qui décrit les caractéristiques des assemblages dans les vues de type assemblage (« *assembly view* »). Indépendamment de la vue, la classe *Feature* est associée à la classe *Fonction* et *Shape* via les associations *has_Ffunction* et *has_shape*. Plus loin, une *Shape* est réalisée par une *Geometry*. Enfin, la dernière classe, (*Artifact*) se réfère à un produit ou à un de ces composants.

Pour l'application pratique de cette ontologie on parcourt, généralement, trois étapes :

- a. La description technique du produit : dans cette étape s'effectue l'identification de la nomenclature des composants et leurs descriptions fonctionnelles.
- b. La hiérarchie de l'assemblage : dans la deuxième étape les composants sont groupés en sous-ensembles dans le cadre d'une hiérarchie produit.
- c. Description dans le Protégé-OWL : dans cette étape on procède à l'implémentation du système produit dans l'application Protégé-OWL. Protégé est un éditeur d'ontologies et de structures de base de connaissances de type « *open source* » et gratuit mise au point par l'Université de Stanford.⁴¹ La plateforme Protégé permet la modélisation d'ontologies à l'aide de deux éditeurs, *Protégé-Frames* et *Protégé-OWL*.⁴² Les ontologies Protégé peuvent être exportées dans une variété de formats, y compris RDF (S), OWL, et XML.

⁴¹ <http://protege.stanford.edu/>.

⁴² L'éditeur Protégé-OWL est une extension de Protégé qui supporte le Web Ontology Language (OWL). L'OWL est le développement le plus récent dans les langages standards d'ontologie, approuvées par le Consortium de World Wide Web (W3C) pour promouvoir la vision Web Sémantique.

La communauté de Protégé a contribué avec de nombreuses extensions à l'amélioration de la plate-forme de base. Parmi les plus populaires de ces extensions se trouve OWLViz, qui peut être utilisé pour visualiser des ontologies OWL graphiquement. Dans la figure ci-dessous (Figure 3-15) nous montrons, partiellement, l'ontologie d'une méthode de conception.

L'établissement d'une ontologie de produit améliore les performances du travail collaboratif par l'utilisation des mécanismes disponibles de requêtes (*query*), de navigation et d'inférence d'ontologie. Ces mécanismes sont extrêmement utiles lorsque les informations recherchées ne sont pas disponibles directement dans l'ontologie du produit. Par exemple, nous pouvons déduire les caractéristiques d'usinage pour l'obtention d'une forme géométrique (par exemple, la réalisation d'un trou) à travers l'utilisation d'une requête (*query*) complexe associé à l'utilisation de OWL-DL.⁴³ Grâce à cette extension il est possible de construire automatiquement une classification hiérarchique et de vérifier les incohérences d'une ontologie conformément à OWL-DL. Ceci permet d'exécuter des tâches qui étaient autrefois accomplies autrefois par des experts en réduisant le temps et le risque d'erreurs et en assurant une coopération transparente dans le cadre d'un travail collaboratif. Dans ce sens nous pouvons citer les mécanismes de :

- Requête (*query mechanism*),
- Navigation (*ontology browsing*), et
- Inférence (*ontology inference*).

L'ontologie pourrait être étendue pour inclure l'analyse des coûts, la fabrication, les fonctions de produit et beaucoup d'autres secteurs que la conception d'un produit englobe. De notre point de vue, l'avantage de l'établissement d'une ontologie avec ses classes est de pouvoir cibler les objectifs dans la phase de recherche de besoins des utilisateurs. Nous allons introduire, dans le Plan qualité présenté plus loin, des classes (catégories) d'objectifs à explorer lors de l'analyse des besoins. L'ontologie du produit permet aussi une meilleure analyse fonctionnelle et analyse d'assemblage plus précise. Enfin, au niveau plus conceptuel, une ontologie permet, dans le cadre d'une organisation, d'identifier et de modéliser les concepts d'un domaine, pertinents pour une/des applications et de se mettre d'accord sur les termes employés pour se référer à ces concepts. Comme applications pratiques l'ontologie peut se retrouver, par exemple, dans les référentiels métiers, le vocabulaire technique, les bases de connaissances d'une organisation. Pour pallier aux inconvénients des processus traditionnels de développement de produits des auteurs comme (Patil et al, 2005) ont proposé l'introduction d'une ontologie pour l'échange des données liées au processus de conception (la CAO) et à l'usinage (les gammes d'usinage assistée par l'ordinateur). D'autres, comme (Kesavadas et al, 2005) ont proposé une ontologie suffisamment générique pour incorporer les relations sémantiques et les contraintes associées aux concepts et artefacts de conception dans leur produit appelé PrOntoTM. Cet outil a été testé avec succès pour une ontologie de 1500 termes relatifs aux engrenages.

⁴³ OWL-DL est basé sur le Description Logics d'où le suffixe DL.

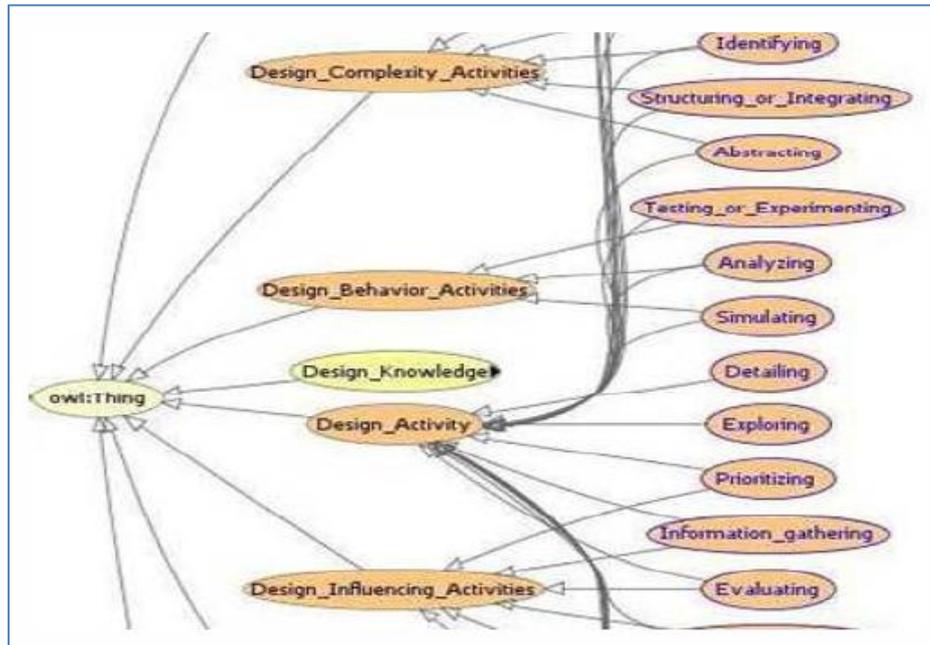


Figure 3-15 Copie d'écran d'une hiérarchie d'une méthode de conception (Kumar, 2008)

La construction d'une ontologie produit dans un contexte PLM est une tâche très complexe à cause de la quantité très importante de connaissances produit, mais représente toutefois une perspective intéressante dans le cadre de la fusion d'ontologies par le recouvrement d'un domaine plus large de connaissances produit. Cependant la fusion d'ontologie fait partie d'un domaine plus large appelé l'interopérabilité des ontologies.

3.5.6.4 L'interopérabilité des ontologies

Il existe trois formes d'interopérabilité :

- a. *Mapping* (mise en correspondance),
- b. *Merging*, (fusion),
- c. *Alignment* (alignement).

Nous nous attarderons sur la fusion, qui présente l'avantage de l'utilisation d'une ontologie pivot et où la perte d'informations semble moins significative que dans le cas de l'alignement, même si ladite fusion est moins précise que le procédé par mise en correspondance, qui lui est plus lourd. La fusion d'ontologie est le processus de production d'une seule ontologie cohérente à partir de deux ou de plusieurs ontologies existantes et différentes liées au même sujet. L'ontologie résultante unifie et remplace les ontologies d'origine (Figure 3-16). Cette définition ne précise pas comment l'ontologie résultante est reliée aux ontologies originales pour laisser ouvert le problème du choix de la méthode de fusion. Les approches les plus courantes utilisent l'union ou l'intersection. Dans l'approche par union, l'ontologie résultante contient l'union des entités provenant des ontologies originales et suppose résolues les différences de représentation d'un même concept. Dans

l'approche de type intersection, l'ontologie résultante ne contient que les parties communes des ontologies originelles.

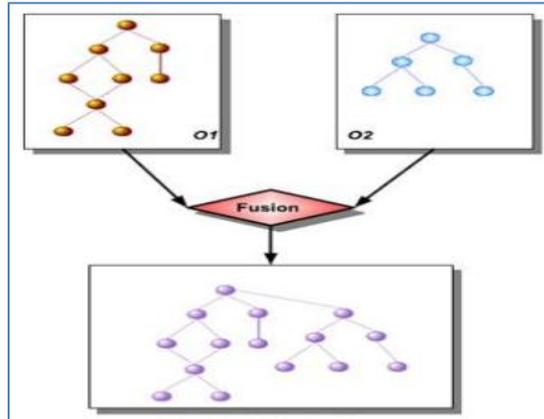


Figure 3-16 Le principe de la fusion d'ontologies

Même si la fusion automatique d'ontologies n'est pas encore opérationnelle à 100% il existe des outils qui peuvent faire des suggestions raisonnables et détecter des situations de conflits ou de violations de certaines contraintes au niveau sémantique : Ontomorph (McGregor et al, 1999), Chimaera (McGuinness et al, 2000) et PROMPT (Fridman Noy et al, 2000) comptent parmi les plus représentatifs. Le dernier outil cité compte parmi les meilleurs algorithmes de fusion/alignement d'ontologies. PROMPT effectue certaines tâches automatiquement et guide l'utilisateur pour l'accomplissement d'autres tâches pour lesquelles son intervention est nécessaire.

Dans le domaine des entreprises d'ingénierie plusieurs ontologies ont vu le jour. Nous citons, par exemple, les ontologies TOVE (*Toronto Virtual Enterprise*) issue du projet homonyme et Enterprise (*Enterprise Project at the University of Enfinburgh*). TOVE comporte des aspects très pertinents pour le PLM: existence d'ontologies de pièces et de produit, une description détaillée des besoins (*requirements*), des caractéristiques (*features*) et des contraintes (*constraints*). TOVE est considérée comme une ontologie des besoins dans le domaine de la conception en ingénierie (Mostefai, 2001). La Figure 3-17 ci-dessous montre seulement un sous-ensemble de TOVE qui intègre la notion du produit la plus rapprochée de celle qui correspond au contexte PLM : intégration des concepts de *Part* (pièce), *Feature* (caractéristique de forme), *Requirement* (besoin), *Property* (propriété) et *Constraint* (contrainte).

L'ontologie Enterprise est dédiée à la modélisation de l'entreprise, cible l'innovation dans la gestion de l'entreprise et offre l'aide à la gestion du changement. (Mostefai, 2001) a extrait le contenu le plus pertinent pour le PLM : les concepts de *Activity*, *Plan*, *Capability* et *Ressource*. Ces termes sont structurés sous forme hiérarchique dans la Figure 3-18. L'algorithme PROMPT sous l'environnement Protégé 2000 effectue la fusion des deux ontologies sous forme d'une liste TO DO de suggestions à valider par l'utilisateur. Après plusieurs itérations le processus de fusion est achevé au moment où l'utilisateur fini l'exploration des possibilités offertes par la liste TO DO (Figure 3-19). L'ontologie résultante est exploitée de diverses manières dans un contexte de cycle de vie PLM par : les requêtes (avec la

création de bibliothèques de requêtes par métiers), le parcours de l'ontologie (pour rendre accessibles les concepts et leurs sémantiques aux utilisateurs représentant différents points de vue) et l'utilisation d'inférences (par les mécanismes de raisonnements automatiques).

Les mécanismes présentés ici, d'obtention d'une ontologie dédiée à l'environnement PLM, ne sont indiqués qu'à titre d'exemple parce qu'ils pourraient encore être améliorés par l'adjonction d'autres ontologies et par l'utilisation d'outils supplémentaires pour le contrôle de la validité formelle et du point de vue sémantique. L'intérêt de cette introduction dans le domaine des ontologies consiste dans la hiérarchisation des classes (concepts) et dans l'utilisation des sémantiques spécifiques à l'environnement PLM.

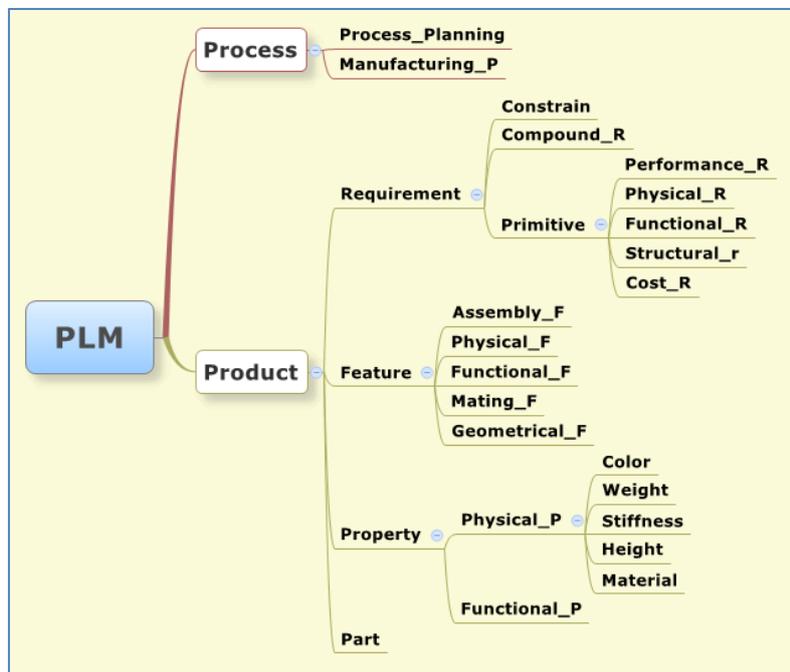


Figure 3-17 Concepts extraits de TOVE (Mostefai, 2001)

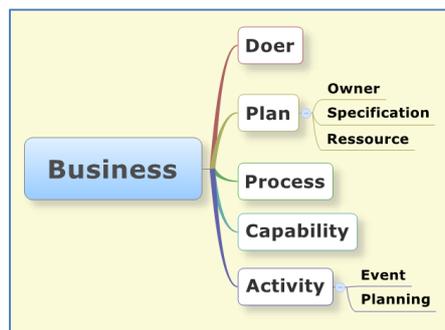


Figure 3-18 Concepts extraits de l'ontologie Enterprise (Mostefai, 2001)

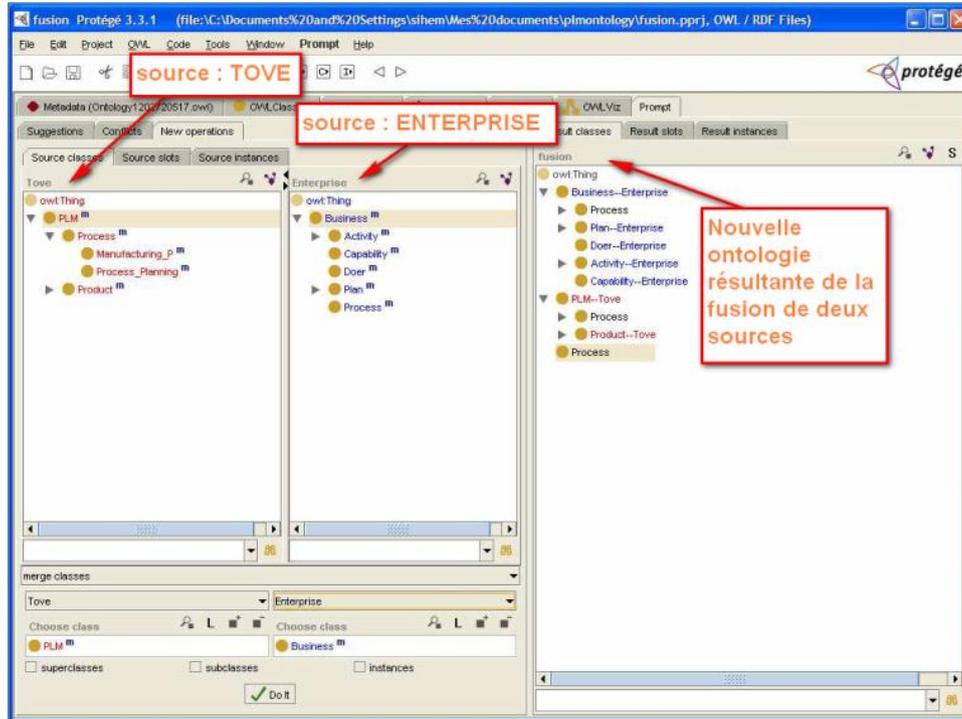


Figure 3-19 Processus de fusion : PROMPT dans Protégé2000 (Mostefai, 2001)

3.6 Modélisation

Le concept de PLM, qui consiste dans la focalisation des informations sur le produit, depuis sa définition jusqu'à sa production et au recyclage constitue le guide pour la définition des phases du cycle de vie et des activités métiers (Figure 3-20). En même temps nous avons adopté comme méthode de modélisation le principe de « *l'observation participante* » exposée au Chapitre 3.4. Comme la construction d'un modèle reste une démarche interdisciplinaire et systémique, nous avons dû parcourir les étapes montrées dans la Figure 3-5. Une autre technique qui nous a permis d'identifier les phases du cycle de vie a été l'investigation systémique qui s'est développée autour de trois axes : fonctionnel, structurel et historique (voir les critères d'investigation systémique du Chapitre 3.4.1). A partir de ces axes nous avons conçu par la suite le Plan qualité, véritable « boîte à outils » qui contient les méthodes et outils utilisés pendant presque tout le cycle de vie du système.

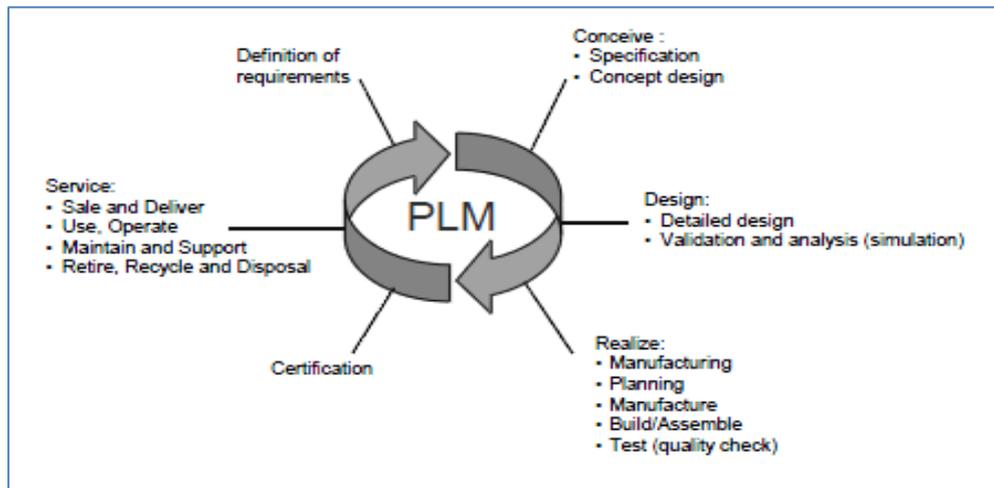


Figure 3-20 Product Lifecycle Management

Le processus de modélisation commence par deux étapes de réduction d'un système (Figure 3-21).

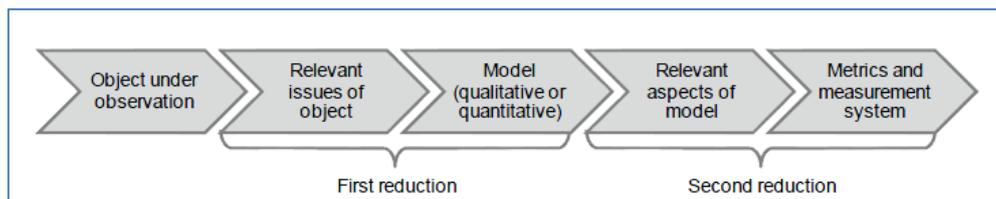


Figure 3-21 Les étapes de la modélisation d'un système (Geiger, 2000)

La procédure de métriques de conception implique généralement deux étapes de réduction d'un système (Geiger, 2000). Dans la première phase, le système du monde réel est réduit à ses questions pertinentes et il est modélisé quantitativement ou qualitativement. Dans la deuxième étape, les aspects pertinents de ce modèle sont réduits et quantifiés. La deuxième réduction fait essentiellement l'objet de notre recherche et ses paramètres sont utilisés pour analyser les modèles de processus existants.

3.6.1 Le modèle « phases-activités »

Nous avons opté pour un modèle « phase-activités », la décomposition de chaque phase s'effectuant selon un axe vertical (Figure 3-22). Au long de cet axe nous mesurons le degré de granularité de la décomposition de la phase en sous-phases, étapes et activités. Le dernier niveau (le quatrième niveau des activités) est localisé au niveau des métiers, qui se succèdent et interagissent pour mener à bien les actions désignées. Le déroulement des phases se fait selon un axe temporel, « le cycle de vie du produit ». Nous avons identifié les notions d'amplitude et d'interférence pour caractériser les activités de type collaboratif effectuées en parallèle. L'amplitude désigne l'étendue de l'activité (ou des activités) mesurée par

niveau et sur l'axe temporel des phases. L'interférence représente le degré de chevauchement des activités dans le cadre du travail de type collaboratif.

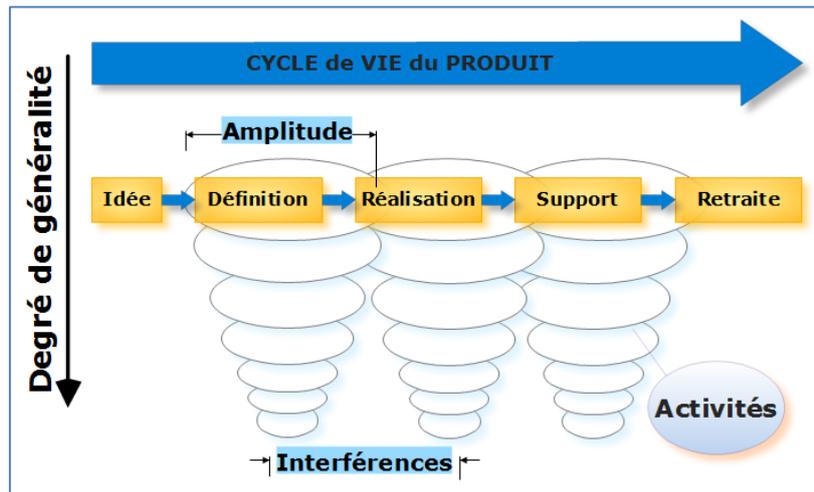


Figure 3-22 Le modèle phases-activités dans le cycle de vie

L'amplitude des « oscillations » de l'activité considérée peut toucher plusieurs phases, surtout aux niveaux supérieurs du cycle de vie. Au fur et à la mesure de l'augmentation du degré de granularité, les amplitudes diminuent et se concentrent sur l'activité métier. Nous adoptons l'hypothèse qu'au quatrième niveau de décomposition nous n'avons plus d'interférences. Si la gestion de ces interférences ne se fait pas correctement, l'effet est nuisible sur l'avancement du projet. En fait, les amplitudes ont aussi un caractère circulaire, ce qui nous renseigne sur le nombre d'itérations : aux niveaux supérieurs les itérations ont une amplitude plus importante qu'aux niveaux inférieurs et par conséquent, leurs coûts augmentent. Le nouveau modèle devrait répondre aussi aux critères d'opérativité et d'enseignabilité (conformément au Chapitre 3.4.3).

3.6.2 Modélisation des entités génériques de conception

Nous partons du constat que la construction de modèles distingue la science de toute autre démarche intellectuelle. Nous sommes aussi tentés de croire que la modélisation d'un problème correspond toujours à sa simplification.

3.6.2.1 Le concept d'activité élémentaire

Du modèle d'Asimow (Figure 3-23) nous avons retenu les entrées/sorties et l'évaluation qui a comme but de valider l'activité et de donner le feu vert pour passer à l'activité suivante. Dans notre propre modélisation de l'activité élémentaire nous avons prévu un arrêt de l'activité dans le cas d'une réponse négative au test d'évaluation, en plus de la boucle de rétroaction (*feedback*).

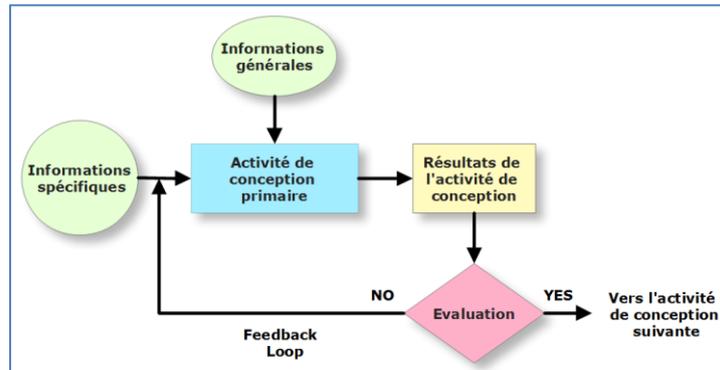


Figure 3-23 Basic module design process (Asimow, 1962)

3.6.2.2 Chaînes de processus étendu piloté par les évènements

EPC (*Extended event-driven process chains*) est une notation semi-formelle graphique pour modéliser des « workflows » et des processus de modèle à plusieurs niveaux de détail. À sa base, le comportement d'un processus est représenté sur divers foyers économiques, par exemple les coûts de processus ou de délais. eEPC étend la structure de base du lieu / de transition filets (comme les réseaux de Petri) pour illustrer les processus d'affaires (Scheer, 1999). Grâce à la représentation bien structurée d'un processus, eEPC est l'un des standards de modélisation les plus courants dans l'industrie allemande. EPC soutient six domaines de base avec un large éventail de types de relations prédéfinies. Il est possible d'étendre les définitions de base pour répondre aux besoins de modélisation réels. La notation de base comprend AND, OR et XOR, qui bifurquent à partir du flux principal dans le modèle.

La figure suivante (Figure 3-24) montre les domaines de base et les types de relations qui sont employées dans des modèles eEPC. Le contrôle intègre tous les éléments réels et les relations du processus dans un flux de contrôle. Le Tableau 3-10 développe en détail les éléments du modèle eEPC selon le schéma : *Function – Event – Input/Output – Milestone – Resource*.

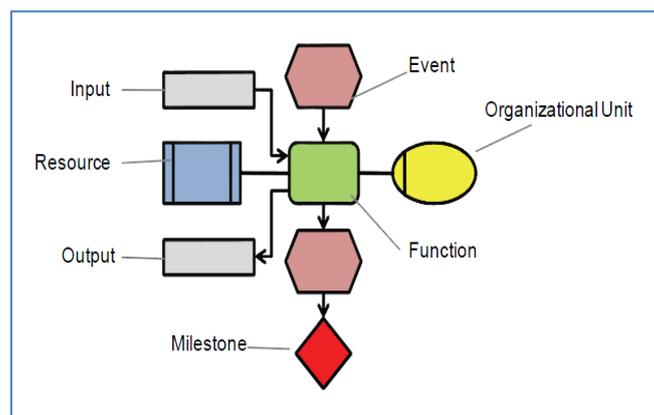


Figure 3-24 Le modèle eEPC

Tableau 3-10 Le tableau du modèle eEPC

	Function	Event	Input/Output	Org. Unit	Milestone	Ressource
Function		Generates	Creates Uses Produces Delivers output for	Belongs to	Is finished at Starts at	
Event	Starts					
Input/Output	Supports Is input for		Is created out of Is generalization of Is in conflict with	Belongs to	Is created at Is needed at	
Org. Unit	Has to inform about result of Has to be informed about Acts as consultant for Is disciplinary responsible for Performs Is responsible for data processing for Takes decision about Is involved in Is produced by		Uses Is authorized to read Is responsible for updates of Creates Deletes Updates Reads	Is disciplinary head of Is formed by Is functional head of Relevant/responsible for Takes role as Belongs to		
Milestone						
Ressource	Supports		Creates Processes	Is finished at Starts at Is active during		Is predecessor of Contains

Une autre représentation du modèle eEPC est donnée dans la Figure 3-25.

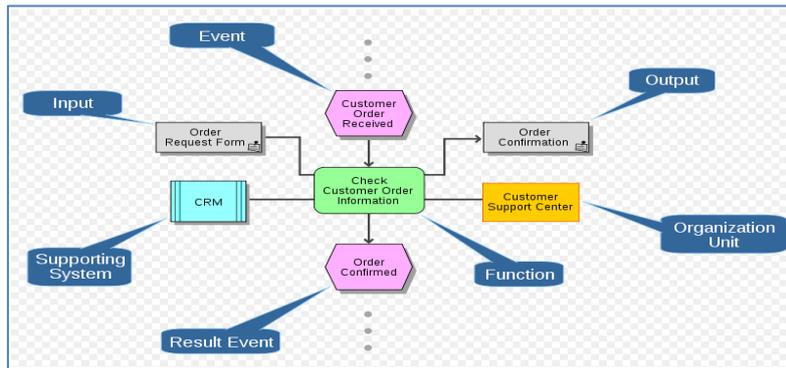


Figure 3-25 Elements of an Event-driven Process Chain

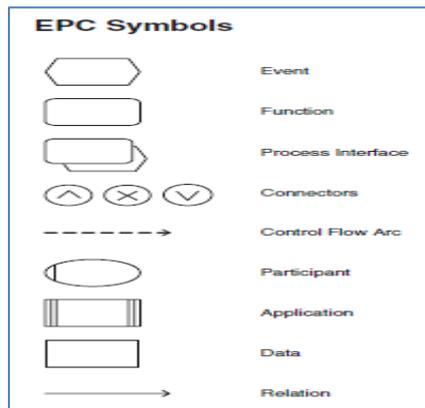


Figure 3-26 Les symboles EPC

Par exemple, nous pouvons construire un diagramme EPC plus complexe en utilisant les symboles de la Figure 3-26 et les opérateurs AND, OR et XOR à l'aide desquels on peut construire les ramifications des divers flux d'activités (Figure 3-27).

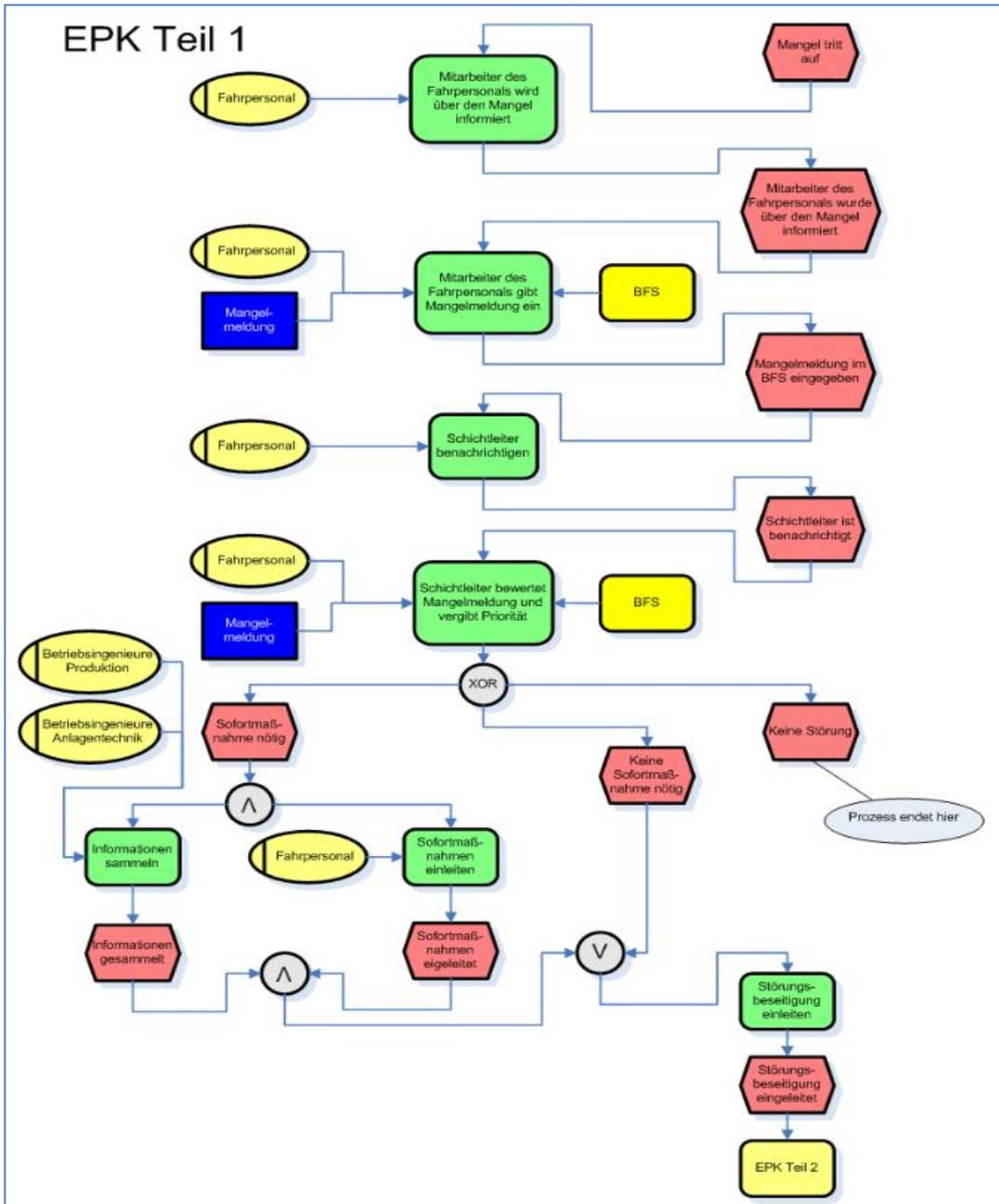


Figure 3-27 Exemple d'un diagramme EPC

3.6.2.3 Chaînes de processus orienté objets pilotés par les évènements

Les chaînes de processus pilotés par les évènements (*Object-oriented Event-driven Process Chains - oEPC*) ne portent pas sur la fonction, comme une activité centrale, mais sur des objets plus discrets, des entités distinctes évoluant dans le processus (Scheer et al, 1997). Ils intègrent le concept de l'orientation objet dans la modélisation des processus communs, pour permettre la représentation de la transition d'un objet métier. Comme un objet dans un logiciel, un objet métier peut être modélisé avec ses différents attributs et méthodes qui sont utilisées pour traiter l'objet. En tant que tel, l'objet dans oEPC (Figure 3-28) regroupe la fonction et l'écran des données de l'eEPC dans une seule modélisation. Le contrôle de flux, c'est à dire le réseau de relations, est créé par les messages de l'échange des objets alors qu'ils progressent d'un événement à l'autre. Cela signifie que les messages en oEPC prennent la place des événements dans EEPC. Le contrôle de flux peut être divisé ou réuni en utilisant ET, OU, et XOR. La structure bipartite formelle des messages (Tableau 3-11) et des objets peut être décomposée en mettant directement en relation les objets, mais dans un modèle de processus formel, ce qui n'est pas l'intention de base du système de modélisation (Scheer et al, 1997).

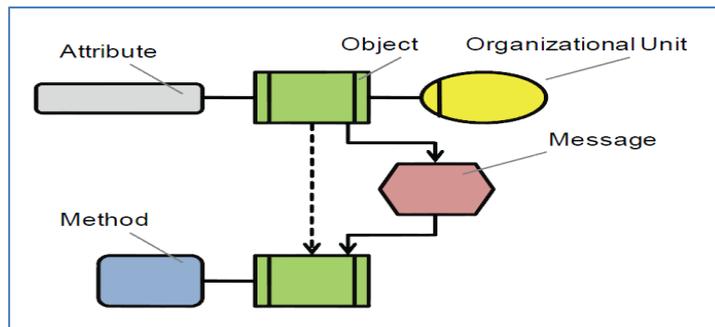


Figure 3-28 Le modèle oEPC

Tableau 3-11 Le tableau du modèle oEPC

	Object	Message	Method	Attribute (object)	Attribute (ressources)
Object	(has relation)	Sends			
Message	Starts				
Method	Is attribute to				
Attribute (object)	Is attribute to				
Attribute (ressources)	Is attribute to				

3.6.2.4 Modèle proposé d'activité élémentaire

Ayant comme point de départ les modèles précédents, nous avons créé, suite à l'expérience acquise dans divers projets de recherche appliquée et industriels, notre propre modèle de description de l'activité. Il est composé de deux parties :

- a. La partie orientée vers la finalité de l'action, avec l'énoncé du but et de

la tâche à accomplir,

- b. La partie orientée sur le contenu de l'action, c'est-à-dire les travaux à réaliser, ainsi que sur l'inclusion des aspects organisationnels comme les services impliqués dans l'activité et le décideur.

Tableau 3-12 Le tableau du modèle de l'activité élémentaire MSIC

	Phase	Tâche	Objectif	Résultat attendu	Méthode	Activités à réaliser	Attribution (Phase)	Attribution (Ressources)	Décideur
Phase									
Tâche									
Objectif									
Résultat attendu									
Méthode									
Activités à réaliser									
Attribution (Phase)									
Attribution (Ressources)									
Décideur									

Nous avons adapté le tableau du modèle oEPC selon nos besoins et nous avons obtenu notre propre modèle de description du processus de l'activité élémentaire (Tableau 3-12).

<p>PHASE : DEFINITION DU PRODUIT</p> <p>N° PHASE : MSIC 33</p> <p>TACHE : Méthodes d'industrialisation</p> <p>RESULTAT ATTENDU : Revue contrôle des coûts no1.</p> <p>METHODE :</p> <p>ACTIVITES à réaliser : Faire un dossier d'avant projet, afin de le présenter à la revue des contrôle des coûts RMSIC 33.</p> <p>ATTRIBUTIONS : DIRECTION, VENTE, BT, BM, PRODUCTION</p> <p>DECIDEURS : DIRECTION</p>

Figure 3-29 Modèle de description d'une activité élémentaire

Dans la Figure 3-29 nous montrons l'application du modèle de description d'une activité élémentaire sur une activité de niveau de décomposition 2 dans la phase MSIC1, en amont du cycle de vie.

3.7 Le Plan qualité

L'utilisation de la Maison de la Qualité (Akao, 1993) est depuis longtemps connue. Pour remplir les champs des « *What* » de la matrice, il manque un outil permettant de faire la synthèse des informations venant du client et de l'intérieur de l'entreprise. Nous avons trouvé - à travers le Plan Qualité - l'outil qui puisse englober les informations nécessaires qui alimentent le QFD (Figure 3-30). Le Plan qualité commence par définir les besoins du client pour les convertir, ensuite, en fonctions du système à produire. Cette opération est réalisée grâce à l'analyse fonctionnelle. Les fonctions sont analysées et on établit les descriptions techniques, les performances attendues, la quantification (combien) ou niveau du critère, leur flexibilité et l'indicateur de négociabilité de la flexibilité (Oriță et Drăghici, (2010). Il est important de préciser la classe de flexibilité dans le cas d'un appel d'offre et la hiérarchisation des fonctions. Celle-ci attribue un coefficient d'importance relative sur une échelle de hiérarchisation des fonctions de 1 à 5.

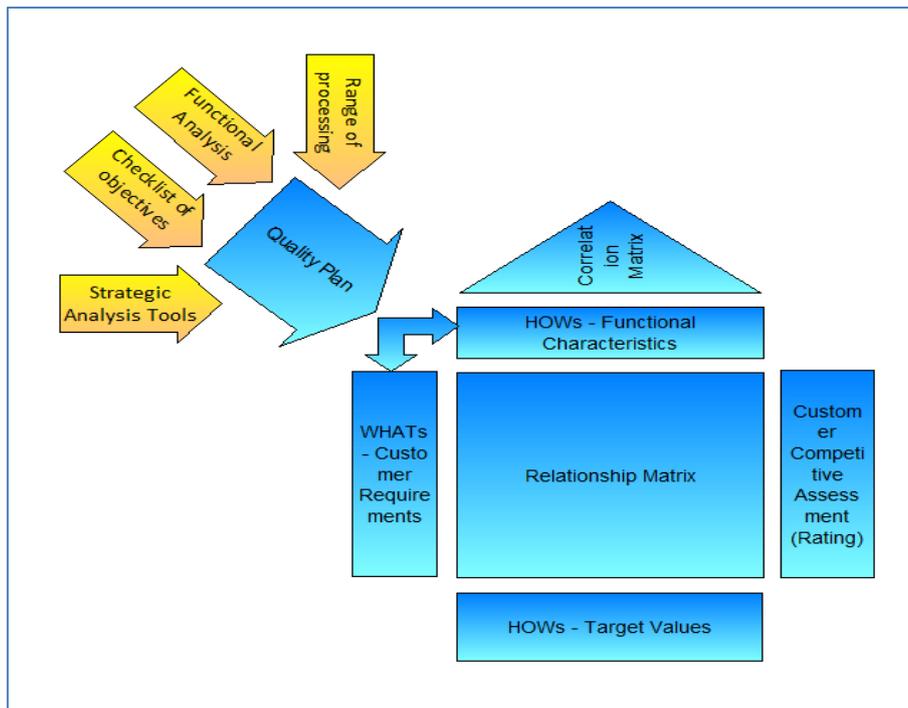


Figure 3-30 La relation entre le Plan qualité et le QFD (Oriță et al, 2011)

Le Plan qualité accompagne le cycle de vie du système, surtout dans les premières deux phases, et constitue une synthèse de son cahier des charges, consultable, comme référence, surtout dans la phase de développement et industrialisation.

Dans le Plan qualité, nous avons voulu intégrer les trois aspects mentionnés par (Donnadieu, 2008) : *fonctionnel*, *structural* et *historique* de l'objet étudié. Ceci offre l'avantage d'offrir une perspective multi-vues sur le système et permet de fixer

les priorités de développement sans, toutefois, compliquer la démarche méthodologique. Dans ce qui suit nous prenons, pour le terme qualité, le sens large du terme : le degré d'adéquation entre un produit et les exigences du client et du marché. Du point de vue formel l'outil se présente sous la forme d'un classeur Excel avec plusieurs onglets :

- Procédure : c'est l'explication, sous forme graphique, des pas à accomplir pour appliquer le QFD (ou la Maison de la Qualité) ;
- Objectifs des produits primaire-secondaire : l'obtention, le tri et la pondération de la première liste des objectifs ; le groupement des objectifs peut obéir à une interprétation ontologique du produit ;
- Qualité demandée (QUOI) : ce peut être un ou plusieurs onglets qui traitent l'évolution du traitement des objectifs (tri, classement, pondération, analyse et synthèse) ;
- Caractéristique de la Qualité (COMMENT) : dans cet onglet on systématise l'analyse fonctionnelle qui est effectuée avec les outils connus comme : FAST, SADT, etc. ;
- Matrice Qualité QUOI-COMMENT : c'est l'onglet où on réalise la corrélation des QUOI et COMMENT dans une synthèse réalisée dans le cadre d'une matrice QFD ; ici nous obtenons notamment : le poids relatifs des «COMMENT» et les priorités des efforts de conception ;
- Matrice VALIDATION : dans cette matrice on peut suivre la validation des fonctions (COMMENT) en fonction des activités de conception.

