



Formulation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire

Dominique Scaravetti

► To cite this version:

Dominique Scaravetti. Formulation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2004. Français. NNT : . tel-00008800

HAL Id: tel-00008800

<https://theses.hal.science/tel-00008800>

Submitted on 16 Mar 2005

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

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

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Centre de Bordeaux

THÈSE

présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR
de
L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
D'ARTS ET MÉTIERS

Ecole Doctorale : Mécanique des Métiers de l'Ingénieur

Spécialité : Mécanique

par

Dominique SCARAVETTI

**FORMALISATION PRÉALABLE D'UN PROBLÈME DE CONCEPTION,
POUR L'AIDE A LA DÉCISION EN CONCEPTION PRÉLIMINAIRE**

Soutenue le 3 décembre 2004 devant le jury composé de

MM.	A.	AOUSSAT	Professeur à l'ENSAM, Paris	Président du jury
	J.C.	BOCQUET	Professeur à l'Ecole Centrale, Paris	Rapporteur
	D.	BRISAUD	Professeur à l'ENSHMG, Grenoble	Rapporteur
	J.P.	NADEAU	Professeur à l'ENSAM, Bordeaux	Directeur de thèse
	P.	SEBASTIAN	Maître de conférences HDR, à l'Université Bordeaux 1	Co-directeur de thèse
	J.	PAILHES	Maître de conférences à l'ENSAM, Bordeaux	Examineur

Table des matières

Chapitre 1	Introduction	5
1.1	Terminologie	6
1.2	Le risque en conception	7
1.3	Problématique	10
1.4	Organisation du document	11
Chapitre 2	Organisation de la conception	13
2.1	Démarches et modèles de conception	13
2.1.1	Différents types de conception	14
2.1.2	Processus de conception	16
2.1.2.1	Processus académiques	20
2.1.2.2	Processus industriels et normatifs	23
2.1.2.3	Comparaison des processus de conception	26
2.2	Données et objets intermédiaires	29
2.2.1	Types de connaissances à chaque étape	30
2.2.2	Évolution de l'abstraction vers la complétude	31
2.2.3	Jalons normalisés	35
2.3	Pratique des processus	39
2.3.1	Organisations	39
2.3.2	Choix, décisions	40
2.3.3	Itérations	42
2.4	Difficultés en conception préliminaire	43
2.4.1	Décisions et faibles connaissances	43
2.4.2	Prise en compte simultanée de données hétérogènes	45
2.5	Synthèse	46
Chapitre 3	Vers un système d'aide à la décision	49
3.1	La Conception Inversée Intégrée	51
3.2	Contraintes en conception préliminaire	52
3.2.1	Pertinence des PSC en conception préliminaire	52
3.2.2	Utilisation des PSC en conception architecturale	54
3.3	Démarche proposée et outil	56
3.3.1	Positionnement et complémentarité par rapport aux processus existants	56
3.3.2	Structuration de notre démarche globale	60
3.3.3	Base de connaissances	64
3.3.4	Le solveur "Constraint Explorer"	65
3.4	Définition d'un problème de conception sous forme de PSC	66

3.5	Synthèse des besoins recensés pour le système d'aide à la décision	67
Chapitre 4	Qualification de la conception	69
4.1	Qualification de la conception pour le concepteur	70
4.1.1	Vision globale du produit conçu	71
4.1.1.1	Critères globaux de conception	71
4.1.1.2	Maîtrise des coûts et de la valeur	71
4.1.1.3	Développement durable et éco-conception	74
4.1.2	Qualification de la réalisation des fonctions	76
4.1.2.1	Résultat final : satisfaction des critères d'appréciation du CdCF	76
4.1.2.2	Qualification des choix de solution	76
4.1.3	Sûreté de fonctionnement	77
4.1.3.1	Contexte	77
4.1.3.2	Sûreté de fonctionnement locale	77
4.1.3.3	Sûreté de fonctionnement globale	77
4.1.4	Synthèse	79
4.2	Données pour l'aide à la décision	81
4.2.1	Indicateurs de pertinence	81
4.2.2	Indicateurs de performance	82
4.2.3	Fonction objectif	83
4.2.4	Front de Pareto	83
4.2.5	Choix	85
Chapitre 5	Analyse et structuration du problème de conception	87
5.1	Approche du problème de conception	87
5.1.1	Comparaison de l'approche axiomatique et d'autres approches	87
5.1.1.1	Approche axiomatique et approche algorithmique	88
5.1.1.2	TRIZ et les règles de Polovinkin	90
5.1.1.3	Complémentarités et divergences des approches TRIZ et AD	91
5.1.1.4	Synthèse	92
5.1.2	Outils existants	94
5.1.2.1	Décomposition du produit	94
5.1.2.2	Analyse fonctionnelle	95
5.1.2.3	Evolution du BDF	99
5.2	Caractéristiques structurantes du problème de conception	102
5.3	Démarche d'analyse et structuration en quatre étapes	103
5.4	Etape 1 : analyse du besoin	104
5.4.1	Expression fonctionnelle du besoin	104
5.4.2	Critères de qualification client	104
5.4.2.1	Critères technologiques	104
5.4.2.2	Critères économiques	105
5.4.2.3	Critères de qualification société, marketing	106
5.4.3	Caractérisation	107
5.4.4	Cycle de vie du produit	109
5.4.5	Indicateurs de pertinence	110
5.5	Etape 2 : Approche fonctionnelle externe	110
5.5.1	Fonctions structurantes	111
5.5.2	Récapitulatif	113
5.5.3	Indicateurs de pertinence	115

5.6	Etape 3 : Approche organique	115
5.6.1	Eléments standards	116
5.6.2	Eléments non définis	116
5.6.3	Contraintes d'interfaces	116
5.6.4	Récapitulatif	117
5.6.5	Indicateurs de pertinence	118
5.7	Etape 4 : Approche physique	119
5.7.1	Identification des comportements physiques structurants	119
5.7.2	Récapitulatif	121
5.7.3	Ecriture des modèles	122
5.7.4	Pertinence de la conception	123
5.8	Synthèse	124
5.9	Vérification de l'exhaustivité	126
Chapitre 6	Application et résolution	131
6.1	Confrontation de notre approche à la démarche classique	131
6.2	Analyse du besoin du client et cahier des charges	132
6.3	Démarche de conception classique	134
6.3.1	Recherche de concepts	134
6.3.2	Difficultés identifiées	136
6.4	Utilisation du système d'aide à la décision	138
6.4.1	Analyse et structuration du problème de conception	139
6.4.1.1	Etape 1 : Analyse du besoin	139
6.4.1.2	Etape 2 : Approche fonctionnelle	140
6.4.1.3	Etape 3 : Approche organique	141
6.4.1.4	Etape 4 : Approche physique	143
6.4.1.5	Paramètres structurants	144
6.4.2	Comparaison entre les concepts de solution	145
6.4.3	Formalisation des contraintes	148
6.4.4	Résolution et exploitation des résultats	150
6.4.4.1	Résolution du PSC	150
6.4.4.2	Fonction objectif	151
6.4.4.3	Front de Pareto	152
6.4.4.4	Analyse des résultats	153
6.4.4.5	Conception détaillée	155
6.4.5	Synthèse de la comparaison des démarches	157
Conclusion		159
Bibliographie		165
Annexes		175

Tables des illustrations

Figure 1: Evolution des coûts engagés sur le projet et des coûts de développement [Zim 01].	9
Figure 2: Mise en parallèle des processus de conception	19
Figure 3: Décomposition hiérarchique d'un problème de conception; 'zig-zag' entre les domaines [Yan 00a].	22
Figure 4: Processus de conception selon le point de vue 'Axiomatic Design' [Suh 90].	22
Figure 5: Flux d'énergie dans un système réel [Fow 98].	23
Figure 6: Processus de conception selon les directives VDI 2221 [VDI 87].	24
Figure 7: Phases du processus de conception [Cav 95].	25
Figure 8: Détail de la phase de conception préliminaire [Cav 95].	25
Figure 9: Processus de conception et jalons en aéronautique.	26
Figure 10: Boucles de retour dans le processus de conception.	27
Figure 11: Identification des jalons communs aux processus de conception.	28
Figure 12: Processus de conception et espaces de représentation ; modélisation matricielle [Vad 96].	30
Figure 13: Evolution du niveau d'imprécision durant le processus de conception, d'après [Gia 97].	31
Figure 14: Modèles et données dans le processus de conception, du besoin à la conception détaillée.	34
Figure 15: Etats et processus du cycle de vie d'un produit [Cav 95].	35
Figure 16: Etats documentaires du déroulement d'un programme; adapté des normes RG Aéro.	38
Figure 17: Structures organisationnelles [Mid 93].	39
Figure 18: Elargissement de l'espace des solutions de conception.	41
Figure 19: Divergence et convergence dans le processus de conception, d'après les directives VDI.	44
Figure 20: Choix réalisés durant la conception préliminaire, durant une démarche classique.	47
Figure 21: Positionnement de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes et des outils intégrés dans le système d'aide à la décision.	50
Figure 22: Proposition de positionnement des choix à réaliser par le concepteur durant la conception préliminaire, avec l'utilisation du système d'aide à la décision.	51
Figure 23: Conception inversée intégrée [Fis 00].	52
Figure 24: Evolution du niveau d'imprécision durant le processus de conception.	53
Figure 25: Processus de spécification et de satisfaction de contraintes [Tho 96b].	55
Figure 26 : Comparaison, dans le temps, des états d'avancement des processus de conception.	57
Figure 27: Evolution du processus de conception par l'introduction de la CII.	58
Figure 28: Conception préliminaire "enrichie" par la CII.	58
Figure 29: Positionnement de la conception architecturale utilisant le système d'aide à la décision.	60
Figure 30: Structuration de la CII et outils intervenant dans le processus.	61
Figure 31 : Processus global d'aide à la décision.	62
Figure 32: Structuration détaillée de la phase d'analyse et structuration du problème de conception.	63
Figure 33: Aperçu de l'interface du logiciel Constraint Explorer.	66
Figure 34: Diagramme des coûts d'un développement.	72
Figure 35: Loi d'intégralité des parties.	76
Figure 36: Indicateurs de pertinence identifiés durant la démarche d'analyse et structuration du problème de conception.	82
Figure 37: Exemple d'espace des solutions.	84
Figure 38: Structure fonctionnelle d'après Pahl et Beitz [Oos 01].	88
Figure 39: Nature hiérarchique des domaines [MAN 99].	89
Figure 40: Stratégies de décomposition comparées.	90
Figure 41: Modèle du processus de conception "arbre des tâches" [Var 95].	94
Figure 42: Organigramme technique.	95
Figure 43: Fonctions de service et contraintes de l'aspirateur ménager.	97
Figure 44: Extrait du diagramme FAST de l'aspirateur.	98
Figure 45: Exemple de Bloc Diagramme Fonctionnel.	98
Figure 46: Extrait du BDF de premier niveau de l'aspirateur.	99
Figure 47: Du BDF au GSC, pour l'exemple de l'aspirateur.	100
Figure 48: Démarche de recherche, outils associés et caractéristiques structurantes identifiés à chaque étape.	103
Figure 49: Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes.	110
Figure 50 : Organigramme Technique étendu.	115
Figure 51: Graphe des associations Substances-Champs de l'aspirateur.	121
Figure 52: Structuration détaillée de la démarche de conception préliminaire enrichie.	125
Figure 53: Horloge monumentale.	132
Figure 54: Analyse fonctionnelle externe: analyse systématique des milieux extérieurs.	133

Figure 55: Schéma de l'architecture globale du mécanisme de remontée des poids, situé par rapport à l'horloge.	134
Figure 56: FAST pour la fonction "remonter les poids".	135
Figure 57: Les deux concepts de solutions (WS) retenus.	135
Figure 58: Variables de conception du problème de conception architecturale.	136
Figure 59: Processus de détermination d'architecture séquentiel et itératif.	137
Figure 60: Différents états d'avancement de la phase de conception architecturale enrichie par la CII, pour la conception du mécanisme de remontée de poids.	139
Figure 61: Organigramme Technique étendu du système de remontée de poids d'horloge; avec les deux alternatives de concepts de solution.	141
Figure 62: Extraits des tableaux des composants standards et leurs variables de conception.	142
Figure 63: Bloc diagramme substances-champs du concept de solution WS#1.	143
Figure 64: GSC du concept de solution WS#2.	144
Figure 65: Variables de conception, pour le concept de solution #1.	145
Figure 66: Exemple de variables différentes sur les deux concepts de solutions sélectionnés.	146
Figure 67: Graphe causal de résolution du solveur Constraint Explorer.	148
Figure 68: Variables de conception et variables critères du problème.	148
Figure 69: Espace des solutions et sa frontière de Pareto.	152
Figure 70: Evolution de la valeur minimum de la fonction objectif et la solution correspondante, en fonction de λ	153
Figure 71: Valeurs croissantes de l'indicateur de performance "effort radial", pour chaque concept.	154
Figure 72: Valeurs croissantes de l'indicateur de performance "coût", pour chaque concept.	154
Figure 73: Vue 3D (CAO) du mécanisme de remontée de poids.	155
Figure 74: Plan d'ensemble du mécanisme de remontée de poids.	156
Figure 75: Mécanisme en cours de montage.	156

Tableau 1 : Risques de conception et conséquences, d'après [Lar 96] et [Sar 97].	8
Tableau 2: Evolution des représentations du produit en fonction niveau d'abstraction, d'après [Ull 03].	31
Tableau 3: Niveaux croissants de concrétisation, d'après [Pah 96].	32
Tableau 4: Critères de qualification du point de vue concepteur et variables critères associées.	80
Tableau 5: Règles similaires des deux approches, d'après [Yan 00a].	92
Tableau 6: Divergences des deux approches, d'après [Yan 00a].	92
Tableau 7: Caractérisation et écriture des critères de qualification client.	109
Tableau 8: Différents types de fonctions structurantes et nature des fonctions.	114
Tableau 9: Eléments structurants de la description organique du produit.	118
Tableau 10: Effets induits par les effets générés par des gradients (cf. annexe III).	120
Tableau 11: Exploitation du GSC et identification des comportements physiques à traduire.	121
Tableau 12: Différents types de caractéristiques structurantes liées aux comportements physiques.	122
Tableau 13: Liste de spécifications selon [Pah 96].	127
Tableau 14: Liste de spécifications selon [Pug 91].	128
Tableau 15: Liste de spécifications selon [Ull 03].	128
Tableau 16: Liste de spécifications selon [Hub 01].	129
Tableau 17: Liste de spécifications selon [Tom 02].	129
Tableau 18: Liste de spécifications selon [Qua 94].	130
Tableau 19: Caractéristiques structurantes identifiées à l'étape 1.	140
Tableau 20: Caractéristiques structurantes identifiées à l'étape 2.	141
Tableau 21: Caractéristiques structurantes identifiées à l'étape 3.	143
Tableau 22: Identification des paramètres et des comportements physiques pertinents (étape 4) pour la WS #1.	144
Tableau 23: Légende de la Figure 66, et nom des variables correspondantes dans les modèles du problème de conception.	146
Tableau 24: Premières solutions pour la masse à remonter de 12kg (côté heures).	151

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'équipe "Système Energétiques et Conception" du laboratoire inter-établissements TREFLE.

Tout d'abord je tiens à remercier chaleureusement Jean-Pierre Nadeau qui a encadré cette thèse. Je le remercie non seulement de m'avoir encouragé à me lancer, mais également pour la confiance qu'il m'a témoigné. Son aide et ses apports m'ont été très précieux. J'ai également apprécié les conditions dans lesquelles j'ai pu travailler durant ces deux dernières années.

Daniel Brissaud et Jean-Claude Bocquet m'ont fait l'honneur de juger ce travail en tant que rapporteur, je les en remercie vivement. Je remercie également Améziane Aoussat qui a accepté de présider le jury de thèse. Les remarques et les questions qu'ils ont soulevées me permettront de faire progresser ce travail.

Mes remerciements vont aussi à Patrick Sébastien qui a co-encadré ce travail et à Jérôme Pailhès. Les échanges constructifs que nous avons eu ensemble m'ont régulièrement aidé.

François Routaboul, Directeur du centre ENSAM de Talence, m'a également toujours encouragé en m'accordant des conditions de travail favorables, qu'il en soit ici remercié.

Je remercie ensuite Jean Rodolphe Puiggali, Directeur du TREFLE, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire, ainsi que ses autres membres pour leur sympathie.

Je remercie également Christophe Lemaire et Victor Pouget-Chabrolle pour leur aide efficace et le travail de réalisation technique du mécanisme de remontée automatique des poids.

Enfin, je remercie Anne, mon épouse, pour son soutien, ses encouragements et son aide au quotidien, mais aussi pour sa patience.

Glossaire des termes anglais et acronymes utilisés

Working principle :	Principe de fonctionnement
Working structures (WS) :	Concept de solution
Conceptual design :	Recherche de concepts
Embodiment design :	Conception architecturale / recherche d'architecture
Detail design :	Conception détaillée
Time to market :	Temps de mise sur le marché

ACV :	Analyse du Cycle de Vie
PSC :	Problème de Satisfaction de Contraintes
CdCF :	Cahier des Charges Fonctionnel
STB :	Spécification Technique du Besoin
DCP :	Dossier de Concept Produit
DD :	Dossier de Définition
DJD :	Dossier de Justification de la Définition
SDF :	Sûreté de fonctionnement
OT :	Organigramme Technique
OTe :	Organigramme Technique Etendu
BDF :	Bloc Diagramme Fonctionnel
GSC :	Graphe Substances Champs
Vco :	Variable de conception
Vcr :	Variable critère

Chapitre 1 Introduction

La conception de produit apporte une réponse aux besoins exprimés sous forme d'un dossier de définition du produit formalisé à la suite d'une succession d'artefacts¹ émis durant le processus de conception. Elle diffère des sciences dites exactes car l'objet conçu sera un compromis [Gui 93][Mat 02], qui répondra plus ou moins bien aux différentes requêtes, car celles-ci sont souvent antagonistes ou contradictoires [Jan 90]. Dès lors que tous les métiers intervenant dans le développement du produit expriment leurs contraintes, il devient difficile de satisfaire idéalement tous les objectifs du cahier des charges. Couramment rencontré, le critère de coût minimum par exemple, est souvent en opposition par rapport à d'autres exigences.

La recherche de ce consensus est intrinsèque aux démarches des concepteurs ; elle met en œuvre leur jugement, un arbitrage, et finalement des décisions. Durant les premières étapes de la conception d'un produit, ces décisions déterminent jusqu'à 70% des futurs coûts du cycle de vie du produit; cette phase de la conception comporte donc des risques. Mais les décideurs ne possèdent pas alors nécessairement tous les éléments qui les aideraient à faire des choix raisonnés. Des outils de validation de la conception existent pour des phases plus avancées, lorsque la définition du produit est plus complète. Ainsi, beaucoup de processus de conception proposent des boucles de recherche itératives d'une définition du produit satisfaisant aux exigences exprimées en amont; Pour s'approcher d'un compromis convenable, plusieurs itérations sont alors nécessaires.

Mais finalement le dilemme suivant se pose durant les premières phases du processus de conception : les concepteurs doivent être peu contraints afin d'être créatifs [Mat 02] et doivent être contraints de sorte que les décisions prises vérifient les exigences du problème de conception.

¹ L'artefact est une structure d'origine artificielle dont l'apparition est liée à la méthode utilisée au cours d'une observation ou d'une expérience [Hac 91].

Ainsi, nous nous sommes intéressés à la conception préliminaire afin de proposer des outils pour l'aide à la décision dans cette phase du processus de conception. Aider à la décision implique les points suivants :

- pouvoir prendre en compte toutes les requêtes, sans éluder celles qui sont antinomiques;
- donner au concepteur l'espace complet des solutions²;
- disposer d'éléments facilitant le choix parmi elles.

1.1 Terminologie

Même si les différentes visions du processus de conception de produit seront détaillées ultérieurement (§2.1.2), nous souhaitons d'ores et déjà définir le vocabulaire que nous employons.

Dans la plupart des processus se retrouvent souvent les phases successives suivantes : expression du besoin, recherche de concepts, recherche d'architecture, conception détaillée. Cette dernière phase (recouvrant calculs, simulation, dimensionnement, production de plans détaillés, etc.) est souvent assimilée en France à la conception tout court [Yan 01]³.

Les termes anglo-saxons correspondant à ces phases, utilisés par Pahl et Beitz [Pah 96], sont très répandus dans la littérature [Wal 00] et utilisés dans les processus industriels. Nous adopterons ces dénominations et leurs traductions.

La **recherche de concepts** ou "conceptual design" met en œuvre des processus de créativité et consiste à explorer diverses solutions de principe pour aboutir au choix du concept répondant aux besoins fonctionnels et spécifiés. Yannou parle également de "concept de solution" comme d'une représentation intermédiaire du produit, à un stade où tous les principes de conception n'ont pas été choisis [Yan 01]. Les différents états de la conception seront exposés dans le §2.2.

Ensuite, l'activité de synthèse en conception préliminaire consiste à déduire des formes, des arrangements de composants, des matériaux, etc, à partir d'une fonction ou d'un comportement exigé.

La phase correspondante dans les processus formalisés est appelée **conception architecturale** ou "embodiment design", durant laquelle sont réalisés des choix de technologies employées, de composants, de dimensions structurelles et d'architectures. Le résultat de cette phase est l'architecture produit ou configuration.

Nous adopterons la définition de la **conception préliminaire** consistant à dire qu'elle englobe les phases de recherche de concept et de conception architecturale. Selon Cavaillès, même si l'expression du besoin précède la conception préliminaire, les tâches sont itératives et conduisent à mener en parallèle les deux processus [Cav 95].

Par contre, nous n'utiliserons pas les termes "preliminary design" ni "préconception", qui ne recouvrent pas le même sens selon les auteurs.

² L'artefact issu de la conception préliminaire correspond à une architecture du produit (voir §2.2). Dans le cadre de la démarche que nous proposons, une solution correspond à une architecture satisfaisant toutes les contraintes identifiées et elle est définie par un ensemble de variables valuées.