A la liste présentée ci-dessus, dans une version plus complète du Plan qualité, nous rajoutons, si c'est nécessaire, encore deux onglets avec AMDEC (FMEA) et TRIZ.

3.7.1 Intégration des outils avec MSIC-PLM

Dans la Figure 3-31 nous présentons le positionnement des méthodes et outils déployés dans le cycle de vie MSIC-PLM.

Nous avons utilisé comme formalisme le *Mind Mapping* (ou outil de cartographie heuristique, de carte mentale, de carte conceptuelle, de carte sémantique, de carte d'idées, etc.), outil très en vogue mais aussi efficace pour représenter les relations existantes entre les composantes d'un système. Nous avons représenté les trois zones :

- Zone des caractéristiques de la qualité intégrées dans le Plan Qualité : QFD, AF, AMDEC ;
- Zone des caractéristique du projet : planification de l'action, organisation des ressources, pilotage du projet/programme ;
- Zone des outils de synthèse et d'innovation : Organigramme technique du produit, TRIZ, Gamme de transformation, Conception à coûts objectifs, Plans d'expériences, etc.

Sur la Figure 3-31 on peut voir les relations entre ces zones et outils sans, toutefois, pouvoir déterminer leur utilisation temporelle par rapport au cycle de vie. Ceci ne constitue pas un inconvénient en soi grâce aux nombreuses itérations et boucles de rétroaction. Cet aspect sera pris en compte lors de la construction du modèle du cycle de vie, dans la description des activités élémentaires.

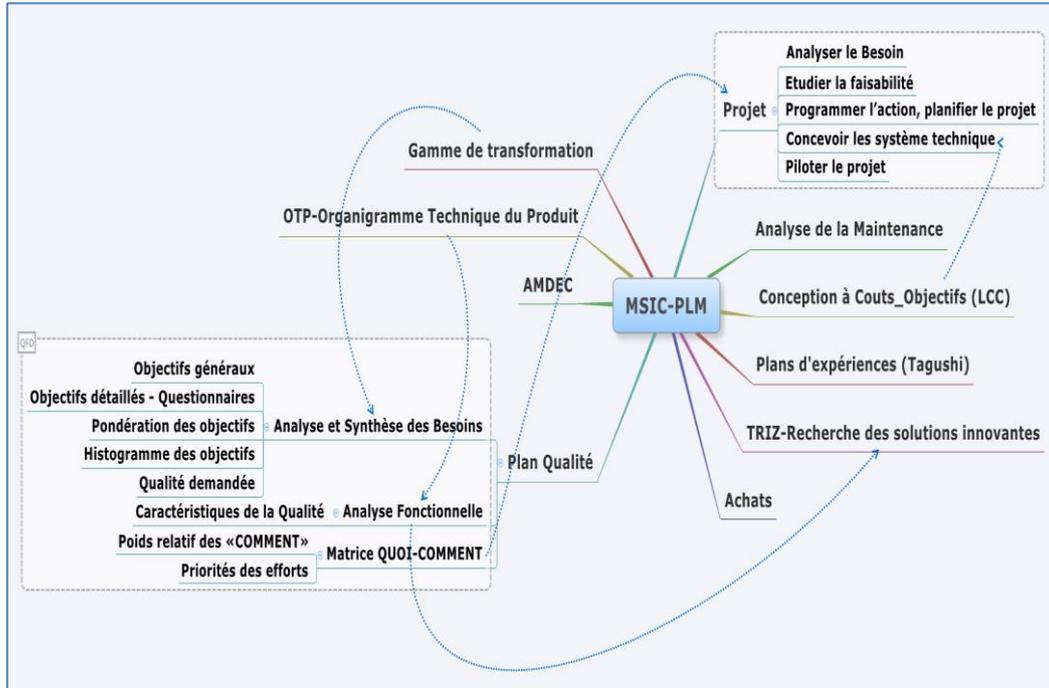


Figure 3-31 Intégration des « outils » dans MSIC-PLM

3.7.2 Analyse et synthèse des besoins

Le tableau complet des activités de marketing inclus trois étapes :

- L'analyse du marché,
- Stratégie et concept,
- Programme/Plan d'action.

Par la suite, nous montrerons les deux étapes de la définition des besoins avec l'aide de la Maison de la Qualité (QFD).

Étape I. L'analyse du marché potentiel et la définition des besoins (Étape I) sont réalisés comme le montre la Figure 3-33.

Au terme de cette première étape, l'outil permet de réaliser une étude de marché. Il est essentiel de comprendre la demande du marché, de définir les besoins ainsi que leur importance.

L'étape I nous permet de fixer les points importants à développer et les attentes du client en relation avec le cycle de vie du système. Au terme de l'étape I, il est déjà possible de définir si le produit est réalisable ou non. Nous avons suffisamment d'informations pour choisir de continuer ou d'arrêter le projet à ce stade.

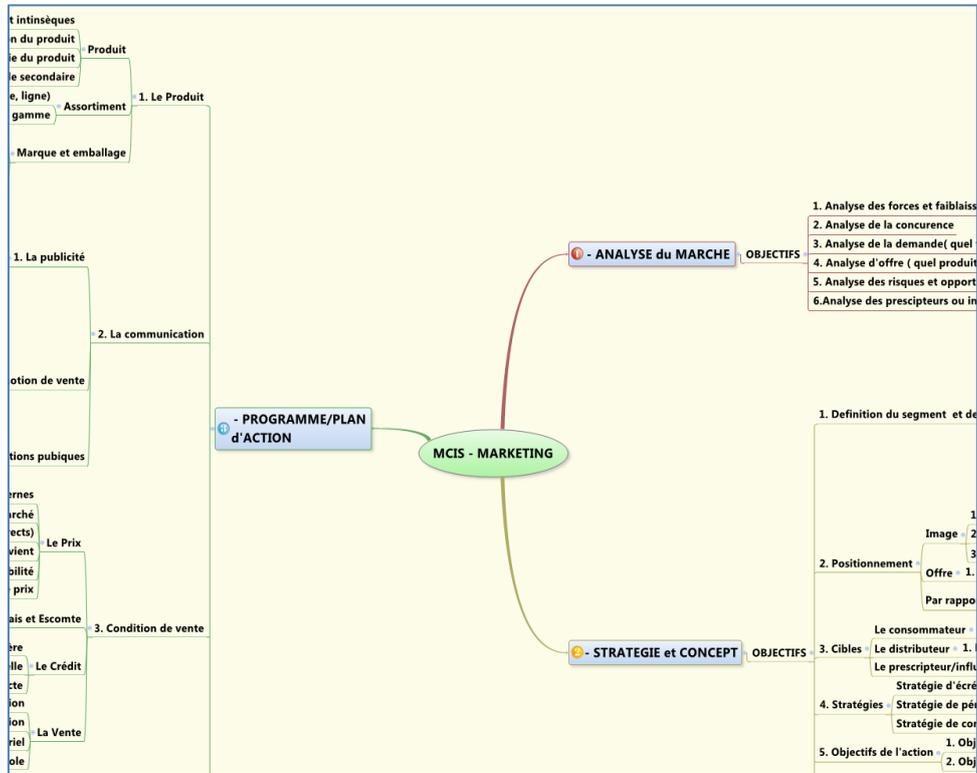


Figure 3-32 Le processus « Marketing » - vue partielle

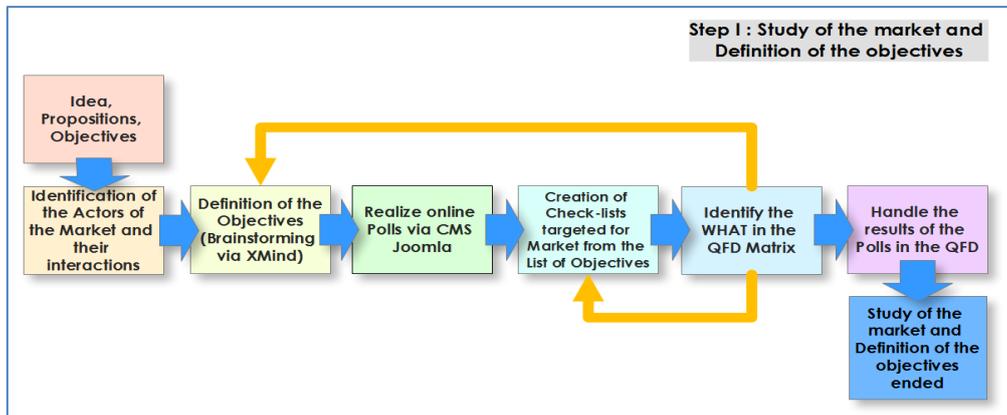


Figure 3-33 I-ère étape : Etude du marché et définition des besoins (Oriță et al, 2011)

Etape II. Dans l'Etape II on commence la phase de «Définition du système - Analyse des besoins et exigences". Le livrable de cette phase est représenté par les spécifications des besoins du système à livrer au client. Il contient des exigences fonctionnelles au niveau du système et établit l'analyse de faisabilité, les exigences opérationnelles, de maintenance, de démantèlement, etc. (Figure 3-34)

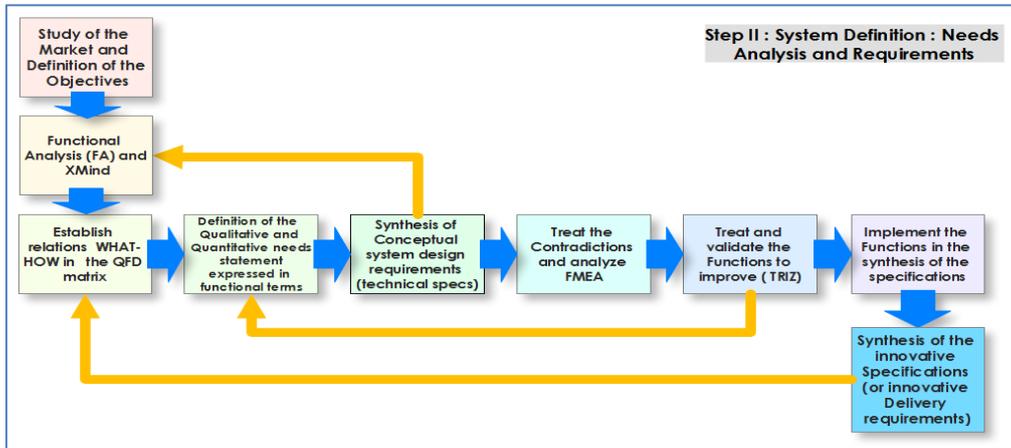


Figure 3-34 Etape II : Analyse des besoins et spécifications (Oriță et al, 2011)

Cette dernière partie de l'outil permet de définir le système par le biais de ses objectifs et à travers ces fonctions. Une pièce supplémentaire a été ajoutée à la méthode QFD classique. Il devient possible de développer le produit par ces fonctions, l'intégration de l'innovation et l'optimisation. Dans la Figure 3-34, nous pouvons voir que le QFD est impliqué dans plusieurs étapes de développement du cahier des charges. C'est le cœur de l'outil. Le QFD représente le produit grâce à ses fonctions et à travers ses objectifs. De ceux-là, le concepteur peut extraire la liste des exigences fonctionnelles (spécifications) - épine dorsale d'un système de spécifications techniques - du futur produit.

3.7.3 Premier tri des besoins

3.7.3.1 La liste des besoins génériques

En utilisant le formalisme de *Mind Mapping* du logiciel libre Xmind, nous avons identifié, d'une manière non-exhaustive, plusieurs classes (ontologies) de besoins (Figure 3-35) : coûts, qualité, productivité, compétences techniques, ergonomie, etc.

A partir de cette check-list, les attentes des clients sont identifiées et pondérées. Bien-entendu, la liste générique n'est pas exhaustive, d'autres classes peuvent y être ajoutées. Il en résulte une première ébauche des besoins (objectifs) du futur système. Dans cette phase le concepteur prend connaissance des besoins du/client(s), qu'il va essayer de pondérer pour établir un premier tri en fonction de l'importance accordée par le client aux objectifs du futur produit. Cette approche a l'avantage d'éliminer les non-dits ou les ambiguïtés relatives au sens de chaque objectif du client et aide à l'établissement d'un langage commun client-fournisseur.



Figure 3-35 Exemple de classification des besoins (objectifs)

Riche d'une expérience industrielle à travers de nombreux projets et ne constatant rien de similaire dans la littérature, nous avons introduit les notions de produit primaire et secondaire (voir le Tableau 3-13). La raison est que dans cette phase, très en amont, de constitution du cahier des charges, il subsiste encore une confusion entre les objectifs/besoins, par exemple, de la conception de la machine et ceux du produit fabriqué par cette même machine. Dans le cas d'une machine d'emballage de portions de fromage il faut faire, assez rapidement, la différence entre les caractéristiques de la machine (produit secondaire) et du produit qui sort sur la ligne d'emballage (produit primaire) pour éliminer la confusion lors du traitement des informations liées au produit secondaire (la machine à concevoir).

Le but de la pondération est de mettre, toute de suite en évidence le degré d'importance des attentes principales du client, ce qui a l'avantage de se fixer dès le début de la conception sur les principaux objectifs du développement. Dans la colonne « Polarisation stratégique entreprise » seront pondérés les besoins qui correspondent à la stratégie de l'entreprise. De cette manière nous comparerons ensemble les deux points de vue : ceux du client et ceux de l'entreprise.

L'organisation des besoins dans le Tableau 3-13 représente une prévisualisation des classes ontologiques. Celles-ci seront triées et mieux organisées, en trois niveaux, dans l'onglet « Qualité demandée ». Dans la Figure 3-36 nous montrons le positionnement des produits primaires/secondaires par rapport au client final, qui constitue le référentiel en termes de source des besoins. En même temps, l'utilisateur du produit secondaire représente le client pour le fabricant du système (machine).

Tableau 3-13 L'onglet « Objectifs produit primaire/secondaire du Plan qualité

Etablir clairement les objectifs de base en fonction de la demande client					
1 Définir les objectifs des clients concernant le produit primaire :					
2 Quel est le poids des objectifs?					
3 Définir les objectifs de l'entreprise concernant le produit secondaire :					
Produit SECONDAIRE Critères de jugement du produit, Besoins, Objectifs	<	Degré d'importance (poids, influence) de chaque critère (attente) dans la décision d'achat : 9, 3, 1		Objectif / Besoin clients	
		<	<	Produit PRIMAIRE 1	Produit PRIMAIRE 2
	Polarisation stratégique entreprise				
Adaptation au marché - options					
Approvisionnement					
Concepts de sécurité					
Convivialité					
Coûts					
Délais					
Développement durable					
Elimination des déchets					
Encombrement, poids					
Ergonomie-Confort					
Facilité d'utilisation					
Fiabilité, durée de vie					
Formation (Learning curve)					
Gestion de la configuration					
Interchangeabilité					
Interfaces					
Logistique-Supply Chain Management					
Maintenance					
Modularité					
Niveau technologique					
Normes, standardisation					
Organisation de l'entreprise (amélioration de l'~)					
Paramètres de fabrication					
Performances					
Problématique externe					
Problématique interne					
Productivité					
Propriétés d'assemblage, Montage et démontage					
Qualité					
Recyclage					
Risques					
SAV-Garanties					
Sécurité					
Stratégie de l'entreprise					
Tests, essais, homologation					

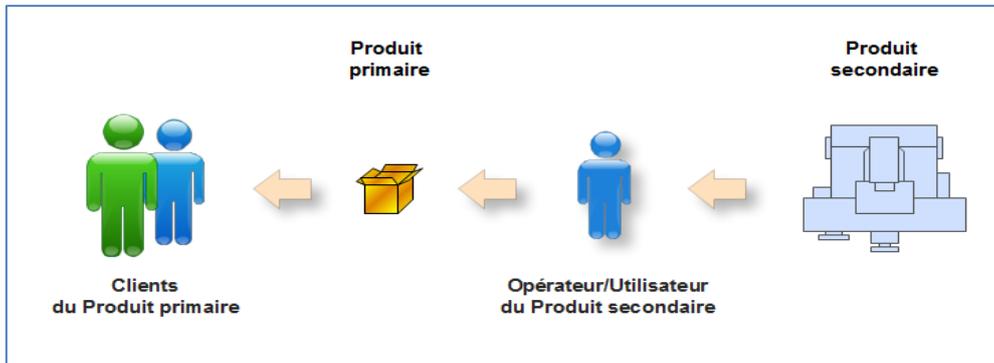


Figure 3-36 Positionnement des produits primaire/secondaire

3.7.3.2 Pondération des besoins

La pondération des besoins, commencée dans l'onglet « Objectifs produit primaire/secondaire », sera continuée dans l'onglet « Qualité demandée 1 » (Tableau 3-14). De plus, nous avons introduit les colonnes représentant une analyse concurrentielle sommaire en les rapportant aux mêmes catégories d'objectifs. Dans cette première recherche d'objectifs nous pondérons les classes ontologiques de

besoins qui sont montrés dans la première colonne, volontairement, non-triés.

Tableau 3-14 L'onglet « Qualité demandée 1 »

Critères de jugement du produit ou Exigences qualité ou Attentes des acteurs du produit ou Besoins ou Souhaits	Degré d'importance (poids, influence) de chaque critère (attente) dans la décision d'achat	Evaluation des produits	
		concurrents	
		<i>Produit_1</i>	<i>Produit_2</i>
	<i>influence</i>	<i>appréciation</i>	<i>appréciation</i>
	1=mineure;6=moyenne;9=très forte		
Adaptation au marché - options			
Agilité de fabrication			
Approvisionnement			
Concepts de sécurité			
Convivabilité			
Coûts			
Délais			
Encombrement, poids			
Ergonomie-Confort			
Fiabilité, durée de vie			
Formation (Learning curve)			
Gestion de la configuration			
Interchangeabilité			
Interfaces			
Logistique-Supply Chain Management			
Maintenance			
Modularité			
Montage et démontage			
Niveau technologique			
Normes			
Performances			
Problématique externe			
Problématique interne			
Productivité			
Qualité			
Qualités de l'environnement			
Risques			
SAV-Garanties			
Sécurité			

L'échelle de la pondération est la même qu'au premier onglet (Tableau 3-14) pour assurer la cohérence des pondérations.

3.7.4 Qualité demandée (QUOI)

Selon (Akao, 1993), pour pouvoir planifier la qualité nous devons savoir avec précision quelles qualités le client exige d'un produit. Ces qualités peuvent ensuite être portées dans un diagramme de déploiement de la qualité demandée (Tableau 3-15), lequel peut nous renseigner sur la qualité cible à planifier. La qualité demandée est donnée en valeurs relatives (%) et sous formes d'histogrammes. De cette manière, le concepteur peut voir d'un seul coup d'œil quelles sont les qualités représentatives du futur produit à concevoir.

Tableau 3-15 L'onglet « Qualité demandée » - histogrammes des objectifs

Qualité demandée (QUOI)			Plan qualité										Mettre la force de la relation ou le degré de corrélation entre la qualité demandée et la polarisation stratégique (caractéristiques de la qualité)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Niveau I	Niveau II	Niveau III	analyse conceptuelle			spécification			évaluation																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
			Produit	Processus	Service	Produit	Processus	Service	Indicateur	Impact	Importance	Indicateur																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	aa	ab	ac	ad	ae	af	ag	ah	ai	aj	ak	al	am	an	ao	ap	aq	ar	as	at	au	av	aw	ax	ay	az	ba	bb	bc	bd	be	bf	bg	bh	bi	bj	bk	bl	bm	bn	bo	bp	bq	br	bs	bt	bu	bv	bw	bx	by	bz	ca	cb	cc	cd	ce	cf	cg	ch	ci	cj	ck	cl	cm	cn	co	cp	cq	cr	cs	ct	cu	cv	cw	cx	cy	cz	da	db	dc	dd	de	df	dg	dh	di	dj	dk	dl	dm	dn	do	dp	dq	dr	ds	dt	du	dv	dw	dx	dy	dz	ea	eb	ec	ed	ee	ef	eg	eh	ei	ej	ek	el	em	en	eo	ep	eq	er	es	et	eu	ev	ew	ex	ey	ez	fa	fb	fc	fd	fe	ff	fg	fh	fi	fj	fk	fl	fm	fn	fo	fp	fq	fr	fs	ft	fu	fv	fw	fx	fy	fz	ga	gb	gc	gd	ge	gf	gg	gh	gi	gj	gk	gl	gm	gn	go	gp	gq	gr	gs	gt	gu	gv	gw	gx	gy	gz	ha	hb	hc	hd	he	hf	hg	hh	hi	hj	hk	hl	hm	hn	ho	hp	hq	hr	hs	ht	hu	hv	hw	hx	hy	hz	ia	ib	ic	id	ie	if	ig	ih	ii	ij	ik	il	im	in	io	ip	iq	ir	is	it	iu	iv	iw	ix	iy	iz	ja	jb	jc	jd	je	jf	jj	jk	jl	jm	jn	jo	jp	jq	jr	js	jt	ju	kv	kw	kx	ky	kz	la	lb	lc	ld	le	lf	lg	lh	li	lj	lk	ll	lm	ln	lo	lp	lq	lr	ls	lt	lu	lv	lw	lx	ly	lz	ma	mb	mc	md	me	mf	mg	mh	mi	mj	mk	ml	mn	mo	mp	mq	mr	ms	mt	mu	mv	mw	mx	my	mz	na	nb	nc	nd	ne	nf	ng	nh	ni	nj	nk	nl	nm	no	np	nq	nr	ns	nt	nu	nv	nw	nx	ny	nz	oa	ob	oc	od	oe	of	og	oh	oi	oj	ok	ol	om	on	oo	op	oq	or	os	ot	ou	ov	ow	ox	oy	oz	pa	pb	pc	pd	pe	pf	pg	ph	pi	pj	pk	pl	pm	pn	po	pp	pq	pr	ps	pt	pu	pv	pw	px	py	pz	qa	qb	qc	qd	qe	qf	qg	qh	qi	qj	qk	ql	qm	qn	qo	qp	qq	qr	qs	qt	qu	qv	qw	qx	qy	qz	ra	rb	rc	rd	re	rf	rg	rh	ri	rj	rk	rl	rm	rn	ro	rp	rq	rr	rs	rt	ru	rv	rw	rx	ry	rz	sa	sb	sc	sd	se	sf	sg	sh	si	sj	sk	sl	sm	sn	so	sp	sq	sr	ss	st	su	sv	sw	sx	sy	sz	ta	tb	tc	td	te	tf	tg	th	ti	tj	tk	tl	tm	tn	to	tp	tq	tr	ts	tt	tu	tv	tw	tx	ty	tz	ua	ub	uc	ud	ue	uf	ug	uh	ui	uj	uk	ul	um	un	uo	up	uq	ur	us	ut	uu	uv	uw	ux	uy	uz	va	vb	vc	vd	ve	vf	vg	vh	vi	vj	vk	vl	vm	vn	vo	vp	vq	vr	vs	vt	vu	vv	vw	vx	vy	vz	wa	wb	wc	wd	we	wf	wg	wh	wi	wj	wk	wl	wm	wn	wo	wp	wq	wr	ws	wt	wu	wv	ww	wx	wy	wz	xa	xb	xc	xd	xe	xf	yg	yh	yi	yj	yk	yl	ym	yn	yo	yp	yq	yr	ys	yt	yu	yv	yw	yx	yy	yz	za	zb	zc	zd	ze	zf	zg	zh	zi	zj	zk	zl	zm	zn	zo	zp	zq	zr	zs	zt	zu	zv	zw	zx	zy	zz

La qualité demandée sera traitée et décomposée, au maximum, jusqu'au troisième niveau de détail.

Tableau 3-16 La qualité demandée, décomposition des besoins à 3 niveaux (détail)

Qualité demandée (QUOI)		
Niveau I	Niveau II	Niveau III
COÛTS	Produit = machine de base(Prix de vente, c Prix des options Délai de livraison Prix d'un nouveaux format Prix des pces pour un changement de form Coût des pièces d'usure Frais d'exploitation	Opérateur Maintenance Mise en service Formation (faible besoin en formation)
	Frais d'installation sur site	
	Surface usine (m ² /unités produites)	

L'importance relative des diverses exigences de qualité exprimées par les consommateurs doit être déterminée. Les personnes interrogées doivent également évaluer les produits concurrents (les colonnes **c** et **d** du Tableau 3-17).

Tableau 3-17 La qualité demandée – vue de détail

Plan qualité									
degré d'importance donné par les exigences Client (moy pondérée)	analyse concurrentiel			planification				pondération	
	Produit actuel PA-00	autres entrep		qualité cible planifiée	taux d'amélioration	polarisations stratégiques: FO=fort; MO=moy; FA=faible	polarisations stratégiques produit: 9=FO 5=MO; 1=FA	pondération absolue	pondération qualité demandée
		Produit Conc_1 PC-1	Produit Conc_2 PC-2						
9	5	9	7	10	2.0	FO	9.0	162.0	5.34%
7	5	3	5	8	1.6	FO	9.0	100.8	3.32%
7	3	5	5	8	2.8	MO	5.0	101.9	3.36%
3	7	1	5	5	0.7	FO	9.0	21.4	0.71%
1	1	1	1	2	2.3	FO	9.0	28.0	0.92%
7	5	3	3	8	1.7	MO	5.0	61.1	2.02%
5	7	5	5	5	0.7	FO	9.0	32.1	1.06%
9	7	5	7	10	1.4	MO	5.0	64.3	2.12%
7	5	7	7	8	1.7	MO	5.0	61.1	2.02%
8	3	5	7	9	3.1	MO	5.0	129.6	4.27%
3	5	5	5	5	1.0	FA	1.0	3.3	0.11%

Mesure la force de la relation ou le degré de corrélation entre la qualité demandée et la polarisation stratégique (caractéristiques de la qualité)

La signification des colonnes est la suivante :

- Colonne **a** - degré d'importance donné par les exigences Client (moy pondérée) ;
- Colonne **b** - Produit actuel ;
- Colonnes **c** et **d** - Produits concurrents ; les évaluations portant sur les caractéristiques qualité des produits de l'entreprise (colonne **b**) doivent être comparées à celles des produit concurrents ;
- Colonne **e** - Qualité cible planifiée ;
- Colonne **f** - Taux d'amélioration ;
- Colonnes **g** et **h** - Polarisations stratégiques: **FO**=fort; **MO**=moy; **FA**=faible ; mesure la force de la relation ou le degré de corrélation entre la qualité demandée (QUOI) et la polarisation stratégique

(caractéristiques de la qualité) ; à ce stade, la situation de l'entreprise, y compris les facteurs externes, doit être sérieusement étudiée ;

- Colonne **i** – Pondération absolue
- Colonne **j** - Pondération qualité demandée (relative)

3.7.4.1 Gamme de transformation

La gamme de transformation est l'outil qui nous montre les transformations nécessaires à effectuer sur le produit primaire pour arriver au produit final acheté par le client. Dans l'exemple ci-dessous (Figure 3-37), nous pouvons suivre les transformations subies par le produit primaire à travers les postes de travail d'une ligne de conditionnement (produit secondaire selon la Figure 3-36). Sur la diagonale principale nous avons positionné le flux principal de matières sur lequel viennent s'ajouter les flux secondaires (mineurs). Les flux identifiés (matière, énergie, signaux) permettront, plus tard, dans l'analyse fonctionnelle, de construire les caractéristiques de la qualité.

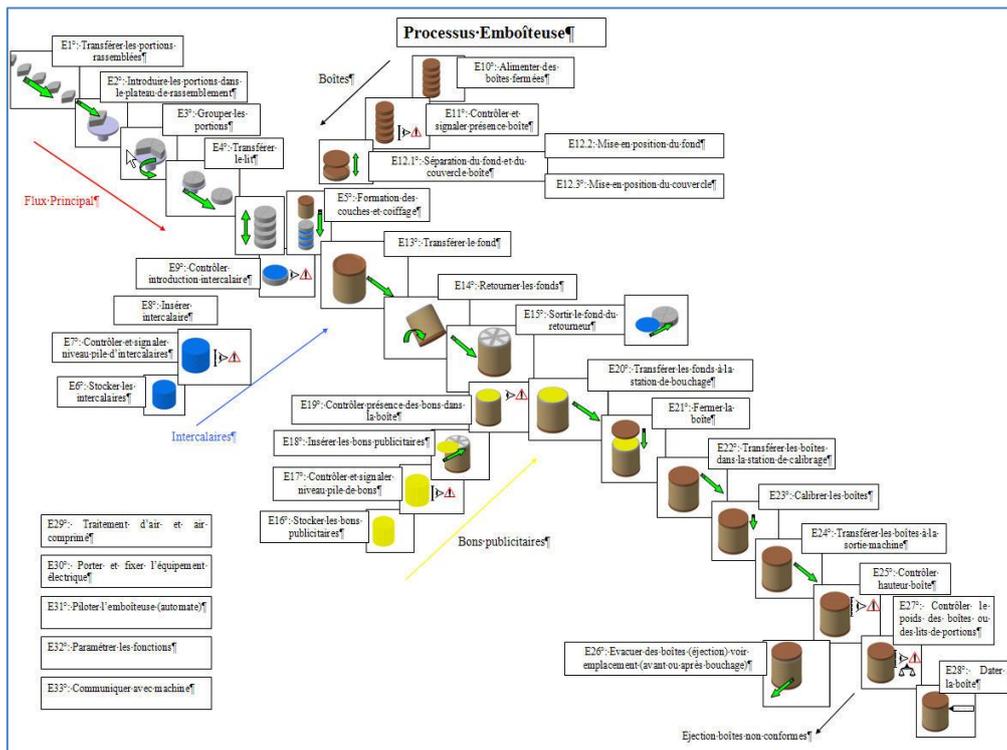


Figure 3-37 Gamme de transformation « en cascade »

La gamme de transformation est représentée, plus schématiquement, par le diagramme causes-effets (ou diagramme d'Ishikawa) (Figure 3-38). L'avantage de cette dernière représentation est qu'on peut facilement, à partir de la gamme de transformation, passer à une analyse de type AMDEC grâce au logiciel iGrafx 2011.

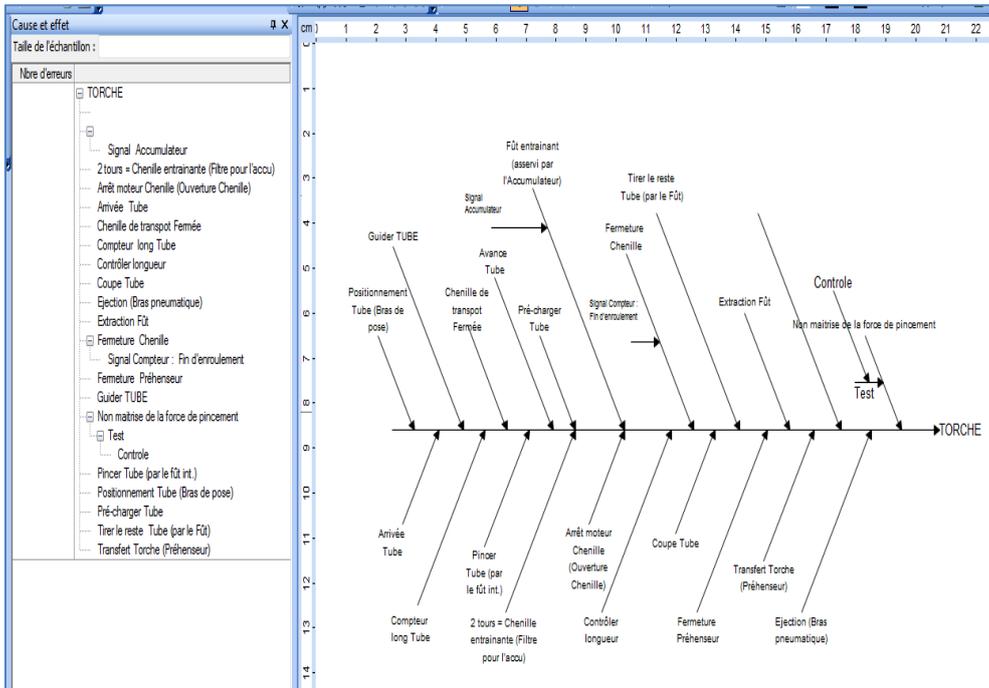


Figure 3-38 Gamme de transformation « diagramme causes-effets »

3.7.4.2 Structure du système

L'analyse du produit selon une technique WBS (*Work Breakdown Structure*) permet l'identification des modules fonctionnels de base (couleur bleu ciel) et optionnels (couleur orange) (Figure 3-39).

L'identification des modules fonctionnels déterminera la création des familles et gammes de produits. La conception modulaire sera facilitée par ce travail d'analyse.

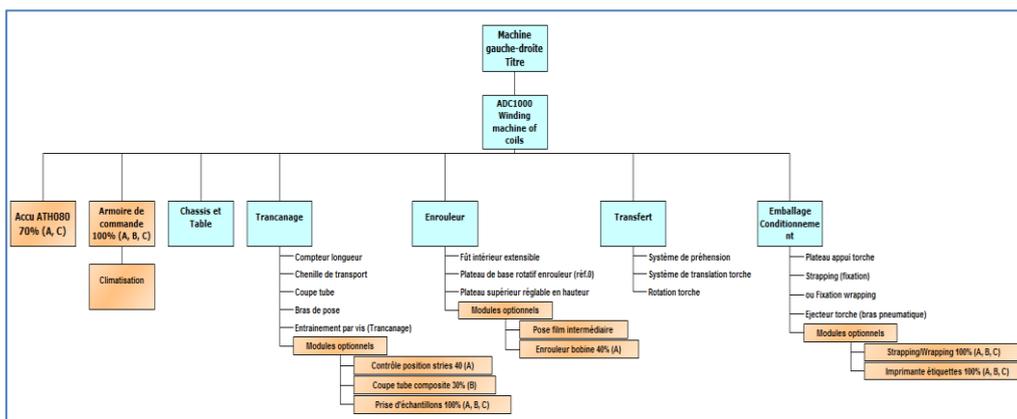


Figure 3-39 Exemple d'une structure (architecture) du produit secondaire

3.7.5 Caractéristiques de la qualité

Les caractéristiques de la qualité sont déterminées par l'Analyse Fonctionnelle (AF) et par l'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC). La description fonctionnelle a comme résultat les COMMENT qui seront utilisés dans la construction de la matrice qualité.

Nous accordons une importance particulière à la définition des buts. Un but est défini comme un objectif à atteindre par le système projeté (Plihon et al, 1998). Prat définit un but comme une structure composée d'un verbe suivi d'un ensemble de paramètres (Prat, 1999). Chaque paramètre joue un rôle différent par rapport au verbe. La Figure 3-40 montre la structure d'un but selon la proposition de Prat.

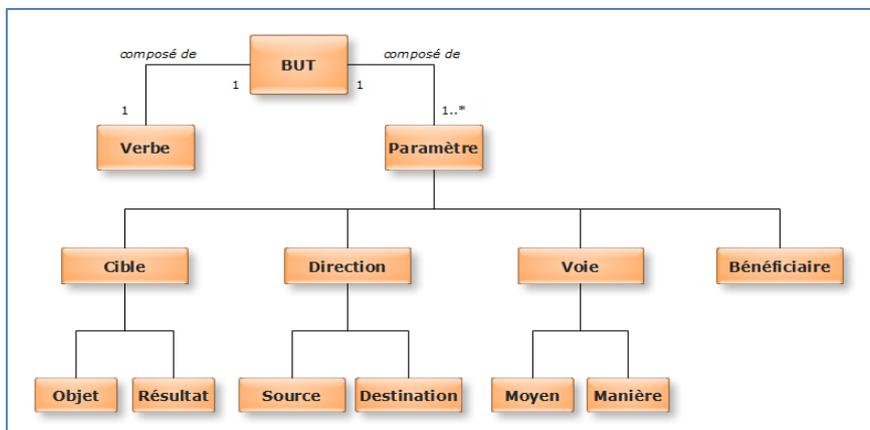


Figure 3-40 La structure du but (Prat, 1999)

De cette analyse découlent la verbalisation du besoin et l'identification des fonctions d'un système. Dans la formulation d'une fonction (ou d'un besoin) le paramètre est exprimé par un complément d'objet qui peut exprimer la cible, la direction, la voie ou le bénéficiaire.

3.7.5.1 Analyse fonctionnelle

Nous avons défini les étapes d'une AF rapide à déployer :

1. Verbalisation du besoin ;
 2. Identifier, exprimer, caractériser, valider et hiérarchiser les fonctions ;
- Une fonction est formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément.

- a. Principales **FP** ou de service **FS** – qui répondent au besoin ;
- b. de Contrainte **FC** – qui s'opposent à la réalisant du besoin ;
- c. Techniques **FT** – qui réalisent les fonctions de services ;

EM_i – élément de l'environnement

FP_i – fonction principale reliant 2 **EM_i** par l'intermédiaire du produit

FC_i – fonction de contrainte ou d'adaptation reliant un **EM_i** au produit

Chaque fonction peut être validée à partir des questions :

- Dans quel but la **F** existe-t-elle ? Parce que ...

- Qu'est-ce qui pourrait faire évoluer la **F** ?
- Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître la **F** ?

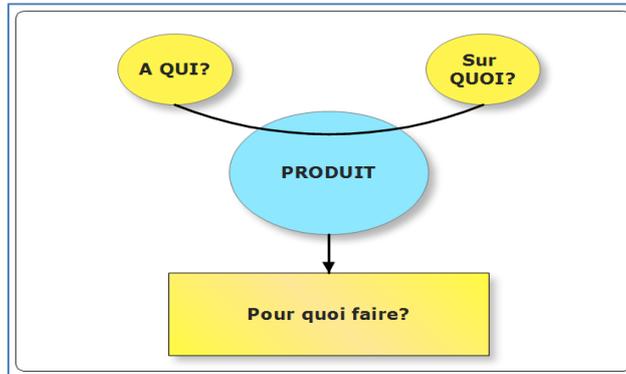


Figure 3-41 « Bête à cornes »

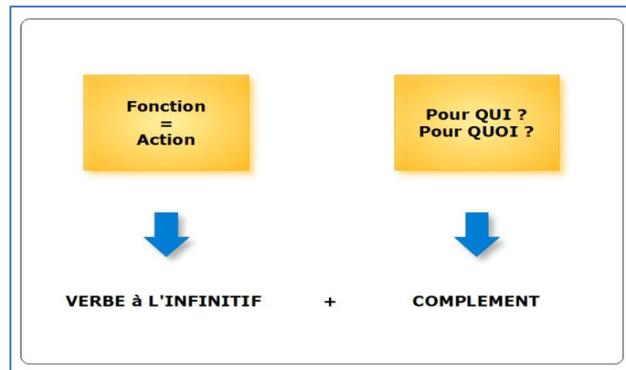


Figure 3-42 Verbe à l'infinitif et ses compléments.

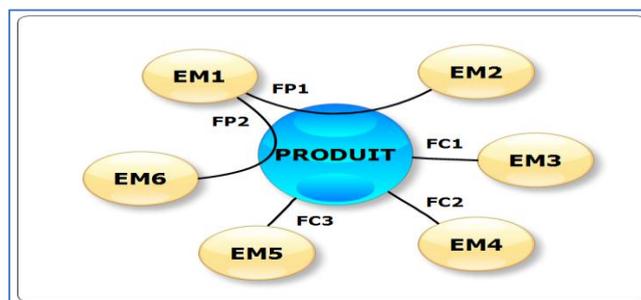


Figure 3-43 Diagramme « pieuvre »

3. Analyse FAST (Figure 3-44 et Figure 3-45)

Le diagramme FAST (*Function Analysis System Technic*) détaille en plusieurs niveaux la réalisation d'une ou plusieurs fonctions.

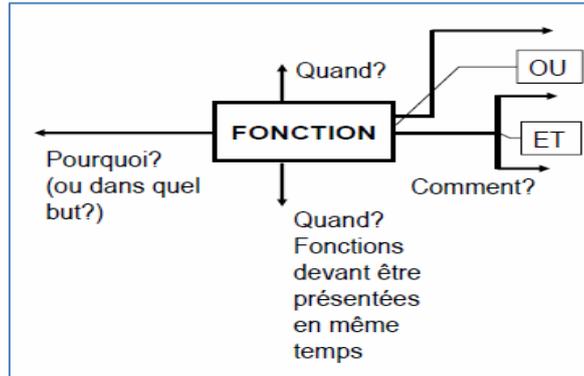


Figure 3-44 Analyse fonctionnelle FAST

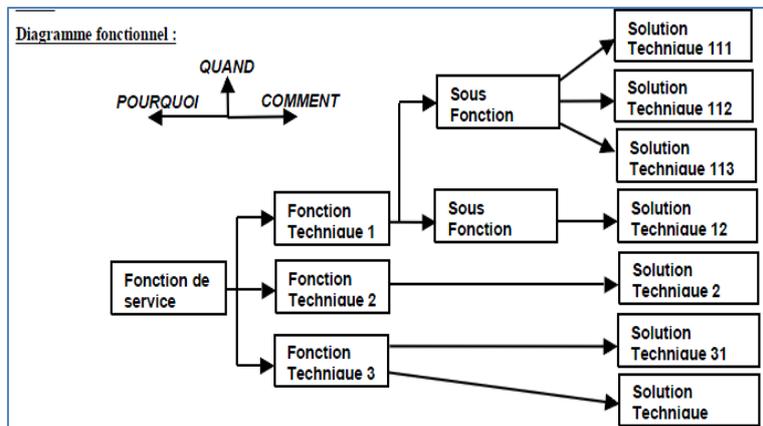


Figure 3-45 Diagramme Fonctionnel

4. Outil graphique SADT (Figure 3-46 et Figure 3-47)

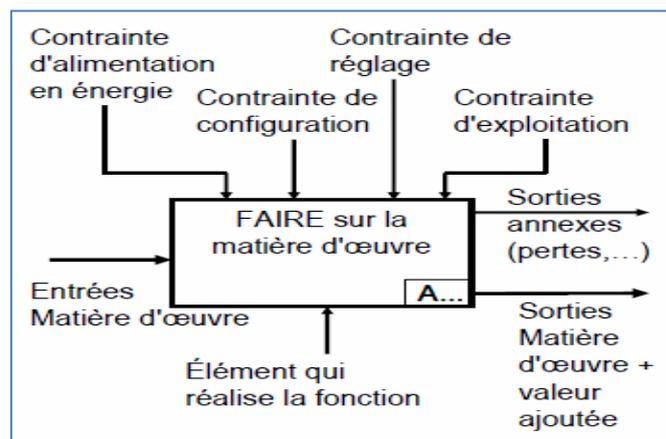


Figure 3-46 Principe de SADT

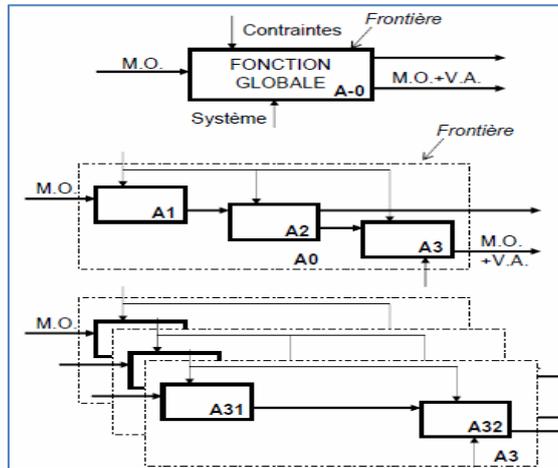


Figure 3-47 Niveau d'analyse descendante SADT

L'outil SADT (*Structured Analysis and Design Technic*) décrit le système en utilisant des boîtes (actigramme – contient l'expression d'une action à accomplir = verbe + CO) et des flèches représentant des flux entrant et sortant de ces boîtes. Un flux comporte un label précisant les données véhiculées par ce flux.