³ Nous utilisons le mot conception au sens du terme anglais "design", pour définir la démarche complète, du concepteur à l'utilisateur, avec la prise en compte de toutes les phases de l'industrialisation.

1.2 Le risque en conception

Le risque de conception correspond au fait que le produit conçu ne réponde pas à l'ensemble des exigences. Selon Sarbacker et Ishii, le risque durant le développement de produit, résulte de l'exposition à une chance d'insuccès dû aux effets de l'ambiguïté et/ou de l'incertitude [Sar 97] :

- L'ambiguïté est un manque de compréhension ou de clarté sur les paramètres critiques d'un problème décisionnel ou sur la nature des relations entre les paramètres. Cela se traduit par l'incapacité pour le concepteur à construire un modèle adéquat du problème, ou inapproprié pour aider à la prise de décision.
- L'incertitude provient d'un manque d'information sur certaines variables pertinentes pour le problème de conception. L'incertitude peut découler du caractère stochastique de la variable ou de sa mesure, la variable peut aussi être non mesurable. L'incertitude concerne aussi les résultats attendus de la conception; Elle peut aller jusqu'à un manque complet d'information.

D'après Fernex-Walch, il existe des risques surtout lors d'un projet d'innovation car l'innovation peut déstabiliser les modes de fonctionnement des entreprises [Fer 91]. Les risques peuvent être :

- liés au développement (conception, fabrication, conditionnement);
- industriels (critères financiers, logistique, respect des plannings);
- organisationnels (perturbation de l'organisation existante);
- un dysfonctionnement du produit;
- une mauvaise perception du produit par l'utilisateur final;
- liés au marché (distribution, ciblage);
- de concurrence;
- de mauvaise image de l'entreprise;
- de positionnement du produit par rapport aux existants;
- un manque de personnel qualifié;
- une non adhésion des employés au projet d'innovation.

Tomala propose d'évaluer les conséquences des décisions en conception dès la phase de créativité [Tom 03] et met en évidence des facteurs d'influence sur la valeur et le coût sur le cycle de vie d'une innovation : indicateurs globaux de performance : indicateurs sociaux, environnementaux, de coût, de valeur (entreprise, client), d'impact sur d'autres innovations

Le Tableau 1 donne des indications sur les risques de conception et leurs conséquences du point de vue du concepteur.

Facteur de risque	Conséquences
<u>Spécifications du produit</u> : les directives du cahier des charges ne correspondent pas aux attentes du client	Perte de client Violation de la date d'exigibilité
<u>Marché</u> : le produit arrive trop tard, les coûts objectifs sont dépassés, le produit ne correspond pas aux critères du marché	Fourniture hors délais stratégique Exigences client non satisfaites
<u>Technique</u> : -la conception proposée ne respecte pas les spécifications -non-compatibilité des interfaces [Cav 95] -degré de complexité élevé	Mauvaise qualité Reconception et violation de la date d'exigibilité Retour en maintenance, après vente
<u>Délais</u> : remise en cause des décisions, reconception	Itérations de conception supplémentaires Recours à des ressources additionnelles Violation de la date d'exigibilité
<u>Financier</u>	Coût dépassé Perte de client
<u>Ressources</u> : les ressources de développement ne sont pas disponibles	Perte d'information Violation de la date d'exigibilité
<u>Risque environnemental</u> : le produit, ses composants, les procédés affectent l'environnement	Pollution Perception négative du public

Tableau 1 : Risques de conception et conséquences, d'après [Lar 96] et [Sar 97].

Les "risques produit" sont principalement supportés par l'utilisateur final durant la phase d'utilisation du produit. Les "risques programme" sont surtout associés aux dérives des objectifs de performances, de coût, de délai [Cav 95].

Pour réduire les risques, l'enjeu consiste d'une part à maîtriser les délais de développement. D'autre part, pour réduire l'ambiguïté et l'incertitude dans les premières phases du processus de conception, il faut aider le concepteur à écrire un modèle du problème de conception approprié pour aider ensuite à la prise de décision.

La conception préliminaire est une phase cruciale du processus de conception, dont les enjeux financiers sont bien connus (voir Figure 1) : elle représente moins de 5% des dépenses de développement, mais peut engager jusqu'à 70% des coûts du projet [Ber 88][Bax 95][Ull 03] qui sont figés pour la suite.

Sur la Figure 1, la courbe en trait pointillé représente l'évolution des coûts de développement du produit durant les phases du processus de conception : les phases de conception préliminaire et détaillée représentent seulement 7.5% du coût global du projet jusqu'à l'industrialisation.

L'autre courbe indique la marge de manœuvre financière restant à la fin de chaque phase pour la totalité des coûts du cycle de vie du produit; les choix réalisés durant chaque phase en figeant une partie. La figure s'appliquant au domaine aéronautique, cette évolution se poursuit au-delà de la certification.

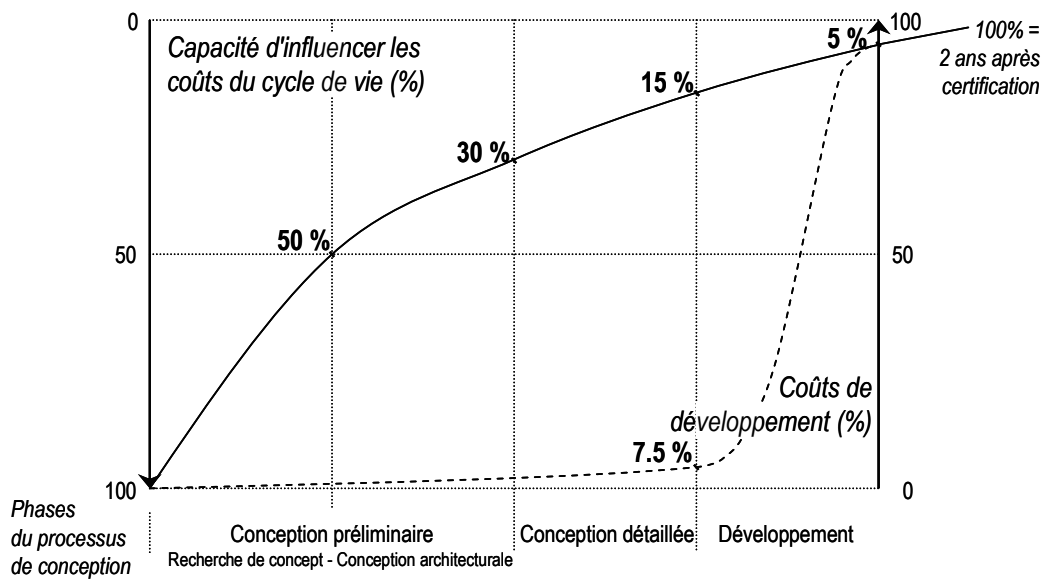


Figure 1: Evolution des coûts engagés sur le projet et des coûts de développement [Zim 01].

Nous voyons donc que les choix réalisés durant la première phase du processus de conception sont déterminants. Se pose notamment le problème suivant : A la suite des phases de créativité, plusieurs concepts peuvent émerger. Développer plusieurs concepts est une solution coûteuse. Sélectionner un concept pour qu'il fasse l'objet de développement est moins onéreux, mais risqué. En effet, même si ce concept semble être le plus pertinent, les concepteurs peuvent passer à côté d'un autre moins connu mais plus performant. Il serait donc souhaitable de pouvoir évaluer plusieurs concepts de solution.

Or, durant les premières phases du processus de conception, les données sont imprécises, et il est difficile selon Antonsson d'utiliser des outils informatiques. Les méthodes assistées par ordinateur comme la modélisation solide, l'optimisation, l'analyse de mécanisme, etc., demandent toute une représentation très précise des objets [Ant 01]. Les concepteurs doivent alors faire beaucoup d'hypothèses [Cha 92] et restreignent le champ de leurs investigations.

Les outils d'analyse conventionnels ne sont pas adaptés pour analyser une solution de conception incomplète [Saw 01b]. Ainsi, les concepteurs doivent souvent adopter une démarche empirique du type "essai-erreur" afin de déterminer les valeurs de paramètres. De plus, la détermination d'architecture est séquentielle et nécessite des choix de valeurs de paramètres pour pouvoir en déterminer d'autres. Les décisions de conception faites dans ces circonstances aboutissent souvent à une solution de conception sous optimale [Saw 02].

Enfin, les outils ou méthodes développées en recherche sont peu exploités et difficilement utilisables industriellement selon Reyman [Rey 01]. La plupart des évaluations sur le produit (performance, robustesse, coût, productibilité, etc.) interviennent après sa définition, ce qui conduit à des itérations dans le processus de conception [Ull 03]; d'où une difficulté à maîtriser les délais de conception. On se limite à évaluer les performances d'une solution souvent arbitrairement évaluée. Peu d'outils et méthodes s'orientent vers la synthèse automatique ou semi-automatique de concepts [Yan 01].

L'enjeu pour la connaissance durant la conception préliminaire est le passage de l'idée au concept puis à l'objet. Mais les choix sont difficiles à faire, les décisions difficiles à prendre, car beaucoup de connaissances sont incertaines à ce stade. Les paramètres sont difficiles à évaluer car ils sont fortement interdépendants. Ainsi, nous verrons que dans une démarche classique, le concepteur fait des choix à priori, avec l'appui de sa propre expérience [Cha 92].

Les risques découlent de situations où il est nécessaire de décider avec peu de données; mais ces décisions sont nécessaires dans un mode de détermination d'architecture séquentiel.

Afin de réduire les risques de conception, les décisions que le concepteur doit prendre doivent être repoussées à un stade où des données chiffrées permettent une comparaison entre les concepts plus facile et plus fiable au regard des objectifs de conception.

Il faut donc pouvoir évaluer plusieurs concepts et prendre en compte pour cela toutes les contraintes du problème de conception préliminaire. C'est l'objectif de la démarche d'aide à la décision que nous proposons.

1.3 Problématique

Nous souhaitons résoudre un **problème de conception architecturale** en évitant les choix a priori et les itérations dues au processus "essai-erreur". Pour que la résolution ne soit plus séquentielle, il faut que le concepteur dispose de toutes les architectures du produit potentiellement intéressantes avant de faire un choix.

C'est pourquoi nous proposons un **système d'aide à la décision en conception préliminaire** afin de pouvoir :

- Exprimer d'une manière la plus complète possible les contraintes que l'artefact doit respecter;
- Rechercher toutes les configurations du produit possibles qui les respectent;
- Proposer des moyens de distinguer les différentes configurations.

Pour effectuer cette recherche, la Conception Inversée Intégrée (CII, voir §3.1) propose la modélisation d'un problème de conception architecturale sous forme de contraintes [Fis 00]; la résolution se fait par satisfaction de contraintes.

Afin d'éviter d'avoir à choisir au préalable un seul concept, nous proposons désormais de partir d'une sélection de concepts pertinents [Sca 04a] pour rechercher les architectures réalisables et extraire le concept répondant au mieux aux exigences exprimées. Nous tendons ainsi vers l'évaluation de concepts de solution, pouvant s'avérer plus intéressante que l'évaluation de définitions avancées de produits générant beaucoup d'itérations.