« **A** » - désigne le niveau hiérarchique d'analyse.

5. Bloc-diagramme, Fonctions Techniques (Figure 3-48)

Outil d'analyse structurale qui situe les Fonctions Techniques réalisées entre les composants d'un produit dans une phase donnée. Les éléments du milieu extérieur peuvent compléter le bloc-diagramme. A partir d'un bloc diagramme, il est possible de construire des liens entre **EM_i**, passant par les composants du produit et représentant les fonctions. Les **FT** composant un lien caractérisent la manière dont la fonction attendue associée est ainsi réalisée (Figure 3-48). Exemple : la **FS1** est réalisée à l'aide de **FT7, FT1, FT4** et **FT8** en utilisant les composants **C1, C4** et **C5**.

6. Synthèse de l'AF

L'analyse fonctionnelle permet de quantifier l'écart de non-conformité et renseigne sur la faisabilité du produit, ce qui permet de revoir le cahier des charges et la conception (Figure 3-49).

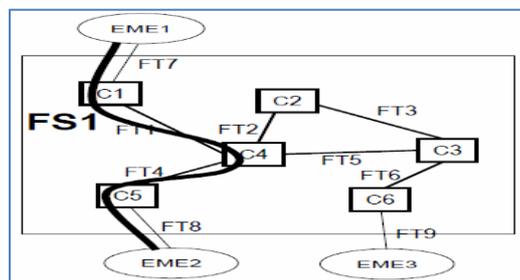


Figure 3-48 Bloc-diagramme fonctionnel

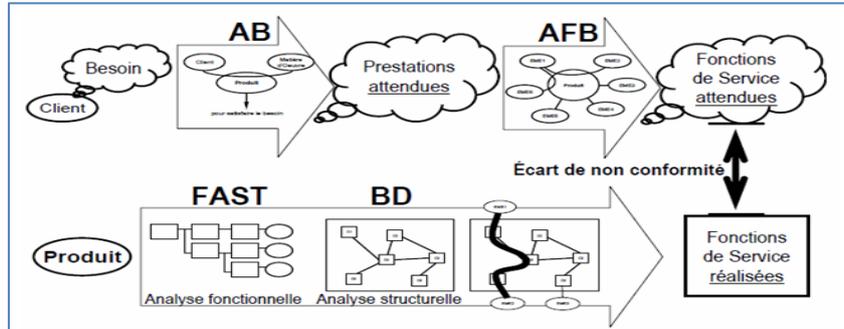


Figure 3-49 Faisabilité / Non-conformité

Dans le Tableau 3-18 nous avons synthétisé les caractéristiques de la qualité, générées par l'AF, dans les colonnes :

- a. Module fonctionnel,
- b. Catégorie des fonctions,
- c. Fonctions attendues,
- d. Performances attendues,
- e. Calcul de concept,
- f. Descriptif mécanique,
- g. Descriptif électrique,
- h. Précisions,
- i. Quantification (combien) ou niveau du critère,
- j. Classe de flexibilité (f), et
- k. Hiérarchisation des fonctions (k) ou importance relative.

Tableau 3-18 La synthèse l'AF – onglet « Caractéristiques qualité » - vue générale

J	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
MODULE FONCTIONNEL	CATEGORIE DE FONCTIONS	FONCTIONS ATTENDUES	PERFORMANCES ATTENDUES	CALCUL DE CONCEPT	DESCRIPTIF MECANIQUE	DESCRIPTIF ELECTRIQUE	PRECISIONS	QUANTIFICATION (COMBIEN) ou NIVEAU du CRITERE	CLASSE DE FLEXIBILITE (F)	HIERARCHISATION DES FONCTIONS (K) ou IMPORTANCE RELATIVE				
1		FR-FCT PRINCIPALE FS-FCT SERVICE FC-FCT CONTRAINTE FT-FCT TECHNIQUE			N_modèle				F0 : flex nulle - impératif F1 : flex faible - peu négociable	1 - Utile 2 - Nécessaire 3 - Importante 4 - Très importante				
88	Emboutisseur	FP 01	Emboutir flans	Formation des coquilles sans les trouser	N_01.doc	E_001.doc	Jeu entre poinçon emboutisseur et bobine → Jeu entre poinçon et alvéole →	de 0.3 mm de 0.6 mm	F0	3				
89		FT 02	Contrôler présence des flans	Présence flans	N_02.doc	E_002.doc	Pas de flan arrêt machine ou verrouillage coulée		F0	4				
90		FT 03	Maintenir la coquille dans alvéole	Plaquez les bords des coquilles contre les parois de l'alvéole	N_03.doc	E_003.doc	Garantir que la coquille reste engagée dans l'alvéole		F0	5				
92	Transport pas à pas	FT 04	Transporter les coquilles	Transporter les coquilles pour opération de remplissage, pliage, tassage et extraction	N_04.doc	E_004.doc	Loi de mouvement évitant la vague Résistance au lavage des alvéoles et des poinçons: 30° à 80° sans déformation Fréquence de lavage : tous les 2 jours Matière recyclée = 0%	Pas -100 avec précision répétitive longitudinale et latérale +/-0,15mm.	F0	5				
94		FT 05	Régler hauteur coquille	Couvrir la plage de réglabilité selon la densité du fromage et pour format de 10g à (40g)	N_05.doc	E_005.doc	Delta de réglabilité -25 mm (à confirmer)		F0	3				
96		FT 06	Dévider bande de la bobine	Alimenter aluminium pour formation des couvercles pour portions de 6/6, 8/8, 12/12, rond, ovale, carré	N_006.doc	E_006.doc	Diamètre est =76(standard) ou 55mm, diamètre est. =30mm. Pour format 12/12 revoir coupe et largeur. Couche thermosoudable à l'enduireur	Position latérale +/- 0.5 mm, réglage manuel	F0	5				
98														

Les hyperliens (couleur bleue) nous renvoient vers des documents où sont consignés les détails des caractéristiques de chaque fonction.

3.7.5.2 Analyse AMDEC

En fait, on applique l'AMDEC en priorité aux composants critiques, ce qui permet d'accumuler de l'expérience sous forme de savoir-faire technique. Dans l'exemple ci-dessous (Tableau 3-19) nous montrons le résultat d'une transformation d'un diagramme cause-effet en AMDEC avec le logiciel iGrafx 2011.

Tableau 3-19 AMDEC à partir du diagramme cause-effet (iGrafx Process 2011)

Entrée/Etape de processus	Mode de défaillance potentielle	Effets des défaillances potentielles	Gravité	Causes potentielles	Occurrence	Contrôles actuels	Détection	RPN	Actions recommandées	Responsable	Date d'achèvement visée	Actions mises en œuvre	Gravité	Occurrence	Détection	RPN		
Conditionnement	Ecrasement	Fuites	1.1.1	Contrôle	1	pas de contrôle												
			1	Non maîtrise de la force de pincement	1													
			3	Extraction Fût	1													
			4	Tirer le reste Tube (par le Fût)	1													
			5.1	Signal Compteur : Fin d'enroulement	1													
			6.1	Signal Accumulateur	1													

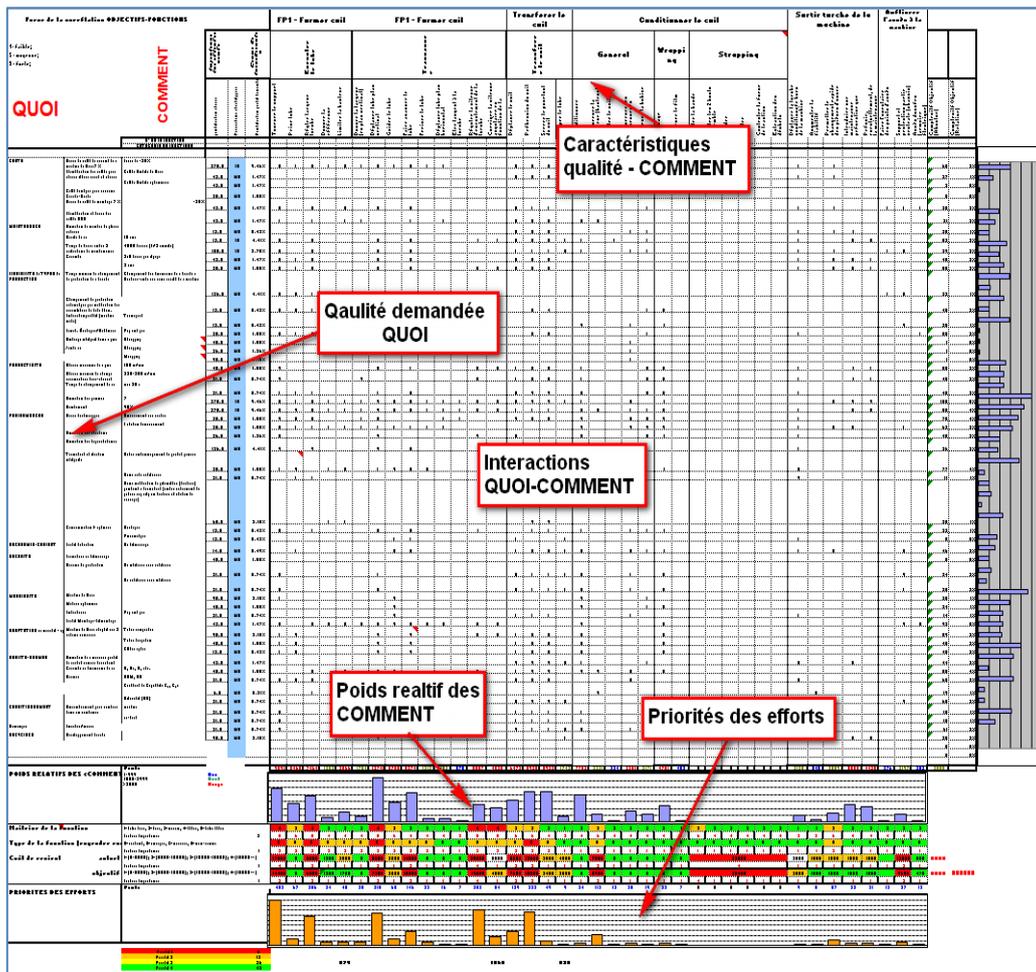
Tableau 3-20 AMDEC rapide avec import des fonctions depuis l'AF

Fonctions	N	Cat	Probabilité de la défaillance "a"	Gravité des conséquences "b"	Probabilité de non-détection "c"	Criticité "a x b x c"
C'est un module	A1	MO	4	1	7	28
Créer les fonctions du système	A2	FT	4	4	1	16
Utiliser la méthode FAST	A3	FT	4	4	1	16
Utiliser l'outil graphique	A4	FT	1	1	1	1
Exemple de fonction	B1	FP				
Permettre le stockage de l'énergie cinétique	B2	FT				
Absorber l'énergie cinétique lors du freinage	B3	FT				
Utiliser l'énergie bio mécanique des bras de l'utilisateur	B4	FC				
Transformer l'énergie bio mécanique en rotation	B5	FT	1	4	1	4
Permettre l'utilisation de l'énergie cinétique emmagasinée	B6	FT				
Restituer l'énergie cinétique emmagasinée pour le déplacement	B7	FT				
Restituer l'énergie cinétique emmagasinée pour l'aide aux passages d'obstacles	B8	FS				

Dans la Tableau 3-20 nous montrons l'application de l'AMDEC à partir de l'analyse fonctionnelle. Les fonctions sont importées directement dans la colonne de

gauche et on peut faire une pré-analyse AMDEC rapide pour identifier rapidement les points critiques du nouveau système.

Tableau 3-21 Matrice de la qualité



3.7.6 Matrice des interactions Objectifs-Fonctions (QUOI-COMMENT)

Représente la synthèse de l'analyse des QUOI et COMMENT (Akao, 1993). L'interaction objectif-fonction est pondérée à l'intérieur de la matrice. Ceci a un rôle important dans la validation de l'AF (Tableau 3-21).

Le poids relatif des COMMENT est obtenu à partir de l'intégration des objectifs et du niveau d'interactions entre les QUOI et les COMMENT.

Les priorités des efforts intègrent, également, la maîtrise des fonctions, leurs coûts de revient et le type de fonction (existante, analogue, nouvelle ou non-connue).

3.7.7 Validation des fonctions

A la fin, on peut également utiliser le Tableau 3-22 pour la validation des fonctions selon des critères constructifs, cinématiques, dynamiques et par essais. L'aspect coût est aussi pris en considération lors de cette revue de conception conceptuelle. Pour la phase MSIC2 (voir le Chapitre 3.8) nous avons pondérer les critères de validation (Tableau 3-23) par rapport aux fonctions identifiées par leurs numéros et leurs appartenances.

Tableau 3-22 Validation des fonctions

Validation	Fonction	MSIC2															
		Porter et fixer la mécanique et l'électrique					Protéger les zones dangereuses					Insonoriser la machine					
		M1	M2	M3	M4	M5	FT	FC	FS	FT	FC	FS	M1	M2	M3	M4	M5
Validation Constructive (faisabilité mécanique, encombrement)	1	5	3	5	3	5	5	3	5	3	5	5	3	5	3	5	
Validation Cinématique	1	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	
Validation Dynamique	1	5	3	5	3	5	5	3	5	3	5	5	3	5	3	5	
Validation par essais	3																
Descriptif élec.		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Descriptif méc.		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Développement		3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	
Validation des coûts		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Revue de construction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Contrôle Cinématique (mvt défini, contrôle croisement)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Contrôle Dynamique		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Finalisation de l'étude		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Validation des heures méc.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Validation des heures électr.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Schémas électrique		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Schémas pneumatique		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Nomenclature		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ensembles 2D		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Documentation, instructions		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ETAT DE LA VALIDATION DE LA PHASE 2 (%)		100.0	40.0	100.0	33.3	100.0	20.0	20.0	80.0	20.0	20.0	100.0	20.0	20.0	73.3	100.0	
ETAT D'AVANCEMENT DE LA PHASE 3 (%)		8.8	6.3	2.5	3.8	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
Moyenne phase2		68.6						4.4									
Moyenne phase3		4.4						4.4									

Tableau 3-23 Validation des fonctions (vue détaillée)

Validation	Fonction	MSIC2				
		M1	M2	M3	M4	M5
		FT	FC	FS	FT	FS
Validation Constructive (faisabilité mécanique, encombrement)	1	5	3	5	3	5
Validation Cinématique	1	3	1	3	1	3
Validation Dynamique	1	5	3	5	3	5
Validation par essais	3					
Descriptif élec.		1	1	1	1	1
Descriptif méc.		3	3	3	3	3
Développement		3	1	3	1	3
Validation des coûts		0	0	0	0	0
Revue de construction		0	0	0	0	0
Contrôle Cinématique (mvt défini, contrôle croisement)		0	0	0	0	0
Contrôle Dynamique		0	0	0	0	0
Finalisation de l'étude		0	0	0	0	0
Validation des heures méc.		0	0	0	0	0
Validation des heures électr.		0	0	0	0	0
Schémas électrique		0	0	0	0	0
Schémas pneumatique		0	0	0	0	0
Nomenclature		0	0	0	0	0
Ensembles 2D		0	0	0	0	0
Documentation, instructions		0	0	0	0	0
ETAT DE LA VALIDATION DE LA PHASE 2 (%)		100.0	40.0	100.0	33.3	100.0
ETAT D'AVANCEMENT DE LA PHASE 3 (%)		8.8	6.3	2.5	3.8	2.5
Moyenne phase2		68.6				
Moyenne phase3		4.4				

3.7.8 Conclusions

Le Plan qualité reprend la « voix du consommateur » et l'intègre dans le processus de conception de l'entreprise. L'outil prépare surtout le déroulement de la partie de la conception, appelée l'étude conceptuelle, et il débute avant même la création des objets en 3D (CAO). La matrice de qualité représente la synthèse du cahier des charges, à partir de laquelle sont définis le poids relatifs des COMMENT et les priorités des efforts en conception. Elle a un rôle important dans la définition de la stratégie de développement. Le Plan qualité représente la boîte à outil intégrée (Figure 3-50 et Figure 3-51) dans notre modèle méthodologique et son utilisation est décrite dans le contenu des activités appartenant à chaque phase du cycle de vie.

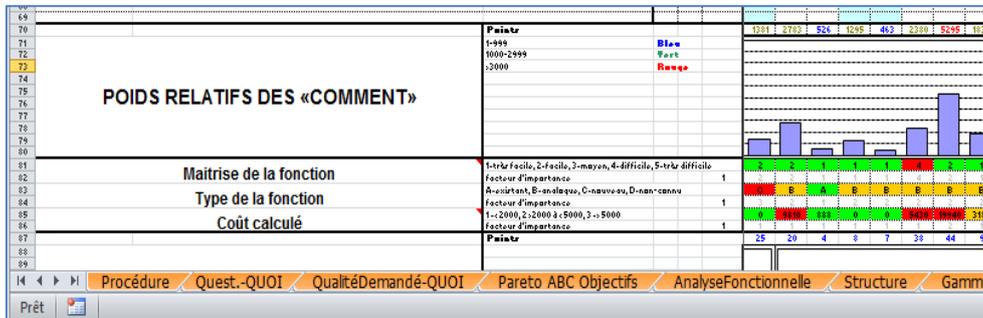


Figure 3-50 Les onglets du Plan qualité (I)

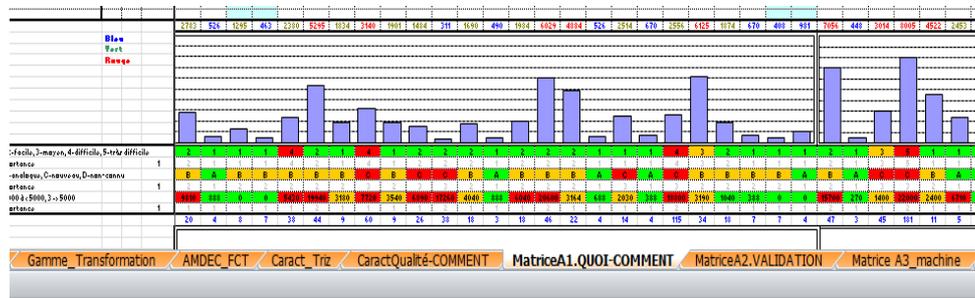


Figure 3-51 Les onglets du Plan qualité (II)

3.8 Le modèle MSIC

Dans la Figure 3-52 nous présentons les sept phases selon un formalisme Mind Map.

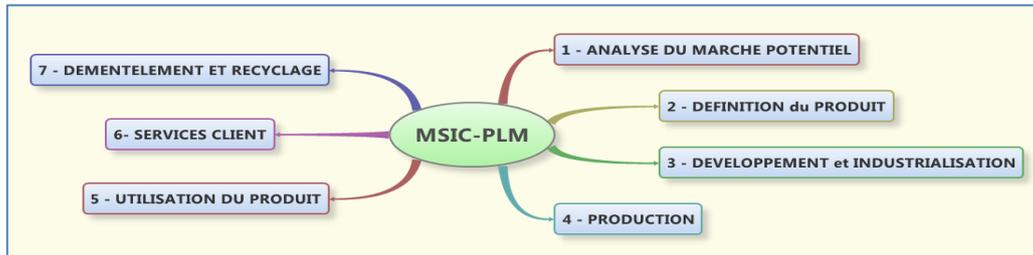


Figure 3-52 Les phases principales de MSIC

Le découpage en sept phases ne représente une nouveauté absolue en soi (par rapport aux modèles présentés dans le Chapitre 2) mais le caractère d'originalité est donné par le contenu de ces phases et l'intégration des outils comme le Plan qualité, la Gamme de transformation, l'Organigramme technique, etc. dans le cycle de vie. Dans les chapitres suivants nous allons décrire le modèle MSIC en tenant compte de son évolution dans le temps et aussi par rapport au formalisme adopté dans chacune de ces trois étapes :

- Modèle de type *flow-chart* avec une logique de type flux d'activités et une décomposition arborescente (pyramidale) des sept phases principales « *top-down* »,
- Modèle de type tableau-matrice (tableau Excel) en mettant en avant les livrables et les documents de gestion, et
- Modèle de type tableau-matrice (tableau Excel) avec l'accent mis sur le caractère ontologique des activités élémentaires.

3.8.1 Modélisation selon le formalisme flow-chart

Pour représenter la méthodologie, au début, nous avons opté pour une représentation graphique de type « *flow-chart* ». L'avantage de ce type de représentation était de donner la possibilité de raisonner en termes de flux. De cette manière il existait la possibilité d'identifier la totalité des activités du cycle de vie et de comprendre les relations qui les relient. Nous mentionnons, toute de même, un désavantage avec lequel nous nous sommes confronté : dans ce type de représentation nous n'avons pas pu montrer toutes les itérations, c'est-à-dire, nous n'avons pas pu rendre compte du caractère dynamique, riche en relations, de la réalité couverte par cette représentation. Au début, nous adoptons une manière simplifiée de représentation du cycle de vie à l'aide d'un organigramme qui nous permet aussi de remarquer la structure pyramidale, à quatre niveaux, de la construction de cette méthodologie (Figure 3-53).

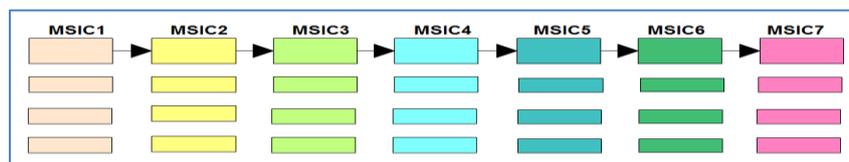


Figure 3-53 Organigramme simplifié de MSIC

3.8.1.1 MSIC - premier niveau

Le premier niveau du cycle de vie comprend les phases suivantes (Figure 3-54) :

1. Demande, Analyse et Synthèse de la demande,
2. Définition du produit,
3. Développement et Industrialisation,
4. Production,
5. Service Client,
6. Utilisation du produit,
7. Démantèlement et Recyclage.

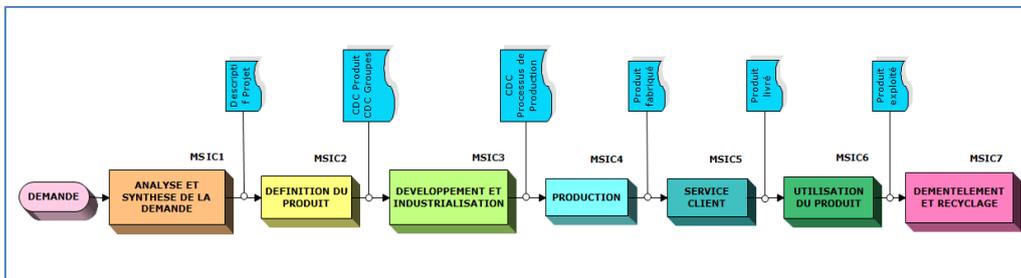


Figure 3-54 Le premier niveau de MSIC

Entre les sept phases du premier niveau (Figure 3-54) comme entre les sous-phases et les étapes nous avons introduit des revues de phases et des actions de choix et décisions conformément aux critères d'opérativité (Chapitre 3.4.3.1).

3.8.1.2 MSIC - deuxième niveau

L'image simplifiée du cycle de vie à l'aide d'un organigramme est représentée dans la Figure 3-55.

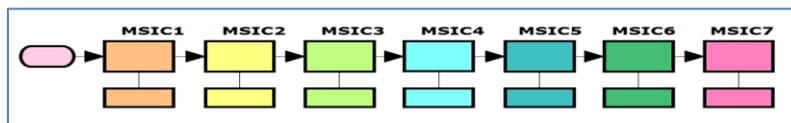


Figure 3-55 Organigramme simplifié de MSIC niveau II

La vue générale de MSIC1 et MSIC2 décomposées jusqu'au quatrième niveau est représentée dans la Figure 3-56. On peut remarquer dans cette figure que le choix des couleurs met en évidence la structure pyramidale de décomposition. Selon la Figure 3-57 la décomposition s'apparente au système IDEF0 simplifié (sans une représentation exhaustive de tous les flux). Le principe de la représentation est celui d'une décomposition arborescente où chaque phase contient quatre niveaux : **sous-phase**, **étape** et **activités**. Le dernier niveau (l'activité) a un fort contenu métier ce qui permet de donner une orientation « gestion de projet » si l'on souhaite extraire les tâches et planifier le projet d'un produit. Pour décrire les activités du dernier niveau (niveau IV) nous avons utilisé le modèle itératif simple décrit au Chapitre 2.5.4.2.

La décomposition au deuxième niveau de la phase MSIC2 tient compte des trois logiques d'actions de conception pour identifier les sous-phases :

- Identification des besoins,
- Analyse et Synthèse des Besoins, et
- Analyse et Synthèse des fonctions et Études de faisabilités.

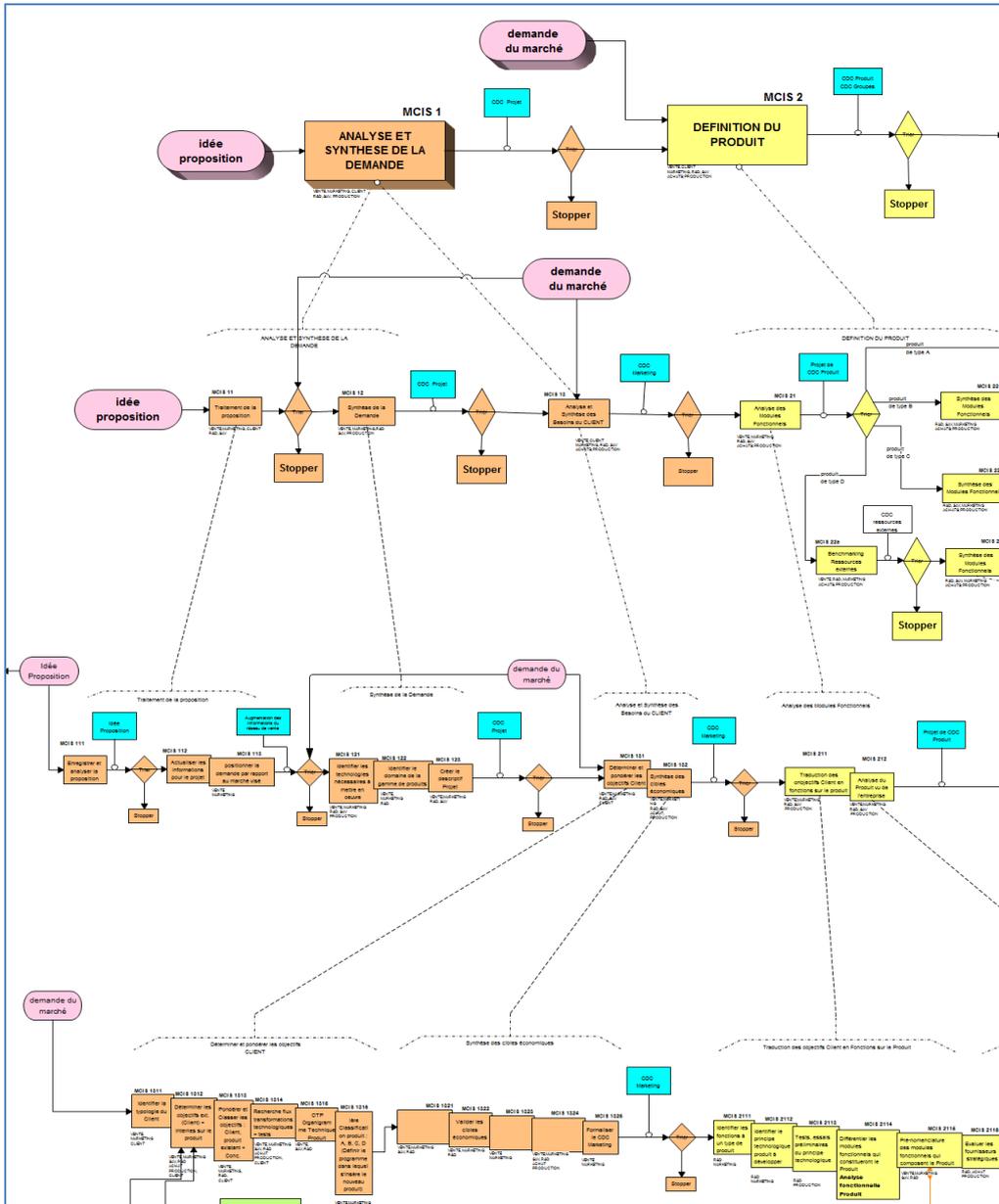


Figure 3-56 Vue générale sur quatre niveaux de MSIC1 et MSIC 2

Dans la Figure 3-58 on peut voir la décomposition sur deux niveaux (phases et sous-phases) des dernières trois phases : Production, Service client, Utilisation du produit, Démantèlement et Recyclage.

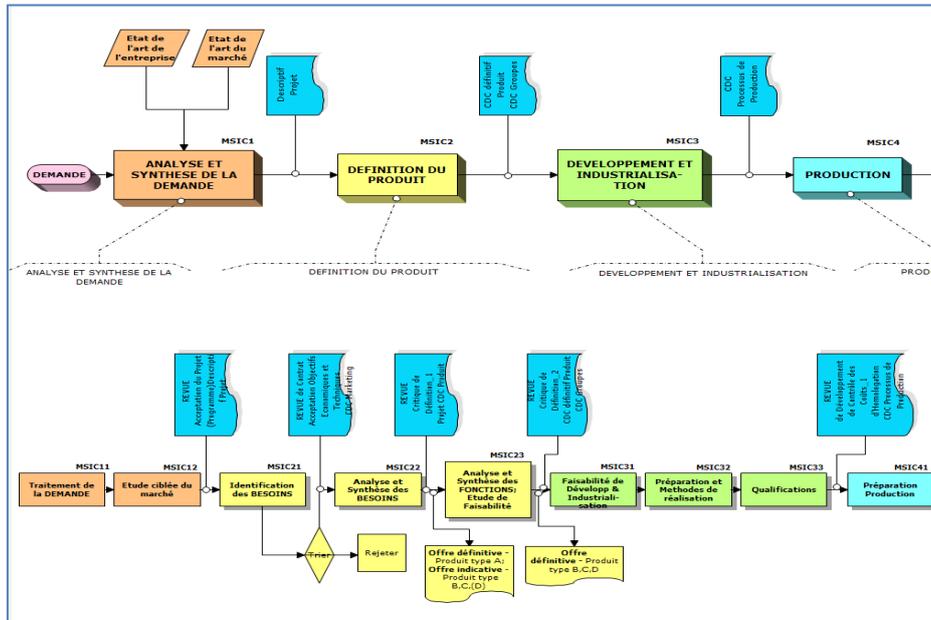


Figure 3-57 Le deuxième niveau - détail de MSIC1 à MSIC3

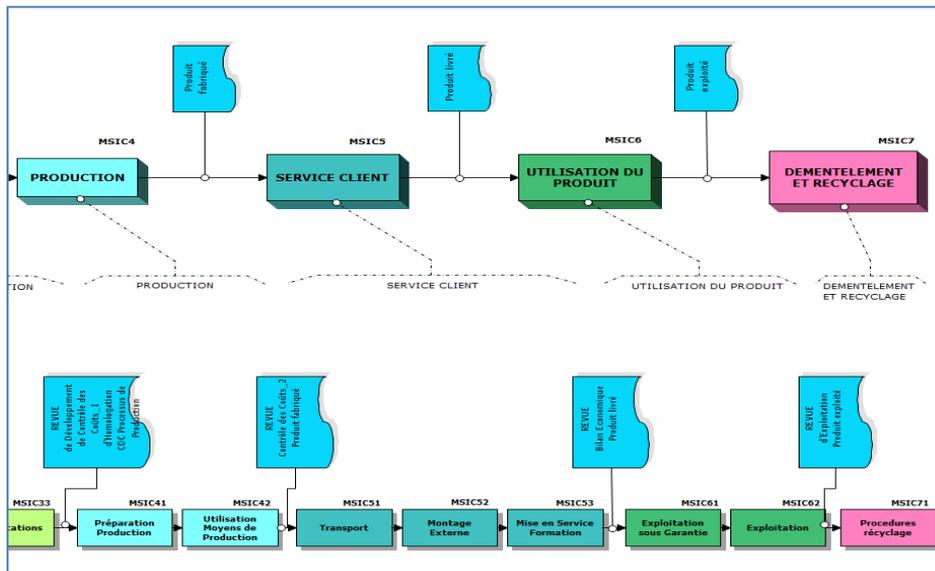


Figure 3-58 Le deuxième niveau - détail de MSIC4 à MSIC7

Dans les figures suivantes nous présentons les troisième et quatrième niveaux des phases MSIC1 et MSIC2. Ces niveaux décrivent en détail les activités à dérouler et possède des revues de phases qui donnent la possibilité d'arrêter le projet si le pronostic sur la suite du projet est pessimiste (Figure 3-59, Figure 3-60 et Figure 3-61). Pour la MSIC2 la décomposition des étapes et activités suit la logique initiée au IIIème niveau (basée sur analyse, synthèse et transformation), c'est-à-dire, l'on détaille les activités :

- De pondération des objectifs,
- De « traduction » des objectifs clients en fonctions,
- D'identification des principes technologiques,
- De création des pré-nomenclatures des modules fonctionnels,
- D'évaluation des fournisseurs stratégiques,
- D'organisation du projet,
- D'Identification des interfaces entre les modules fonctionnels,
- D'identification des processus de maintenance,
- De calcul des coûts de revient,
- D'élaboration des solutions alternatives au niveau module et produit,
- Des faisabilités (dynamique, cinématique, statique, de montage, SAV, d'acquisition et d'industrialisation) et choix de matériaux,
- D'élaboration des cahiers des charges,
- D'élaboration de la stratégie de développement (pour la MSIC3), et
- Des revues des phases.

Dans les détails des activités nous avons tenu compte aussi du fait que la conception est type innovatrice (Dieter et Schmidt, 2007) et avons intégré l'utilisation des méthodes d'aide à l'innovation par l'utilisation du « Plan qualité ». Les solutions de conception et les spécifications évoluent simultanément (Roozenburg et Eekels, 1995) et tiennent compte de la structure itérative des résultats des activités de faisabilités (Chapitre 2.6.3). Dans la Figure 3-61 et la Figure 3-62 nous avons montré la différence entre les flux pour les quatre types de produits :

- A – produit analogue,
- B – produit avec de modifications mineures (de type paramétrique),
- C – produit partiellement nouveau,
- D – produit nouveau.

Pour les produits de type A nous avons déterminé un processus plus « allégé », c'est-à-dire, que le flux ne contient pas toutes les activités présentes dans le flux complet d'un produit de type D.

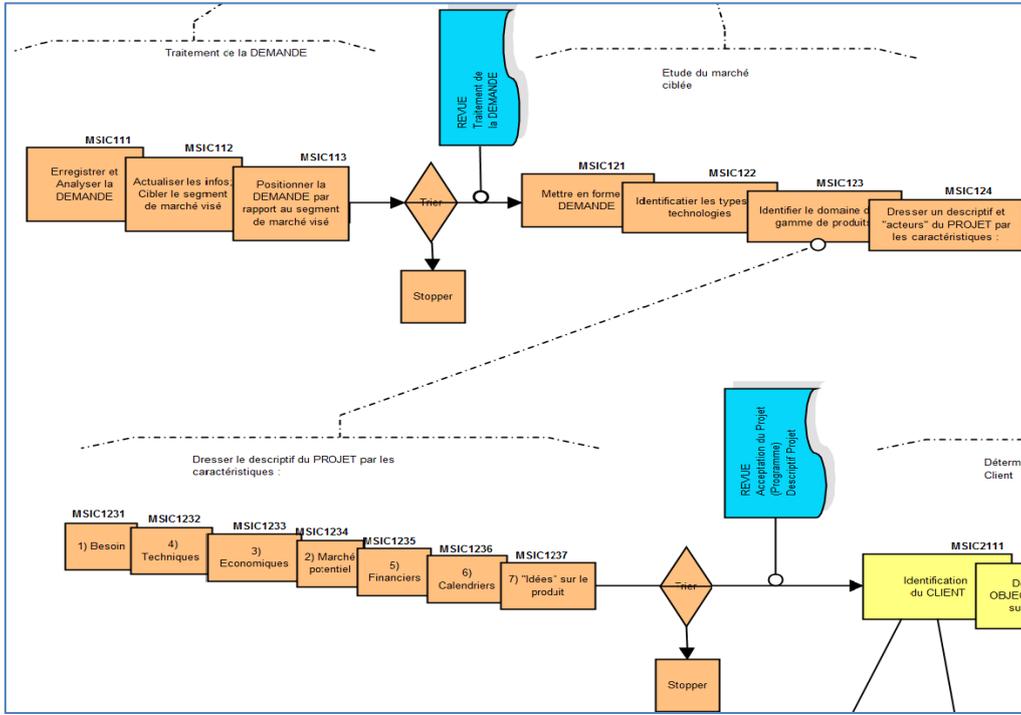


Figure 3-59 Vue des troisièmes et quatrièmes niveaux de MSIC1

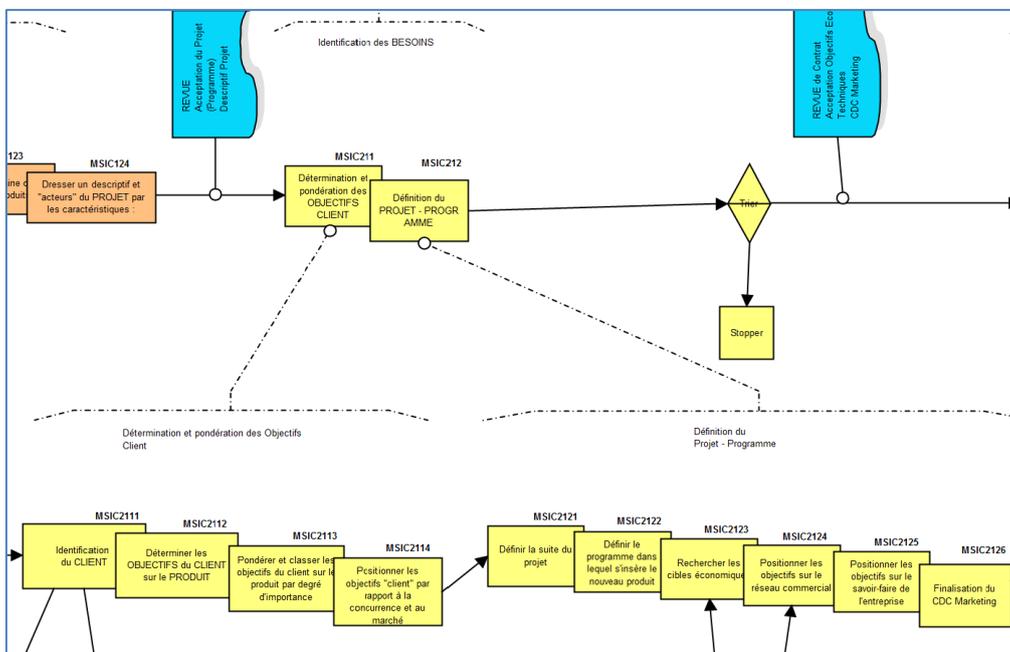


Figure 3-60 Vue des troisièmes et quatrièmes niveaux de MSIC2-a)

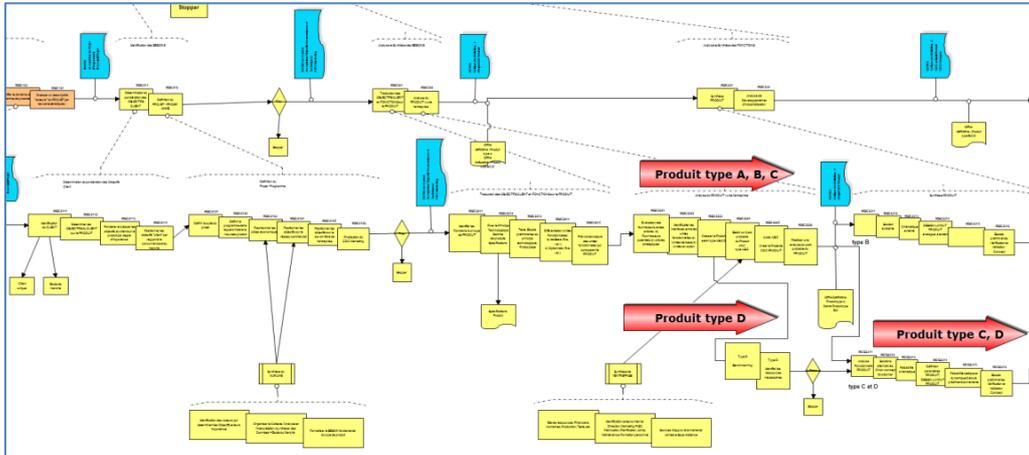


Figure 3-61 Vue globale des flux différenciés de MSIC2

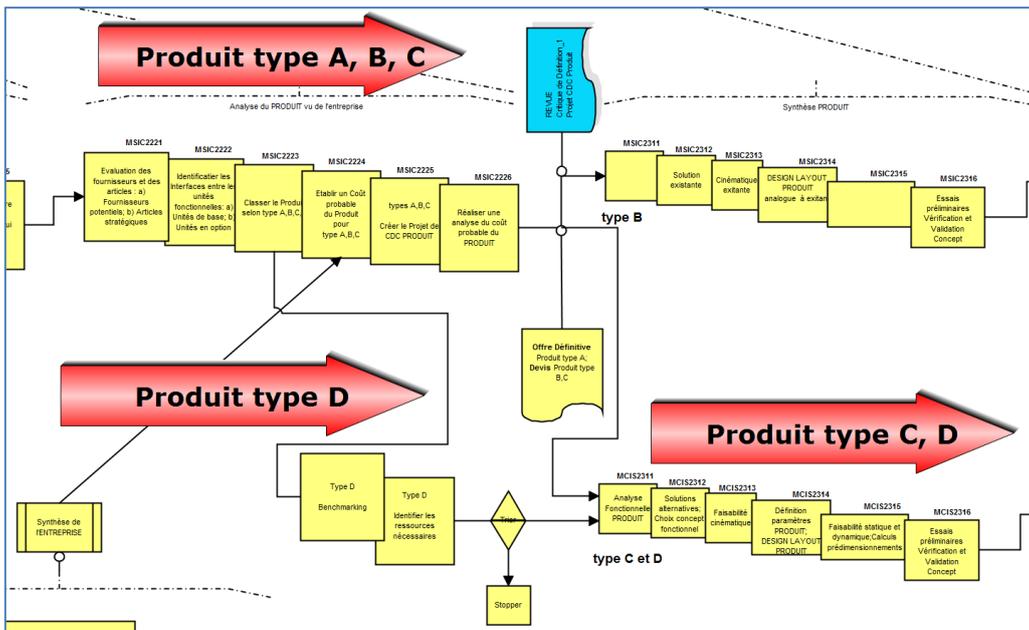


Figure 3-62 Vue partielle des flux différenciés de MSIC2

Nous passons en revue les principales sous-phases des phases MSIC3, MSIC4, MSIC5, MSIC6 et MSIC7 dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3-24 Synthèse des phases MSIC3, MSIC4, MSIC5, MSIC6 et MSIC7

Phases	Description
MSIC3	Faisabilité de développement et d'industrialisation
	Synthèse des procédés de réalisation
	Documentation, Conformité, certification
	Validation par prototype
MSIC4	Revue d'homologation CDC Processus de Production
	Préparation de la réalisation
MSIC5	Utilisation des moyens de réalisation
	Revue de Contrôle des Coûts Produit fabriqué
	Expédition-Transport
MSIC6	Montage externe-client
	Formation
	Revue Bilan Technique et Économique du Produit livré
	Exploitation sous garantie
MSIC7	Exploitation
	Revue d'Exploitation du Produit Exploité
	Arrêt de la production
	Recyclage
	Destruction
	Stockage

3.8.2 Tableau de bord MSIC

A partir du formalisme « *flow-chart* » de la méthodologie nous avons transposé le MSIC dans un tableau (matrice) Excel avec des lignes et des colonnes selon le modèle affiché dans le Tableau 3-25 et Tableau 3-26. L'adoption d'un tel outil nous a permis l'organisation des informations liées au cycle de vie dans le cadre d'un méta-modèle dans le sens décrit au Chapitre 2.4. En utilisant Excel, nous avons voulu profiter de la portabilité offerte par le tableur d'Office afin d'être facilement adopté et utilisé par tous les utilisateurs.