Les résultats de ce processus sont représentés par des artefacts composés de variables structurantes instanciées; que nous appellerons des solutions.

La résolution des Problèmes par Satisfaction de Contraintes (PSC) suppose de formaliser une base de connaissances compatible avec les outils de résolution. Cela nécessite l'identification des composantes du problème de conception importantes et pertinentes à ce

stade (conception préliminaire) et la modélisation du problème sous forme de contraintes (voir §3.3).

Or seule l'expérience du concepteur permet pour l'instant d'identifier les connaissances de conception intéressantes à prendre en compte pour commencer la recherche d'architecture. Nous introduisons donc la notion de **caractéristiques "structurantes"** et qualifierons de structurantes les caractéristiques⁴ du problème de conception qui structurent l'acte de conception depuis l'émergence du concept jusqu'au choix d'une solution.

C'est pourquoi il nous a paru nécessaire de rechercher une méthodologie d'analyse des problèmes de conception, préalable à l'utilisation du système d'aide à la décision :

L'objectif de ce travail est de proposer une démarche générale et exhaustive de recherche des caractéristiques structurantes. Une analyse en quatre étapes permet de les déceler. Elles sont regroupées par catégories dans des tableaux synthétiques facilitant cette démarche.

- L'expression complète du problème de conception préliminaire passe également par :
- l'expression de la pertinence de la conception afin d'être capable de hiérarchiser les solutions obtenues.
 - la description des différents concepts afin de pouvoir les comparer.

La recherche d'indicateurs de pertinence de la conception sera effectuée durant les quatre étapes et le modèle du problème de conception intégrera les contraintes propres à chaque concept pertinent.

1.4 Organisation du document

Le **Chapitre 2** traite des manières dont la conception est organisée : différentes démarches sont proposés pour structurer la conception. Il nous a paru important de **mettre en parallèle les processus existants**, pour dégager des phases communes et des niveaux de matérialisation de l'objet conçu proposés au fur et à mesure des étapes.

De plus, l'observation des pratiques de conception nous a permis d'identifier un certain nombre de difficultés rencontrées durant la conception préliminaire et que nous souhaitons surmonter.

Ainsi, nous proposons dans le **Chapitre 3** la mise en place d'un **système d'aide à la décision**. Afin qu'il réponde aux besoins industriels, il est positionné par rapport aux processus de conception déjà formalisés et utilisés.

Ce système repose sur l'utilisation d'un solveur de contraintes et d'une base de connaissances. L'emploi de ce système d'aide à la décision nécessite une approche préalable du problème de conception.

Nous nous intéressons dans le **Chapitre 4** à la manière dont un concepteur qualifie l'artefact issu de la conception préliminaire. Les critères qu'il utilise, ainsi que ceux exprimé par le client permettent d'écrire des indicateurs de **pertinence de la conception**. Ils sont

⁴ Les caractéristiques structurantes du problème de conception peuvent être des fonctions, des critères, des variables de conception, des comportements physiques. Elles seront définies dans le §5.2.

utilisés afin de hiérarchiser les solutions obtenues par le solveur en fin de conception architecturale.

L'apport principal de ce travail est la **démarche préalable d'analyse et de structuration du problème de conception** constituée, qui est exposée dans le **Chapitre 5**. Elle repose sur la recherche des caractéristiques structurantes du problème de conception, au début de la conception architecturale.

Une approche à quatre niveaux est proposée pour aider à l'identification des caractéristiques structurantes, qui devront être traduites sous forme de contraintes.

L'exploitation des résultats n'est pas l'objet de ce travail. Toutefois la première phase d'analyse permet également de formaliser les objectifs de conception, afin d'être capable de hiérarchiser les résultats obtenus en fin de conception préliminaire.

Enfin, le **Chapitre 6** présente la **résolution d'un problème de conception**, en utilisant le système d'aide à la décision proposé, pour la recherche d'architecture.

Pour cette application, nous avons pu confronter un processus de conception réalisé selon une démarche traditionnelle, au processus intégrant notre démarche.

Une comparaison des deux approches et des résultats obtenus nous permet de vérifier la pertinence de notre démarche.

Chapitre 2 Organisation de la conception

Avant de décrire un système d'aide à la décision, nous nous sommes intéressé à la manière dont se pratique la conception, aux démarches proposées, aux difficultés rencontrées. Comme le souligne Deneux, pour pouvoir supporter l'activité de conception, il est indispensable d'étudier et de formaliser ses processus [Den 02].

D'autre part, nous souhaitons proposer une approche complémentaire de celles existantes. Nous décrirons donc les modèles de processus existants, en essayant d'identifier les différentes phases, leurs points de départ et d'arrivée, ainsi que la zone d'action de la démarche d'aide à la décision que nous proposons.

Nous verrons que l'ingénierie séquentielle a évolué vers l'ingénierie concourante et simultanée. Elle est devenue collaborative grâce notamment aux outils informatiques permettant la définition d'un prototype virtuel, le partage des informations, etc. La démarche d'aide à la décision que nous proposons vise à supprimer la séquentialité et la récursivité de la conception préliminaire, et propose la prise en compte simultanée de différentes contraintes métier.

2.1 Démarches et modèles de conception

Concevoir un produit c'est passer de l'expression d'un besoin à la définition des caractéristiques d'un objet permettant de le satisfaire et à la détermination de ses modalités de fabrication. Le futur produit passe par une série d'état [Jea 98].

La conception en tant qu'**activité** est une transformation provoquant un changement d'état du produit. Pour Mistree, il s'agit d'un procédé de conversion d'information qui caractérise les besoins et exigences pour un artefact, en connaissance sur le produit [Mis 90]. Suh définit la conception comme l'interaction entre ce que nous voulons réaliser, et comment nous voulons le réaliser; c'est-à-dire la transformation d'exigences fonctionnelles en paramètres de conception [Suh 90]. Enfin, selon Ullman, la conception est l'évolution

technique et sociale de l'information, ponctuée par des prises de décision. Les représentations abstraites évoluent vers un artefact physique [Ull 03].

La conception peut être également vue comme un **processus**. Un processus de conception est une séquence d'activités de conception, nécessaires pour créer une ou plusieurs représentations du produit [Rey 01]. L'objectif d'un processus de conception est de synthétiser des systèmes qui réalisent les fonctions et les performances désirées [Woo 01]. Il existe d'une part des modèles descriptifs, qui décrivent le déroulement du travail. Les modèles prescriptifs d'autre part, à l'image de celui de Pahl et Beitz [Pah 96], proposent une approche plus algorithmique et une procédure systématique à suivre. Mais dans les deux cas, la conception est conduite au travers de phases, différenciées par le niveau d'abstraction de la représentation du produit. Nous en reparlerons dans le §2.2.2.

2.1.1 Différents types de conception

Les pratiques de conception diffèrent suivant les entreprises et les habitudes professionnelles.

Toutefois, il existe d'une part trois grandes classes de comportement humain, se distinguant principalement par l'importance accordée à l'activité mentale [Ler 92] :

- Le comportement "machinal" (skill-based behaviour) ne demande presque pas d'activité mentale consciente, des modèles de comportements parfaitement maîtrisés sont reproduits.
- Le comportement procédural (rule-based behaviour) fait appel à une activité mentale consciente. Il consiste à exécuter des tâches de manière coordonnée en suivant des règles ou procédures qui ne sont pas assez maîtrisées pour être appliquées "machinalement". Ces tâches ne nécessitent pas de choix complexes entre plusieurs alternatives.
- Le comportement cognitif (knowledge-based behaviour) est basé sur une activité mentale complexe et consciente, afin de résoudre des problèmes et planifier des tâches.

Les deux premiers comportements sont privilégiés durant la conception préliminaire, lorsque les connaissances sur le futur produit sont limitées.

Il est possible d'identifier d'autre part plusieurs typologies de démarches [Sri 89], que l'on peut classer selon la proportion de connaissances nouvelles qu'elles nécessitent :

- Selon Dieter, la **reconception** est une situation courante. Elle peut concerner des modifications à apporter à un produit commercialisé, nécessitées par de nouvelles exigences ou un manque de performances. Il peut s'agir également d'une mise à jour, planifiée dans le cycle de vie du produit avant son introduction sur le marché, afin qu'il reste compétitif [Die 00]. Dans tous les cas, la reconception part d'une solution existante, d'un produit existant pour les faire évoluer.

- La **conception routinière** concerne l'utilisation de principes de solutions possibles, qui sont souvent catalogués. Même si le problème est nouveau, l'ensemble des sous problèmes et leurs solutions sont connus [Den 00] ; les stratégies et méthodes sont connues,

le cahier des charges ne change que d'une manière quantitative. Ainsi, le produit trouve son origine dans la mémoire industrielle des produits antérieurs [Jea 98].

Culverhouse parlera lui de "repeat design" [Cul 95]. Cela concerne des modifications pour réduire les coûts, simplifier une conception existante en utilisant des techniques de conception établies. Elle peut également concerner un nouveau produit, mais elle ne nécessite pas de nouvelles connaissances.

Cette typologie est proche des deux suivantes.

Dans la **conception adaptative** [Pah 96], on part d'une structure fonctionnelle établie, on maintient des principes de solution connus et on adapte l'architecture aux exigences changées.

Le "**variant design**" nécessite de 1 à 20% de connaissances nouvelles [Cul 95]. Il peut s'agir d'innovation incrémentale par extension d'un produit existant : changements de tailles et de dispositions, amélioration de l'usage d'une technologie existante, application d'amélioration des procédés de fabrication; mais le principe de solution reste inchangé.

- Le point de départ de "l'original design" est une formulation abstraite du problème, une liste d'exigences [Pah 96]. Cette typologie est à rapprocher de la **conception innovante**, qui requiert 20 à 50% de connaissances nouvelles [Cul 95]. Elle peut concerner une innovation par combinaison nouvelle d'éléments de produits existants, une nouvelle utilisation de technologie sur une solution existante, une application de nouveaux procédés de fabrication.

La décomposition du problème est connue, mais il n'existe pas d'alternative connue pour tous les sous problèmes [Den 02]. Dans la conception innovante, tous les attributs ne sont pas connus à l'avance.

- Lors de **conception créative**, ni les attributs ni la méthode ne sont connues [Die 00]. L'élément clé est la transformation de l'inconscient en conscient [Sri 89].

Enfin, la **conception stratégique** nécessite d'étendre les connaissances de conception et de production d'une entreprise (plus de 50% de connaissances nouvelles) [Cul 95]. Elle met par exemple en œuvre de nouveaux principes physiques.

La reconception, la conception routinière ne nécessitent pas forcément un passage par toutes les phases du processus de conception. Mais, quel que soit le type de conception, la conception architecturale et la conception détaillée sont des passages obligés.

La démarche que nous proposons peut s'appliquer aux cas de conception innovante : nous verrons qu'elle permet l'identification des éléments à concevoir. Ensuite, la recherche d'architecture est facilitée par la résolution d'un PSC.