Dans le contenu des colonnes nous avons détaillé les caractéristiques du modèle de l'activité élémentaire montré dans le Tableau 3-12. Les colonnes représentent l'avancement des phases de 1 à 7 et les lignes contiennent les caractéristiques de l'activité élémentaire définie plus haut : PHASES ; ÉTAPES ; SOUS-ÉTAPES ; ACTIVITÉS; ÉTAPES DIRECTION PROGRAMME; DÉCISIONS DIRECTION PROGRAMME; DONNÉES INITIALES (Infos, Moyens); RÉSULTATS; COÛTS; OUTILS de GESTION; OUTILS GÉNÉRAUX; MÉTHODES; QUANTIFICATION des RISQUES; QUESTIONS.

Tableau 3-25 Lignes et colonnes du tableau MSIC

PHASES	Phase 1...7				
ETAPES	étape 1...n				
Sous-étapes	sous-étape 1...n				
Activités	activité 1...n				
Etapes					
Direction					
Programme					
Décisions					
Direction					
Programme					
Données					
Initiales (Infos, Moyens)					
Résultats					
Coûts					
Outils de Gestion					
Outils généraux					
Méthodes					
Quantification des risques					
Questions					

Tableau 3-26 L'en-tête du tableau MSIC (vue partielle)

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
ETAT DE L'ART DU MARCHÉ				ETAT DE L'ART DE L'ENTREPRISE							DEMANDE	ANALYSE et SYNTHÈSE de la DEMANDE						DEFINITION PRODUIT						
												Traitement de la Demande	Etude ciblée du marché			Identification des BESOINS								

La matrice Excel que nous avons développée ensuite contient, sur l'horizontale (l'axe du temps), les sept phases de MSIC selon le Tableau 3-27 ci-bas. Cette mise en forme nous a permis, surtout, d'identifier les livrables de chaque phase, étape, sous-étape du programme, les documents qui contiennent les informations clés du cycle de vie PLM et, surtout, les outils et les méthodes qui interviennent à travers le cycle de vie.

Ce premier tableau-matrice avait, surtout, un caractère analytique mais ne pouvait pas être utilisé, en tant que tel, dans le cadre d'un projet industriel. C'est pourquoi nous avons amélioré ce tableau-matrice en mettant en évidence les classes ontologiques : CONTENU, BUTS, QUOI-TRAVAUX, DOCUMENTS, RESSOURCES. Ainsi l'axe du temps a été transposé sur la verticale. Finalement, nous avons obtenu un outil où nous avons détaillé davantage le contenu des activités (travaux à réaliser) et avons facilité le passage du contenu de la méthodologie vers le projet de réalisation du produit (Tableau 3-28 et Tableau 3-29).

Tableau 3-27 MSIC1 en format Excel (Vue partielle de la première phase)

PHASES du Programme ETAPES du programme Sous-étapes programme	ETAT DE L'ART DU MARCHÉ				ETAT DE L'ART DE L'ENTREPRISE				DEMANDE	ANALYSE et SYNTHÈSE DEMANDE							
	Pas programme									Traitement de la Demande		Etude ciblée					
Tâches MARKETING	Recherche Informations	Positionnement de la gamme des produits de l'entreprise sur le marché	Identifier la Qualité en utilisation de la gamme de produits;	Quantification de la gamme des MTBF-Moyenne des ventes (produits sur le marché)	Veille Technologique	Développements en cours en interne et externe	Disponibilité et pérennité des ressources	Disponibilité du capital-faire dans l'entreprise	Organisation de la Qualité; Etat des procédures internes	Comparaison et Etat des défauts par rapport aux produits similaires	Enregistrer la Demande	Analyser la Demande	Actualiser les Infos; Choisir le segment de clientèle	Triier, Regler ou Transmettre la Demande	Mettre en forme la Demande	Identification technologiques	Identifier (nouveaux) domaine gamme produit
Tâches R&D																	
Tâches ACHATS																	

Annotations:

- Pour percevoir le BESOIN du marché il faut installer une STRUCTURE D'ECOUTE DU MARCHÉ
- Les prises de décisions des dirigeants ne doivent plus se fonder sur l'habitude et la seule expérience personnelle.
- Le DDP (Dossier de Demande de Programme) représente la mémoire du produit;
- Orientations générales:
 - que la demande oriente bien la conception,
 - que le cadre général soit bien tracé,
 - que le problème soit posé avec ses limites de principe,
 - que le cadre financier soit clair,
 - que le programme de production (issu du développement) et le calcul de rentabilité (quantités) soient abordés.

De cette manière l'utilisateur peut développer le contenu de ces propres activités en se référant au fil conducteur donné par le contenu de la MSIC. Dans la colonne « Activités correspondantes » l'utilisateur décrit ses propres activités. Par conséquent, nous avons appelé ce deuxième tableau-matrice « Tableau de bord » parce qu'il permettait à l'utilisateur, parmi d'autres facilités, de mesurer l'avancement de ses travaux et se positionner, en même temps, temporellement et typologiquement dans le cycle de vie.

Tableau 3-28 Exemple du Tableau de bord MSIC

N° tâche MSIC	Contenu selon MCIS - Phase / Tâche	BUT(S)	Travaux à réaliser	Activités correspondantes	Responsables		Documents	Date Début	Date final	Date Fin
					QUI	DECIDEURS				
312	Synthèse des composants stratégiques	Obtenir le design précis de chaque composants stratégiques	Pré-nomenclature des composants stratégiques	Présentation de MCIS 3	Team projet: Approv., Montage,Essais,R&D méca,élect.,technologie, Spécialiste	Core Team				
3121	Pré-nomenclature des composants du GROUPE	Obtenir une nomenclature des éléments stratégiques du groupe	Pré-nomenclature des composants stratégiques	Réaliser la faisabilité technologique de Montage et SAV	Réaliser la fais. techn. de Montage et SAV	Team projet: Approv.,R&D				
3122	Faisabilité technologique de Montage et SAV	Optimiser le montage et le SAV du Groupe	Identifier les besoins futurs probables de maintenance du SAV	Identifier les besoins futurs probables de maintenance du SAV	Team projet: Approv., Montage,Essais,R&D méca,élect.					
3123	Réaliser la faisabilité technologique d'acquisition de composants	Établir une première macro-gamme d'acquisition des composants stratégiques du groupe	Identifier les besoins d'acquisition des composants du groupe	SAP Diaphe du projet	Team projet: Approv., R&D méca,élect.					

Le projet spécifique de l'entreprise ne suit pas, rigide, étape par étape la ligne de la méthodologie, mais au contraire, il s'inspire des réalités de l'organisation en les intégrant, dans une manière créatrice, dans le déroulement de la méthodologie. La structure du contenu du tableau tient compte aussi de la structure de l'activité élémentaire exposée au chapitre 3.6.2.4 et, par conséquent, les colonnes disponibles dans le Tableau de bord sont :

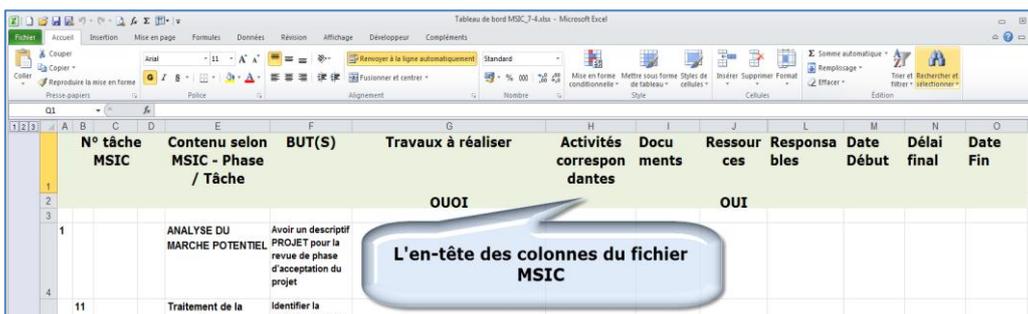
- N° DE LA TÂCHE MSIC,
- CONTENU SELON MSIC PHASE/TÂCHE,
- BUT(S),
- TRAVAUX À RÉALISER,
- ACTIVITÉS CORRESPONDANTES,
- DOCUMENTS,
- RESSOURCES,
- RESPONSABLES,
- DATE DÉBUT,
- DATE FIN,
- DÉLAI FINAL.

Tableau 3-29 En-tête du tableau MSIC

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O
1			N° tâche MSIC		Contenu selon MSIC - Phase /	BUT(S)	Travaux à réaliser	Activités correspondantes	Documents	Ressources	Responsables	Date Début	Délai final	Date Fin
2							QUOI			QUI				
3														

Dans un seul fichier nous pouvons naviguer facilement à travers tout le cycle de vie PLM de la méthodologie (Tableau 3-30 et Tableau 3-31) sans devoir chercher ailleurs les informations concernant le produit. L'avantage est que dans n'importe quel moment du projet nous pouvons naviguer (remonter ou descendre) sur le fil des activités avec beaucoup d'aisance ce qui nous permet de nous situer correctement par rapport au reste du cycle de vie.

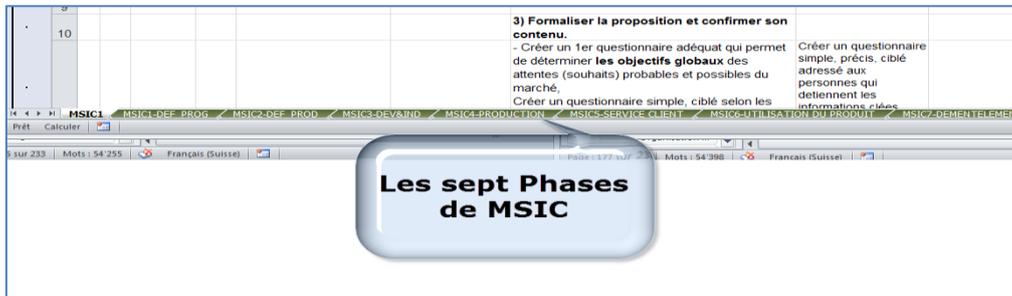
Tableau 3-30 L'en-tête du fichier MSIC



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O
1			N° tâche MSIC		Contenu selon MSIC - Phase / Tâche	BUT(S)	Travaux à réaliser	Activités correspondantes	Documents	Ressources	Responsables	Date Début	Délai final	Date Fin
2							QUOI			OUI				
3														
4					ANALYSE DU MARCHÉ POTENTIEL	Avoir un descriptif PROJET pour la revue de phase d'acceptation du projet								
11					Traitement de la	Identifier la relation de cause								

Bien-entendu, à partir du Tableau de bord nous sommes dirigés, grâce aux hyperliens, vers tous les documents utilisés pendant le cycle de vie du produit ce qui assure un accès facile, à partir d'une seule source, à toutes les informations nécessaires dans un cycle de vie PLM.

Tableau 3-31 La partie inférieure du fichier Excel avec les sept onglets MSIC



3.9 Conclusions

Nous pouvons conclure maintenant sur quelques caractéristiques principales concernant le modèle MSIC (Méthodologie Systémique Intégrée de Conception)

- Simplicité d'utilisation et portabilité grâce à l'utilisation d'Excel ;
- Modifiable à souhait sans demander des connaissances particulières,
- Transposition des concepts théoriques sous une forme accessible aux concepteurs travaillant à des différents niveaux d'abstraction ;
- L'outil devient opérationnel rapidement (pour les utilisateurs débutants dans les « sciences molles »⁴⁴) sans être nécessaire une formation laborieuse ;
- Utilisation d'une seule boîte à outils, le Plan qualité, qui intègre à son tour des outils comme AF, AMDEC, etc. ;
- Organisation facile de l'information ; en la faisant correspondre aux étapes distinctes du cycle de vie on peut suivre un fil conducteur informationnel lors de la création d'un artéfact (caractère prescriptif souple); Par rapport à ce point il faut préciser le caractère d'auto-organisation du processus de conception et développement lors des interactions effectuées dans le cadre du groupe de conception ;
- Passage naturel vers la « gestion de projet » ; en effet, lors de la création, en parallèle, de la liste des « Activités correspondantes » dans le Tableau de bord, nous créons l'outil de pilotage et suivi du projet.

⁴⁴ Les « sciences molles » (ou, moins connoté négativement, « sciences douces ») est une expression populaire désignant dans un même ensemble les sciences humaines et les sciences sociales étudiant les aspects sociaux des diverses réalités humaines. Par sciences humaines et sociales, on entend en général un ensemble de disciplines diverses et hétérogènes, telles que, par exemple et dans le désordre, la sociologie, l'économie, l'ethnologie, l'anthropologie, la psychologie, l'histoire, la géographie, la démographie, les sciences politiques, la linguistique, la communication, les sciences de la religion, la philosophie, ou la théorie du droit. L'épistémologie, « les sciences » de la conception, etc., font aussi partie des « sciences molles ».

4 APPLICATION INDUSTRIELLE

4.1 Introduction

Selon le Chapitre 1.4 « *Construction de la démarche de recherche* » et la Figure 1-2, nous procédons maintenant, dans le cadre d'une démarche de type convergent, à l'analyse et à la validation du modèle présenté au chapitre 3. Ces opérations (analyse et validation) seront effectuées dans le cadre de l'application industrielle de la méthodologie MSIC.

Le projet choisi pour montrer l'application de la méthodologie s'est déroulé dans le cadre d'un mandat effectué par le laboratoire de conception LI3C de la Haute École d'Ingénieurs et de Gestion du Canton de Vaud de Yverdon-les-Bains (Suisse). Le contenu du mandat était la conception d'une nouvelle ligne de conditionnement pour le fromage fondu (Figure 4-1). L'objectif principal initial, très ambitieux, du cahier de charges de vente, exigeait une réduction du coût de revient de la machine de l'ordre de 30%. En plus de l'objectif principal concernant le coût, le cahier de charges prévoyait d'autres exigences concernant les domaines : productivité, niveau technologique, maintenance, normes, etc. Il faudrait mentionner aussi que la société se trouvait dans la situation où il fallait redéfinir sa stratégie par rapport à une concurrence très agressive et repenser sa gamme de produits. Le choix d'utiliser une nouvelle méthodologie se justifiait, à court terme, non seulement par le gain en termes opérationnels mais aussi par les modifications ressenties, à long terme, sur la manière de raisonner des acteurs impliqués dans le cycle de vie des systèmes de conditionnement de la société.



Figure 4-1 Exemples de produits finis

Le chapitre est structuré en deux parties : la présentation du transfert de la méthodologie, dans le cadre du projet de la ligne de conditionnement pour le fromage fondu et la description de l'application informatique de la méthodologie implémentée dans le logiciel LISP. Nous allons centrer la présentation de l'application industrielle sur les deux premières phases de la méthodologie : MSIC1 – Analyse de la demande et MSIC2 – Définition du produit, parce que c'est dans les

phases en amont que sont prises les décisions les plus importantes pour le développement et l'industrialisation. Les conséquences des activités déroulées dans ces phases et des décisions prises se répercutent sur les autres phases en aval du cycle de vie : fabrication, mise en service, utilisation, démantèlement. Dans ce sens, nous insistons sur l'utilisation des outils appelés Tableau de bord et Plan qualité qui intègrent complètement la méthodologie de conception intégrée MSIC.

Le cahier de charges de vente initial qui nous a été proposé pour l'étude contenait indistinctement des objectifs qui concernaient autant le produit primaire (fromage fondu emballé) que le produit secondaire (la ligne de conditionnement)⁴⁵. Tout d'abord, nous avons analysé et synthétisé les besoins des clients détectés par la vente. Il a donc fallu redéfinir, trier, classer et structurer les objectifs dans le cadre d'un cahier de charges reconstruit. A partir de ces objectifs, nous avons recherché les fonctions correspondantes, à partir desquelles il a fallu développer des solutions alternatives. Celle-ci ont été analysées de multiple points de vues (fonctionnel, technologique, faisabilité, sécurité, coûts, etc.) et ensuite triées et retenues en vue de la troisième phase de la MSIC : le « Développement et industrialisation ». Bien entendu, dans la MSIC1, nous avons fait remonter toutes les informations depuis les phases en aval du cycle de vie, à travers le travail collaboratif dans le cadre de plusieurs équipes pluridisciplinaires. Nous avons intégré, dès le début du projet et dans une vision *LifeCycle Cost (LCC)*, la définition des coûts objectifs et leurs suivi et pilotage au long de l'avancement du projet. Dans cette perspective de cycle de vie, nous avons inclus les coûts de développement, de réalisation des prototypes, les coûts de fabrication et de montage, d'approvisionnement, etc. Ceci nous a permis de contrôler en permanence les écarts entre les coûts objectifs budgétés et réels, ce qui nous a permis d'atteindre les objectifs coûts proposé.

4.2 Suivi du fil conducteur de la MSIC

Nous présenterons les résultats de l'application de la méthodologie dans le projet de développement de la ligne de conditionnement. Le point de départ a été un Cahier de Charges marketing, qui a été enrichi avec des informations pertinentes selon la phase MSIC1. C'est ce Cahier de Charges modifié qui a constitué l'entrée dans la phase MSIC2. A la fin de la MSIC2 (Définition) nous avons livré le Cahier de charges de définition du produit. Celui-ci constitue la référence pour les travaux effectués dans la phase suivante MSIC3 (Développement et Industrialisation). Dans le Cahier de Charges Marketing, nous nous sommes surtout penchés sur l'analyse de la concurrence, ainsi que sur le positionnement du produit par rapport à la gamme de produits de l'entreprise (Figure 4-4). Pour cette dernière analyse, nous avons utilisé l'outil BCG⁴⁶ (Figure 4-2 et Figure 4-3), qui nous a aussi renseignés sur les forces et les faiblesses de l'entreprise.

⁴⁵ Voir la Figure 3-36 du Chapitre 3.7.3.1.

⁴⁶ Le modèle BCG est un outil bien connu de gestion de portefeuille (créé par le Boston Consulting group) utilisé dans la théorie du cycle de vie du produit pour hiérarchiser les produits en quatre catégories basées sur des combinaisons de croissance du marché et des parts de marché par rapport au plus grand concurrent. En général, une société doit maintenir un portefeuille équilibré de produits, c'est-à-dire deux produits à forte croissance et des produits à faible croissance.

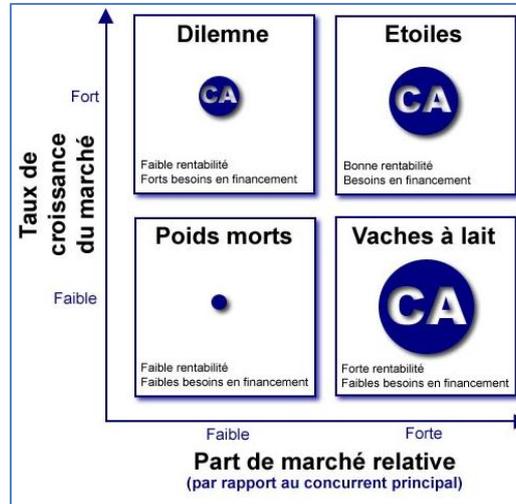


Figure 4-2 Matrice BCG

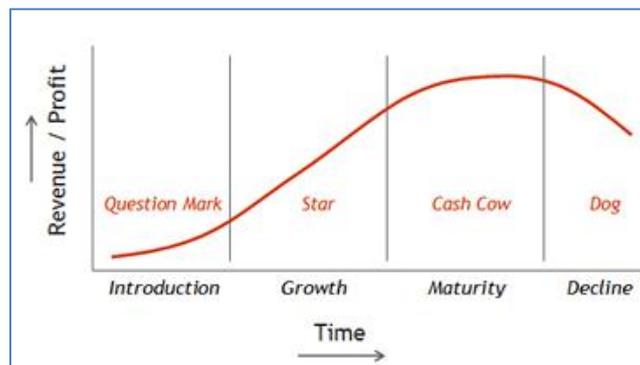


Figure 4-3 La positionnement de la BCG à travers le cycle de vie du produit

Cette première analyse nous a confirmé que le produit à développer s'inscrivait dans la catégorie des produits « étoiles » sur un marché, avec un bon taux de croissance et une part de marché importante pour la société. Ceci impliquait que la société relevait plusieurs défis majeurs comme : renouvellement du portfolio simultanément sur tous les marchés ciblé, baisse du prix de vente sans pour autant diminuer beaucoup les marges et atteinte des objectifs proposés sans augmentation des ressources actuelles (personnel, investissements, financières, etc.). Toujours selon MSIC1, nous avons identifié le programme de l'entreprise dans lequel notre projet s'inscrivait. Les limites du projet ont ensuite été clairement définies, ainsi que l'estimation de son enveloppe financière. La stratégie qui s'est mis en place visait, par conséquent, les marchés du fromage fondu identifiés comme ayant un très fort potentiel de croissance et d'amélioration du savoir-faire de la société dans cette gamme de produits.

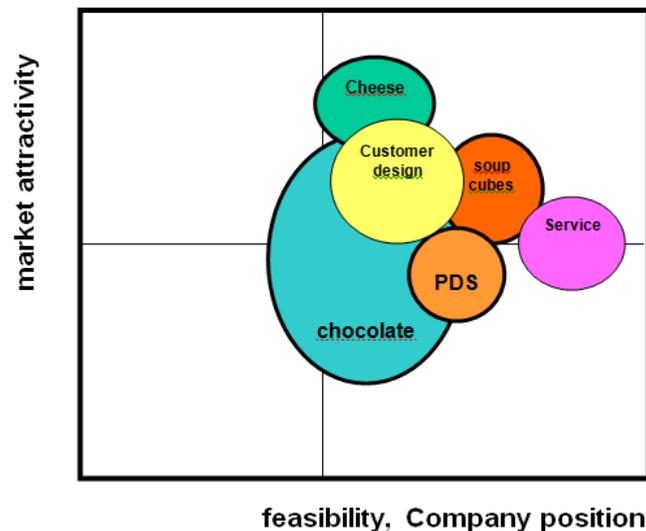


Figure 4-4 Positionnement de la gamme de produits par rapport aux marchés

4.2.1 Organisation du flux des travaux

Dans le cahier de charges initial étaient présents le coût de revient estimé et quelques objectifs indicatifs concernant la simplicité et la robustesse, l'hygiène, la productivité et quelques choix technologiques obligatoires.

Nous avons décidé, comme stratégie de transfert de la méthodologie MSIC, de travailler dès le début avec les outils présentés au chapitre 3 : le Plan qualité, la Gamme de transformations, l'Organigramme technique du produit et le Tableau de bord. Mais, tout d'abord, nous avons identifié les activités spécifiques du projet et leurs contenu dans le *flow-chart* MSIC (Figure 4-5) et ensuite dans le Tableau de bord (Tableau 4-1). Dans la figure ci-dessous, nous pouvons remarquer le rajout de détails des activités spécifiques à dérouler (en vert) et les portes « Trier » et « Stopper ». La raison de l'existence de ces étapes est justifiée par la complexité et le nombre importants d'inconnus. En effet, il fallait avancer « *step-by-step* » et avoir la possibilité d'arrêter un projet (suite à une analyse pertinente) avant de dépenser beaucoup de ressources jusqu'à se rendre compte de sa non-faisabilité.

Les documents spécifiés (sous formes de liens « *hyperlink* ») dans la colonne « Documents » (Tableau 4-1) suivent les étapes MSIC et constituent la base de données du produit. Ces documents se rajoutent à la base de connaissances de la société et constituent, finalement, son savoir-faire. Dorénavant, le suivi opérationnel de l'avancement du projet se fait en prenant comme référence le document appelé « Tableau de Bord » (fichier Excel). Ceci a, parmi d'autres avantages, celui de pouvoir offrir une excellente base pour le pilotage du projet selon la technique appelée « Gestion de projets ».

Tableau 4-2 Vue partielle du Tableau de bord de MSIC11 à MSIC12

1	2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	2	N° tâche MSIC				Contenu selon MSIC - Phase / Tâche	BUT(S)	Travaux à réaliser	Ressources		
1	2							QUOI	QUI	DECIDE	
1	2					ANALYSE DU MARCHÉ POTENTIEL	Avoir un descriptif PROJET pour la revue de phase d'acceptation du projet				
3						Traitement de la proposition	Identifier la relation de cause à effet qui doit être formalisée par la demande				
4					111	Enregistrer et analyser la proposition	Identifier le profil et le rôle du demandeur	1) Enregistrer la proposition dans la base de données de l'entreprise	Team market: Vente, Client, Spécialiste, Gestion technique, Direction, team projet		DIRECTION
5					112	Actualiser les informations pour le projet	Connaître l'origine, l'objectif et la suite prévue du nouveau projet	1) Identifier le rôle de la demande sur le cycle de vie du produit pour	Team market: Vente, Client, Spécialiste, Gestion technique, Direction, team projet		DIRECTION
21					113	Positionner la demande au marché visé	- Cibler le segment de marché visé - Evaluer les compétences de la concurrence à répondre à ce marché	Déterminer dans quelle mesure les compétences de la concurrence répondent aux objectifs du client (Benchmarking)	Team market: Vente, Client, Spécialiste, Gestion technique, Direction, team projet		DIRECTION
46					12	Synthèse de la demande	Avoir un descriptif PROJET pour la revue de phase d'acceptation du projet ou du programme				
54					121	Identifier les technologies princ. Nécessaires à mettre en œuvre	Cerner globalement le principe général du produit	Identifier le (les) principe(s) général(aux) de fonctionnement du nouveau produit: type de machine, etc. (la gamme de transformation produit, Flux produit avec architecture)	Team projet: Vente, Approvisionnement, Montage/Essais, R&D mécat., élect., technologie.		DIRECTION
55					122	Identifier le domaine de la gamme de produits	Organiser la gamme de produits	Identifier le programme dans lequel s'inscrit le projet:	Team projet: Vente, Approvisionnement, Montage/Essais, R&D mécat., élect., technologie.		DIRECTION
66					123	Créer le descriptif du Projet	Avoir un descriptif PROJET pour la revue de phase d'acceptation du projet ou du programme / Identifier le groupe PROJET	Créer un descriptif du projet: Finaliser la formulation du but global du projet dans un dossier identifiant les caractéristiques du projet	Team projet: Vente, Approvisionnement, Montage/Essais, R&D mécat., élect., technologie.		DIRECTION

Tableau 4-3 Vue partielle du Tableau de bord de MSIC13

1	2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	2	N° tâche MSIC				Contenu selon MSIC - Phase / Tâche	BUT(S)	Travaux à réaliser	Ressources		
1	2							QUOI	QUI	DECIDEURS	
1	2					Déterminer et pondérer les objectifs Client	- Créer un CDC Marketing - Pouvoir accepter les objectifs du client - Pouvoir réaliser un premier tri des affaires - Pouvoir réaliser une revue de contrat				
80					131	Déterminer et pondérer les objectifs Client	- Cibler exactement le produit désiré identifié par les objectifs Client - Déterminer exactement les objectifs Client - Leur poids sur le produit - Leur positionnement par rapport à la concurrence	Déterminer et pondérer les OBJECTIFS CLIENT Identifier la typologie du client Déterminer les objectifs du client (des clients) sur le produit Pondérer et classer les objectifs du client Positionner des objectifs par rapport à la concurrence Déterminer les objectifs en maintenance Définir la suite à donner au projet Identification précise d'acteurs (acteurs)	Team market: Vente, Client, Spécialiste, Gestion technique, Direction, team projet		DIRECTION
81					1311	Identifier la typologie du client	- Avoir une image précise du client ou de son représentant - Connaître l'identité exacte d'acteurs « client »		Vente, Marketing, Client		DIRECTION
82					1312	Déterminer les objectifs externes (clients) - internes sur le produit à développer	Avoir une image précise des objectifs	Identification précise des objectifs: I, II, III niveaux. Faire une analyse situationnelle: - Formaliser le besoin exprimé par le client (les clients) - Faire une identification précise des objectifs du client - Identifier les objectifs du client, en s'appuyant sur une liste d'objectifs potentiels préalablement établie au sein de l'entreprise - En cas de nouveaux objectifs exprimés, tenir à jour cette liste pour augmenter la base de données de l'entreprise - Exprimer toutes les exigences y compris celles de maintenance SAV en matière d'entretien et de dépannage - Exprimer la flexibilité de chaque exigence client - Réviser le lay-out succéder non proportionnel - Exprimer les coûts investissement et les frais d'exploitation	Team market: Vente, Client, Spécialiste, Gestion technique, Direction, team projet		DIRECTION
92					1313	Pondérer et classer les objectifs : Client(s), produit existant et produits concurrence	- Déterminer l'importance de chaque objectif - Voir apparaître les objectifs importants désirés par le client		Team market: Vente, Client, Spécialiste, Gestion technique, Direction, team projet		DIRECTION
99					1314	Recherche flux transformations technologiques et tests					
103					1315	GTP - Organigramme Technique Produit					
104					1316	Classe Classification produit : A, B, C, D	Positionner le nouveau produit dans la gamme des produits de l'entreprise	1) Gamme de produits, famille de produits; Organiser le programme des produits en tenant compte du nouveau produit à concevoir ou à reconcevoir 2) Insérer le nouveau produit dans la famille de produits ou la gamme de produits			
105					132	Synthèse des cibles économiques	Créer une définition claire du projet et du programme prévu	3) Identifier le produit à un groupe de produit 1) Définir le programme dans lequel s'inscrit le nouveau produit 2) Rechercher les cibles économiques	Team market: Vente, Client, Spécialiste, Gestion technique, Direction, team projet		DIRECTION
107					1322	Valider les cibles économiques	Trouver la niche du produit sur le marché	5) Finaliser le CDC Marketing Identifier les cibles économiques visées par le produit et 6) Valider les cibles économiques visées par le produit			

Dans la Figure 4-6 est montré le répertoire dans lequel sont stockés les liens du Tableau de Bord. Chaque acteur peut consulter ce répertoire et retrouver facilement les informations qui concernent divers sujets comme : les nouvelles technologies, le positionnement sur le marché, la fiabilité, etc.

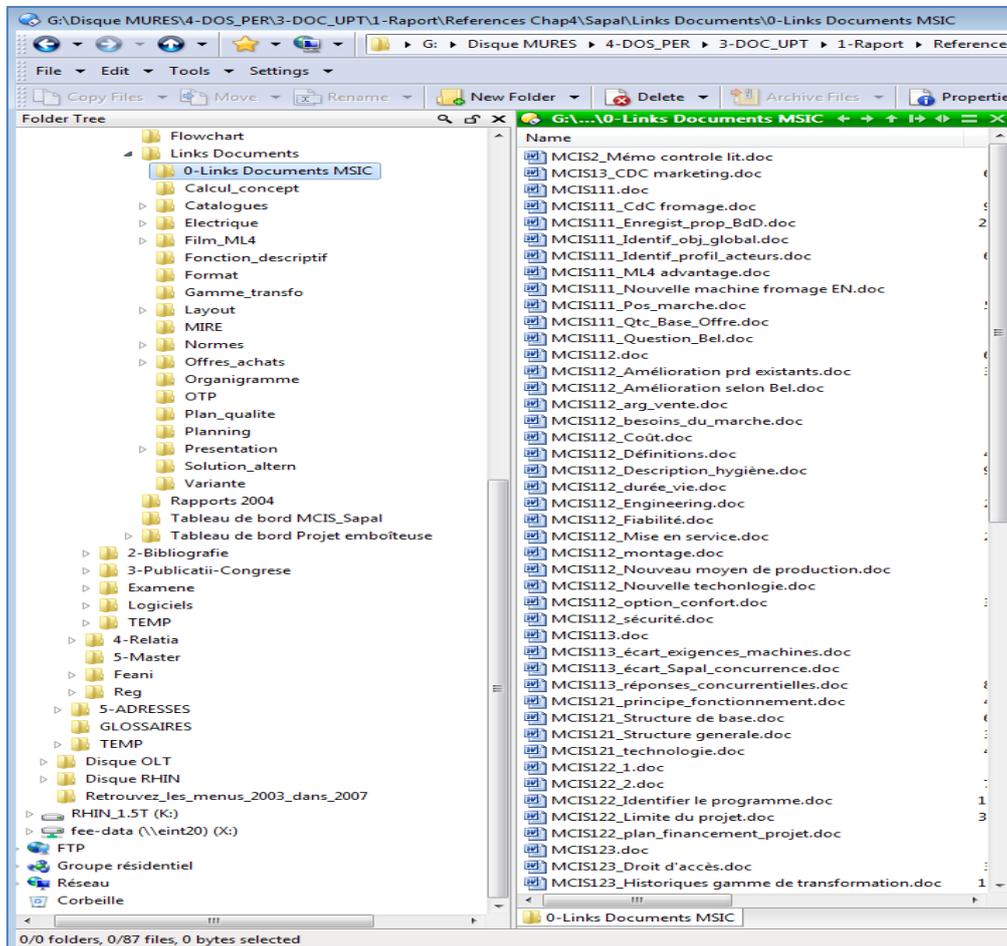


Figure 4-6 Gestion du Tableau de bord (répertoires et fichiers)

4.2.2 Analyse et synthèse des objectifs

A partir de l'étape MSIC1113 (Formaliser la proposition et confirmer son contenu), nous avons introduit l'outil « Plan qualité » (Figure 4-7), dans lequel nous avons commencé par déterminer les objectifs globaux des attentes (souhaits) probables et possibles du marché. La logique des séquences des onglets du fichier Plan qualité obéit à l'enchaînement des phases du cycle de vie défini dans la méthodologie MSIC. En même temps, en obéissant à la triangulation systémique (Figure 3-6), nous développons en combinant les trois vues : fonctionnelle, structurale et historique, d'une manière complémentaire. Ainsi :

- L'onglet Quest.-QUOI accompagne les activités de recueil, de tri, de classification et de pondération des besoins des clients durant le déroulement de la MSIC1 ;
- L'onglet Qualité Demandé – QUOI effectue la synthèse des besoins et

détermine la qualité cible relative et absolue ; c'est l'outil utilisé pendant MSIC1 et le début de MSIC2 ;

- L'onglet Pareto ABC Objectifs affiche graphiquement la synthèse des besoins.
- Les onglets Analyse Fonctionnelle, Structure (l'architecture du produit), Gamme de transformation (introduit la vue processus), AMDEC_FCT et Caractéristique Qualité-COMMENT sont utilisés pendant la MSIC2 durant l'analyse fonctionnelle du système et la définition du produit ;
- L'onglet Caract_TRIZ contient la matrice des contradictions et les principes ;
- L'onglet Matrice1 QUOI-COMMENT (utilisé pendant la MSIC2) concentre les activités d'analyse et de synthèse pour trouver les poids des interactions entre les QUOI (besoins) et COMMENT (fonctions) ; c'est l'outil qui fixe les caractéristiques du système et trace les directions de développement et d'industrialisation, tâches exécutées pendant la MSIC3.

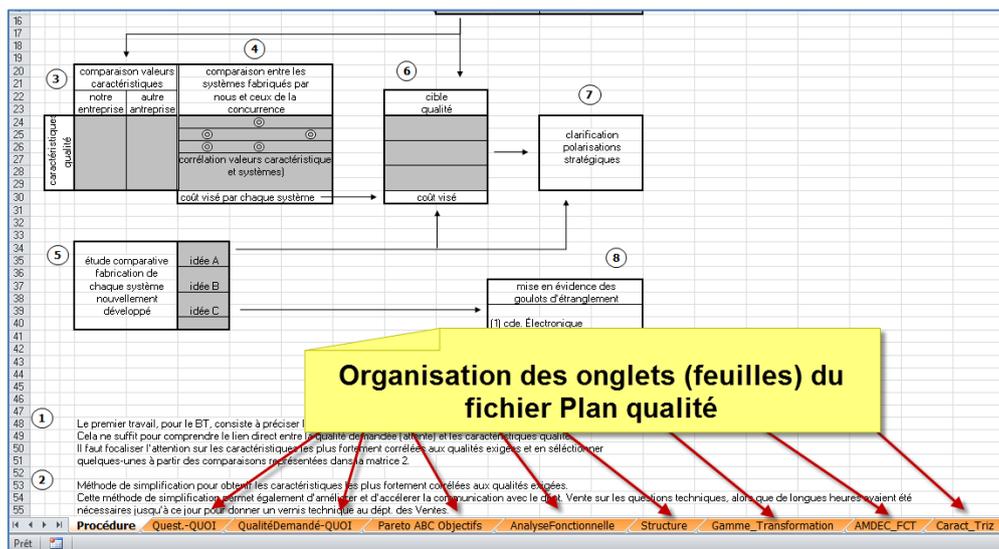


Figure 4-7 Vue générale des onglets (feuilles) du classeur Plan Qualité

Après le recueil des attentes du marché, nous avons ordonné les objectifs selon les classes ontologiques (conformément au chapitre 3.5.6) :

- Intensité capitalistique,
- Flexibilité,
- Productivité,
- Qualité.

Dans l'onglet « Quest.-QUOI » du classeur Plan qualité, les objectifs ont été décomposés en trois niveaux (Tableau 4-4 et Tableau 4-5) et pondérés selon les critères retenus pour cette première analyse : les poids de la décision d'achat et l'évaluation des produits concurrents (Tableau 4-6).

Tableau 4-4 Décomposition des classes ontologiques d'objectifs (vue partielle)

Critères de jugement du produit, ou Exigences qualité, ou Attentes des acteurs du produit, ou Besoins, ou Souhaits, ou BESOINS souhaités				degré d'importance donnée par les exigences Client (moy pondérée)
qualité demandée				
Niveau I	Niveau II	Niveau III		
Intensité capitalistique	Produit = machine de base (Prix de vente, coût/unités produites) Prix des options Délai de livraison Prix d'un nouveau format Prix des pcs pour un changement de forme Coût des pièces d'usure Frais d'exploitation	Opérateur Maintenance Mise en service		
	Frais d'installation sur site	Formation (faible besoin en formation)		6
	Surface usine (m2/unités produites)			3
Flexibilité	Souplesse de configuration des modules de production	Emboîteuse, OPP, rubans, intégrateur parfums, etc. Système de stockage pour refroidissement		1
	Fromage	Changement rapide de recette Tolérance à différents fromage		7
	Matériaux d'emballages	Tolérance à différents matériaux d'emballage		7
	Style d'Emballage	Possibilité multiparfums (4 parfums) Changement de format Changement de forme Différents systèmes d'ouverture de portion Éléments suppl. dans la boîte (bon,		3

Décomposition en 3 classes de besoins

Moyenne pondérée des exigences des clients

Tableau 4-5 Décomposition des classes d'objectifs (vue partielle, suite et fin)

Critères de jugement du produit, ou Exigences qualité, ou Attentes des acteurs du produit, ou Besoins, ou Souhaits, ou BESOINS souhaités				degré d'importance donnée par les exigences Client (moy pondérée)	
qualité demandée					
Niveau I	Niveau II	Niveau III			
Productivité	Rendement			6	
	Mesure et réglage des paramètres d'utilisation			9	
	Tracabilité, statistique de fonctionnement			5	
	Tolérance de la machine aux caractéristiques variable du fromage en cours de production			7	
	Matière première : (fromage et matériaux d'emballage)	Maintenance	Facilité du chargement		7
			durée de la charge		7
			Economie mat d'emballage		9
			Economie dosage fromage		3
			Gestion de l'arrêt de la machine		7
			Pas d'outils spéciaux (gabarits, clé,...)		5
			Accès facile		6
			Nettoyage rapide		8
			Préparation des formats ou option en temps caché		7
			Pas de graissage (autolubrification)		7
	Confort, ergonomie		Télemaintenance		9
Accès facile au flux (côté opérateur)				9	
Commande et surveillance simples				3	
Energie, consommation de fluides et vide		Design		3	
Qualité	Assurance de la qualité d'emballage produit primaire	Aspect du produit primaire		7	
		Etanchéité emballage		9	
	Dosage	Facilité d'ouverture		9	
		Précision du grammage		7	
	Tracabilité produit primaire	Qualité de la coulée (répartition du fromage)		8	
				7	
	Hygiène machine	Zone contrôlée		7	
		Facilité de nettoyage		7	
	Normes		Hygiène (normes FDA)		9
			Bruit (idéalement 78 dB(A))		7
Environnement (ISO 14'000)				1	
Sécurité (normes CE)				9	
	20'000 heures sans révision majeure			1	

Tableau 4-6 Critères de pondération des objectifs

Degré d'importance (poids, influence) de chaque critère (attente) dans la décision d'achat				Evaluation des produits concurrents		
influence				appréciation		
1=aucune; 3=mineure; 5=moyenne; 7=forte; 9=très forte				1=très mauvaise; 3=mauvaise; 5=moyenne; 7=bon; 9=très bon		
marché 1 (unitaire)	marché 2 (5 mach.	marché 3 (>10)	Moyenne pondérée des 3	Corazza	Kustner	ML4 +
1.0	1.5	0.5		FF220	Delta	coul.mecat

Pour le traitement des besoins (objectifs) nous avons opté pour l'en-tête de tableau suivant (Tableau 4-7), dans le but de calculer la qualité cible. La signification des colonnes est la même que celle décrite dans le chapitre 3.7.4.