Une fois que des modèles de problèmes de conception, de concepts de solution, de composants sont écrits, ils peuvent être réutilisés pour reconcevoir un produit ou pour de la conception routinière utilisant des composants, des concepts identiques.

2.1.2 Processus de conception

Il existe beaucoup de descriptions de processus de conception, nous retiendrons les plus caractéristiques et plus répandues. Nous décrivons d'une part les processus issus de publications de chercheurs et universitaires, et d'autre part ceux issus de documentations industrielles ou normatives.

Nous proposons de discerner des points communs dans les phases et les jalonnements.

Selon Suh, il existe plusieurs pratiques et démarches de conception, mais une trame est commune aux activités de conception [Suh 90] :

- Connaître et comprendre les besoins du client;
- Définir le problème à résoudre pour satisfaire les besoins;
- Conceptualiser la solution;
- Effectuer l'analyse, pour optimiser la solution proposée;
- Vérifier la conception obtenue, pour voir si elle répond aux besoins clients initiaux.

Nous avons recherché les différentes descriptions de déroulement de processus de conception. Nous avons regroupé sur une même figure le déroulement des processus les plus caractéristiques. La Figure 2 met en parallèle les étapes et jalons⁵ de plusieurs descriptions de processus de conception séquentiels, à partir du besoin exprimé jusqu'à la définition du produit.

Il s'agit de démarches issues ou adaptées de processus industriels ou normatifs [Cav 95][Nad 02][Fan 94][AFA 94][BAN 99]; ou proposées dans des publications scientifiques [Aou 90][Pah 96][Die 00][Ull 03][Hub 88/01][Qua 94].

Dans tous les cas, il existe un découpage en phases assez semblable, qui provient d'un besoin de segmenter le temps et de prévoir des étapes de validation; chacune des phases se termine en effet par des choix et des décisions [Qua 94]. Ce qui diffère surtout, ce sont les contenus des représentations intermédiaires du produit.

Qu'il s'agisse d'une approche séquentielle ou simultanée, la conception est en effet toujours séquencée en phases; mais l'on procède à un chevauchement des phases dans le deuxième cas [Vad 96].

Nous allons détailler les processus les plus caractéristiques dans le paragraphe suivant.

⁵ Un jalon marque la transition entre deux étapes. Il est souvent associé à un livrable permettant de valider ce passage.

[Pah 96]	Tâche	Clarifying requirements Marché - Exigences fonctionnelles et contraintes	Liste d'exigences	Conceptual Design Principaux choix technologiques - structure du système	Concept	Embodiment Design Caractéristiques structurales - fonctionnement - énergie - matériaux - formes Préparation production, assemblage topologie prélim.	Topologie/ disposition définitive	Detail Design définition complète ; plans, nomenclatures..	Documentation produit
	Conceptual design		Identification du besoin, Définition du problème et exigences (PDS Product Design Specification), Propriété Industrielle	Génération de concepts	Concept	Embodiment design "Configuration Design": Contraintes spatiales, Dimensions Architecture produit, arrangement Sélection prélim. matériaux	Prototype	Detail Design formes, tolérances, matériaux, fabrication plans et spécifications	
	Specification definition		Exigences client Spécifications techniques Objectifs	Spécifications	Concept	Product development Configuration (arrangement de composants, assemblages) Génération de formes Interfaces entre composants affinage Sélection matériaux et procédés		Evaluation du produit Approbation de production	Produit
[Die 00]	Conceptual design		Générations de concepts Evaluation concepts (faisabilité)						
	Conceptual design		Processus de transformation, Choix de technologies Structure fonctionnelle	Structure fonctionnelle	Organ structure (concept optimal)	Laying out (Disposition, Architecture) Arrangement, formes globales, dimensionnement partiel Disposition préliminaire Structure, topologie préliminaire forme, dim° prélim.		Topologie dimensionnée	Description du système technique
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
[Hub 88] [Hub 01]	Conceptual design		Processus de transformation, Choix de technologies Structure fonctionnelle	Structure fonctionnelle	Organ structure (concept optimal)	Laying out (Disposition, Architecture) Arrangement, formes globales, dimensionnement partiel Disposition préliminaire Structure, topologie préliminaire forme, dim° prélim.		Topologie dimensionnée	Description du système technique
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
[Qua 94]	Conceptual design		Processus de transformation, Choix de technologies Structure fonctionnelle	Structure fonctionnelle	Organ structure (concept optimal)	Laying out (Disposition, Architecture) Arrangement, formes globales, dimensionnement partiel Disposition préliminaire Structure, topologie préliminaire forme, dim° prélim.		Topologie dimensionnée	Description du système technique
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
[Pah 96]	Conceptual design		Processus de transformation, Choix de technologies Structure fonctionnelle	Structure fonctionnelle	Organ structure (concept optimal)	Laying out (Disposition, Architecture) Arrangement, formes globales, dimensionnement partiel Disposition préliminaire Structure, topologie préliminaire forme, dim° prélim.		Topologie dimensionnée	Description du système technique
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
[Die 00]	Conceptual design		Processus de transformation, Choix de technologies Structure fonctionnelle	Structure fonctionnelle	Organ structure (concept optimal)	Laying out (Disposition, Architecture) Arrangement, formes globales, dimensionnement partiel Disposition préliminaire Structure, topologie préliminaire forme, dim° prélim.		Topologie dimensionnée	Description du système technique
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
[Hub 88] [Hub 01]	Conceptual design		Processus de transformation, Choix de technologies Structure fonctionnelle	Structure fonctionnelle	Organ structure (concept optimal)	Laying out (Disposition, Architecture) Arrangement, formes globales, dimensionnement partiel Disposition préliminaire Structure, topologie préliminaire forme, dim° prélim.		Topologie dimensionnée	Description du système technique
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
[Qua 94]	Conceptual design		Processus de transformation, Choix de technologies Structure fonctionnelle	Structure fonctionnelle	Organ structure (concept optimal)	Laying out (Disposition, Architecture) Arrangement, formes globales, dimensionnement partiel Disposition préliminaire Structure, topologie préliminaire forme, dim° prélim.		Topologie dimensionnée	Description du système technique
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype
	Faisabilité		Analyse et formulation du problème, Etude de marché, Identification des objectifs	CdC conceptuel	CdC fonctionnel	Etudes détaillées Spécification, mise au point, études détaillées		CdC technique	Prototype

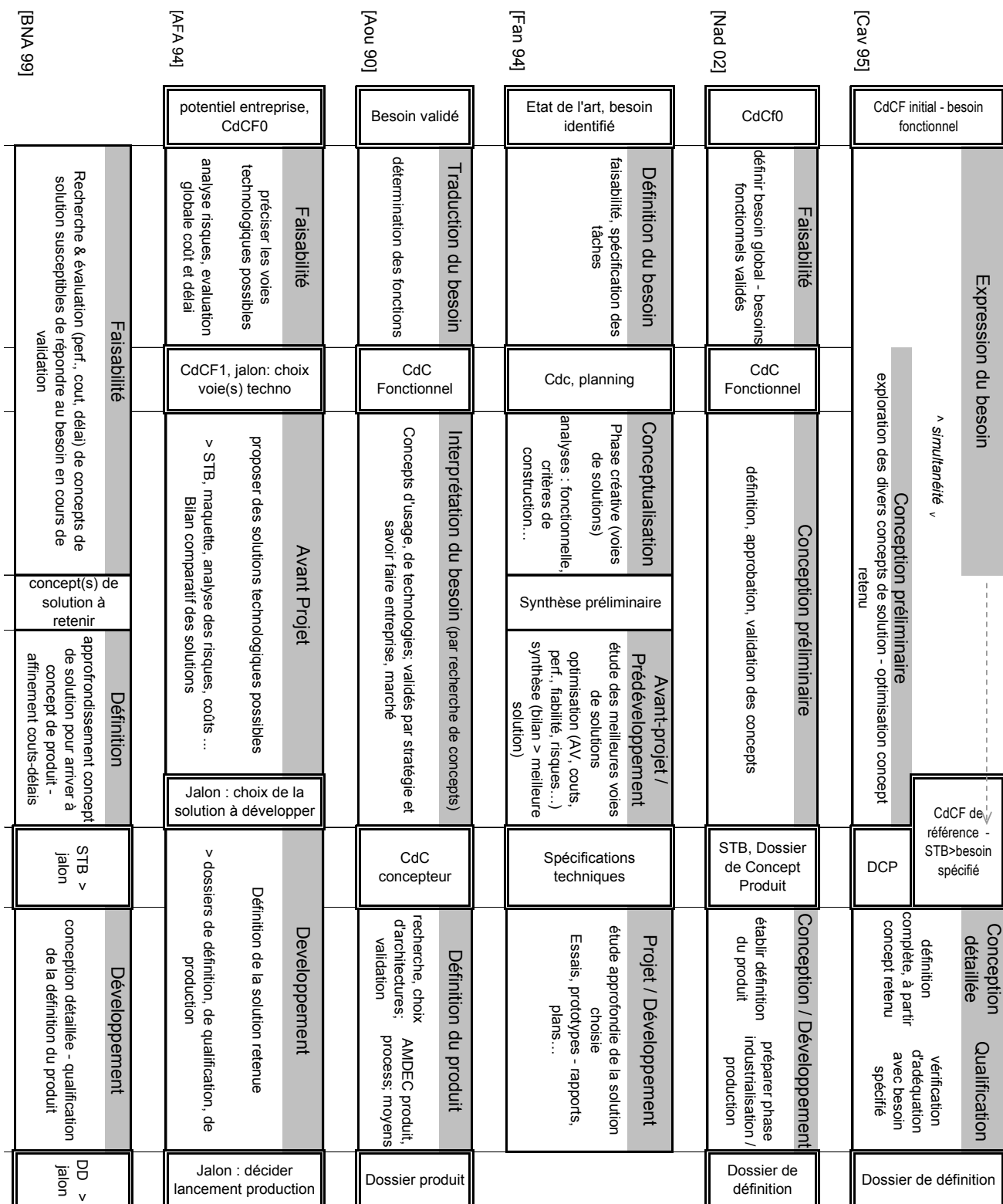


Figure 2: Mise en parallèle des processus de conception

2.1.2.1 Processus académiques

Dans les méthodologies existantes, on retrouve très souvent trois étapes importantes [Oos 01] :

- La définition du problème, qui aboutit aux exigences;
 - La définition conceptuelle, qui met en place la structure fonctionnelle, les principes physiques et propose un concept;
 - La définition détaillée, qui offre une description complète de la conception.
- Nous avons constaté grâce à la Figure 2 que cette phase est souvent scindée en deux parties.

▪ Selon l'**approche systématique** décrite par Pahl et Beitz, le but de la conception est de mettre en place une méthodologie compréhensive, pour toutes les phases de conception et développement de systèmes techniques [Pah 96] (le processus complet est décrit en annexe I).

Ce modèle prescriptif est issu des directives VDI (Société des ingénieurs Allemands). Sa traduction en anglais et ce vocabulaire ont été adoptés comme une référence, y compris par des normes [Wal 00]. Malmqvist et al. indiquent qu'il est représentatif de l'école européenne de conception, mais aussi le plus accepté internationalement. Il a aussi influencé des ouvrages américains (Ullman notamment) [Mal 96], et il se retrouve dans le processus de conception selon Dieter [Die 00].

Le processus de conception que ces auteurs décrivent est divisé en phases :

- 1- Clarification de la tâche : phase de spécification d'informations dans une liste d'exigences.
- 2- "Conceptual design", recherche de concepts : phase de recherche de la structure fonctionnelle et de solutions de principe, combinées ensuite en concepts; puis définition du concept, exploration, évaluation et sélection. Cette phase détermine une solution de principe.
- 3- "Embodiment design", conception architecturale : Les concepts sont traduits en architectures. Pendant cette phase sont déterminés les choix structuraux, les choix de composants et de leurs paramètres pertinents, ainsi que les principales dimensions du système. Outre l'arrangement de composants, les formes et matériaux sont également déterminés, avec la prise en compte de critères économiques.

Cette phase peut se diviser en trois étapes :

- diviser la tâche en modules réalisables
- développer des architectures des modules clés (preliminary layout)
- compléter l'architecture supérieure (definitive layout)

Cette phase est parfois nommée par d'autres auteurs "layout design", "hardware design", "shape design".

Dieter propose également trois phases pour l'embodiment design :

- L'architecture produit : arrangement d'éléments physiques pour exécuter les fonctions. Le produit est organisé en utilisant des modules, sous systèmes; et en donnant des relations entre les composants.
- La conception de configuration : définition de formes et dimensions générales des composants; agencement d'éléments standards; assemblage des concepts,

vérification que le produit est réalisable; sélection préliminaire de matériaux et modes de fabrication.

- La conception paramétrique : tolérances, dimensions finales, robustesse.

La réalisation de cette phase demande beaucoup de temps et d'efforts. Les activités comme le calcul de composants, les recherches d'éléments sur catalogues, la satisfaction de contraintes géométriques, etc, constituent un processus itératif et souvent récursif. De plus, des décisions clés sont prises [Hic 02c].

Les systèmes assistés par ordinateurs ne proposent pas d'assister la conception architecturale, mais plutôt la conception détaillée [Pop 99].

4- "Detail design", conception détaillée : phase de production de plans et spécifications détaillés, de mise en place du process de fabrication et contrôle.

D'autres approches existent, mais ne présentent pas le même séquençement de phases :

▪ **L'Axiomatic Design** tout d'abord, repose sur l'existence de principes de conception (axiomes), de domaines, de structure hiérarchique. Selon Suh [Suh 90], il existe quatre domaines dans le monde de la conception :

- Le domaine "consommateur" où sont listés ses attentes (Attentes Consommateur: AC).
- Le domaine "fonctionnel" où sont listées les Exigences Fonctionnelles (EF) et des contraintes.
- Le domaine "physique" où sont listés les Paramètres de Conception (PC) : dans les niveaux hiérarchiques les plus bas, les PC sont des pièces, des spécifications précises de géométrie, de matériaux, de tolérances. Au plus haut niveau, les PC ne sont pas nécessairement physiques mais peuvent représenter des solutions de principe ou des concepts.
- Le domaine "procédé" où sont listées les Variables du Procédé de fabrication (VP).

Lorsque les AC sont identifiées, elles sont exprimées sous forme de fonctionnalités (EF) dans le domaine fonctionnel. Les paramètres de conception (PC) satisfaisant les EF sont définis dans le domaine physique, ainsi que les VP dans le domaine procédé. Il y a ainsi un traitement continu d'information entre et dans les domaines distincts.

La description de chaque domaine évolue de concepts en informations détaillées, d'une manière descendante, en zigzagant entre deux domaines (voir Figure 3). Les hiérarchies fonctionnelles et physiques sont interdépendantes, et il n'est pas possible de construire la hiérarchie fonctionnelle complète sans se référer au domaine physique à chaque niveau.

La définition des PC de niveau système est nécessaire pour que les EF du niveau inférieur puissent être définies. Cette nature hiérarchique des problèmes de conception est le concept le plus important de l'Axiomatic Design [Man 99].

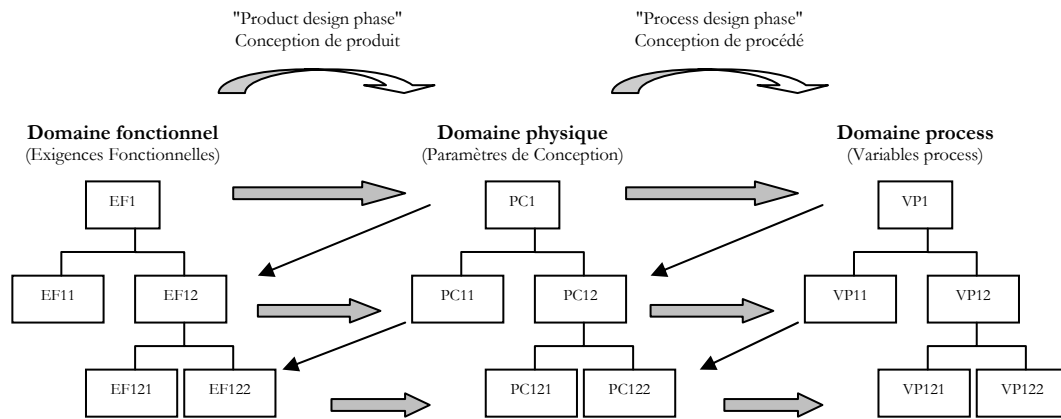


Figure 3: Décomposition hiérarchique d'un problème de conception; 'zig-zag' entre les domaines [Yan 00a].

Suh propose de détecter les conceptions "couplées" (dépendance des EF), inacceptables au sens du design axiomatique. Toutefois, l'étape de matérialisation des exigences fonctionnelles en paramètres de conception n'est pas très détaillée.

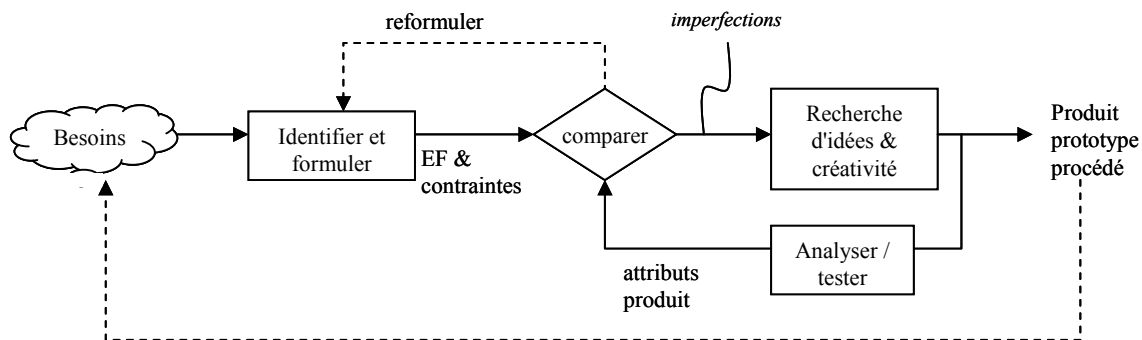


Figure 4: Processus de conception selon le point de vue 'Axiomatic Design' [Suh 90].

La Figure 4 représente le processus de conception selon le point de vue de l'Axiomatic Design. Ce processus de définition est itératif, et il est centré sur la définition et l'optimisation des EF.

Des axiomes issus de pratiques de conception sont énoncés; nous les détaillerons dans le §5.1.1. Ils permettent la détermination de la qualité d'une conception et la comparaison des alternatives entre elles; il s'agit de conception analytique.

L'Axiomatic Design facilite la décomposition d'un produit et l'évaluation de la conception et permet une évaluation de la conception. Ceci dit, envisager une conception complète nécessite d'être très averti [Oos 01].

Nous retiendrons que les composantes d'un problème de conception sont, selon Suh, issues des domaines fonctionnel, physique et process. Nous utiliserons ces différents niveaux dans notre approche de recherche des caractéristiques structurantes.

▪ Le **Robust Design** développé par Genichi Taguchi, met l'accent sur l'obtention d'une conception "robuste" : Un plan d'expérience portant sur des paramètres de conception et des facteurs de bruit (simulant les perturbations que le système risque de rencontrer) permet de déterminer les valeurs à affecter aux paramètres afin de minimiser la sensibilité à ces bruits.

Les systèmes qui accomplissent un travail le font en transformant de l'énergie et de la matière en performance désirée. Chaque sous-système doit contribuer de manière indépendante et harmonieuse à la réponse globale [Fow 98]. Un système idéal est sans perte ni variabilité. Dans un système réel (Figure 5), une partie de l'énergie entrante peut induire des résultats non désirés.

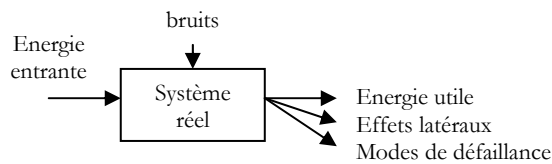


Figure 5: Flux d'énergie dans un système réel [Fow 98].

Le système ne pourra être rendu robuste que vis-à-vis des bruits listés. Les causes sous-jacentes aux problèmes de dysfonctionnement sont les variations dans les transformations d'énergie. Les facteurs de bruit doivent donc être retenus pour leur capacité à perturber ces transformations.

Les interactions physiques sont dues à un facteur altérant l'influence sur la transformation d'énergie d'un autre facteur. Elles ne peuvent être éliminées, mais leurs effets réduits. Si plusieurs facteurs influent sur la même transformation d'énergie interne au système, il est probable qu'ils auront un effet d'interaction physique sur la réponse [Fow 98].

Les facteurs de contrôle sont les paramètres du produit que l'on peut spécifier pour définir la combinaison optimale satisfaisant au mieux la voix du client. C'est à l'équipe pluridisciplinaire de sélectionner ceux qui régissent les performances du système. Ce sont les paramètres à optimiser. Il est impératif de disposer d'un grand nombre de facteur de contrôle afin d'avoir des chances d'améliorer la robustesse. Il faut utiliser les connaissances d'ingénieur lors du choix des niveaux des facteurs de contrôle [Fow 98].

Nous voyons ici qu'il est important d'analyser le comportement du système en terme d'énergie et de flux.

Afin d'identifier les **flux présents dans le système**, les outils Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) et Graphe Substances Champs (GSC) peuvent être utilisés. Ils sont présentés dans le §5.1.2. D'autre part, nous appellerons les effets désignés comme "latéraux" dans le Robust Design (Figure 5) des **effets induits** par les phénomènes physiques désirés : le GSC ainsi qu'un tableau présenté dans le §5.7.1 permet de les identifier.

2.1.2.2 Processus industriels et normatifs

Les directives VDI 2221 [VDI 87], proposées par la Société des Ingénieurs Allemands, suggèrent une approche systématique dans laquelle le processus de conception est subdivisé en sept étapes (voir Figure 6), chacune ayant une production particulière. Les directives VDI décrivent toutes les étapes à suivre durant le processus de conception, mais ne donnent pas vraiment de moyens pour prendre des décisions. Ces directives ont été décrites et adaptées par Pahl et Beitz [Pah 96].