Tableau 4-7 Pondération de la qualité cible

plan qualité											N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
degré d'importance donné par les exigences Client (moy pondérée)	analyse concurrentielle			planification				pondération												
	Produit actuel SAPAL ML4	autres		qualité cible planifiée	taux d'amélioration	polarisations stratégiques:	polarisations stratégiques	pondération absolue	pondération qualité demandée											
		Corazza	Kustner							d	f=e/b	g	h	i=a*f*h						
a	b	c	d	max(a,b,c)	f=e/b	g	h	i=a*f*h												
8	5	7	7	9	1.9	FO	9.0	140.0	4.62%											
9	3	3	3	10	3.3	FA	1.0	30.0	0.99%											
5	3	3	3	6	1.9	MO	5.0	44.1	1.45%											
7	3	3	5	8	2.8	FO	9.0	183.3	6.05%											

Le but de cette opération a été de rapporter les objectifs de l'entreprise aux besoins des utilisateurs des différents marchés et aussi à ceux de la concurrence. La synthèse des objectifs est présentée dans le Tableau 4-8, dans lequel on peut voir tout de suite l'importance des objectifs, grâce à la synthèse graphique (histogramme). Ce processus est itératif et consultatif, parce que les objectifs et leurs pondérations sont révisés et enrichis plusieurs fois par les acteurs de l'entreprise appartenant aux divers métiers. Les trois niveaux de décomposition arborescente (les colonnes Niveaux I, II et III) et la dernière colonne (Qualité demandée) seront importés automatiquement dans l'onglet « Matrice QUOI-COMMENT » dans la partie gauche de la matrice, grâce à une macro-commande. Dans le tableau ci-dessus les objectifs du produit sont triés selon une décomposition arborescente en classes. Dans l'onglet suivant les classes d'objectifs sont présentées selon une distribution Pareto. Nous avons ainsi déterminé que les deux premières classes (Productivité et Qualité) influencent la plus grande partie (plus de 66%) des objectifs.

: a) en ligne ; b) séquentielle ; c) à deux pistes ; d) en porte-à-faux.

Finalement le choix s'est porté sur la variante d) selon l'analyse du Tableau 4-9 :

Tableau 4-9 Machine en porte-à-faux

Principe	Avantages	Inconvénients
Machine dont les organes se trouvent en appui d'un seul côté	Séparation de la partie commande et passage produit Excellente accessibilité pour la maintenance et le nettoyage	Flexion des éléments en porte-à-faux

Conformément à la MSIC1213 nous avons élaboré un dossier des technologies potentiellement nécessaires retenues pour le projet.

Tableau 4-10 MSIC 121

	A	B	C	D	E	F	G	H
	N° tâche MSIC				Contenu selon MSIC - Phase / Tâche	BUT(S)	Travaux à réaliser	Activités correspondantes
	QUOI							
1								
2			121		Identifier les technologies principales.	- Identifier les technologies principales nécessaires à mettre en œuvre - Identifier globalement les principes généraux de...	1) Identifier le (les) principe(s) général(aux) de fonctionnement du nouveau produit : type de machine, etc. (la gamme de transformation produit, Flux produit avec architecture) a) Type de machine b) La gamme de transformation de produit c) Architecture: organigramme technique d) Structure : modules de base et les modules optionnels	
34								
37								
38							2) Identifier le besoin en nouvelle technologie Identifier le besoin en nouvelle technologie, les améliorations des produits existants, l'utilisation des moyens de production et des nouveaux matériaux. Identifier, en s'appuyant sur des idées d'innovation ou sur des objectifs : - Les améliorations à apporter sur le produit existants - L'utilisation de nouveaux moyens de production - L'utilisation de nouveaux matériaux	
39								
40								
41							3) Faire le dossier des technologies. Faire un dossier des technologies potentiellement nécessaires retenues pour le projet.	
42								

MSIC121 : Création de la Gamme de transformation et de l'OTP

Après avoir retenu la technologie de base de la machine, nous avons abordé l'analyse fonctionnelle en suivant les méthodes classiques mais aussi en rajoutant deux outils : la Gamme de transformation et l'Architecture (structure) de la machine ou l'Organigramme Technique de Produit (OTP). L'analyse fonctionnelle est présentée dans l'onglet Caractéristique de la Qualité (COMMENT) sous forme de synthèse des fonctions. Cette synthèse est présentée sous forme de tableau avec l'en-tête comme dans les figures ci-dessous (Tableau 4-11, Tableau 4-12 et Tableau 4-13). Nous présentons le résultat sans descendre dans les détails de l'analyse de chaque fonction (Tableau 4-14). Nous remarquons dans le Tableau 4-13 les deux dernières colonnes qui classent les fonctions en fonction des paramètres Classe de flexibilité et Importance relative. La Classe de flexibilité est surtout importante pour la recherche de compromis avec les sous-traitants à travers le paramètre Niveau de négociation : de flexibilité nulle (impératif) à flexibilité forte (très négociable). Ce

Tableau 4-14 Vue partielle de l'onglet Caractéristique de la qualité - COMMENT

MODULE FONCTIONNEL	CATEGORIE DE FONCTIONS	FONCTIONS ATTENDUES	PERFORMANCES ATTENDUES	CALCUL DE CONCEPT	DESSCRIPTIF MECANIQUE	DESSCRIPTIF ELECTRIQUE	PRECISIONS	QUANTIFICATION (COMBIEN) ou NIVEAU du CRITERE	CLASSE DE FLEXIBILITE (F)	HIERARCHISATION DES FONCTIONS (K) ou IMPORTANCE RELATIVE
Transport pas à pas	03	Maintenir la coquille dans alvéole	Plaquier les bords des coquilles contre les parois de l'alvéole		M_003.doc	E_003.doc	Garantir que la coquille reste engagée dans l'alvéole	F0	F0 : flexibilité - impératif F1 : flexibilité - négociable F2 : flexibilité - négociable F3 : flexibilité - négociable	1 - Utile 2 - Nécessaire 3 - Importante 4 - Très importante 5 - Vitale
	04	Transporter les coquilles	Transporter les coquilles pour opération de remplissage, pliage,assage et extraction	O04 Entraînement transferts.xls	M_004.doc	E_004.doc	Loi de mouvement évitant la vague. Résistance au lavage des alvéoles et des pompes: 30P à 50P sans déformation. Fréquence de lavage : tous les 2 jours. Matière recyclée = 0%	Pas =100 avec précision répétitive longitudinale et latérale +/-0,15mm.	F0	
	05	Régler hauteur coquille	Couvrir la plage de réglabilité selon la densité du fromage et pour format de 10g à (40g)		M_005.doc	E_005.doc	Delta de réglabilité +/-25 mm (à confirmer)	F0		
	06	Dévider bande de la bobine	Alimenter aluminium pour formation des couvercles pour portions de 6/6, 8/8, 12/12, rond, ovale, carré		M_006.doc	E_006.doc	Diamètre int.=76(standard) ou 55mm diamètre ext. =300mm. Pour format 12/12 revoir coupe et largeur. Couche thermosoudable à l'extérieur.	Position latérale +/-0,5 mm, réglage manuel	F0	
	07	Contrôler et signaler la présence bobine	Avertir l'opérateur de la fin ou manque bobine		M_007.doc	E_007.doc	Cellule	F1		
	08	Avancer bande	Alimenter aluminium pour formation des couvercles pour portions de 6/6, 8/8, 12/12 rond, ovale, carré		M_008.doc	E_008.doc	Avance de 23 à 70mm. Pour format 12/12 revoir coupe et largeur. Mouvement verrouillable	Longueur de découpe +/- 0.2	F0	
	09	Découper les couvercles	Découper les couvercles aux dimensions et formes	O09 Calcul surface couvercle.xls	M_009.doc	E_009.doc	Largeur découpe de 45 à 70mm pour 6/6,8/8. Pour format 12/12 revoir coupe et largeur. Mouvement verrouillable	Dimension +/-0,25mm sur la base de la portion	F0	
	010	Séparer les couvercles	Position selon l'entreaxe coquille	O10 pose couvercle.doc	M_010.doc	E_010.doc	Les 2 mouvement ont des courses différentes	125mm +/- 0,15	F2	
	011	Retourner les couvercles, valable	Dinger la pointe du couvercle vers la pointe de la coquille		M_011.doc	E_011.doc	Pas valable pour portion rectangulaire,	Position angulaire +/- 0,2 deg.	F0	

La quantification des fonctions et sous-fonctions de la colonne des COMBIEN servira comme base à la génération de la liste des spécifications techniques (Tableau 4-14).

4.2.3.1 Fiches de description fonctionnelle

Pour une meilleure description des fonctions et pour le partage de l'information (à partir d'une source commune et unique qui est la base des données techniques), nous avons introduit un formulaire décrivant les fonctions (Figure 4-9).

Ces fiches nous ont aidés à définir les tâches allouées aux ressources du bureau technique et nous ont aussi permis de piloter l'avancement des travaux et donc d'avoir une bonne précision de l'estimation du délai final.

Les fiches sont stockées dans un répertoire dédié sur le disque d'un serveur auquel ont accès seulement les utilisateurs ayant droit (Figure 4-10). C'est d'ailleurs la même organisation que celle appliquée à l'ensemble de la base des données techniques du système.

Fonction :	Mélanger le fromage fondu (Brasseur)		
Num.:	C11V010		
Description :	Un brasseur installé dans la cuve		
Hardware:	Moteur du brasseur		
Traitement :	Le brasseur tourne à une vitesse <u>déterminée</u> pour <u>homogénéiser</u> et <u>écrémer</u> le fromage fondu		
Mode(s) concerné(s) :	automatique, <u>cleaning</u>		
Initialisation :	Non nécessaire		
Synchronisation :	Pas de <u>synchronisation</u> avec d'autres éléments		
Modes d'arrêt :	Arrêt rapide : Stop <u>immédiat</u> lors d'un arrêt d'urgence Arrêt normal : Arrêt <u>doux</u> lors d'un arrêt normal		
Sécurité :	Vérifier la fermeture du couvercle avant de tourner le brasseur		
Heures :	Développement :	Préparation(15), software(16)	
	Schématique :	Préparation(4), CAO(8)	
		\Estim Heures & planing\Heures develop.xls	
<i>This documentation can change.</i>			
Created by:		Date:	7.11.2003
Modified by:		Date:	
			Version 1.0

Figure 4-9 Modèle du document de description d'une fonction

Name	Size	Type	Date
M_modèle.doc	36.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	13.11.
E_C06.doc	58.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C07.doc	57.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C08.doc	57.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C09.doc	57.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C10.doc	58 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C11.doc	57.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C13.doc	57.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C12.doc	57 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C14.doc	57 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C15.doc	58.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C17.doc	58 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C16.doc	58 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C18.doc	57 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C19.doc	59 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C20.doc	58 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
E_C21.doc	58 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	18.11.
M_F02.doc	37.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	03.02.
M_F03.doc	36.5 KB	Document Microsoft Word 97 - 2003	05.02.

Figure 4-10 Répertoire des fiches de description fonctionnelle

4.2.3.2 Architecture de la ligne de conditionnement

Le but de cette opération a été de définir les modules de base et les modules optionnels. La définition de la structure de la machine s'est effectuée en plusieurs étapes au fur et à la mesure de l'avancement dans la phase MSIC1. La structure générale possible a été construite à partir de l'analyse de la concurrence et du savoir-faire propres à l'entreprise (par rapport aussi aux produits anciens).

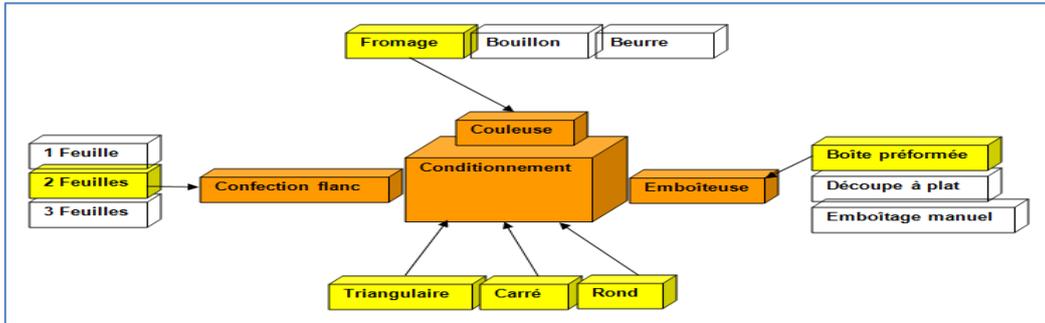


Figure 4-11 Structure générale possible de ligne de conditionnement

Dans la première étape (Figure 4-11), une structure possible et générale de la ligne de conditionnement a été esquissée. En utilisant une approche top-down, la structure initiale a été décomposée en sous-modules (Figure 4-12).

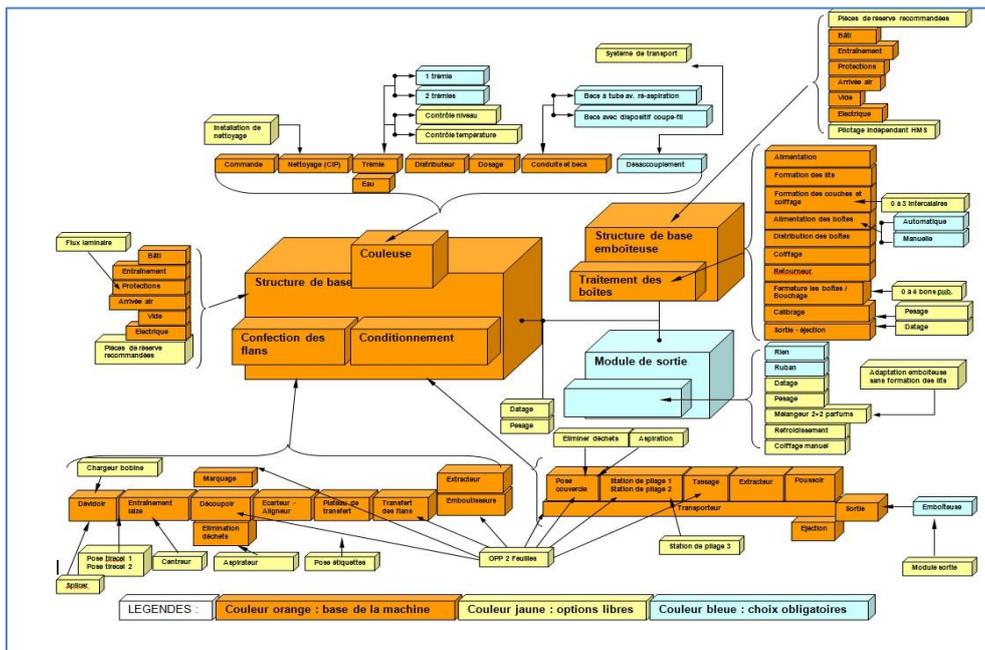


Figure 4-12 Structure (architecture) de la ligne de conditionnement

Dans la décomposition de la structure (Figure 4-13 et Figure 4-14), nous avons aussi intégré une vision à caractère fonctionnel, ce qui nous a aidés dans l'analyse fonctionnelle proprement dite présentée plus haut. Nous avons remarqué que seuls les outils consacrés comme FAST (qui est mieux adapté pour l'analyse des produits moins complexes), par exemple, ne suffisent pas à la définition d'un produit mécatronique d'une grande variété fonctionnelle.

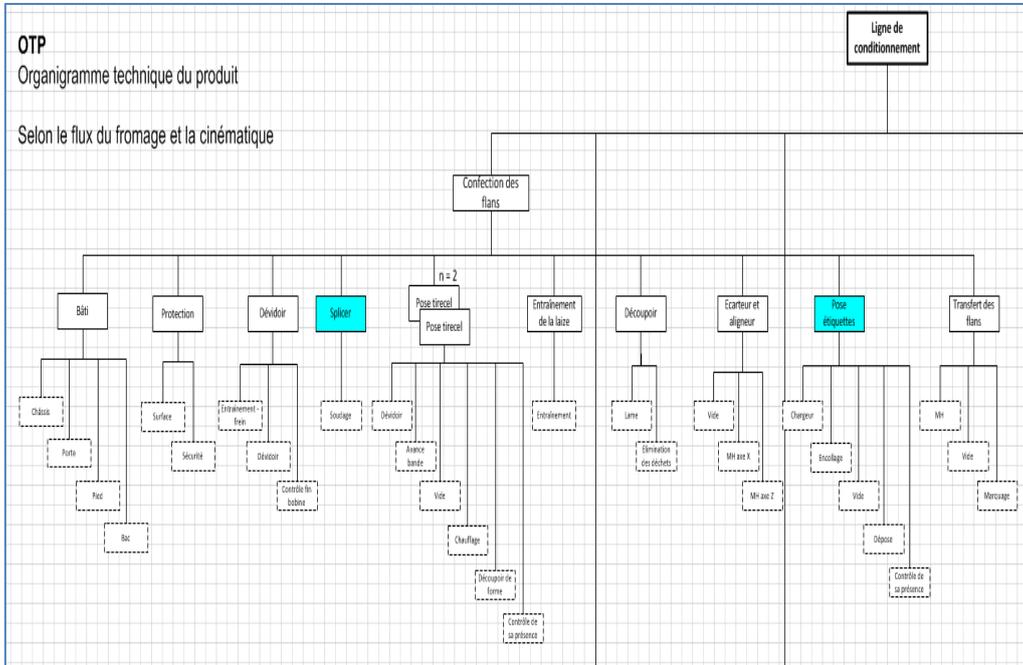


Figure 4-13 L'organigramme technique selon le flux principal et la cinématique

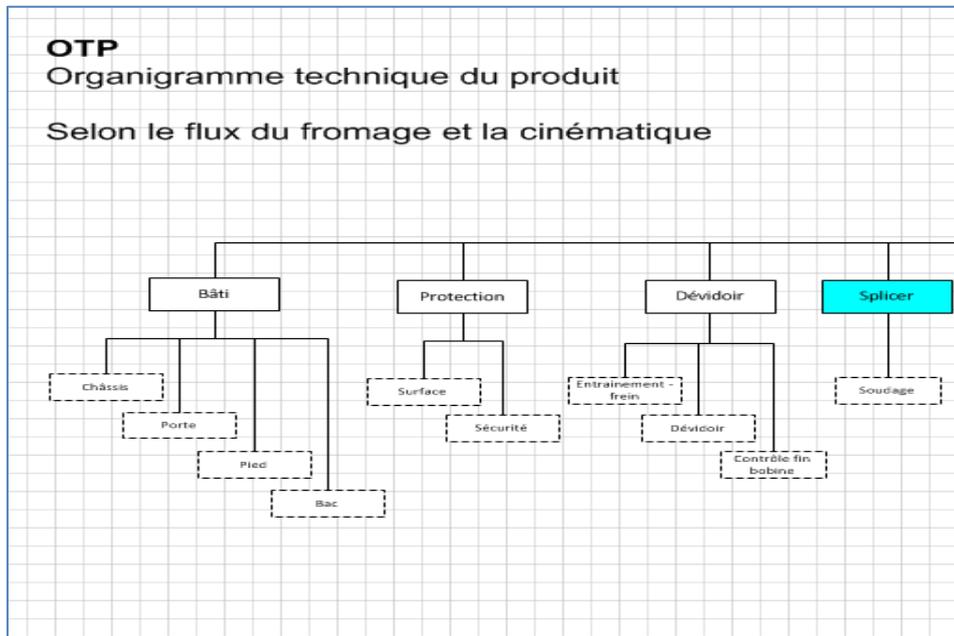


Figure 4-14 Vue de détail de l'organigramme technique du produit - OTP

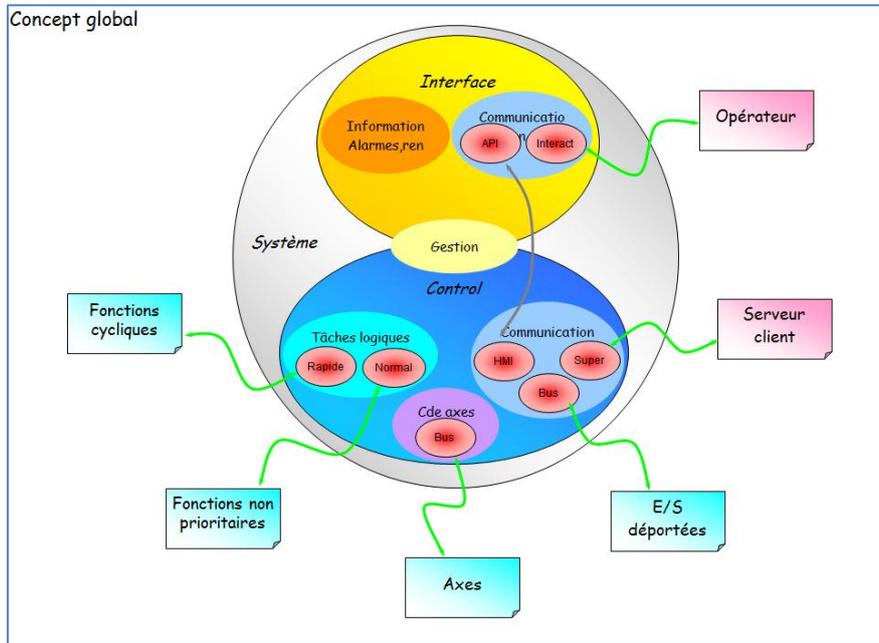


Figure 4-15 Vision systémique de l'architecture de la partie électrique

La vision systémique est également beaucoup utilisée dans l'établissement du concept global de l'architecture de la partie électrique (Figure 4-15).

4.2.3.3 Gamme de transformation

C'est le deuxième outil qui participe à l'analyse fonctionnelle, en plus de l'organigramme OTP. La gamme de transformation est un aperçu graphique des actions de transformation du produit primaire. Dans la suite des transformations du produit primaire sont incluses également : l'étude des interfaces et la définition des actions de contrôle et leurs positionnements dans le flux de transformations.

Nous avons commencé par identifier les formats prévus (Figure 4-16) de conditionnement du fromage et avons par la suite remonté le fil des transformations pour finalement établir la gamme de transformation.

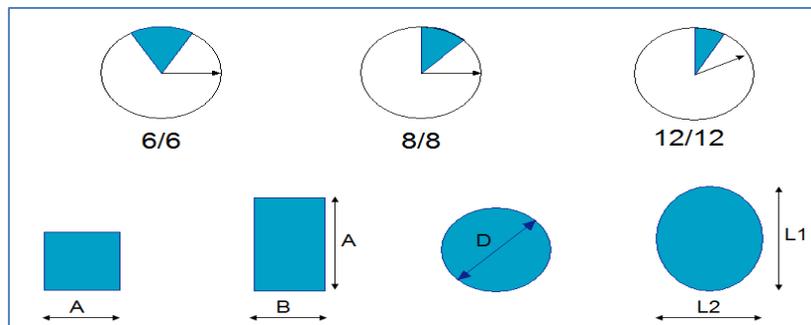


Figure 4-16 Les formats prévus de conditionnement du fromage fondu

La démarche utilisée a d'abord été l'étude par analogie de l'ancien produit de la société (Figure 4-17), en mettant en évidence les faiblesses et les points à optimiser.

Ensuite, l'étude a atteint un niveau plus abstrait, elle est devenue plus conceptuelle en essayant de mettre en évidence le groupement des actions de transformation du produit primaire. En même temps, nous avons voulu éliminer les analogies, dans le domaine physique, avec les produits existants, pour avoir plus de liberté dans le processus de création de la nouvelle gamme de transformation (Figure 4-18 et Figure 4-19). Dans la phase suivante, après la construction de la Gamme de transformations, les étapes (actions) de transformation sont facilement transformées en fonctions. Nous mentionnons aussi que plusieurs versions de la Gamme de transformation ont été étudiées et rapportées aux besoins (objectifs) du produit primaire, avant de figer la version finale.

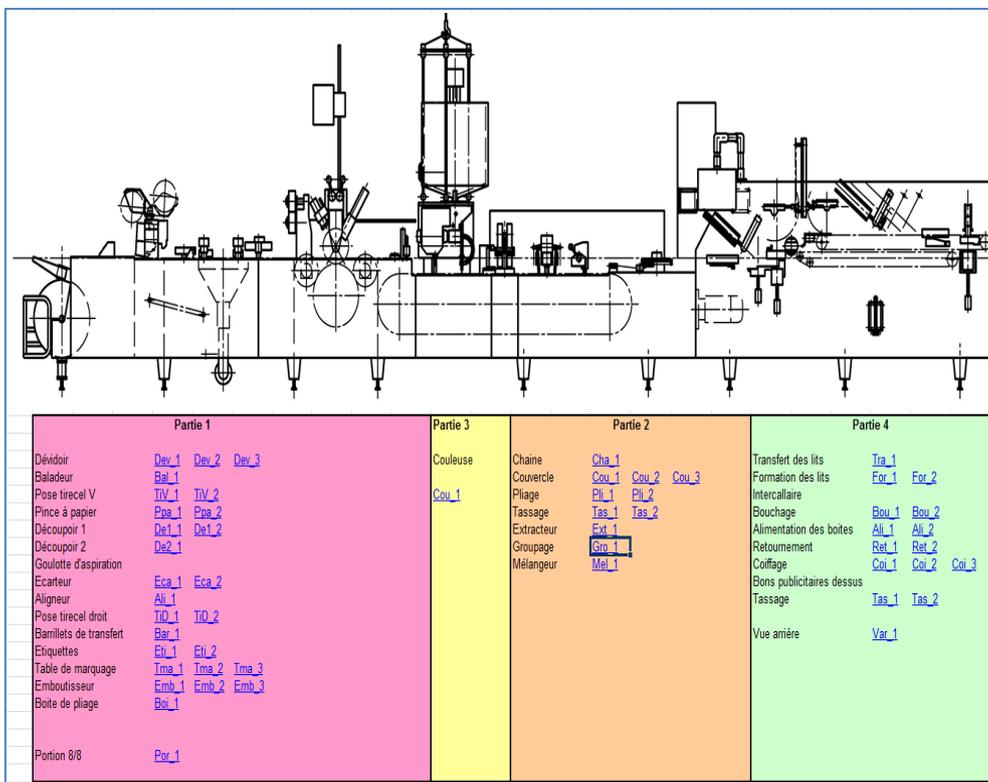


Figure 4-17 La première phase de l'étude de la gamme de transformation

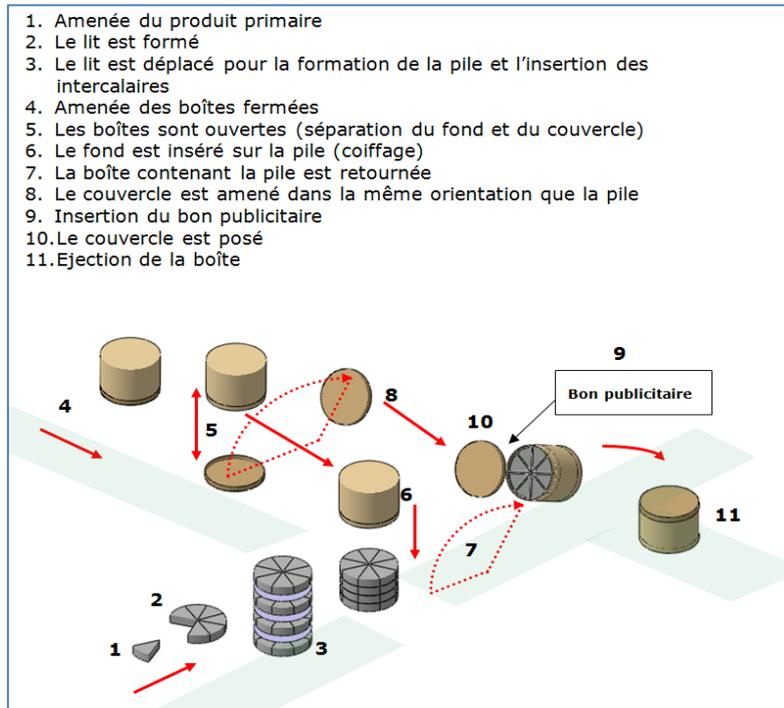


Figure 4-18 Gamme de transformation générale de l'emboîteuse (11 étapes)

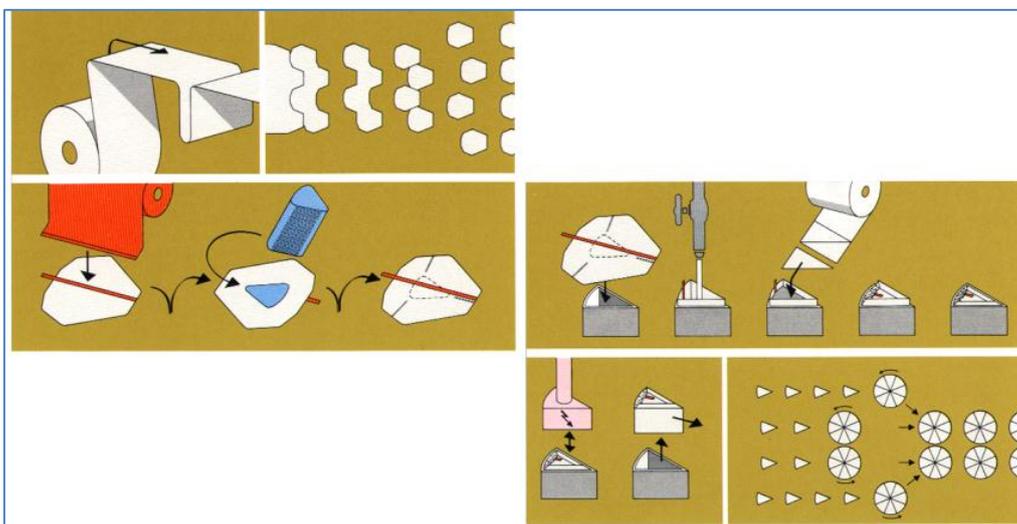


Figure 4-19 La gamme de transformation finale du produit primaire

Le lien entre l'analyse fonctionnelle et la gamme de transformation est illustré dans la Figure 4-20 et dans la Figure 4-21, où nous pouvons voir la topologie des fonctions au long du processus (de la gamme de transformation).

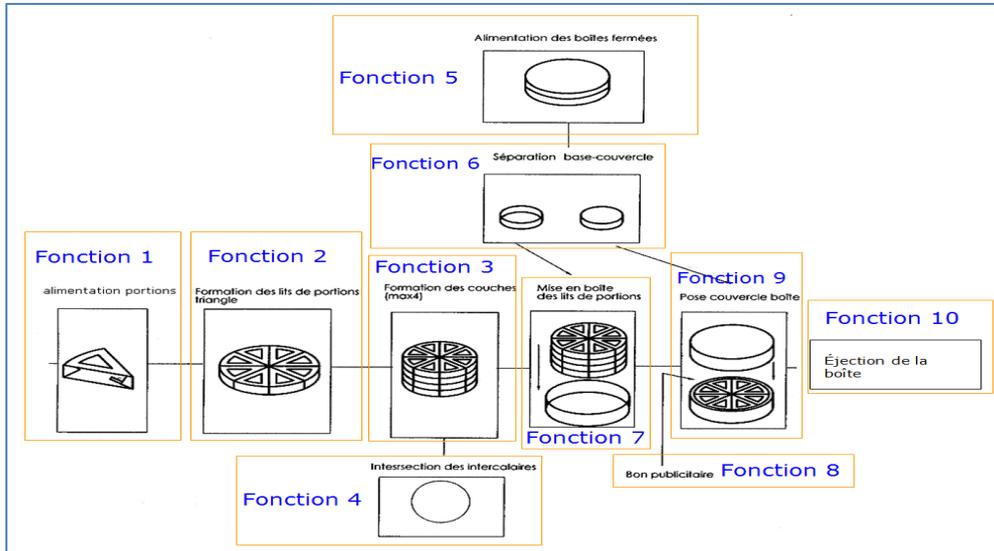


Figure 4-20 Fonctions de l'emboîteuse

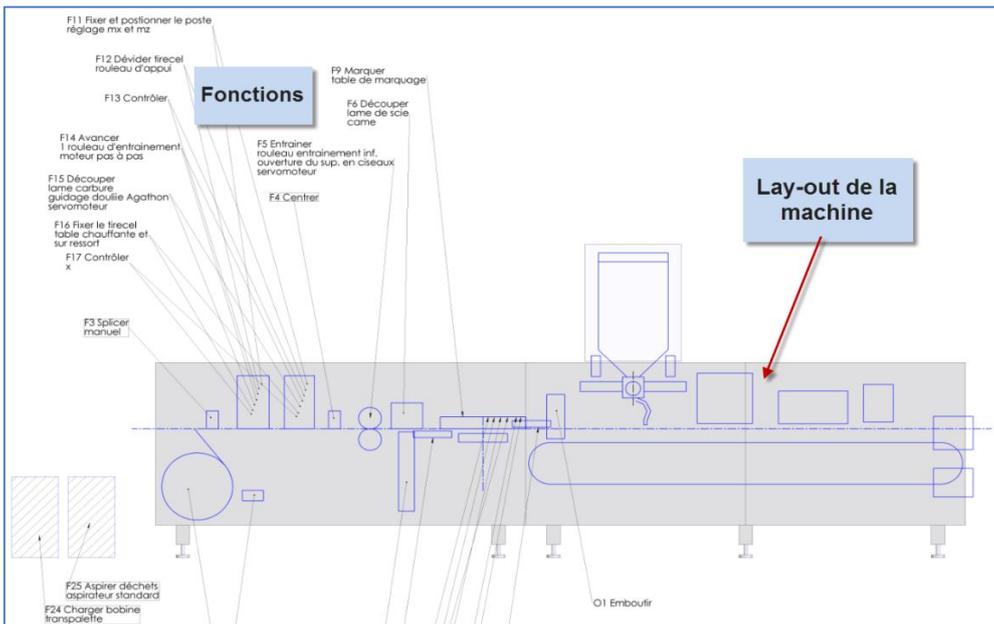


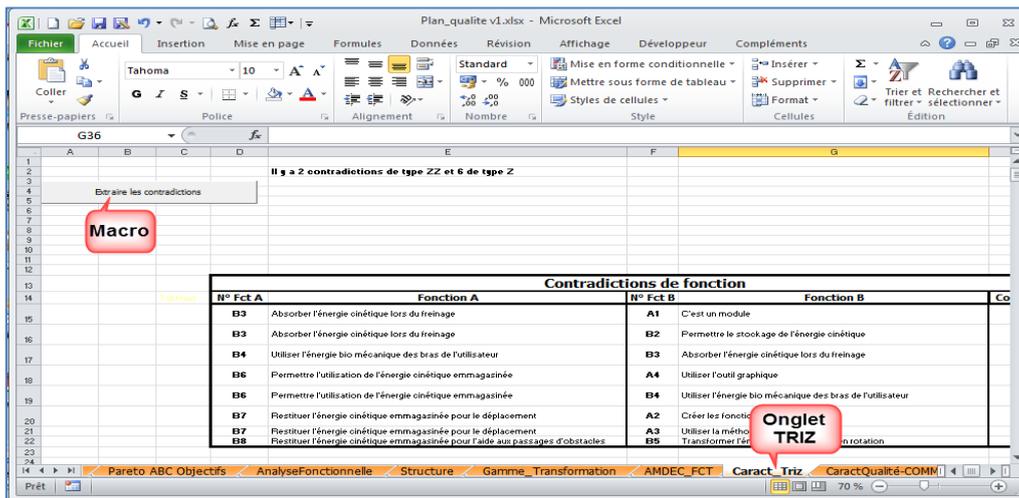
Figure 4-21 Synthèse confection des flans

4.2.3.4 L'analyse TRIZ

Comme enchaînement logique après l'analyse fonctionnelle et après avoir identifié les contradictions les plus pénalisantes pour notre artéfact, nous avons pu effectuer une analyse de type TRIZ pour esquisser les futurs champs de solutions. Dans cette étape, nous en sommes seulement restés au niveau d'esquisse de

solutions, privilégiant plusieurs variantes avant de faire le choix final dans la phase MSIC3 « Développement et Industrialisation ». Dans le fichier Excel nous avons créé la base de données TRIZ avec la matrice et les principes de résolution.

Tableau 4-15 L'onglet « Caract_TRIZ »



En appliquant une résolution de type TRIZ au problème posé par le manque de fiabilité de la chaîne de transfert (Figure 4-22), nous avons trouvé une nouvelle solution (compromis entre la souplesse et la rigidité), plus fiable et plus économique.

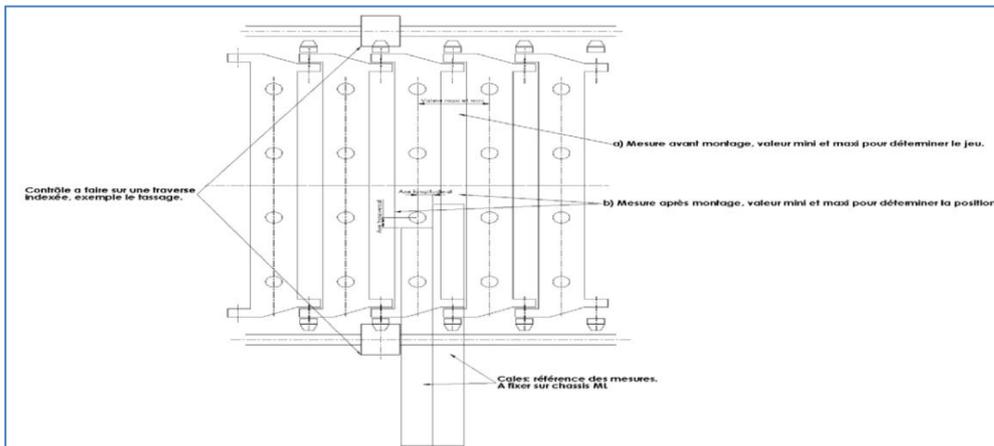


Figure 4-22 Vue partielle de chaîne métallique de transfert

4.2.4 Recherche des priorités des efforts

Le besoin de traduire les besoins des clients en caractéristiques qualité se concrétise dans la construction de la matrice qualité. Celle-ci est l'instrument

graphique qui a comme finalité de développer de manière rigoureuse la qualité en conception. La construction de la qualité en conception est l'ensemble du procédé qui consiste à convertir la qualité que demande le client (les caractéristiques réelles) en caractéristiques analogues, dans le langage de l'entreprise, grâce au raisonnement, à la « traduction » et au « transfert ». Nous identifions ces travaux à réaliser (dans le cadre de notre méthodologie) comme faisant partie de l'étape MSIC2111 (Tableau 4-16). Ce travail a toujours un caractère itératif par la consultation des divers métiers et par le contrôle permanent effectué sur l'adéquation des fonctions et des besoins des clients.

Tableau 4-16 Identification de la tâche « Recherche des priorités des efforts »

N° tâche MCIS	Contenu selon MCIS - Phase /	BUT(S)	Travaux à réaliser	Ressources	Activités correspondantes	Responsable	Documents
2111	Identifier les fonctions à un type de produit	1) Trouver les relations entre objectifs et fonctions 2) Faciliter l'orientation du produit dans la phase ultérieure de synthèse du produit 3) Attacher le maximum d'objectifs client à un minimum de fonctions sur le produit	QUOI 1) Classer et qualifier les informations provenant du CDC marketing 2) Identifier des fonctions par rapport aux objectifs définis et par groupes 3) Créer un schéma des modules (unités) fonctionnels et de leurs relations selon un concept des boîtes noires 4) Lay-out général proportionnel avec la somme des unités fonctionnelles nécessaires (voir MCIS 2112) 5) Déterminer l'importance de chaque unité fonctionnelle 6) Comparer le résultat de la pondération avec un masque qui met en évidence le savoir-faire de l'entreprise 7) Qualifier les nouvelles fonctions	QUI Team projet: Vente, Approvisionnement, Montage/Essais, R&D, mécatronique, technologie, Spécialiste	COMMENT Tableau croisé entre les objectifs client et les fonctions attendues	Avert, Bänninger, Kohler, Sona	Plan_qualite
2112	Identifier le principe technologique et le process du produit à développer	Déterminer un principe technologique parmi ceux disponibles	1) Réaliser les spécifications PRODUIT 2) Classer et pondérer les unités fonctionnelles 3) Dissocier les unités fonctionnelles par groupes correspondant à un type de produit connu de l'entreprise 4) Qualifier les unités fonctionnelles 5) Fixer le principe technologique 5) Layout général proportionnel qui contient l'ensemble des modules nécessaires 6) Design fonctionnel	Team projet: Vente, Approvisionnement, Montage/Essais, R&D, mécatronique, technologie, Spécialiste		Avert, Bänninger, Kohler, Sona	MCIS2112_Variantes_des_fonctions

4.2.4.1 Construction de la matrice QUOI-COMMENT (besoins-fonctions)

La matrice besoins-fonctions (ou matrice de la qualité) a été adaptée selon la méthodologie MSIC dans le but de fournir au bureau d'études la « Priorité des efforts » (Tableau 4-17), c'est-à-dire la quantification des « Caractéristiques de la qualité » (Tableau 4-18) en fonction de critères comme:

- Le Poids relatif des « COMMENT »,
- La Maitrise de la fonction,
- Le Type de fonction, et
- Le Coût estimé.

Nous pouvons introduire d'avantage de critères pour pondérer encore plus finement les caractéristiques de la qualité. Pour les objectifs de notre projet nous avons considéré comme suffisant le niveau des critères pris en compte, parce qu'il reflétait assez bien la réalité du système.

Tableau 4-17 Matrice de la qualité (vue générale)

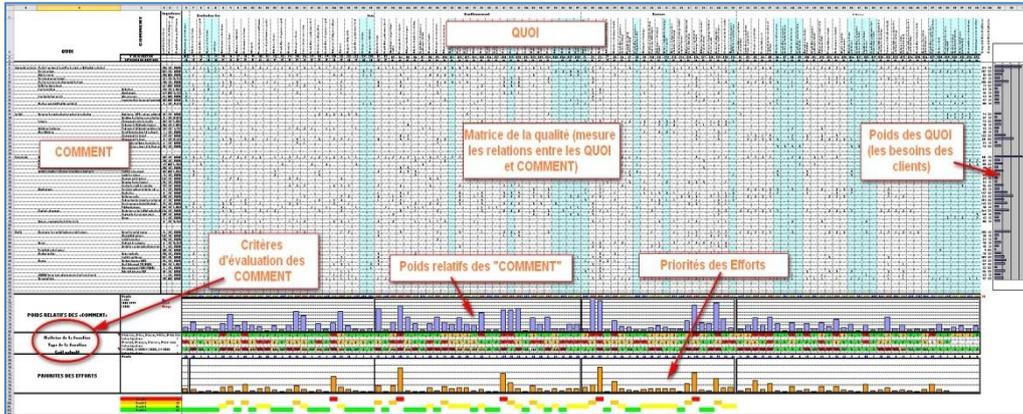
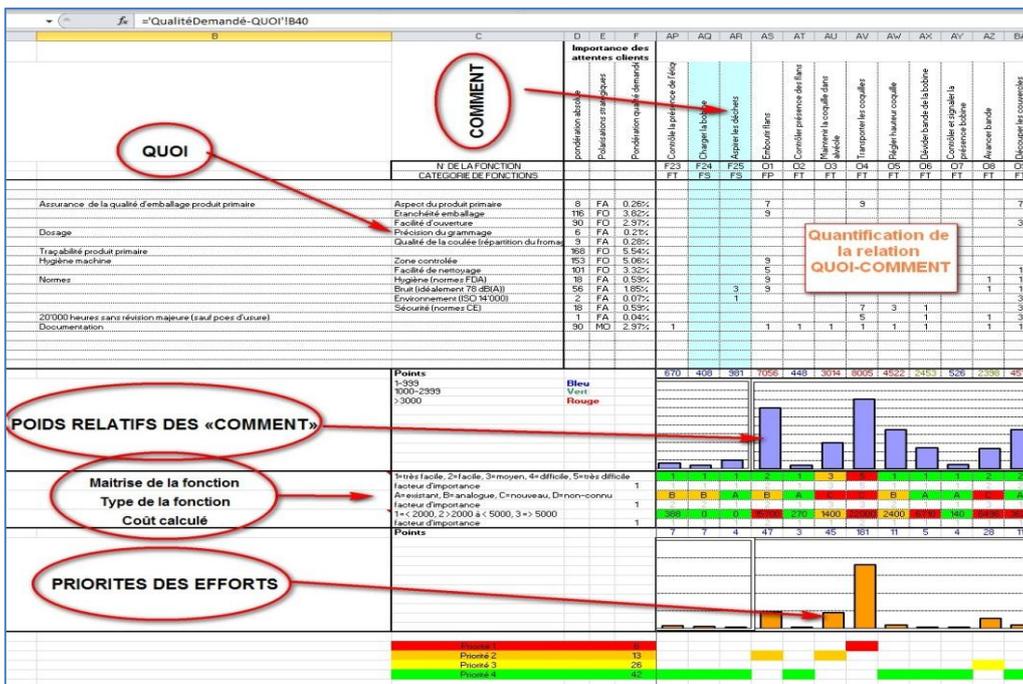


Tableau 4-18 Matrice de la qualité (vue de détail)



Nous citons quelques avantages qui résultent de l'utilisation de la Matrice globale de la qualité :

- Fourni une bonne synthèse (« accord » parfait entre les besoins et les fonctions) entre les QUOI et les COMMENT, une excellente cohérence entre les Cahiers de charges de marketing, de définition du produit et de développement et industrialisation ;
- Indique les stratégies pour la conception conceptuelle et de détail ;

- Couvre toute la famille de produits ; des modifications mineures peuvent être introduites dans la matrice globale pour tenir compte des différences entre les produits ; il en résulte un gain de temps considérable même si l'établissement de la matrice qualité prend déjà beaucoup de temps ;
- Intègre tous les métiers et les informations du cycle de vie dans la définition du produit.

4.2.4.2 Matrice de validation

Cet onglet (Tableau 4-19) permet, dans une perspective générale PLM, de suivre l'avancement des travaux de définition du produit (MSIC2-Définition produit). Grâce à la disposition sous forme de matrice, nous pouvons avoir une vue synthétique de l'avancement des travaux concernant les modules fonctionnels de la machine par rapport aux types de validations suivants : constructive, cinématique, dynamique, essais, coûts, etc. De plus, nous avons pu mesurer l'avancement de l'établissement de la documentation concernant : les descriptifs mécaniques, électriques, pneumatiques, etc.

Tableau 4-19 Matrice de validation (vue partielle)

Validation		Éléments généraux de la machine												
Notation: 5 => 90-100% de valid. 3 => 30-80% de valid. 1 => 0-20% de valid. 0 => pas commencé si la réponse est FAIT => 5 si la réponse est PAS FAIT => 0		Porter et fixer la mécanique et l'électrique	Protéger les zones dangereuses	Insonoriser la machine	Entraîner (partie commune)	Manipuler la machine	Contrôler la machine	Paramétrer les fonctions	Communiquer avec machine	Flux laminaire	Créer le vide	Production de l'air comprimé	Mesures statistique	Dépannage à distance
N° de la fonction		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
Catégorie de la fonction		FT	FC	FC	FT	FS	FT	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS
Phase 2	Validation Constructive (faisabilité mécanique, encombrement)	5	3	5	3	5	1	1	1	1	5	5	1	1
	Validation Cinématique		1		3									
	Validation Dynamique	5			1									
	Validation par essais								5					
Descriptif élect.. SAPAL-MCIS		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Descriptif méc. SAPAL-MCIS		3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Développement		3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Validation des coûts		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Revue de construction		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Contrôle Cinématique (mvt défini, contrôle croisement)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Contrôle Dynamique		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Finalisation de l'étude		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Validation des heures méc.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Validation des heures électr.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schémas électrique		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schémas pneumatique		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nomenclature		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ensembles 2D		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Documentation, instructions		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETAT DE LA VALIDATION DE LA PHASE 2 (%)		100.0	40.0	100.0	33.3	100.0	20.0	20.0	80.0	20.0	100.0	100.0	20.0	20.0
ETAT D'AVANCEMENT DE LA PHASE 3 (%)		8.8	6.3	2.5	3.8	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Moyenne phase2		68.6												
Moyenne phase3		4.4												

4.2.4.3 Matrice « Suivi du développement »

La matrice « Suivi du développement » couvre les activités qui débutent déjà à la fin de la phase « MSIC2-Définition du produit » et continuent pendant toute la phase « MSIC3-Développement et Industrialisation ».

Tableau 4-20 Matrice « Suivi du développement » (vue partielle)

Configurations			Éléments généraux de la machine																					
Fonctions			Porter et fixer mécaniquement et l'électrique			Concept pneumatique et vide			Protéger les zones dangereuses		Insonoriser la machine		Entrainer (partie commune)		Manipuler la machine		Contrôler la machine		Paramétrer les fonctions		Communiquer avec machine		Flux laminaire	
N de la fonction			M1	M1a	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8
Composants			Sous-fonctions	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis
Jalons (Planification étapes importantes)			Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis	Bâtir le châssis
Etats dev. méc.			Développer	Interpack 05 et machine pour client	Projet pilote avec (embouteuse)	Futur 1er priorité	Futur 2ème priorité	Futur 3ème priorité																

Les lignes de la matrice représentent les jalons les plus importants du projet et les colonnes sont constituées par les fonctions et les sous-fonctions à partir desquelles est configurée de la machine.

4.2.4.4 AMDEC

Nous avons utilisé une AMDEC de type allégée (Tableau 4-21) car nous avons voulu détecter très tôt les faiblesses importantes de notre artéfact, sans beaucoup investir en temps et en ressources. Elle a été couplée à l'AF et à TRIZ.

Tableau 4-21 Onglet AMDEC

Fonctions			Probabilité de la défaillance "A"	Gravité des conséquences "B"	Probabilité de non-détection "C"	Criticité = AxBxC
N°	Car.					
C'est un module						
	A1	MO	4	1	7	
	A2	FT				
	A3	FT	4	4	1	
	A4	FT	1	1	1	
Exemple de fonction						
	B1	FP				
	B2	FT				
	B3	FT				
	B4	FC				
	B5	FT	1	4	1	
	B6	FT				
	B7	FT				
	B8	FS				

4.2.5 Tests et essais

Effectuer des tests et des essais représente certainement des activités parfois lourdes et coûteuses, et si les résultats ne sont pas au niveau des attentes, alors les conséquences en termes de délais et de coûts mettent en péril l'existence même de la société. Donc nous avons réparti avec beaucoup d'attention les activités de tests et essais tout au long du cycle de vie du produit et avons recommandé leurs utilisations avec précaution. Bien-entendu, la place de ces activités dans le cadre de la MSIC n'est pas figée mais constitue plutôt des repères dans le cycle de vie. Nous avons introduit, une première fois, ces activités dans l'étape « MSIC 136 - Recherche flux transformations technologiques et tests » et ensuite dans :

- MSIC213 - Test, essais préliminaires du principe technologique ;
- MSIC241 - Essais préliminaires au niveau produit ;
- MSIC3119 - Essais finaux au niveau GROUPE ;
- MSIC3126 - Réaliser la faisabilité de tests sur le GROUPE ;
- MSIC3136 - Dessins de contrôle, tests, spécifications techniques, etc. ;
- MSIC331 - Tests finaux et certification.

Tableau 4-22 MSIC213 Test, essais préliminaires du principe technologique

N° tâche MSIC	Contenu selon MSIC - Phase / Tâche	Ressources	Activités Docu correspondants	Responsable	Documents	
213	Test, essais préliminaires du principe technologique	Team projet: Vente, Approvisionnement, Montage/Essais R&D méc., élect., technologie, Spécialiste	Core Team	Came sans lubrification	Pasche	Cahier de charges Procédures de tests Certificat d'Homologation Certificat Qualification
				Dynamique du fluide dans les godets de la chaîne	Pasche	
				Essais de cames avec contact sans lubrifiant externe	Pasche	
				Cahier de charge pour valider le transport des godets par bande métallique et après analyse voir de l'utilité d'avoir un appareil d'essais	Avert	
				Formation et documentation concernant le CIP	Kohler	

A chaque activité de test nous avons associé les documents (qui constituent aussi les livrables) qui contiennent les informations techniques concernant les Cahier de charges, les procédures, les conditions d'homologation et les certifications (Tableau 4-22).

4.2.6 Recherche des solutions

Pour la recherche des solutions (couplé à TRIZ) nous avons utilisé l'analyse fonctionnelle (AF), la gamme de transformation et l'organigramme technique de produit (OTP). Nous ne mentionnerons pas ici les outils nécessaires, par exemple pour le calcul.

4.2.6.1 Solutions alternatives

Les activités de recherche de solutions alternatives débutent à la MSIC2212 « Solutions alternatives au niveau PRODUIT ». Elles continuent dans la phase MSIC3 « Développement et Industrialisation » avec les travaux de faisabilité : MSIC3112 « Solutions Alternatives au niveau GROUPE ». Nous remarquons l'enchaînement des deux démarches : de type convergente (niveau produit) dans la MSIC2 et, ensuite, divergente (niveau groupe) dans la MSIC3. Les livrables de ces activités sont :

- Dossier solutions alternatives,
- Dossiers normalisations et standardisations,
- Dossier des choix de variante,
- Dossier appareils d'essais,
- Dossiers des récapitulatifs des offres.

Selon notre approche, la recherche de solutions et le choix de la meilleure variante ont occupé une grande partie du travail du bureau technique. Nous montrons plus bas (Figure 4-23 et Figure 4-24) les variantes constructives de la fonction « Fixer le tirecel sur le flan » et l'étude dynamique qui les accompagne. Finalement, le choix s'est porté sur un type de servomoteur qui correspondait le mieux à la définition de la fonction.

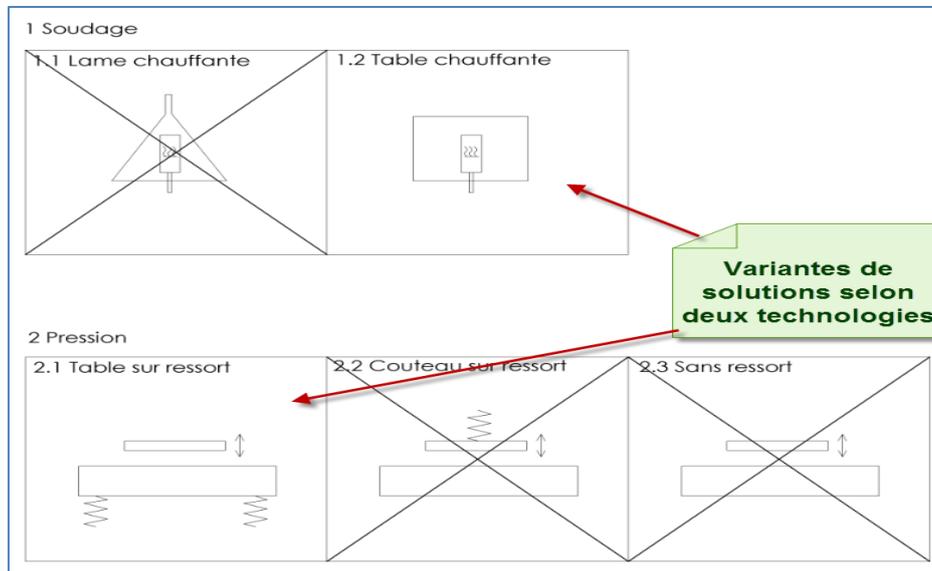


Figure 4-23 La fonction « Fixer le tirecel sur le flan »

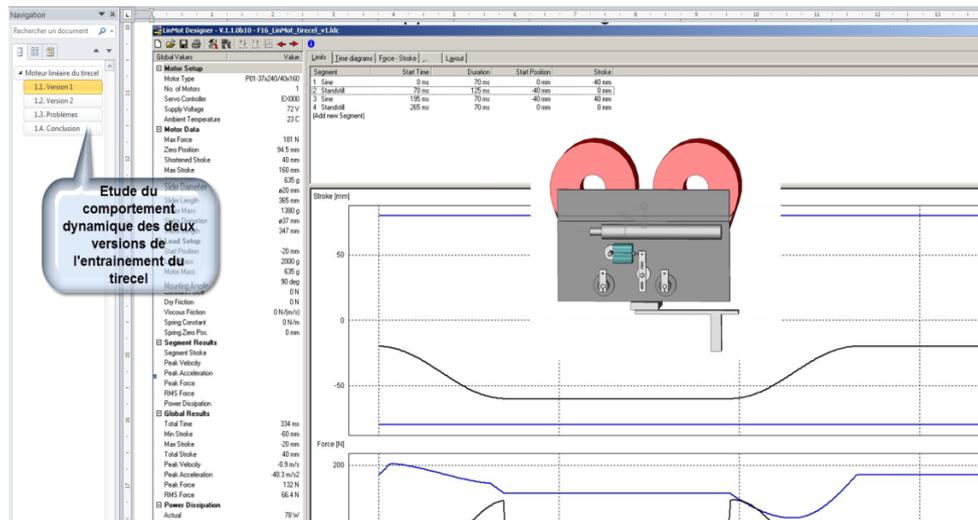


Figure 4-24 Étude du moteur linéaire du tirecel

4.2.6.2 Design

La recherche fonctionnelle a été accompagnée, surtout dans les phases MSIC1 et MSIC2, par une équipe de « design », à l'extérieur de la société, qui a cherché à trouver la bonne forme qui correspondrait au mieux au contenu technique du système. La recherche des formes esthétiquement correctes s'est manifestée autant pour l'ensemble de la machine que pour les ensembles de composants visibles pour les opérateurs (Figure 4-25, Figure 4-26 et Figure 4-27).

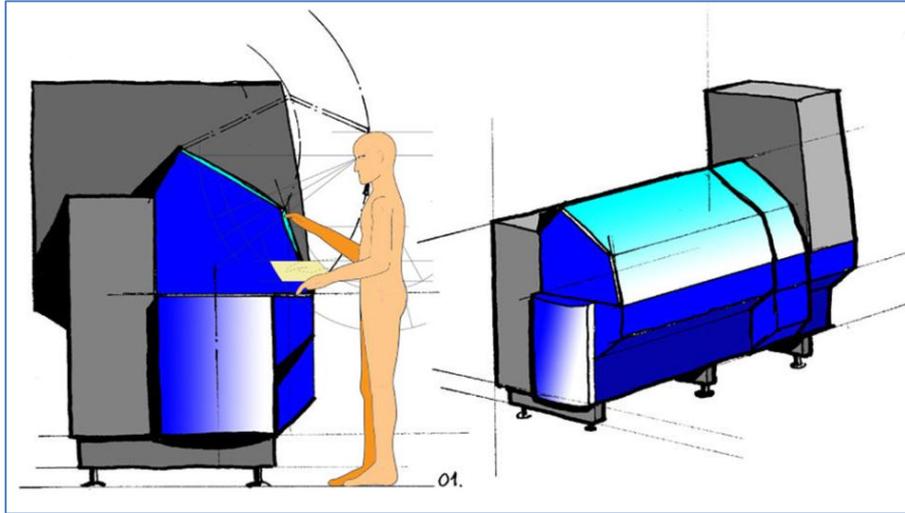


Figure 4-25 Esquisses variante 01

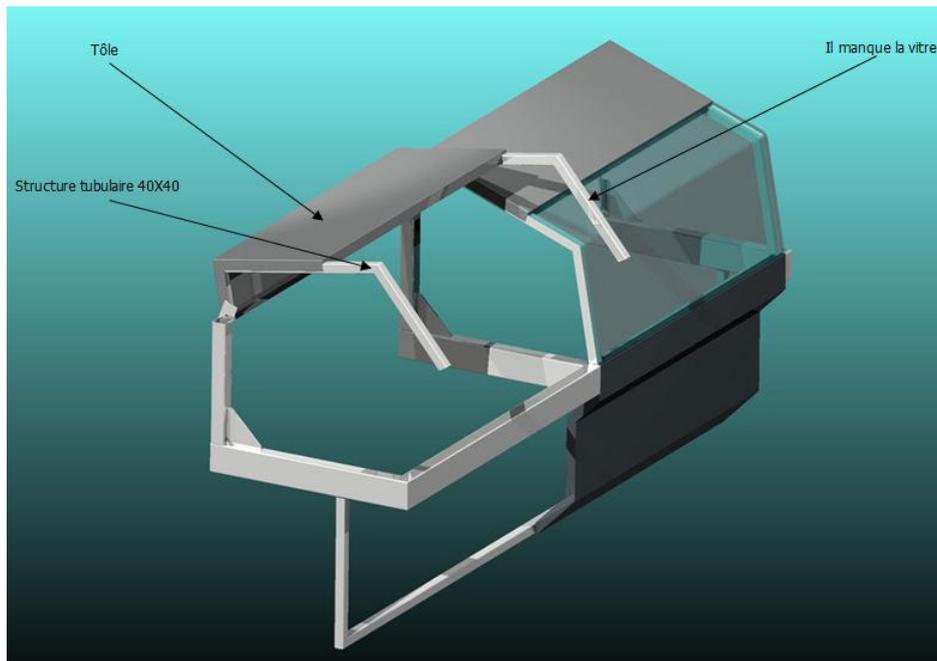


Figure 4-26 Éléments technologiques et de « design »

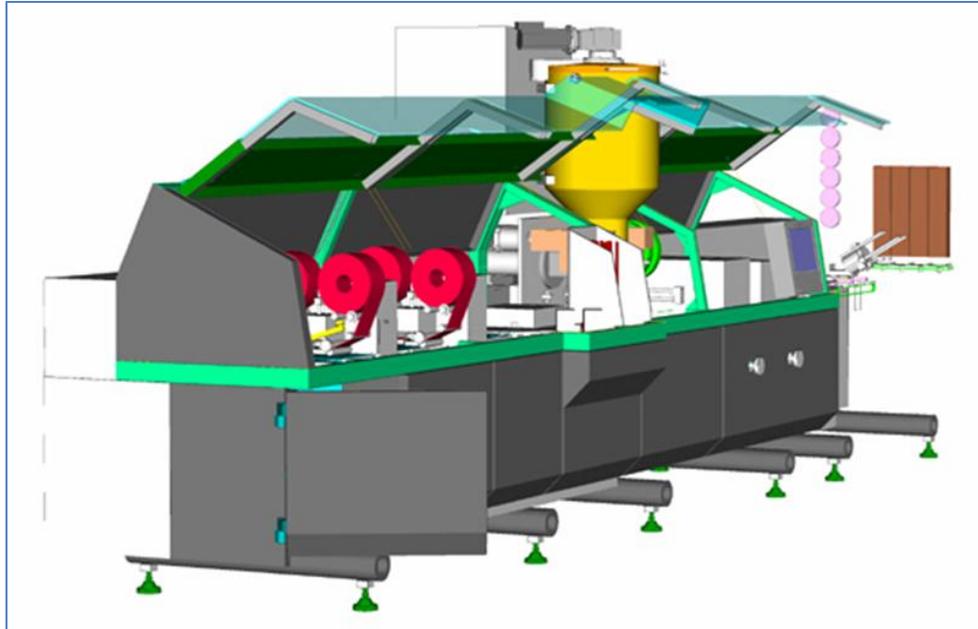


Figure 4-27 Concept « design » final avec les protections ouvertes

4.3 Calcul des coûts

A l'intérieur de la méthodologie utilisée nous avons appliqué des outils tels que *Design for X*⁴⁷ (Pahl et al, 2007) pour la conception (où $X = \text{Short Time to market, Assembly, Manufacturability, Reliability, Test, Safety, Quality, Minimum Risk, Logistics, Environment, Ergonomics, Aesthetics, etc.}$). Ces outils nous ont permis d'intégrer très tôt, dans la définition du produit, les informations provenant des phases en aval du cycle de vie. Pour certains paramètres stratégiques en terme de compétitivité (masse, coûts, temps de développement), nous avons utilisé les règles de *Design to cost*⁴⁸ et *Design to standards*. Le *Design to Cost* peut être défini comme une méthode de pilotage de la conception qui pousse les concepteurs à considérer le coût comme une donnée d'entrée de la conception au même niveau que les spécifications techniques et les délais (Roucoules et al, 2006). Pour cette raison nous avons intégré la classe d'objectifs (besoins) « Intensité capitalistique » dans le Plan qualité (conformément au Chapitre 4.2.2 et à la Figure 4-8) et nous avons tenu compte des coûts dans le management des alternatives de conception. A part le *Design to Cost*, nous avons abordé la problématique des coûts par le *target costing* qui nous a permis de déterminer le coût cible à partir des prix du marché et

⁴⁷ Il existe une tendance à créer une méthode séparée pour le coût de chaque paramètre qui pose des problèmes (*Design to time, Design to maintenance cost, Design to weight, etc.*). Le fait que les méthodes à appliquer par les concepteurs se multiplient, ne favorise pas leur acceptation.

⁴⁸ La norme française NF X50 156 définit le concept de « conception à objectifs désignés », qui constitue une généralisation de la « conception à coûts objectifs » (version française du *Design to Cost*).

de la détermination du prix de vente concurrentiel (voir plus bas la Figure 4-32). En ce qui concerne le *Design to standards*, celui-ci nous a permis d'économiser de l'argent en introduisant des normes internes de conception ou de fabrication dans l'entreprise ou d'optimiser les opérations de chaîne d'approvisionnement. Par rapport aux normes externes, nous avons intégré dans la phase de Définition du produit les normes concernant : la FDA, l'hygiène, le conditionnement, etc.

Les coûts représentent les objectifs les plus importants dans la vie d'une entreprise. Les buts principaux étaient la diminution de la période de rentabilité négative (Figure 4-28) et l'obtention du niveau de rentabilité budgété. Voici les principales stratégies appliquées pendant notre projet :

- Une étude ciblée du marché,
- Une très bonne définition du produit (parfaite adéquation entre les besoins des clients et les fonctions du système) en sachant que les coûts de revient sont établis à 85% par des décisions d'ingénierie (Park, 2009),
- Un suivi très strict de l'évolution des coûts pendant le cycle de vie,
- L'application au bon moment des mesures correctives.

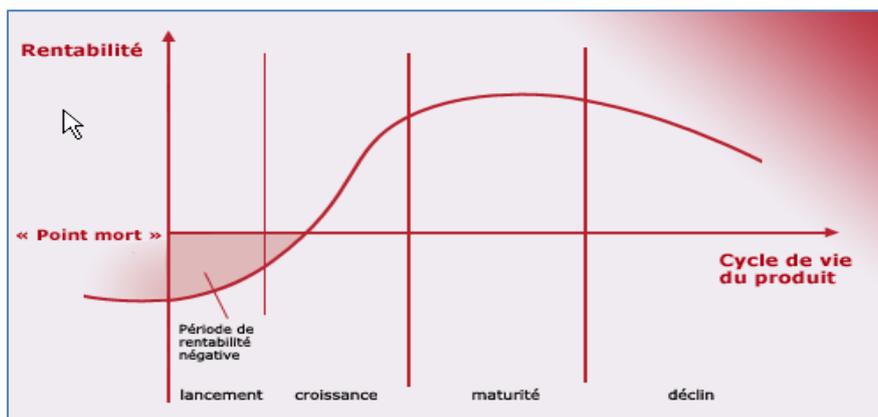


Figure 4-28 Rentabilité du cycle de vie

Dans une perspective PLM du LCC (*Lifecycle Cost*), nous avons déterminé les étapes clés de la constitution du Coût Objectif (CO) par rapport au cycle de vie complet, depuis « MSIC1 - l'Analyse et Synthèse de la demande » jusqu'à la dernière phase « MSIC7 - Démantèlement et Recyclage ». Dans la Figure 4-29 nous donnons la structure générale des Revues de phases et des coûts qui constituent le LCC.

La construction du Coût de Revient Objectif (CRO) tient compte du schéma présenté dans la Figure 4-30.

Nous avons commencé très tôt (dans la MSIC112) l'analyse du coût et nous donnons plus bas (Figure 4-31) l'exemple d'un des documents qui nous a servi pour le calcul et l'analyse du Coût de revient.

Le coût de revient (750'000 CHF) de la machine standard avec l'emboîteuse a été établi en tant qu'objectif principal dans la phase MSIC1 (voir dans l'outil Plan qualité les objectifs du produit secondaire).

Nous avons commencé, dans la MSIC1, par définir le P1 - Prix souhaité par

MSIC 112 Objectifs coût

Prix de Revient du marché 2XXX

Selon l'étude de marché, l'argumentation et décision du besoin, nous pouvons dire que le PdR 2xxx est :

- Machine de base sans mise en boîte CHF XXX KF
- Machine de base avec mise en boîte CHF XXX KF

Il faut tenir compte de (déduction) :

La composition de la machine de base
Des instructions et documentations que nécessitent 1,5 % du PdR
L'augmentation du coût de la vie entre 2xxx et 2xxx

La composition de la machine de base :

[voir MCIS111 Enregist_prop_BdD.doc](#)

Des instructions et documentations qui nécessitent un budget de 1,5 % du PdR,
 soit de CHF 9'000.- pour la machine et CHF 2'250.- pour l'emboîteuse
L'augmentation du coût de la vie entre 2xxx et 2xxx
Taux comptable de 1% par

COUT DE L'ENTRETIEN

Entretien du produit
*A définir le temps de nettoyage, lavage, maintenance par shift, jours, mois.
 Coût des consommables
 Définir les modes de redémarrage production après changement de bobine.*

COUT DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE

*Selon instructions (les heures de fonctionnement) -> coût à évaluer
 Selon intervention déclenché par client ou la société) -> coût à évaluer*

Coût du changement de forme
*Changement de forme par exemple 6/6 en 12/12
 Temps indiqué 5 heures*

Coût du changement de format
Coût des pièces à déterminer

Figure 4-31 Fiche de calcul du Coût de revient de la machine

Ensuite, dans la MSIC2 (dans la Revue de Contrat Acceptation Objectifs Economiques et Techniques (RCAOET) et les Revues de Définitions) nous avons établi les objectifs pour le P5 - Prix de Vente (PV), le P6 - Coût de Revient du Produit (CRP), le P7 - Coût de Revient de Production du Produit (CRPP) et le P8 - Coût de revient des groupes (CRG) (Figure 4-33). Notons que dans l'estimation de ces coûts (aussi pour garder la vision LCC) nous avons tenu compte des coûts enregistrés dans les phases en aval du cycle de vie, comme, par exemple (Figure 4-34) :

- Coûts de faisabilité de développement et réalisation,
- Coûts de méthodes d'industrialisation,
- Coûts des qualifications,
- Coûts de revient réels,
- Coûts de transport et taxes,
- Prix de maintenabilité,
- Prix d'exploitation, etc.

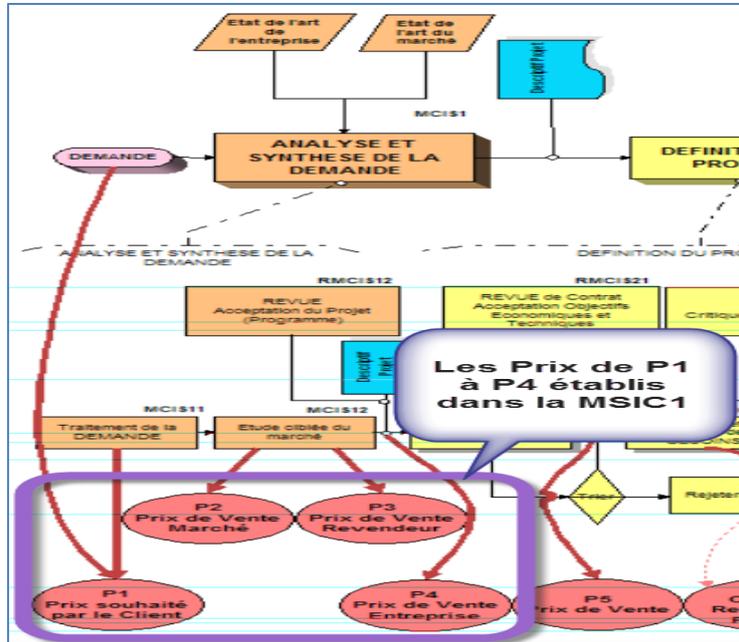


Figure 4-32 Les prix P1-P4 dans la MSIC1

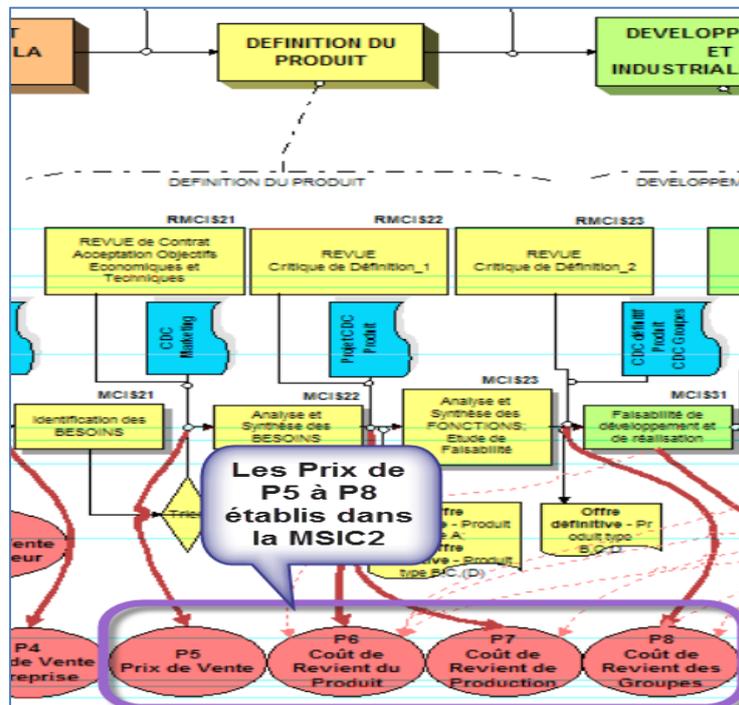


Figure 4-33 Les coûts P5-P8 dans la MSIC2

Comme méthode de calcul des coûts de revient nous avons opté pour un compromis entre les méthodes analogiques et analytiques. Ceci a été possible grâce à l'établissement d'un Coût de Revient Objectif (CRO), en tout début de programme, en tant que performance économique à atteindre pour la compétitivité. Le CRO a été calculé par rapport au Prix de Vente en déduisant les marges et les frais fixes et variables. Pour l'optimisation des coûts, toujours dans la MSIC2, nous avons utilisé la matrice coûts-fonctions. Cet outil permet de calculer le coût des composants multifonctions : le coût est ventilé sur plusieurs fonctions. La matrice coûts-fonctions combine la liste exhaustive des fonctions (axe X) que doit satisfaire le produit et la liste des constituants (pièces, composants) du produit (axe Y). A leur intersection nous avons introduit le coût des éléments qui participent à la réalisation de ces fonctions (Tableau 4-23).

Tableau 4-23 Estimation des fonctions à partir du prix des constituants

Procédé 1	Fonction 1	Fonction 2	Fonction n	Total
S/syst A	Pièces			
	P1	Coût_P11	Coût_P12	Coût_P1n
	P2		Coût_P22	

Coûts des fonctions

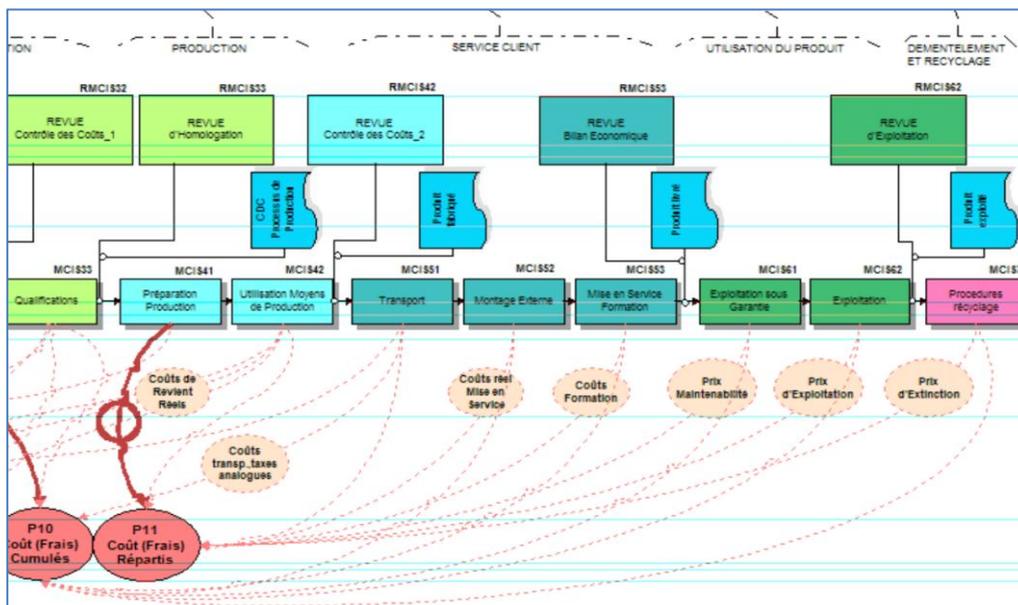


Figure 4-34 Les coûts en aval du cycle de vie du système

Nous avons voulu éliminer l'effet pervers de l'imposition automatique d'un pourcentage pour le calcul de la marge par une approche volontariste dans laquelle la marge constitue une véritable résultante. Donc :

$$\text{PRIX DE VENTE} - \text{COÛTS} = \text{MARGE}$$

Par ce biais, les seules actions possibles ont été dirigées vers l'optimisation des coûts, car le Prix de Vente restait imposé par le marché.

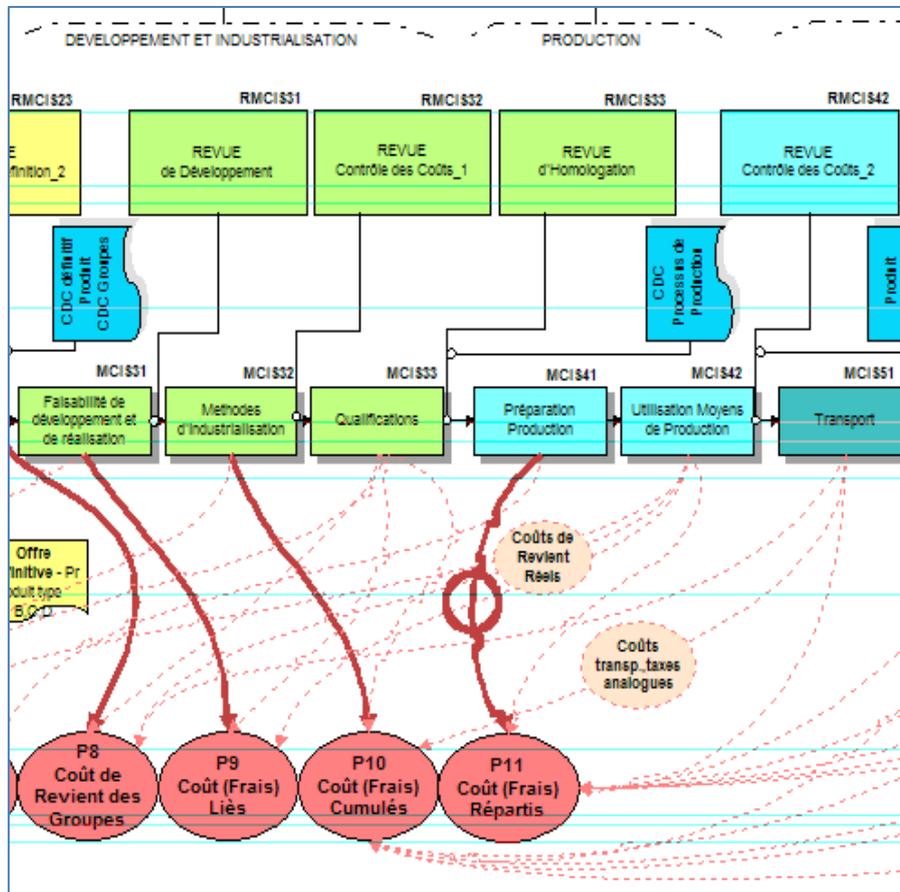


Figure 4-35 Les coûts dans les MSIC3 et MSIC4

Nous avons identifié deux phases (Figure 4-35) dans le calcul des coûts :

- Une phase divergente: dans la MSIC 1, MSIC2 et MSIC3, en partant du prix de vente, nous l'avons décomposé en ses composants de coût en arrivant à obtenir les coûts des articles ; remarquons aussi que dans ces phases nous avons travaillé avec des coûts estimés ou budgétés ;
- Une phase convergente : dans la MSIC4, à partir des coûts des articles, nous les avons intégrés dans les coûts des sous-ensembles, ensembles, modules fonctionnels et finalement nous avons obtenu le coût de revient du produit réel.

Dans la MSIC2 nous avons pu mesurer l'écart entre les coûts estimés et ceux budgétés (voir la MSIC 2126 dans la Figure 4-36).

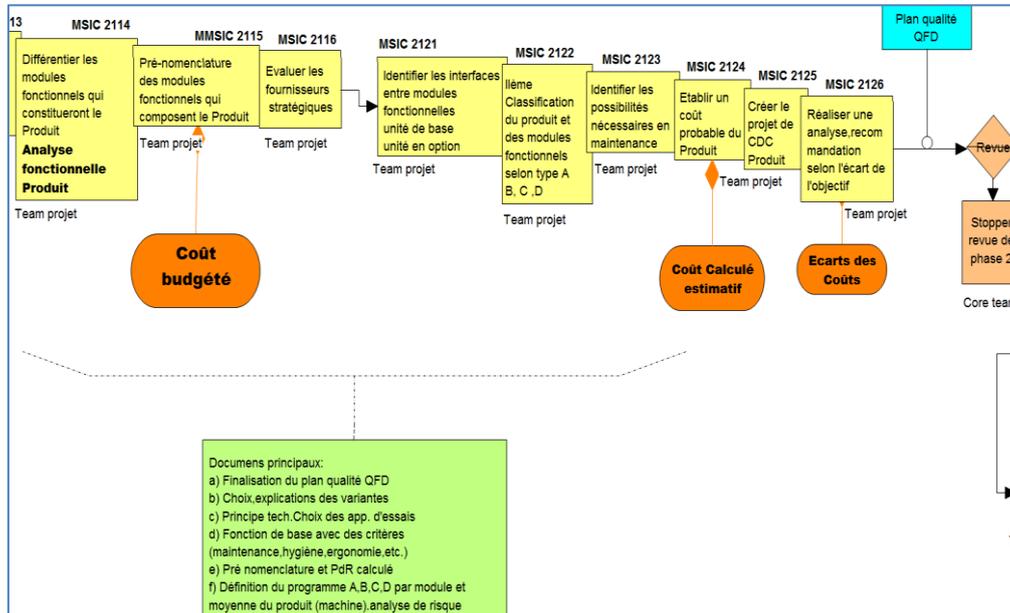


Figure 4-36 Calcul des coûts dans la MSIC2

Dans la figure suivante (Figure 4-37) nous présentons la synthèse de l'évolution des coûts des phases MSIC1 à MSIC3. Nous avons identifié plusieurs courbes :

- La droite du « PR objectifs »⁴⁹ de 750 KF : elle est toujours parallèle à l'axe X car c'est un objectif qui ne change pas ;
- La courbe du PR « Objectif calculé » : le coût objectif varie surtout dans les phases MSIC1 et MSIC2 pour se stabiliser dans la MSIC3 ; ce comportement est logique parce que le début de réalisation du prototype, dans la MSIC3, donne des informations réelles sur les valeurs des composants ;
- « Courbe du Prix prévisionnel » : représente les coûts introduits dans le système de gestion SAP ; ces coûts convergent finalement asymptotiquement vers le « PR objectifs » ; en s'approchant de la phase MSIC4 – Fabrication la part de l'estimation diminue, ce qui permet d'avoir dans le SAP des valeurs réelles ; celles-ci tendent vers la courbe objectif ;
- La « Courbe du potentiel » indique l'impact des décisions prises pendant les phases de conception, de développement et d'industrialisation.

⁴⁹ Nous avons préféré utiliser dans notre rapport de thèse l'expression « Coût de revient » au lieu de « Prix de revient » car la notion de prix implique une valeur d'échange qui n'existe pas à l'intérieur d'une entreprise. Donc, on peut parler de « prix » lorsque l'entreprise vend un produit, tandis que les valeurs utilisées pendant la fabrication d'un produit possèdent un coût. Finalement, c'est une convention acceptée pour mieux identifier le flux des valeurs.