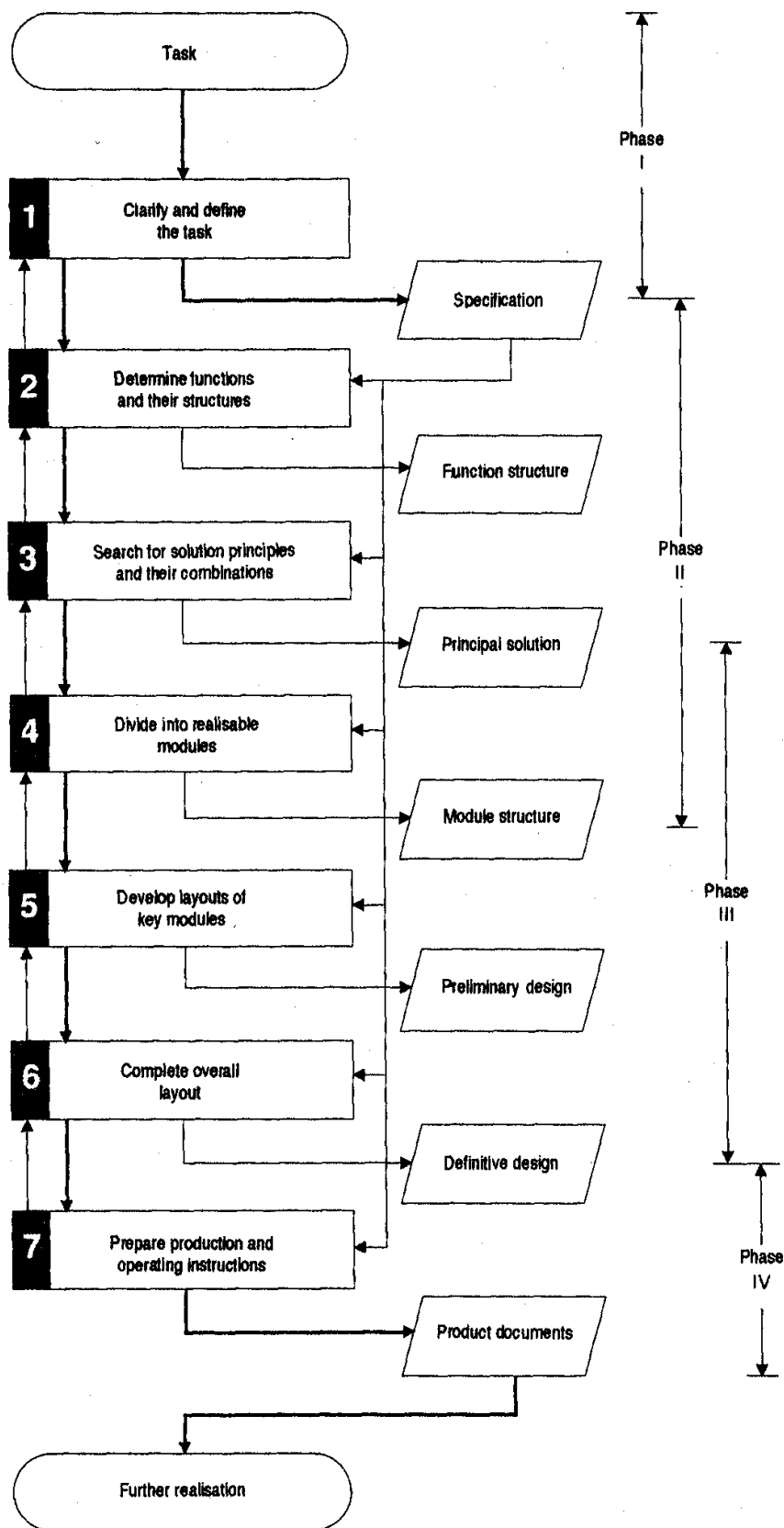


Figure 6: Processus de conception selon les directives VDI 2221 [VDI 87].

Les recommandations générales pour le management de programme RG.Aéro 000 40 [BNA 99] proposent également un processus, décrit en détail par la DGA [Cav 95]. La Figure 7 représente sous forme de diagramme SADT les étapes du processus de conception, avec leurs entrées et sorties. La Figure 8 précise les étapes de la phase de conception préliminaire.

On retrouve dans ce processus les phases identifiées précédemment d'expression du besoin, de conception préliminaire et détaillée. Les livrables issus de ces phases (STB, DCP, DD, DJD) seront explicités dans le §2.2.

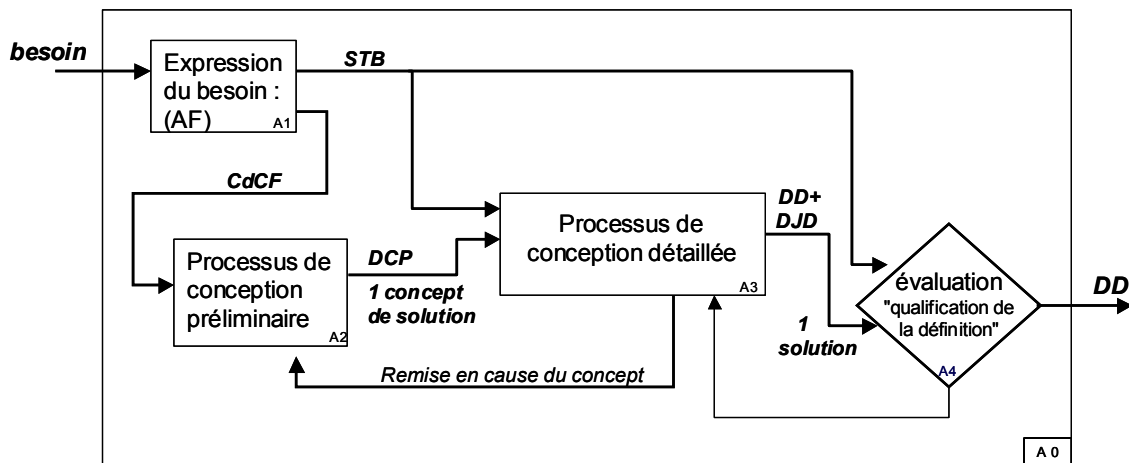


Figure 7: Phases du processus de conception [Cav 95].

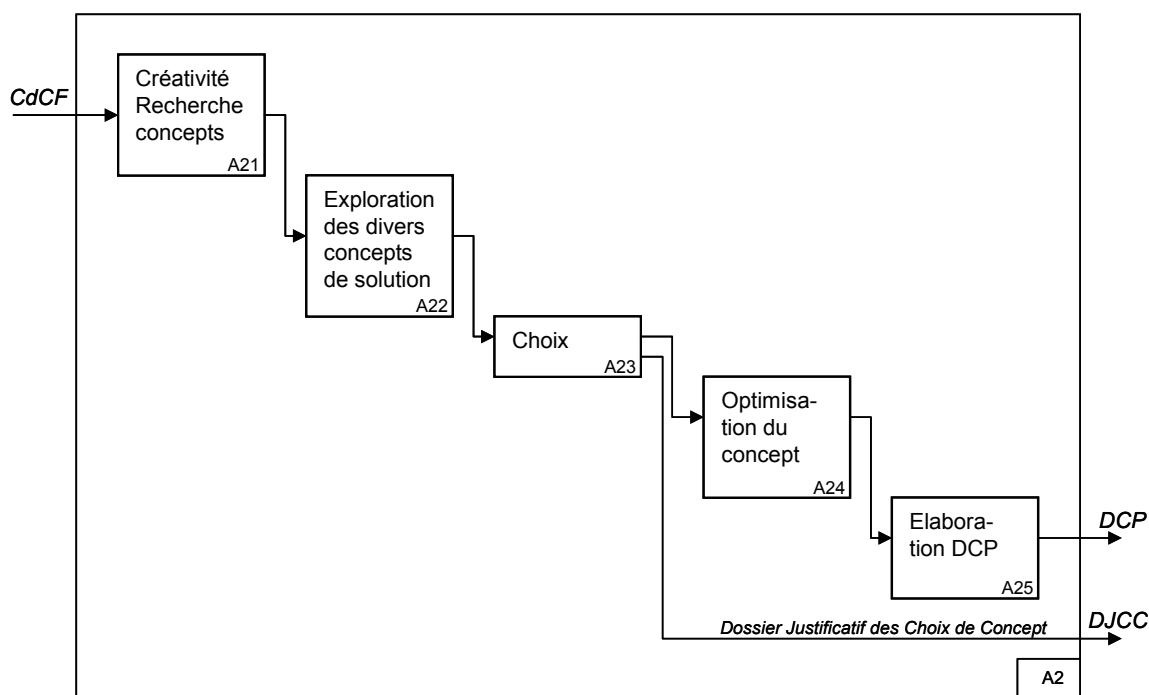


Figure 8: Détail de la phase de conception préliminaire [Cav 95].

La Figure 9 reprend un document d'une grande entreprise aéronautique et décrit son processus de conception et ses jalons. La phase de faisabilité permet d'analyser le marché, d'identifier des concepts prometteurs. Elle aboutit à un concept sélectionné. Il est développé dans la phase suivante pour être validé. Puis, la phase de définition permet de finaliser les spécifications du système, de choisir les composants, de définir la structure. Cette phase débouche sur une définition détaillée car la phase de développement commence par la fabrication des pièces.

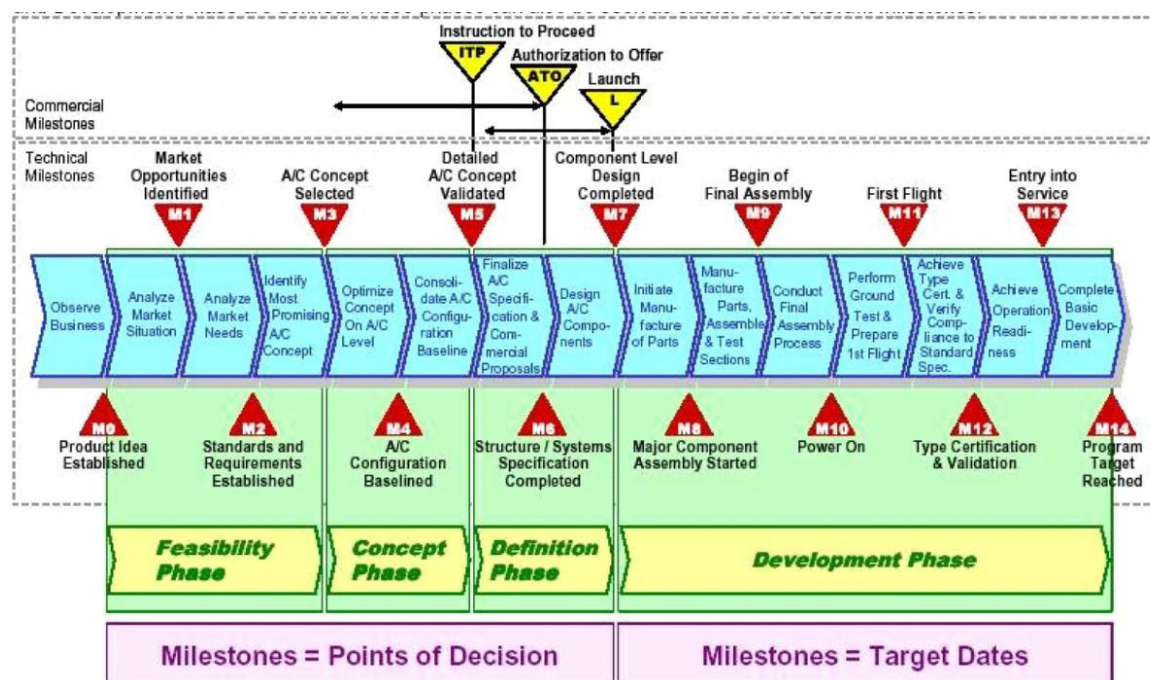


Figure 9: Processus de conception et jalons en aéronautique.