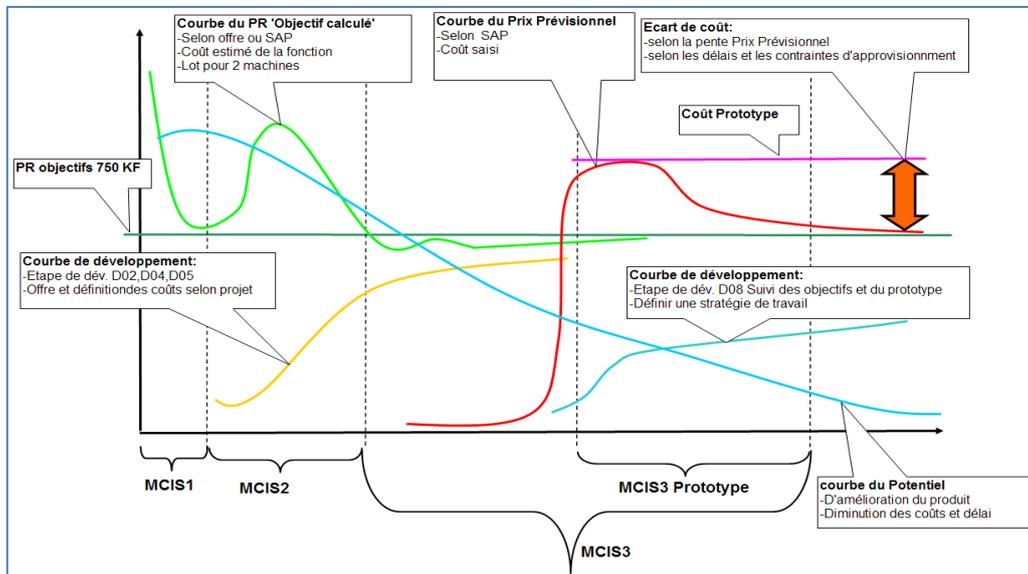


Figure 4-37 Les courbes l'évolution du coût de revient pendant le projet

4.4 Processus de modification des documents

L'échange d'informations et de documents se fait par le biais d'un système intranet dont bénéficie le système PLM, et aussi via poste interne. La matrice ci-dessous (Figure 4-38) indique le cheminement de la modification à travers le processus du système PLM. La matrice est organisée selon les deux axes :

1. Le Degré d'avancement,
2. Le Status.

Selon le premier axe nous avons les étapes d'avancement :

- En travail,
- Soumission,
- Modif. Doc + Donnée de base et Article,
- Modification accomplie,
- Modification Finie,
- Modification rejetée.

Et selon le « Status » nous avons :

- Produit commandé,
- Examen des Normes,
- Définition Détaillée,
- Adapter,
- Libérer.

Chaque activité est retrouvée selon son n° de « Status ». Par exemple, les

statuts n° 9220 et n° 9420 sont directement gérés par le Bureau des Modifications (Figure 4-39).

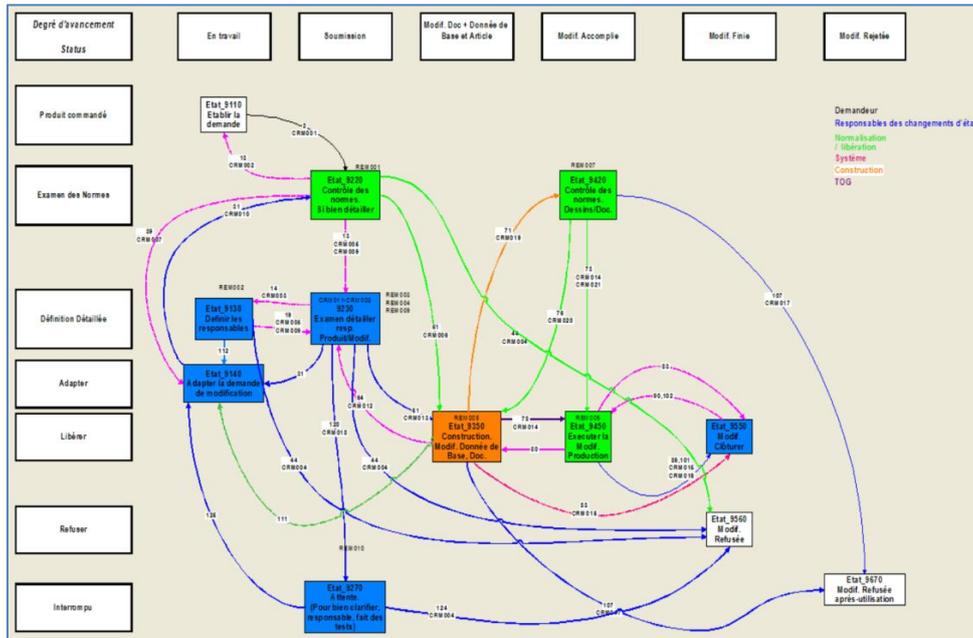


Figure 4-38 Le degré de l'avancement et le « status » des modifications

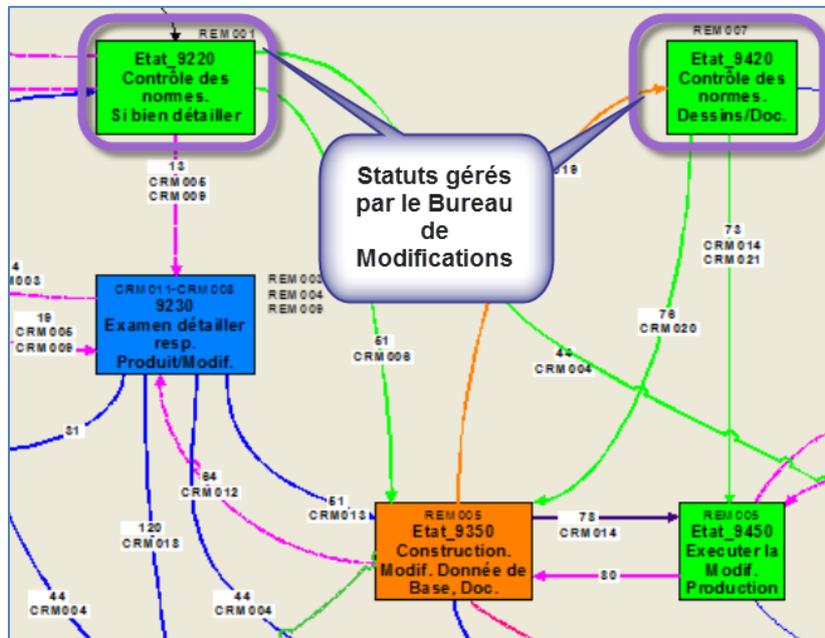


Figure 4-39 Vue partielle « Contrôle des normes »

4.5 Application informatique de la méthodologie

Nous avons recherché, en plus de l'utilisation d'Excel comme support de la MSIC, un programme informatique qui ait le plus de similitudes avec la philosophie « cycle de vie » de notre méthodologie. Nous avons trouvé le produit LIPS qui est devenue LIPS-MCIS (MCIS était le premier nom donné à la méthodologie) après l'intégration de la méthodologie MSIC. En plus du savoir-faire méthodologique, de la chronologie des phases de développement et des modèles de documents de travail, LIPS-MSIC comprend une gestion de projets dédiée aux bureaux techniques et R&D (Figure 4-40) et une base des données Oracle. Il était ainsi possible de suivre le coût et les spécifications de chaque composant du produit, d'attribuer et de gérer les actions critiques et, bien sûr, de piloter les équipes en s'appuyant sur des tableaux de bord automatiques.

L'introduction de la méthodologie dans le programme informatique ne s'est pas fait sans l'ajustement de la terminologie de la MSIC pour pouvoir s'adapter aux concepts existant déjà dans LIPS. Par exemple, les termes « Annuaire local », « Prestations », etc. sont propres à LIPS et il a fallu leur trouver un correspondant dans MSIC. Le résultat a été satisfaisant car la philosophie de base de la MSIC ne s'est pas trouvée modifiée suite à cette opération.

Nous allons donner plus bas un aperçu des principales fonctionnalités de LIPS : le Tableau de bord et le Pilotage des activités.

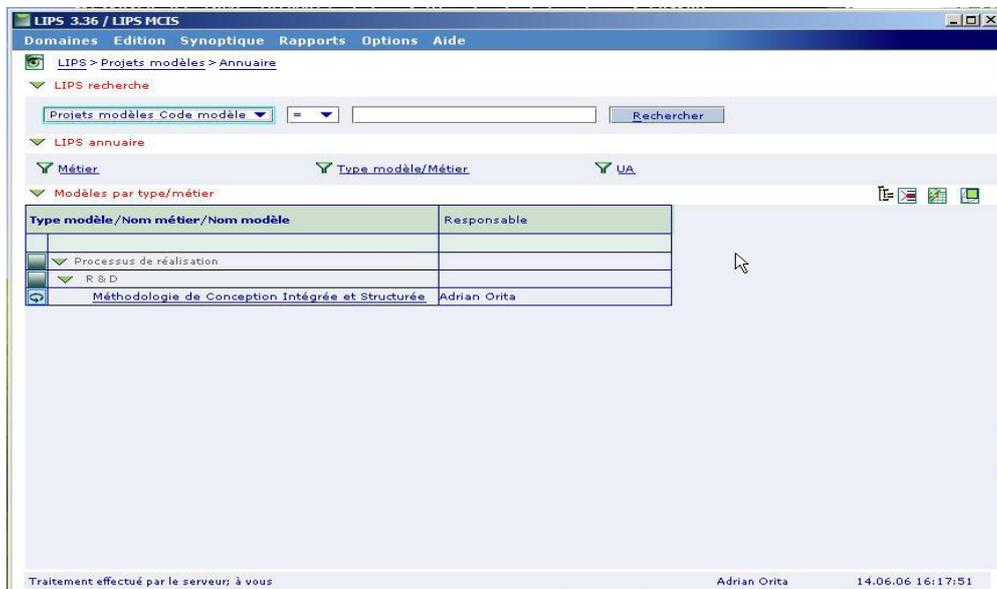


Figure 4-40 Ecran de démarrage de LIPS

4.5.1 Tableau de bord

Après le choix du projet (Figure 4-41), nous avons tout de suite un aperçu des principales informations concernant le projet : les budgets de développement, les coûts de développement actuels, les délais budgétés et réels, ainsi que les coûts

du produit budgétés et réels (Figure 4-42).

Client	Code projet	Projet	Fact	Budget accordé	Début	Statut	Chef projet
ABC	COUL-04	Couleuse ABC	<input checked="" type="checkbox"/>	1'250'000.00	03.05.04	2. En cours	Adrian Orita
ABC	EMB-04	Conditionneuse de pâtes alimentaires	<input checked="" type="checkbox"/>	850'000.00	16.08.04	1. A l'étude	Adrian Orita
MO	GOE2004	Projet Goéland	<input checked="" type="checkbox"/>	1'200'000.00	01.01.05	1. A l'étude	Robert Pernod
MO	PROD2005	Nouveau produit	<input checked="" type="checkbox"/>	800'000.00	01.12.04	1. A l'étude	Robert Pernod

Figure 4-41 Liste des projets introduits dans LIPS

La fenêtre principale est divisée en trois parties : Information, Annuaire local et Module fonctionnel. Dans la première partie sont disponibles les informations de gestion comme : le nom de la prestation et celui du chef de projet, les dates estimées de début et de fin de projet, les ressources, les finances, les délais, les budgets et le statut du projet. Depuis l'Annuaire local nous accédons à la partie de gestion technique du projet : les activités, les modules fonctionnels, les références documentaires, les tâches et les ressources assignées. Le choix fait dans cette partie est affiché dans le bas de l'écran, comme par exemple le Module fonctionnel avec les informations concernant les coûts objectifs et actualisés.

Nous pouvons consulter à tout moment les documents liés aux activités et savoir dans quelle phases (ou étape) du cycle de vie nous nous trouvons. Dans la Figure 4-43 nous choisissons de consulter les spécifications techniques d'un certain projet.

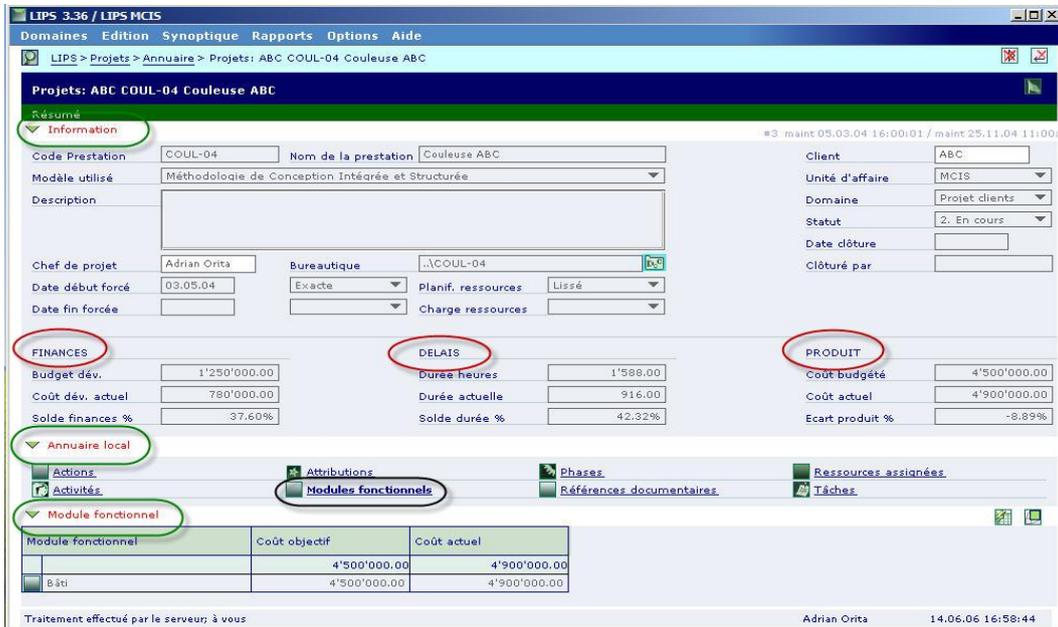


Figure 4-42 Tableau de bord (résumé) du projet

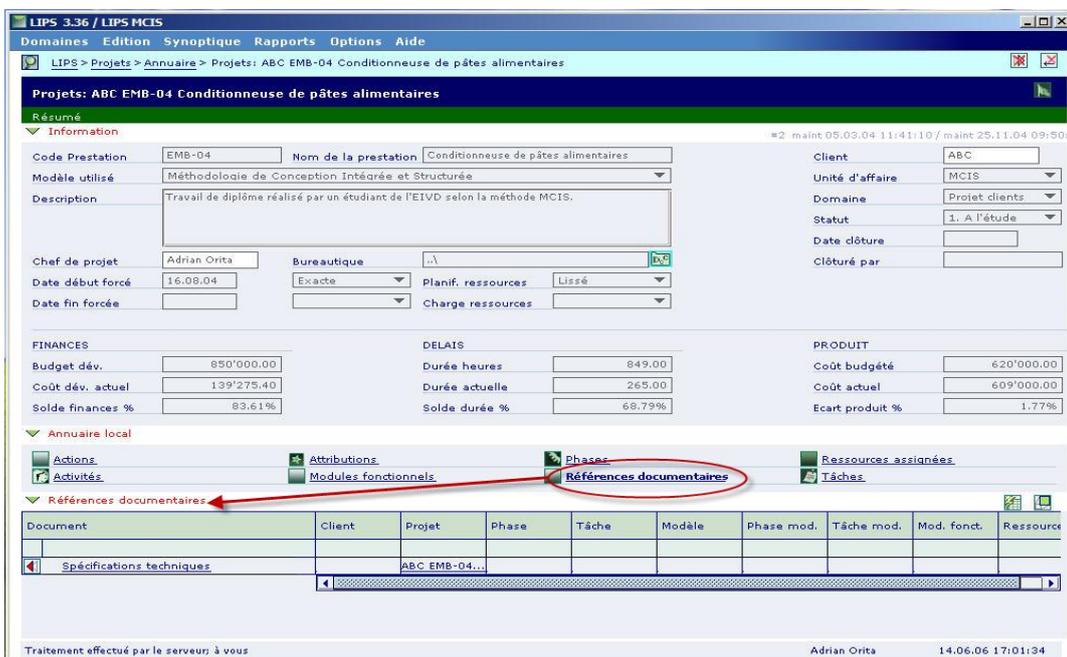


Figure 4-43 Les Références documentaires

Une gestion de type PLM impose à tout moment de savoir l'état du document consulté. Ainsi nous pouvons voir dans la Figure 4-44 le numéro de la

version et si le document respectif est archivé ou pas.

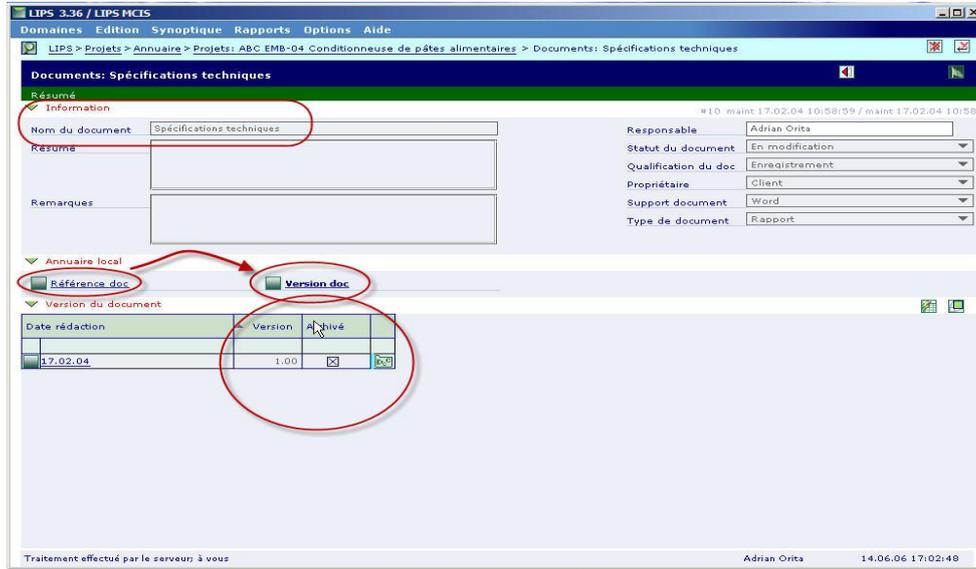


Figure 4-44 La version du document

4.5.2 Pilotage des activités

Nous donnons plus bas quelques exemples de pilotage d'actions critiques (Figure 4-45), d'activités (Figure 4-46) et d'attributions (Figure 4-47).

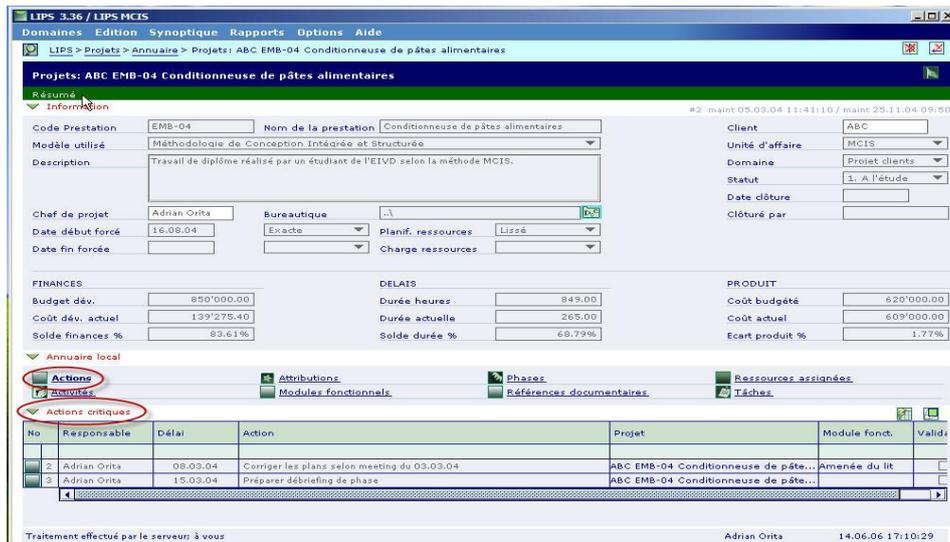


Figure 4-45 Actions critiques

Par exemple, nous pouvons descendre hiérarchiquement dans le contenu d'une activité à travers le chaînage Phases modèle -> Tâches -> Travaux (Figure 4-48, Figure 4-49, Figure 4-50) et cocher si l'activité est d'abord nécessaire dans le projet (Applicable) et ensuite valider la ligne si les travaux sont terminés (Fait).

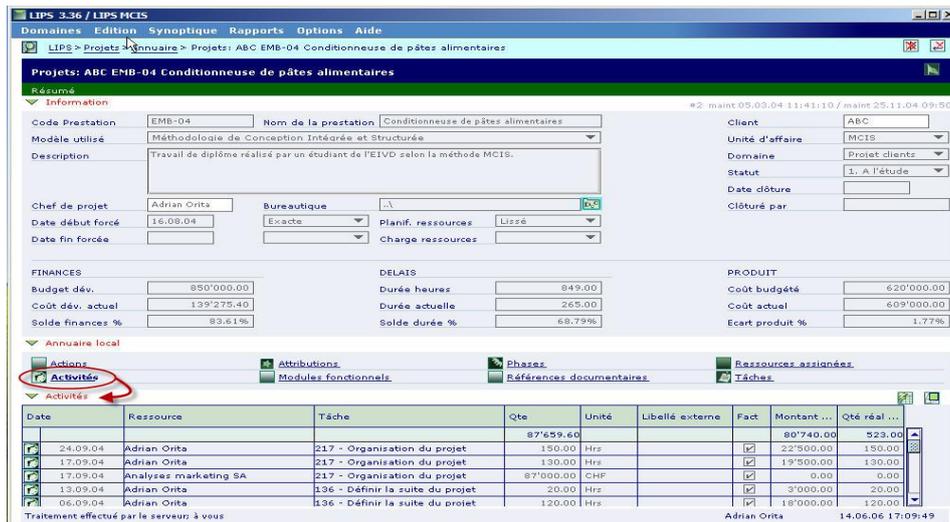


Figure 4-46 Activités

A une ligne de type « Travaux » on peut lui attribuer des ressources et des références documentaires (spécifications techniques, Plan qualité, normes, nomenclatures, etc.). Les références documentaires sont gérées par l'Annuaire où on peut contrôler le statut de chaque référence : Applicable et/ou Fait (Figure 4-51).

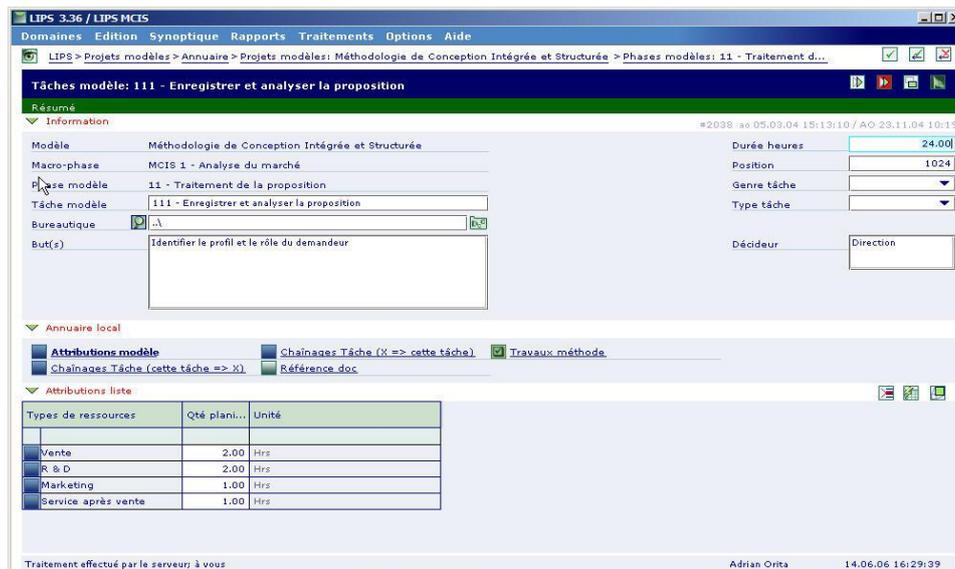


Figure 4-47 Attributions

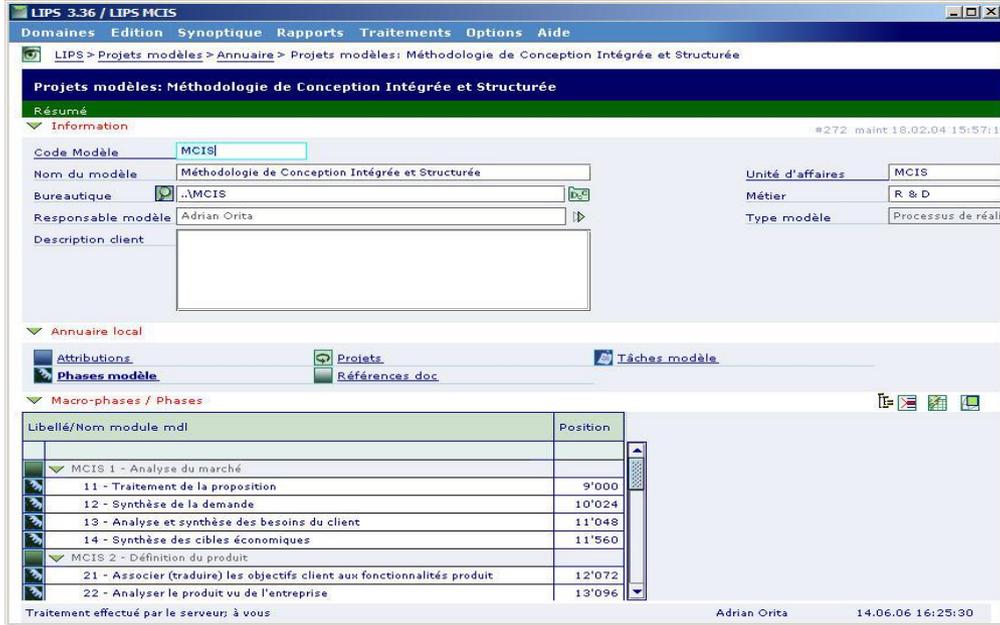


Figure 4-48 Phases modèle

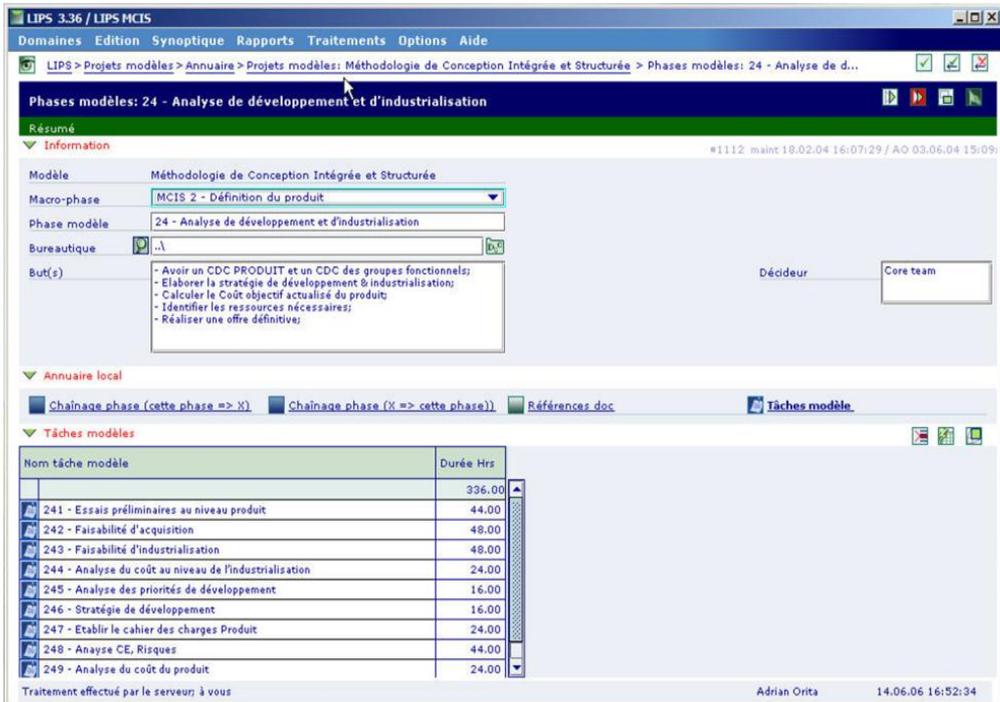


Figure 4-49 Tâches modèle



Figure 4-50 Travaux méthode

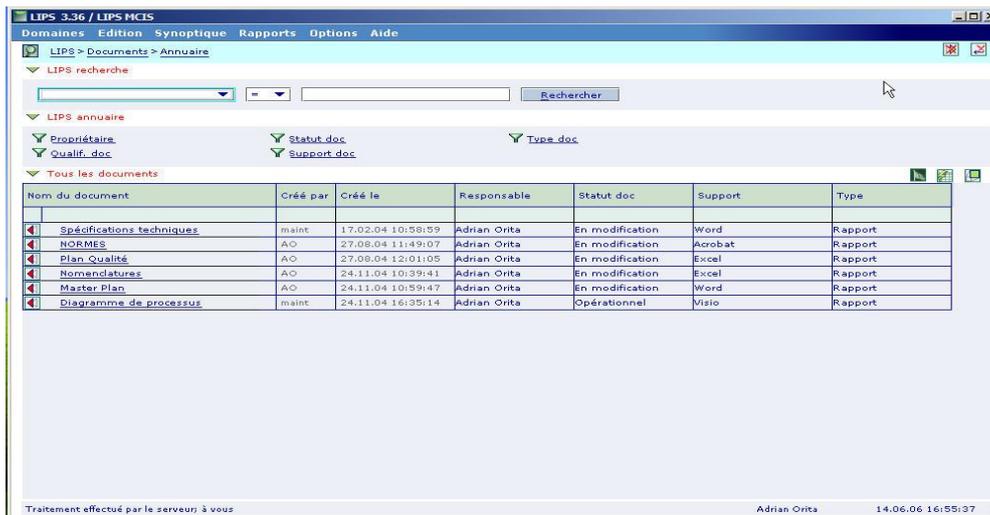


Figure 4-51 Annuaire de documents

4.5.3 Edition-modification du modèle

A travers les filtres mis en place on peut rechercher le projet ou on peut créer un modèle de projet (pattern) qui servira à l'introduction d'un projet concret. Notre « pattern » est représenté par la méthodologie MSIC (Figure 4-52). Bien entendu, le modèle est éditable (modifiable), et encore plus, le projet issu de l'application du modèle est, à son tour, modifiable.

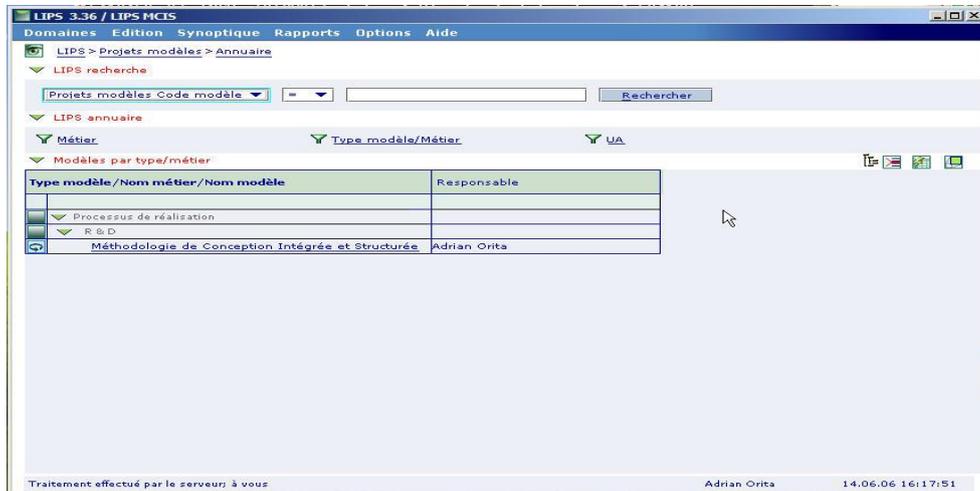


Figure 4-52 Choix d'un modèle

Les sept phases du cycle de vie de la méthodologie MSIC sont introduites dans LIPS avec leurs durées estimées comme le montre la Figure 4-53.

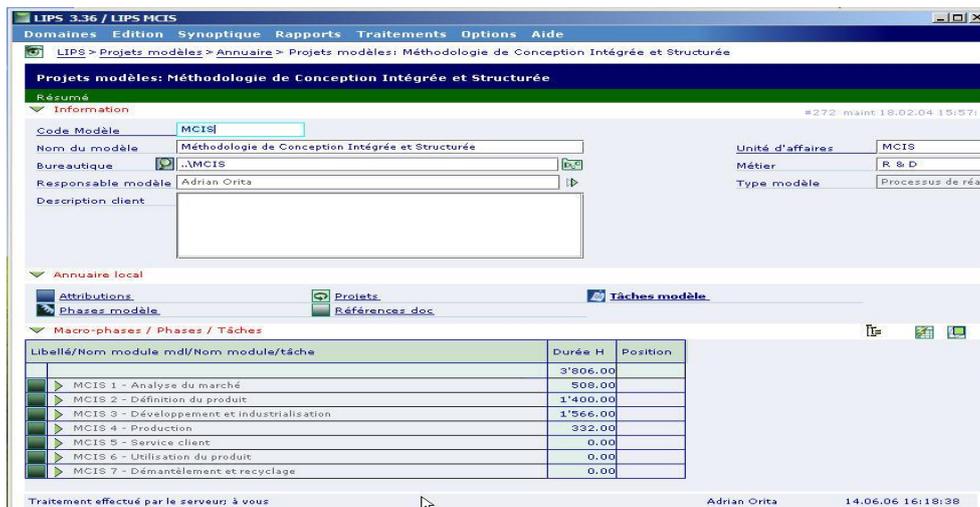


Figure 4-53 Libellés des sept phases de la MSIC

4.5.4 Reporting

LIPS peut nous renseigner, lors des revues de phases, sur l'état de l'avancement du projet (Figure 4-54). Ces requêtes peuvent mettre en évidence divers indicateurs comme, par exemple, les coûts, les budgets, les délais. Les requêtes peuvent être formulées dans un module dédié ou en utilisant le langage SQL.

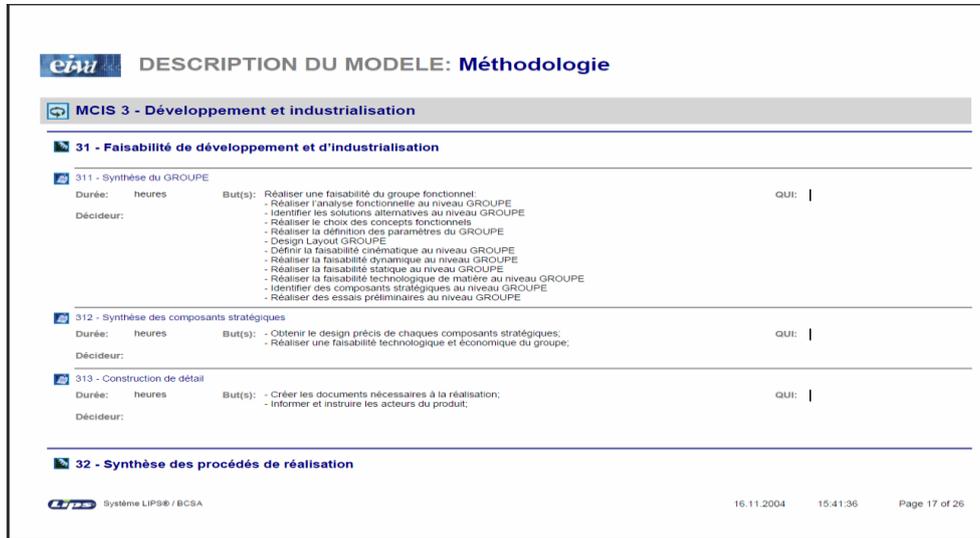


Figure 4-54 Rapport MSIC3

Nous avons aussi la possibilité de faire une analyse financière encore plus détaillée, comme le montre la Figure 4-55. Dans le formalisme de LIPS une prestation signifie la globalité des activités d'un projet.

The screenshot shows a financial report in Adobe Reader. The title is 'AVANCEMENT DE LA PRESTATION (en prix de revient)'. The report is for 'ABC Industrie SA' and 'Conditionneuse de pâtes alimentaires'. It includes a table with columns for 'BUDGET INIT.', 'BUDGET CORR.', and 'REALISE'. The table lists activities such as '11 - Traitement de la proposition', '13 - Déterminer et pondérer les besoins du client', '21 - Associer les objectifs client aux fonctionnalités du produit', '22 - Analyser le produit vu de l'entreprise', '23 - Synthèse produit au niveau des fonctions fonctionnelles', and '24 - Analyse de développement et/ou commencent d'industrialisation'. The table shows budget and realized values in various currencies (EUR, USD, etc.). The footer indicates the system is 'Système LIPS® / BC SA', dated '14.06.2006', with version '17:14:17' and 'Page 1 / 1'.

	BUDGET INIT.		BUDGET CORR.		REALISE							
	plan PR	hrs plan	corr PR	hrs corr	Tot. Real PR	Tot. Hrs PR	Tot. Frais PR	Tot. S/T PR	hrs real	Rs real	S/T real	
11 - Traitement de la proposition	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
13 - Déterminer et pondérer les besoins du client	0.00	0.00	0.00	0.00	17'125.40	17'000.00	125.40	0.00	166.00	136.60	0.00	
21 - Associer les objectifs client aux fonctionnalités du produit	0.00	0.00	0.00	0.00	122'150.00	35'150.00	87'000.00	0.00	367.00	7'000.00	0.00	
22 - Analyser le produit vu de l'entreprise	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
23 - Synthèse produit au niveau des fonctions fonctionnelles	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
24 - Analyse de développement et/ou commencent d'industrialisation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	0.00	0.00	0.00	0.00	139'275.40	52'150.00	87'125.40	0.00	523.00	87'136.60	0.00	
	850'000.00											

Figure 4-55 Avancement de la prestation

4.6 Vérification des résultats et conclusions

Avant de formuler les résultats de l'application industrielle, il est intéressant

de se rappeler les contraintes principales initiales du projet : diminution du coût de revient de 30%, création de commandes et d'une surveillance simplifiées et d'une gestion d'arrêts machine efficace. Finalement, le LCC constitue l'indicateur principal du succès ou du non-succès du projet. A ceci nous pouvons rajouter le respect des délais, des performances techniques et de qualité qui constituent ensemble les indicateurs de base selon lesquels sont jugés les résultats d'un projet industriel. Nous pouvons donc conclure, en suivant la présentation de l'application industrielle de la méthodologie, que les objectifs initiaux de la société mandante ont été atteints. Pour exemplifier, il faut mentionner que l'objectif initial du Coût de revient a été respecté. De plus, le délai de conception de la ligne de conditionnement a été de seulement neuf mois (pour le prototype fonctionnel). Ceci représente un délai exceptionnel pour un artéfact de ce type.

Nous pouvons rajouter encore quelques caractéristiques significatives qui ont constitué de réelles « *plus-values* » pour la société mandante :

- La plus importante a été le transfert de la méthodologie systémique et intégrée ; finalement, à part les résultats opérationnels très positifs du projet, l'assimilation d'une nouvelle culture d'ingénierie a été le facteur qui a dynamisé le plus l'activité de la société et qui est resté après la fin du projet : on peut véritablement parler de la transmission d'une valeur pérenne à l'entreprise,
- Le transfert de la méthodologie a aussi atteint un autre but : l'élaboration du dossier de définition de l'artéfact a précédé la phase de développement et d'industrialisation.
- L'utilisation seulement des informations pertinentes sur le produit ; ces informations ont le point de rattachement dans le cycle de vie par l'intermédiaire du Tableau de bord ; elles constituent une base des connaissances pour les développements ultérieurs de la société ;
- L'utilisation d'une vraie méthode d'ingénierie pour l'identification des besoins clients,
- L'adoption et l'application de l'Analyse fonctionnelle dans une phase très en amont du cycle de vie,
- La recherche ciblée des solutions répondant strictement aux objectifs clients validés,
- L'estimation rapide du coût de revient et la correction permanente de l'écart par rapport au coût budgétés tout au long du projet,

En particulier, l'amélioration du processus de conception s'est caractérisée par les aspects suivants :

- Approche systématique et structurée avec moins d'itérations,
- Traçabilité des activités, dans le sens de l'aptitude à identifier les relations entre les différents artéfacts du processus de développement,
- Transfert de know-how entre les métiers impliqués dans la conception,
- Garantie du prix objectif ciblé,
- Diminution du nombre de composants,
- Diminution des budgets de développement,

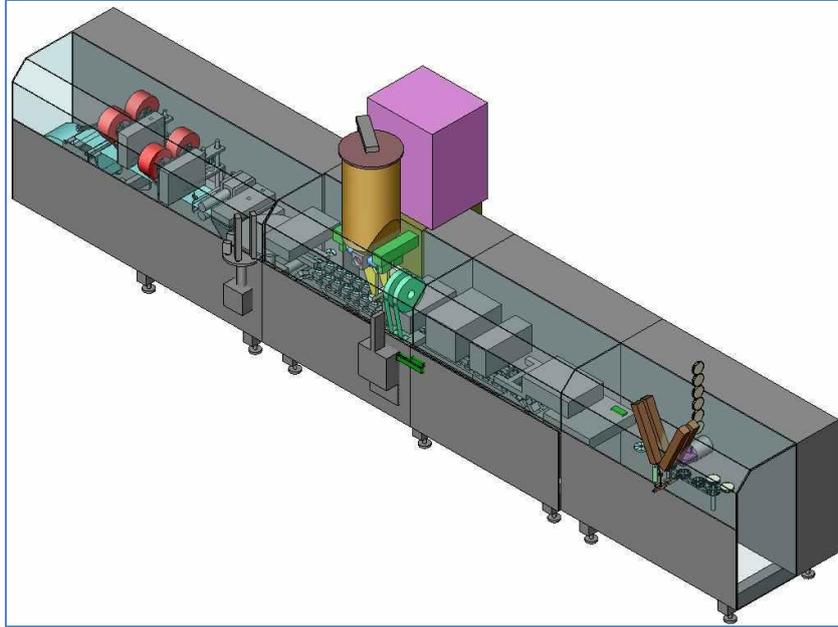


Figure 4-56 L'ensemble de la ligne de conditionnement avec l'emboîteuse

Suite à la finalisation du projet (Figure 4-56), le contenu de la méthodologie a été amélioré, surtout par rapport aux aspects suivants :

- Meilleur positionnement des actions de STOP and GO (choix et décisions),
- Meilleures séquences des activités (IVème niveau) de faisabilité (MSIC2),
- Introduction des nouvelles activités (IVème niveau) pour l'application des méthodes innovantes de conception,
- Meilleure décomposition des classes ontologiques d'objectifs,
- Meilleur suivi de l'évolution des coûts.

5 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

5.1 Rappel du cadre de la recherche

Dans cette section, les résultats obtenus tout au long de cette recherche sont brièvement examinés, suivis d'une discussion détaillée des forces et des faiblesses de l'approche et des conséquences qui peuvent en être tirées.

Dans cette thèse nous avons proposé, en tant que nouveauté, une méthodologie systémique et intégrée permettant d'intégrer le processus de conception dans le cycle de vie d'un système mécatronique, afin de répondre aux contraintes caractéristiques à l'environnement PLM. Cette méthodologie a été testée dans un projet industriel dans le but d'étudier sa faisabilité et de l'améliorer pour créer une plateforme opérationnelle et valide pour le monde économique. Le but de notre méthodologie systémique et intégrée était de prendre en charge la description, l'analyse et la définition d'un processus de conception d'ingénierie en termes de structure de relations entre les entités faisant parti du cycle de vie d'un système industriel. Pour atteindre cet objectif, la recherche s'est basée au départ sur deux hypothèses:

- a. Le processus de conception innovante est une démarche influente au plus haut degré sur la compétitivité des produits industriels. La conception est devenue un sujet d'étude très important, considéré comme le moteur de la réussite sur les trois plans : Qualité, Coûts et Délai de mise sur le marché.
- b. A présent, la nécessité d'intégrer tous les facteurs (artéfacts) qui contribuent à la création des systèmes industriels dans une entité méthodologique appelée « *cycle de vie du produit* » est devenue un nouveau paradigme industriel du XXIème siècle.

On pourrait ajouter à ces deux hypothèses une forte tendance manifestée dans les entreprises de réorganiser le management des R&D, mais aussi le management général tout court, dans le sens d'accorder une place privilégiée au cycle de vie du produit et à la recherche des méthodologies capables de traduire en réalité cette ambition. D'autre part, nous avons intégré dès le début de notre recherche les contraintes majeures qui caractérisent l'activité de création de nouveaux produits :

- L'inadéquation entre les besoins des clients (exigences), les spécifications techniques (les fonctions) et les solutions proposées pour résoudre les problèmes posés, avec comme corollaire un réajustement coûteux des objectifs des clients.
- Le manque d'outils méthodologiques pour la pérennisation et la transmission structurée du savoir (connaissances) entre les métiers et entre les membres, plus ou moins informés, des équipes de projets.
- Le caractère complexe, « mal défini » et ouvert du problème de conception qui se pose au début de l'activité de création des nouveaux produits.

Les évolutions des organisations industrielles citées plus haut et les contributions existantes dans la littérature technique du domaine de l'ingénierie industrielle sur la manière d'assurer la « traduction » des besoins des clients dans le cadre d'un processus complet de création de nouveaux produits, nous ont poussés à soulever la question de la représentation, de la description, de la modélisation des processus de conception dans un contexte PLM (*Product LifeCycle Management*). A partir de cela nous avons voulu répondre à la question liminaire posée au tout début de notre recherche : *Peut-on créer un outil transversal qui puisse concilier les exigences du client avec les contraintes de la conception et de l'industrialisation ?* Dans le champ de recherche qu'est la méthodologie de conception, nous nous sommes positionnés au rang de ceux qui défendent l'idée (dans un raisonnement abductif) qu'il est possible de développer un modèle de processus de conception, quel que soit le problème de conception à résoudre et la nature des connaissances utilisées. De ce fait, la modélisation du processus de conception recherchée dans ce rapport de thèse se situe dans le domaine des sciences de l'artificiel, par opposition aux sciences naturelles, dans le sens donnée par (Simon, 1969).

L'examen des contributions de l'ingénierie des systèmes, des domaines de l'épistémologie des connaissances et de l'ontologie des classes, des méthodes de gestion des connaissances, de la théorie des réseaux, de la gestion des processus et du génie logiciel, a montré qu'une méthodologie systématique axée sur la transformation des objectifs des clients et l'amélioration de l'ingénierie du processus de conception sont toujours manquants. Pourtant, les méthodes existantes (conformément au Chapitre 2) fournissent une bonne base pour construire une solution complète basée sur les concepts déjà existants :

- Les divers modèles de cycle de vie, les typologies de méthodes conception,
- Les méthodes et les techniques de créativité : Axiomatic Design, DFSS, FBS, etc., et
- Les outils tels que : Analyse Fonctionnelle, AMDEC, COD, DFX, IDEF0, LCC, QFD, TRIZ, VOC, WBS, etc.

Dans la solution finale du nouveau modèle, nous avons pris en compte l'évolution d'un modèle linéaire de conception vers un modèle interactif, la séquentialité étant remplacée par la superposition partielle des activités où les connaissances relatives au cycle de vie complet sont intégrées dans la phase de conception.

Pour résumer, nous pouvons affirmer que le processus de synthèse d'un nouveau modèle méthodologique systémique et intégré, représentant le cycle de vie du produit en contexte PLM (conformément au Chapitre 3), s'est basé sur le croisement des trois champs complémentaires qui par leurs interactions ont donné naissance à la MSIC (Figure 5-1) :

- a. Modèle de recherche DRM modifié selon les méthodes de recherche dans la conception de (Blessing et Chakrabarti, 2009) ;
- b. Les Typologies existantes de modèles de conception et de cycle de vie ;
- c. La Validation de l'application industrielle du modèle.

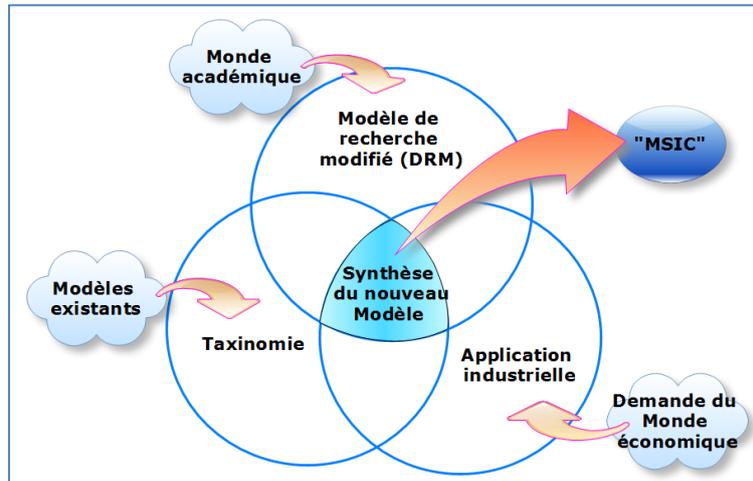


Figure 5-1 La convergence des 3 champs

5.2 Validation de la méthodologie

Comme méthode de validation générale, on qualifie le modèle de « bon » s'il permet de trouver les réponses à « *l'ensemble des questions avec une bonne tolérance* » (Lissandre, 1990). Or, étant donné que « l'ensemble de questions » est une notion assez vague, nous avons choisi, précisément, de vérifier si le résultat de notre recherche :

- A été obtenu en suivant la méthode de travail proposée au Chapitre 1.4,
- A apporté des nouveautés par rapport à d'autres modèles existants inventoriés dans le Chapitre 2 et modélisés dans le Chapitre 3, et
- A été validé par une l'application industrielle et avec quels résultats (cf. au Chapitre 4).

La méthode de travail adoptée pour la modélisation s'appelle le modèle DRM modifié (Figure 1-2) et a été suivie pendant toute la recherche. Elle est constituée d'une succession de six étapes dans le cadre d'un « *framework* » qui tient compte des types de logique et des formes canoniques de raisonnement. Nous avons suivi d'une manière souple l'enchaînement des étapes, ce qui a généré la succession des chapitres du présent travail, comme montré dans la synthèse ici-bas (Tableau 5-1).

La modélisation (conforme au Chapitre 3) a mis en évidence le caractère complexe de la démarche mais a finalement réussi la création d'une méthodologie nouvelle de type systématique, prescriptif et descriptif basée sur les notions de phase, sous-phase, étape et activité métier.

La caractéristique principale (et la nouveauté) de la méthodologie réside dans l'intégration des techniques de créativité (brainstorming, QFD, TRIZ, AF, AMDEC/FMEA, LCC, Conception à coût objectif, etc.) à travers un élément nouveau, la « boîte à outils » appelée « Plan qualité ».

Tableau 5-1 Validation du modèle de recherche DRM modifiée

Chap.	Résultats selon Étape DRM modifiée	Logique	Forme canonique
1 ; 2	Classification des Objectifs	Divergence et Convergence	Analyse et Synthèse
2	Etat de l'art des méthodes de conception innovante	Divergence	Analyse
3	Etablissement des critères et des étapes d'analyse des outils méthodologiques ; Tests et validation du modèle	Convergence	Analyse et validation d'un modèle de résolution de problèmes
3	Constitution d'un modèle théorique, tests du modèle, validation selon des critères sélectionnés.	Convergence, Divergence, Transformation	Synthèse d'un modèle théorique méthodologique
3 ; 4	Validation de l'outil au travers de focus groups ; validation application industrielle ; validation outil informatique	Convergence	Analyse et validation d'un modèle de résolution de problèmes

Le « Plan qualité » intègre le travail du groupe pluridisciplinaire et l'accompagne à travers le cycle de vie en le guidant selon un fil conducteur (caractère prescriptif). Malgré la nature prescriptive, notre méthodologie peut prendre en compte les réactions possibles des acteurs selon leur situation réelle et leurs compétences. Les trois axes selon lesquelles se concentre le fil conducteur des activités sont : le produit, les projets et les ressources. De cette manière MSIC peut garantir la réussite du pilotage industriel dans un contexte évolutif et incertain (Verzat, 2000). Notre méthodologie a été également validée par la facilité d'intégrer des outils informatiques non-spécialisés, tels que : Office, iGrafx2011, XMind, ConceptDraw Office Pro, outils qui ont permis l'utilisation des formalismes de type : SADT, IDEF0, diagrammes d'Ishikawa, etc. et une grande portabilité pour les utilisateurs sans ou avec peu de ressources informatiques dédiées.

L'application industrielle de la méthodologie a répondu, tout d'abord, à un des buts exprimés au début, celui de *générer des connaissances sur la conception et pour la conception* » (Horváth, 2001). Les activités de l'entreprise se sont concentrées sur l'activité qui apporte le plus de valeur au produit : la conception. A partir de ceci une nouvelle culture de conception a été transférée pendant le déroulement du projet. Une autre nouvelle caractéristique est l'intégration du concept de conception à coût objectif. Très tôt, lors de l'analyse fonctionnelle, les coûts sont quantifiés par diverses méthodes : analogique, paramétrique ou analytique. Le respect de la consigne de coûts de départ représente aussi une validation de la pertinence de la méthodologie.

5.3 Synthèse des contributions personnelles

L'organisation de la thèse est présentée dans la Figure 5-2 en se focalisant sur le domaine des contributions personnelles. Après l'analyse de l'état de l'art dans le domaine de la recherche sur l'ingénierie intégrée (Chapitre 2), nous entrons dans le domaine des contributions personnelles représentées par la synthèse du modèle

d'ingénierie intégrée et par l'application industrielle du modèle méthodologique MSIC (voir les Chapitres 3 et 4).

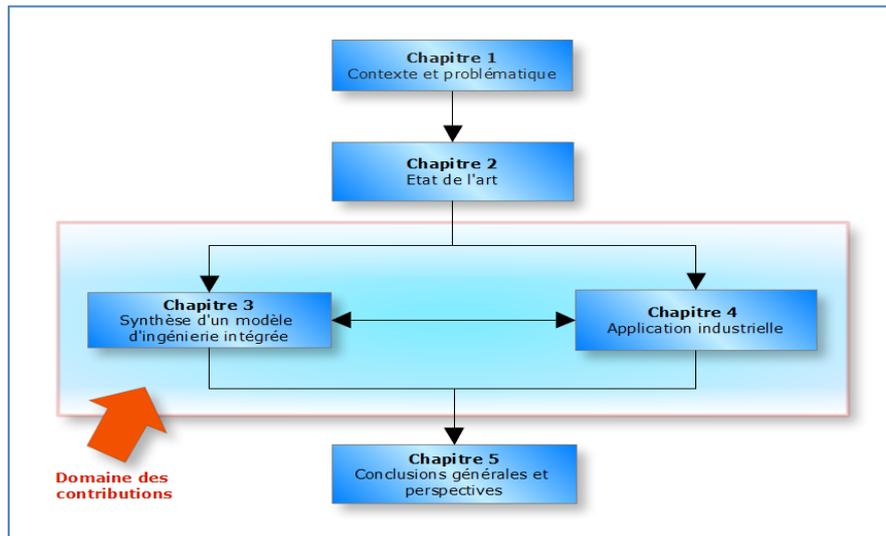


Figure 5-2 Représentation synoptique de l'organisation de la thèse

Sans rentrer dans les détails et sans répéter ce qui a déjà été écrit dans les conclusions des chapitres précédents, nous nous bornons à mentionner les principales contributions apportées par la méthodologie MSIC :

- a. Il a été possible de développer un modèle du processus de conception, quel que soit le problème de conception à résoudre et la nature des connaissances utilisées. Il s'agit donc d'une méthodologie qui a une grande adaptabilité grâce à son haut niveau conceptuel.
- b. Une meilleure utilisation du flux d'informations de la partie aval du cycle de vie dans le processus de conception, dans le cadre d'une méthodologie intégrée de conception ;
- c. Une intégration des méthodes et outils existants dans le cadre du PLM ;
- d. Mise en place d'une structure de projet et de coordination d'activités hétérogènes grâce à l'intégration de la structure du projet dans l'organisation de l'entreprise par le biais de notre méthodologie. MSIC permet, de par sa structure en phases-activités, la création ad-hoc des projets en suivant le fil conducteur.
- e. Permet la prise de décisions dans un contexte caractérisé par une forte incertitude. Le caractère systématique, prescriptif et descriptif aide, paradoxalement, à caractériser une situation autrement difficile à cerner.
- f. L'introduction du concept de « boîte à outils ». Le « Plan qualité » intègre le travail du groupe pluridisciplinaire et l'accompagne à travers le cycle de vie, en le guidant selon un fil conducteur (caractère prescriptif).
- g. Instanciation des besoins des clients par rapport au spécifique de

chaque métier par l'utilisation des outils du « Plan qualité » : Gamme de transformation et Organigramme technique du produit (OTP). Le dialogue entre ces outils donne naissance aux spécifications techniques du produit et implicitement aux cahiers des charges métiers.

- h. La facilité de gérer des activités délocalisées : il a été aisé d'organiser les activités de calcul et de fabrication en mode *outsourcing* grâce à la précision de la définition du produit (MSIC2) et à la création de cahiers des charges fidèles aux objectifs définis par le « Plan qualité ».
- i. Une très bonne définition des caractéristiques des composants obtenue en amont du cycle de vie a permis l'établissement d'un bon dialogue avec les fournisseurs et la diminution du nombre d'itérations entre le bureau technique, les achats et les fournisseurs extérieurs.
- j. Intégration de MSIC dans une application informatique qui offre un tableau de bord de l'avancement de la conception du système à travers son cycle de vie.

5.4 Perspectives

Ce travail pourrait être étendu dans plusieurs directions relatives aux technologies, méthodes et outils déjà utilisés dans cette recherche ou seulement identifiés :

- Une future recherche peut établir un modèle de prises de décisions pour le processus de conception basé sur un algorithme de type « *fuzzy logic* ». A commencer par l'introduction de ce modèle dans le concept original « Plan qualité » de type « boîte à outils » utilisé dans le processus de conception.
- L'introduction d'une méthode métrique d'évaluation des performances du processus de conception et ensuite l'application de celle-ci au cycle de vie complet d'un produit. Par la suite création d'un modèle quantitatif, mesurable.
- L'approfondissement et l'utilisation de nouvelles méthodes IT basées sur l'ontologie informatique (tels que OWL 2), qui peuvent fournir des fonctionnalités supplémentaires pour notre méthodologie MSIC, selon nos investigations initiales discutées dans le Chapitre 3.5.6.3. Etendre les modèles ontologiques pour les processus de : fabrication, maintenance, achats, mise en service, recyclage, etc. Identification des « *best practices* » dans ces domaines.
- La recherche et l'intégration de la méthodologie MSIC dans un standard informatique commercial du domaine PLM, dans le but d'offrir une plateforme commune aux intervenants du cycle de vie du produit, surtout sur l'axe : CRM, SCM, CAO, ERP et SDLC.
- Dans le cadre de la MSIC en général et plus particulièrement dans une plateforme de conception CAO (Catia), l'intégration d'un outil de chiffrage des coûts constituerait une perspective attractive.

TERMINOLOGIE - GLOSSAIRE⁵⁰

AI (*Artificial Intelligence*) : La branche de l'informatique qui essaie de construire des ordinateurs qui se comportent comme des êtres humains. Le terme a été créé en 1956 par John McCarthy au Massachusetts Institute of Technology.

Client (*Customer*) : Bénéficiaire d'un produit fourni par un fournisseur. Dans un contexte contractuel, le client est appelé l'acheteur. Le client peut être le consommateur (usager final) l'utilisateur, le bénéficiaire, l'acheteur ou le donneur d'ordre. Le client peut être interne ou externe à l'organisme (Cf. ISO 8402).

Conceptual design (étude conceptuelle) : Une combinaison de tâches commençant avec la définition du produit en utilisant des concepts précis et neutres venant de besoins ou des idées. Ceci est suivi par la génération de concepts de design (conception) prenant les phases différentes du cycle de vie physique en considération et fini par l'évaluation de concepts de design (conception) proposés. L'adéquation des concepts de design (conception) avec les besoins formalisés finit ces tâches.

Configuration (*Concept*) : Caractéristiques fonctionnelles et physiques d'un produit ou des constituants d'un système, de matériel, de logiciel incorporé, de logiciel associé ou d'une combinaison de ceux-ci, telles qu'elles doivent être exprimées dans la documentation technique et atteintes dans la réalisation des différents exemplaire du produit ou du système(Cf. ISO 10007).

Configuration de référence (*Baseline Configuration*) : Configuration d'un produit, formellement établie à une étape de la vie du produit et servant de référence pour les activités ultérieures (Cf. ISO 10007 - RG Aéro 00040A). (*Baseline*) : Spécification ou produit qui a été formellement revu et accepté, qui est appelé à servir de base à des développements ultérieurs et qui ne peut être modifié que dans le cadre de procédures formalisées de contrôle des modifications (Cf. IEEE 610 Standard Computer Dictionary).

Cycle de vie du système (*System Life Cycle*) : Evolution d'un système étudié dans le temps, depuis sa conceptualisation jusqu'à son retrait (de service) (Cf. ISO 15288). Ou Le cycle de vie d'un produit correspond à l'ensemble de toutes ses phases de vie allant de la préparation de sa naissance, émergence du besoin, jusqu' à sa mort, obsolescence ou retrait de service et recyclage d'ingénierie.

Design theory : Une collection de principes utiles pour expliquer le processus de design (la conception) et pour fournir une base pour des méthodologies (Evbuomvan, 1996).

Design methodology : Une collection de procédures, des outils et des techniques pour les designers pour les utiliser en concevant (Evbuomvan, 1996).

Design concept : Un concept de design (conception) définit et décrit les principes et les caractéristiques d'ingénierie d'un système ou d'un composant qui est faisable et qui a le potentiel pour accomplir toutes les exigences (conditions) de design (conception) essentielles.

Durée de vie : Durée pendant laquelle une entité accomplit une fonction

⁵⁰ Selon (Bardou L., 2010).

requis dans des conditions d'utilisation et de maintenance données, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint (NF X-60-500).

ERP (*Enterprise Resource Planning*), aussi appelés *Progiciels de Gestion Intégrés (PGI)* : sont des applications dont le but est de coordonner l'ensemble des activités d'une entreprise (activités dites verticales telles que la production, l'approvisionnement ou bien horizontales comme le marketing, les forces de vente, la gestion des ressources humaines, etc.) autour d'un même système d'information. Les Progiciels de Gestion Intégrés proposent généralement des outils de **Groupware** et de **Workflow** afin d'assurer la transversalité et la circulation de l'information entre les différents services de l'entreprise. Le terme « ERP » provient du nom de la méthode *MRP (Manufacturing Resource Planning)* utilisée depuis les années 70 pour la gestion et la planification de la production industrielle.

Fonction (*Function*) : Une tâche ou activité exécutée pour atteindre un résultat attendu (*Cf. EIA 632*). Aptitude d'un système à réaliser des fonctions (contrainte, opérationnelle, technique, de conception, de service).

GED : **G**estion **E**lectronique de **D**ocuments. Terme générique désignant les systèmes d'information intégrant les différents supports et assurant les fonctions de stockage-archivage et de consultation-diffusion

Ingénierie simultanée (*Concurrent Engineering* ou *CE*) : L'ingénierie simultanée (ou concourante) est une approche systématique pour concevoir un produit prenant en considération tous les éléments de son cycle de vie, depuis la conception jusqu'à la mise à disposition du produit et par conséquent, intégrant la définition du produit, les processus de fabrication, et tous les autres processus requis dans le cycle de vie tels que, notamment, le fonctionnement ou la maintenance. Cette approche doit permettre aux équipes multidisciplinaires et/ou multi-métiers de travailler en parallèle, le plus tôt possible, vers un même but.

KANO : La méthode Kano a été créée par le qualiticien Japonais éponyme (Noriaki Kano) en 1984. Elle fait partie des outils de management de l'innovation par la qualité. La méthode Kano permet de comprendre en quoi les différents éléments composants un produit contribuent à la satisfaction de l'utilisateur. Pour ce faire, elle identifie des « natures » de fonctions différentes.

Life cycle phase models : Conceptualisations des phases de cycle de vie physique d'un produit existant/désiré via l'utilisation de concepts abstraits et génériques.

Modèle de cycle de vie (*Life Cycle Model*) : Cadre de travail constitué de processus et d'activités en relation avec le cycle de vie, utilisé comme référence commune pour la communication et la compréhension. (*Cf. ISO 15288*).

Maintenance : Ensemble des actions destinées à maintenir, ou rétablir, une entité dans un état dans lequel elle peut accomplir sa mission requise (NF X-60-500).

PLM (**Product Lifecycle Management**) : est une discipline qui s'intéresse à l'intégralité du cycle de vie des produits manufacturés, depuis les études préliminaires jusqu'à la maintenance et la fin de vie. Le PLM est une extension du **PDM** (ou **Product Data Management**) qui est un système se chargeant uniquement de la gestion des données techniques du produit (fichiers *CAO*, plans, documentation, etc.) lors de la phase de conception. Le PLM est un concept plus vaste permettant également la gestion des processus de l'entreprise (ou *Workflows*) en relation avec cette documentation. Le PLM est parfois intégré avec un *ERP* pour échanger des informations en temps réel entre le département de conception et les

départements de gestion et de fabrication.

Processus (*Process*) : Ensemble de moyens et d'activités qui transforment des éléments entrants en éléments sortants. La différence représentant la valeur ajoutée (ISO 8402). Enchaînement logique d'activités (opérations, tâches, actions...) avec critères de transition entre activités, défini en vue d'aboutir à un résultat par progression d'actions. Ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie (Cf. ISO 9000).

Processus du cycle de vie d'un système (*System Life Cycle Processes*) : Les quatre groupes de processus du cycle de vie applicables à toutes les phases du cycle de vie. (Cf. ISO 15288)

Revue : Réunion technique au cours de laquelle sont examinés en détail les éléments de décision. (Revue de définition, de projet, de conception, finale, de décision, de modification...).

Spécification (*Specification*) : Document prescrivant les exigences. Un qualificatif précise le type d'exigences concernées (produit, test...). Une spécification peut référer ou inclure des dessins, modèles ou tout autre document pertinent et indiquer les moyens et critères permettant de vérifier la conformité (Cf. ISO 8402). Ensemble des définitions des caractéristiques auxquelles doit répondre un produit (cahier des charges, plans, normes...), en matière fonctionnelle, physique, technique..., et vues sous un angle général ou détaillé.

Spécification Technique de Besoin (STB) : terminologie consacrée dans l'industrie pour indiquer le besoin d'une entreprise, exprimée suivant des critères techniques. La spécification technique vient de manière générale après l'expression fonctionnelle du besoin (EFB).

Système (*System*) : Ensemble d'éléments en interaction, organisés pour atteindre un ou plusieurs résultats déclarés. Un système peut être considéré comme un produit, procès ou comme les services qu'ils délivrent. (ISO 15288).

Traçabilité (*Traceability*) : L'aptitude à identifier les relations entre les différents artefacts du processus de développement. Processus qui permet d'établir une « matrice de traçabilité » et de tisser tous les liens ascendants et descendants pour un type d'information à travers l'architecture et le cycle de vie du système (traçabilité des exigences, de la configuration, des interventions...).

TRIZ (acronyme russe "Тéория Реchéния Изобрéателских Задатч": "Théorie de résolution inventive des problèmes" créée par Altshuller. ARIZ (*Inventive Problem Solving Algorithm*) : algorithme, comme une séquence d'opérations pour résoudre des problèmes techniques.

Validation (*Validation*) : Confirmation par des preuves tangibles que les exigences pour une utilisation spécifique ou une application prévue ont été satisfaites (Cf. ISO 9000). La validation, dans le contexte du cycle de vie d'un système, regroupe les activités qui assurent et qui construisent la confiance dans le système et dans son aptitude à satisfaire aux utilisations prévues, à atteindre les buts et les objectifs assignés (Cf. ISO 15288).

BIBLIOGRAPHIE

1. Ackerman P., Eichelberg D., (2004). Product Knowledge Management, in Proceedings International Conference on Economic, Technical and Organizational Aspects on Product Configuration System, Technical University of Denmark, Copenhagen.
2. AFITEP, (1998). Le management de projets, Principes et Pratiques, AFNOR ISBN : 2-12-470721-3.
3. AFNOR, (1994). Management de projet - Recueil des normes françaises.
4. Akao Yoji, (1993). Prendre en compte les besoins du client dans la conception du produit, AFNOR, Paris, ISBN 2-12-468311-X.
5. Altshuller G., (1984). Creativity as an exact science, Gordon & Breach, Luxembourg.
6. Asimow M., (1962). Introduction to Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
7. Bachelard G., (1934). Le nouvel esprit scientifique, PUF, réédité en 2003.
8. Baconsky T., (1996). Le rire des Pères, Essai sur le rire dans la patristique grecque, Desclée de Brouwer, Paris, ISBN 2-220-03716-9.
9. Bardou L., (2010). Ingénierie, Gestion et Soutien du Cycle de Vie des Produits et des Systèmes, Products & Systems Life Cycle Engineering, Support & Management, <http://lbardou.free.fr/index.htm>.
10. Bellut S., (1995). Estimer le coût d'un projet, AFNOR.
11. Blanchard B. S., (2004). System engineering management. 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, ISBN 0-471-29176-5.
12. Blanchard B. S., Fabrycky W. J., (2006). System engineering and Analysis. 4th ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, ISBN 0-13-196326-0.
13. Blessing L., Chakrabarti A., (2009). DRM, a Design Research Methodology, Springer-Verlag, London Limited, ISBN 978-1-84882-586-4.
14. Cantamessa M., (2001). Design research in perspective – a meta-research on ICED'97 and ICED'99. In: Culley S. et al. (eds) International Conference on Engineering Design (ICED'01). IMechE, Glasgow.
15. Cazaubon Ch., Gramacia G., Massard G., (1997). Management de projet technique – Méthodes et outils. Ellipses, Paris, ISBN 2-7298-5704-4
16. Chvidcenko I., (1974). La gestion des grands projets. Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace SUP'AERO, Toulouse.
17. Ciavaldini B., (1996). Des projets à l'avant-projet : l'incessante quête de réactivité – Analyse du processus de rationalisation de la conception automobile liée à l'évolution du produit en termes de complexité et d'innovation au sein du Groupe PSA Peugeot Citroën, Thèse de doctorat, ENSMP, Paris.

18. CIMdata Incorporated, (2009). PLM Market Growth in 2008 "A Mid-Year Look in 2009 – Weathering the Storm", White Paper, August.
19. CIMdata, (2001). Product Lifecycle Management (PLM) Definition, <http://www.cimdata.com/PLM/plm.html>.
20. Cross N., Christians H., Dorst K., (1996). *Analysing Design Activity*, John Wiley and Sons.
21. Cross N., Dorst K., Roozenburg N., (1992). *Research in Design Thinking*, Delft University Press.
22. Danesi F., Gardan N., Gardan Y., Reimeringer M., (2007). P4LM : A methodology for product lifecycle management. *Computers in Industry*.
23. Demoly F., (2010). *Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage*. Thèse de doctorat en mécanique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard – UTBM.
24. Dieter G. E., Schmidt L. C., (2007). *Engineering Design*, 4th edition, McGraw-Hill, New-York, ISBN 978-0-07-283703-2.
25. Dixon J. R., (1966). *Design Engineering : Inventiveness, Analysis and Decision Making*, McGraw-Hill, New-York.
26. Dixon J. R., (1987). *On Research Methodology Towards a Scientific Theory of Engineering Design*. *Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing (AI-EDAM)*, Academic Press, vol 1, n°3.
27. Dong A., (2009). *The Language of Design*, Springer-Verlag, London Limited, ISBN 978-1-84882-020-3.
28. Donnadiou G., (2008). *La carte n'est pas le territoire, mais... Essai d'épistémologie systémique*, 7th Systems Science European Union Congress Proceedings, Lisboa, Portugal.
29. Drăghici G., (1999). *Ingineria Integrată a produselor*, Eurobit, Timișoara, ISBN 973-96065-7-1.
30. Drăghici G., **Oriță A.**, (2008). *Building an Efficient Research Team for Attending the Product Lifecycle Management Industrial Needs*, The 32rd Annual Congress of the American Romanian Academy of Arts and Sciences (ARA), Wentworth Institute of Technology Boston, MA, USA, July 22-26, 2008, Proceedings, Scientific Editors: Marian Gh. Simion, Ilie Tălpășanu, Polytechnic International Press Canada, ISBN 978-2-553-01424-6
31. Drăghici G., **Oriță A.**, Drăghici A., (2008). *Building a Collaborative Product Development Network*, in *Design Synthesis*, Conference abstracts of the 18th CIRP Design Conference, Enschede, April 7-9, 2008
32. Drăghici, G. et Banciu, F. (2007). *Parallelism Between Algorithmic (Systematic) Design and Axiomatic Design*, în *Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VI (XVI)*, 2007, CD-ROM Edition, Volume VI (XVI), 2007, ISSN 1583 – 0691, pp. 1457-1468, Abstract pp.247
33. Evbuomwan N. F., Sivaloganathan S. et Jebb J. (1996). *A survey of Design Philosophies, Models, Methods and Systems*, *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 210, pp. 301-320.

34. Evbuomwan N., (1997). Generation of Design Solutions Using Morphological Analysis, International Conference on Engineering Design, Tampere.
35. FD X50-101, (1995). Analyse fonctionnelle - L'analyse fonctionnelle outil interdisciplinaire de compétitivité, AFNOR, Décembre.
36. FD X50-127, (2002)., Outils de management - Maîtrise du processus de conception et développement, AFNOR.
37. Forest J., (2007). Artéfact, les apports de l'approche simonienne, Colloque MEOTIC à l'Institut de la Communication et des Médias, Université Stendhal.
38. Gangemi A., (2005). Ontology Design Patterns for Semantic Web Content. Musen et al. (eds.): Proceedings of the Fourth International Semantic Web Conference, Galway, Ireland, Springer.
39. Gasevic, D., Djuric, D., Devedzi, V., (2006). Model Driven Architecture and Ontology Development, Springer-Verlag.
40. Geiger, O., (2000). Kennzahlenorientiertes Entwicklungscontrolling - Ein ganzheitliches, kennzahlenbasiertes Planungs-, Steuerungs- und Kontrollinstrument zur Analyse des Entwicklungsbereichs industrieller Unternehmen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2000.
41. Gero, J. S., Kannengiesser U., (2006). The situated function-behaviour-structure framework, Key Centre of Design Computing, and Cognition, University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia, <http://mason.gmu.edu/~jgero/research/ontologies.html>
42. Girard P., Doumeingt G., (2004). « Modelling of the engineering design system to improve performance », I.J. Computes & Industrial Engineering, vol. 46/1, p.43-67.
43. Gormand C., (1995). Le coût global - Pratique et études des cas. Afnor.
44. Griffin A., Hauser J. R., (1993). The voice of the customer, Marketing science, pages 1-27.
45. Hill P. H., (1970). The Science of Engineering Design, Holt, Rinehart and Winston, New York.
46. Hippel von E., (1978). Successful industrial products from customer ideas, The Journal of Marketing.
47. Horváth I., (2001). A contemporary survey of scientific research into Engineering Design. In Culley S. et al. (eds) International Conference on Engineering Design (ICED'01). IMechE, Glasgow.
48. Horvath I., Xirouchakis P., (2004). Tools and methods of competitive engineering, Fifth international symposium on tools and methods of competitive engineering - TMCE 2004 - Lausanne. Rotterdam : Millpress, 2 vol, p. 221-234.
49. Hubka V., Eder W.E., (1992). Engineering Design, Heurista, Zürich, Switzerland, ISBN 3-85693-026-4.
50. Hubka V., Eder W. E., (1996). Design science: introduction to the needs, scope and organization of engineering design knowledge, Springer-Verlag, London.

51. Hundal M. S., (2002). Mechanical life cycle handbook - good environmental design and manufacturing. New York : Marcel Dekker Inc., ISBN 0-8247-0572-6
52. Ingénierie, Gestion et Soutien du Cycle de Vie des Produits et des Systèmes, Products & Systems Life Cycle Engineering, Support & Management, <http://lbardou.free.fr/index.htm>.
53. Jones J. C., (1970). Design Methods, John Wiley & Sons, New York.
54. Jongho S., (2009). Decision Support Methods for Closed-Loop Conceptual Design, Thèse EPFL, no 4397, Lausanne.
55. Kesavadas M. P., Peygude A., Bandi K., (2005). Development of Formal Ontology for Product Design Lifecycle, Actes de la Conférence Internationale sur le PLM PLM'05, Lyon, Juillet 2005, France, Edition Inderscience Enterprises Ltd, p. 3-10.
56. Kumar P. P., (2008). Design process modeling: Towards an ontology of engineering design activities, Thesis presented to the graduate School of Clemson University.
57. Lebel B., (2010). Construire un tableau de bord pertinent sous Excel – Théorie, méthodologie et mise en œuvre, Eyrolles, Paris, ISBN : 978-2-212-53981-3.
58. Lindemann U., Maurer U., Braun T., (2009). Structural Complexity Management, Berlin, Springer, ISBN 978-3-540-87888-9.
59. Lotter B., (1986). Manufacturing Assembly Handbook. Butterworths, Boston.
60. Marples D., (1960). The Decisions of Engineering Design, Institute of Engineering Designers, London.
61. Matsokis A., (2010). An Ontology-Based Approach for Closed-Loop Product Lifecycle Management, Thèse EPFL, no 4832, Lausanne.
62. Medina J.-L-P., (2010). Approche orientée services pour la réutilisation de processus et d'outils de modélisation, Thèse de doctorat en informatique, Ecole doctorale de Mathématiques, Sciences et technologies de l'information, Informatique, Université de Grenoble.
63. Micaëlli J. P. et Forest J., (2003). Artificialisme: introduction à une théorie de la conception, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, ISBN 2-88074-540-3.
64. Minsky M., (1965). Matter, Minds, and Models. In: Proceedings of International Federation of Information Processing Congress, New York, United States, vol. 1, pp. 45-49.
65. Moigne J. L. (1984). La théorie du Système général. PUF.
66. Moigne J. L. (2003). Le constructivisme, Collection Ingénium, édition L'Harmattan, ISBN-10: 2747525759.
67. Moigne, J. L. (2002). L'Épistémologie de la modélisation, <http://www.mcxapc.org/docs/ateliers/lemoign3.htm>.
68. Morin E. (2005), Introduction à la pensée complexe, Collection Points essais, Seuil, Paris, ISBN-10: 2020668378.
69. Mostefai S., (2001). Fusion d'ontologies dans une optique PLM.

70. Mostefai S., Bouras A., Batouche M., (2005). Data Integration in a PLM Perspective for Mechanical Products, The International Arab Journal of Information Technology, Vol. 2, No. 2.
71. Mostefai S., Bouras A., Batouche M., (2006). Effective Collaboration in Product Development via a Common Sharable Ontology, International Journal of Information and Mathematical Sciences 2:4 2006.
72. Napoli A., (2005). Éléments sur La conception d'ontologies, La problématique de la conception d'une ontologie des UCD en OWL, ACI MDA, Strasbourg, 3 février 2005.
73. NF EN1325-1, (1996). Vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 1 : Analyse de la valeur et analyse fonctionnelle, AFNOR.
74. NF X50-127, (1988). Recommandation pour obtenir et assurer la qualité en conception, AFNOR.
75. NF X50-151, (1991). Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel, AFNOR.
76. NRC - National Research Council, (1991). Improving Engineering Design, National Academy Press, Washington, DC.
77. **Oriță A.**, Beney J.L., (2009). L'ingénierie systémique dans le PLM d'un produit, PLM Séminaire, Haute Ecole ARC Ingénierie, TRANSCAT, 12 mars 2009
78. **Oriță A.**, Drăghici G., (2005). User-Centred Design Process and its Influence on Product Competitiveness, 12th CIRP Seminar on Life Cycle Engineering, Grenoble, France, April 3-5, 2005
79. **Oriță A.**, Repetti P., (2000). Proposition d'un modèle de conception intégrée, Université d'été de recherche francophone: Ingénierie Simultanée et Concurrente ISC 2000 Saline Royale, Arc et Senans, Juillet 2000
80. **Oriță A.**, Drăghici G. et Repetti P., (2011). Methodology of Definition of Delivery Requirements, ModTech International Conference - New face of TMCR, Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, 25-27 May 2011, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, p.793-796 (în curs de indexare **ISI Web of Knowledge**)
81. **Orita, A.**, Draghici, G., (2010). Improvement of QFD with a Quality Plan, Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21th International DAAAM Symposium, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2010, ISBN 978-3-901509-70-4, ISSN 1726-9679, pp. 1513-1514, (în curs de indexare **ISI Web of Knowledge**, Database: **Inspec**)
82. **Oriță A.**, Drăghici, G., Beney J.-L. & Repetti P., (2011). Using TRIZ to find Alternatives Solutions, ModTech International Conference - New face of TMCR, Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, 25-27 May 2011, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, p.789-792 (în curs de indexare **ISI Web of Knowledge**)
83. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J. and Grote K.-H., (2007). Engineering Design - a systematic approach, 3rd edition, Springer-Verlag, London Limited, ISBN 978-1-84628-318-5.

84. Park C. S., (2009). Analyse économique en ingénierie, Editions du renouveau pédagogique Inc., Quebec, ISBN 978-2-7613-2704-6
85. Patil L., Dutta D., Sriram R., (2005). Ontology Based Exchange of Product Data Semantics, IEEE Transactions on Automation Science and engineering, vol 2, n° 3, 2005, p. 213-225.
86. Pepper D. Culppeper, Peter A. Hall, Bruno Palier, (2005). La France en mutation 1980-2005, Collection Sciences Po, Les Presses, ISBN-10: 9782724609721.
87. Perrin J., (1991). Ouvrage coordonné par ~. Construire une science des techniques, Collection l'Interdisciplinaire. Limonest, France.
88. Perrin J., (2001). Concevoir l'innovation industrielle, CNRS Editions, Paris, ISBN 2-271-05822-8
89. Petitdemange C., (1991). La maîtrise de la valeur – La gestion de projet et l'ingénierie simultanée, AFNOR, Paris, ISBN 2-12-475 021-6
90. Plihon V., Ralyté J., Benjamin A., Maiden N.A.M., Sutcliffe A., Dubois E., Heymans P., (1998). A Reuse-Oriented Approach for the Construction of Scenario Based Methods. Proc. of the Int. Software Process Association's 5th Int. Conf. on Software Process (ICSP'98), Chicago, Illinois, US, (1998).
91. Prat N., (1999). Réutilisation de la trace par apprentissage dans un environnement pour l'ingénierie des processus, Thèse présenté à l'Université de Paris1, février 1999.
92. Protégé, (2006). Free, open source ontology editor and knowledge-base framework, Stanford University School of Medecine, <http://protege.stanford.edu/>.
93. Rabardel, P. (1995). Les Hommes et les technologies une approche cognitive des instruments contemporains. Paris, Université de Paris 8.
94. Rantanen Kalevi, DOMB Ellen, (2002). Simplified TRIZ. Boca Raton : St. Lucie Press, ISBN 1-57444-323-2
95. Reyman, Isabelle M. M. J. (2001). Improving design processes through structured reflection: a domain-independent approach – Eindhoven: Eindhoven University of Technology, Proefschrift, ISBN 90-386-0831-4 NUGI 841.
96. Rochet S., (2007). Formalisation des processus de l'Ingénierie Système : Proposition d'une méthode d'adaptation des processus génériques à différents contextes d'application. Thèse de doctorat en Systèmes Automatiques, l'Institut National des Sciences Appliquées, Université de Toulouse, Toulouse.
97. Roozenburg N. F. M. et Eekels J., (1995). Product Design: Fundamentals and Methods, Wiley, Chichester.
98. Rosca I., (1999). Vers une vision systémique du processus de l'explication. Récit d'une recherche sur l'intégration de la pédagogie, de l'ingénierie et de la modélisation. Thèse de doctorat en technologie éducationnelle, Université de Montréal. <http://www.ioanrosca.com/education/these/>.

99. Roucoules L., Yannou B., Eynard B., (2006). Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits. Lavoisier, Paris, 421 p., (Traité IC2, série Productique). (ISBN 2-7462-1214-5)
100. Saaksvuori A., Immonen A., (2004). Product Lifecycle Management. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-40373-6
101. Saffarpour A., (2009). Product platform development: a functional approach considering customer preferences, Thèse n° 4536, EPFL – Lausanne.
102. Scheer, A.-W., (1999). ARIS - Business Process Modeling, Springer, Berlin, ISBN 3-540-65835-1.
103. SEF, (2001). Systems Engineering Fundamentals, January 2001, Defense Acquisition University Press, Fort Belvoir, Virginia.
104. Simon H. A., (1991). Science des systèmes, science de l'artificiel, Dunod, Paris.
105. Simon H. A., (1996). The Sciences of the artificial, 3rd ed., The MIT Press, Cambridge, MA.
106. Stark J., (2005). Product Lifecycle Management. 21st Century Paradigm for Product Realisation. London : Springer-Verlag, (Decision Engineering Series), ISBN 1-85233-810-5
107. Suh N. P., (2005). Complexity: Theory and Applications. Oxford University Press, Oxford.
108. Suh N.P., (1990). The Principles of Design. Oxford University Press, Oxford.
109. Tassinari R., (1992). Pratique de l'analyse fonctionnelle, Dunod, Paris.
110. TDC, (2001). Manuel utilisateur TDC Need, TDC France.
111. Tollenaere M., (1998). Conception de produits mécaniques. Hermès, Paris. (ISBN 2-86601-694-7)
112. Ulrich, K. T. et Eppinger, S. D., (2000). Product Design and Development, Second edition, McGraw Hill International Editions.
113. Verzat C., (2000). Les logiques d'apprentissage collectif en recherche industrielle. Thèse de doctorat en sociologie, UFR Sciences des Organisation, Université ParisIX-Dauphine.
114. Vries, M. J., Cross, N., Grant. D. P., (1993). Design Methodology and Relationships with Science, Kluwer Academic Publishers.
115. WEEE, (2002). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council, of 27 January 2003, on waste electrical and electronic equipment (WEEE), Official Journal of the European Union.
116. Wikipedia,
http://fr.wikipedia.org/wiki/Introduction_%C3%A0_la_syst%C3%A9mique
et <http://mutation.ifrance.com/systeme.htm>
117. Zwingelstein G., (1996). La maintenance basée sur la fiabilité, guide pratique d'application de la RC, Hermès, Paris, ISBN 2-86601-545-2