2.1.2.3 Comparaison des processus de conception

Pour beaucoup de processus, après une étape d'analyse et de **traduction du besoin**, les spécifications fonctionnelles sont le point de départ de la conception (voir Figure 2). La formalisation fonctionnelle du besoin, souvent sous forme de cahier des charges, ne présage pas des solutions possibles.

La **conception préliminaire** permet un passage du fonctionnel au structurel. La première étape de la conception préliminaire conduit à proposer des concepts. Viennent ensuite les choix d'architectures, de formes, de composants, de matériaux et un prédimensionnement du mécanisme. Des décisions importantes sont prises. Toutefois, pour beaucoup de processus, la plupart des dimensionnements apparaissent après le dossier de concept, durant la phase de conception détaillée. En effet, les outils de dimensionnement en conception préliminaire manquent [Cha 92][Yan 01].

Les démarches actuelles fonctionnent plutôt sur un mode d'analyse ; la simulation et les calculs de validation interviennent après le choix de solution. Si la solution n'est pas valide, on peut revenir en arrière à différents niveaux (voir Figure 10), modifier et revérifier; d'où la présence de jalons tout au long du processus de conception.

C'est pourquoi, notamment la phase de conception architecturale et ses itérations sont coûteuses en temps.

Enfin, la phase de **conception détaillée** correspond à un enrichissement de la définition du produit [Vad 96].

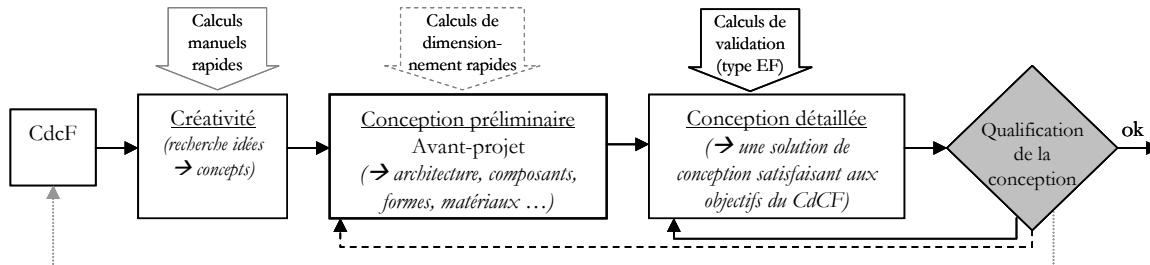


Figure 10: Boucles de retour dans le processus de conception.

Nous avons complété la Figure 2 afin de mettre en évidence des phases communes, identifiées grâce aux différents stades d'avancement de la conception (Figure 11). Ces données et matérialisations différentes du produit vont être traitées dans les paragraphes suivants. Toutefois, nous pouvons identifier pour la plupart des processus, deux jalons communs : cahier des charges fonctionnel (CdCF) et définition complète du produit (Dossier de Définition). Entre ces deux étapes, un stade intermédiaire apparaît souvent : les spécifications techniques; elles marquent le passage à la phase de conception détaillée. Les normes RG.Aéro parlent à ce niveau là de "concept"; cela ne correspond pas à la notion de concept dont nous avons déjà parlé dans le Chapitre 1, nous préférons le terme de "**concept de produit**".

La phase comprise entre CdCF et spécifications techniques correspond à la conception préliminaire.

Nous voyons également sur la Figure 11 que la phase "spécifications techniques" n'est pas explicitement présente dans les processus décrits par Pahl et Beitz, Dieter, Ullman et Quarante. Par contre, ces auteurs proposent une étape un peu plus avancée en terme de définition du produit, où est décrite la topologie du produit avec des éléments de dimensionnement. Ils proposent également une étape intermédiaire entre CdCF et spécifications techniques, qui marque la fin du "conceptual design" (recherche de concepts) : un concept pertinent est retenu. La phase comprise entre concept et topologie est souvent dénommée "embodiment design", que nous transposons en conception architecturale.

Nous voyons que la conception préliminaire n'a pas tout à fait le même sens lorsqu'elle englobe la recherche de concept et la conception architecturale, ou lorsqu'elle se termine aux spécifications techniques. La définition du processus de conception faisant apparaître concept sélectionné et topologie, nous intéresse particulièrement; elle nous permettra ultérieurement de positionner précisément notre démarche. Toutefois, plutôt que de partir d'un seul concept, nous souhaitons pouvoir en évaluer plusieurs et éviter en fin de recherche de concepts une décision trop contraignante.

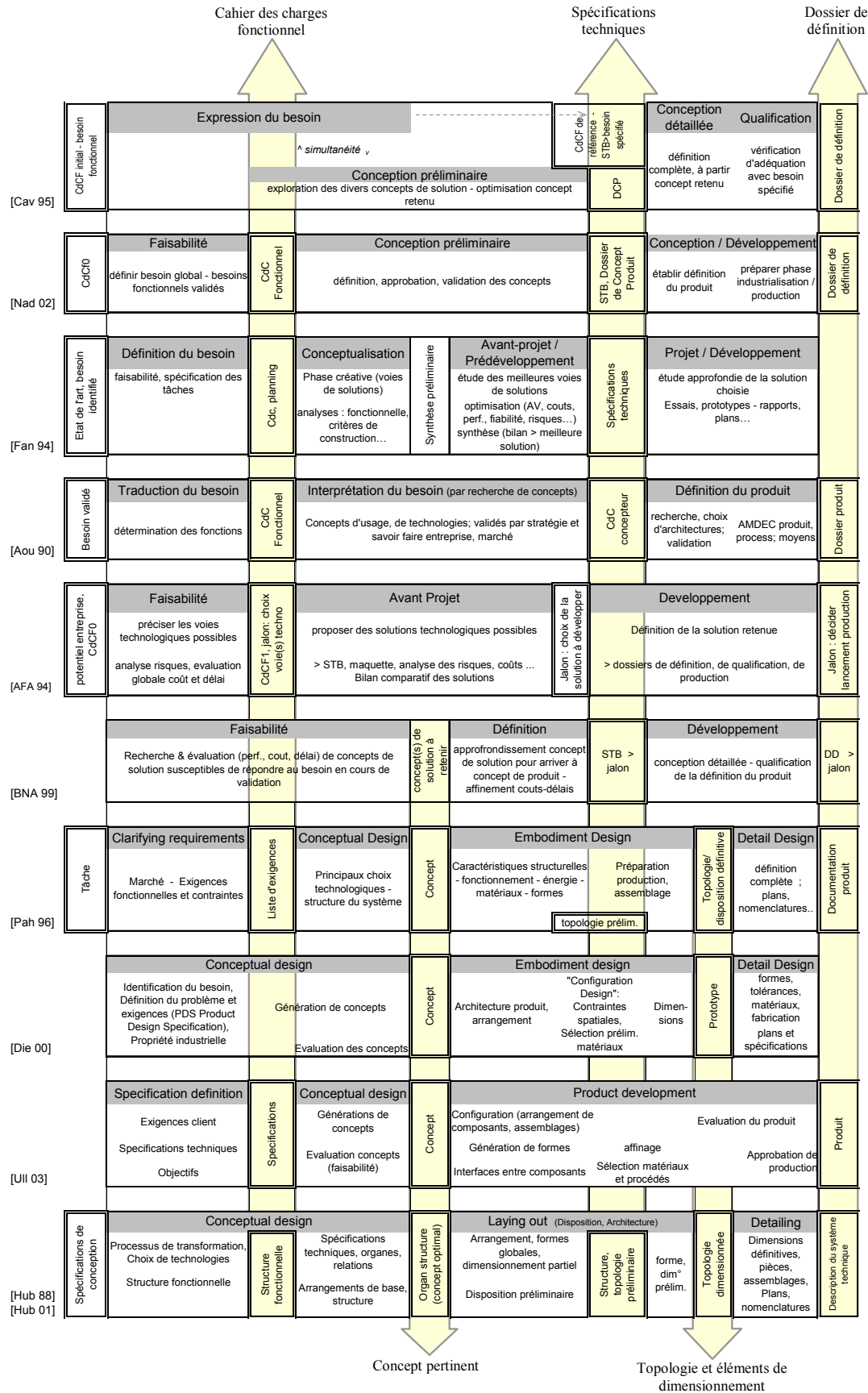


Figure 11: Identification des jalons communs aux processus de conception.

2.2 Données et objets intermédiaires

La conception est une transformation d'informations (besoins, exigences et contraintes demandées) en description d'une structure (un système technique) qui est capable de remplir ces demandes [Hub 01].

Un ensemble de données, dans un contexte particulier, constitue une information [Hic 02a]. Des informations formelles (structurées) et informelles permettent le processus de connaissance. Informations et connaissances participent à la décision.

Selon Reymen [Rey 01], la connaissance de conception peut être :

- Une connaissance implicite, obtenue au travers de l'expérience acquise. Les connaissances liées à l'expérience, au savoir faire sont souvent intériorisées. Hubka les appelle "intuitives" ou "tacites" [Hub 01].
- Une connaissance explicite est exprimée dans les méthodes, les modèles de conception, les stratégies ou grâce aux projets antérieurs.

La connaissance peut également être :

- Indépendante des domaines d'activité (c'est le cas des processus et démarches de conception);
- Spécifique à un domaine ou une discipline.

Baizet propose une typologie des connaissances à capitaliser, dans le cas de la simulation numérique chez Renault [Bai 04]. Il distingue les connaissances théoriques, les connaissances de processus (méthodologies), les connaissances liées au métier de la simulation (modélisation, outils) et les connaissances de référence, relatives à des objets, personnes ou organismes extérieurs à la capitalisation proposée.

Nous nous intéressons aux connaissances (implicites ou explicites) définissant le problème de conception, c'est-à-dire les connaissances sur le système technique suivantes :

- connaissances de base, des différentes sciences de l'ingénieur : résistances des matériaux, fabrication, structure des matériaux, etc.;
- connaissances sur la famille de produits : fonctions, modes d'utilisation, maintenance, principes de conception;
- connaissances sur les possibilités de production, approvisionnement de matière, produits semi-finis, etc.;
- connaissances des normes, règlements, brevets.

Nous allons détailler le type de connaissances rencontrées dans les artefacts successifs à chaque étape du processus de conception et observer leur évolution de l'abstrait vers le concret. Puis nous définirons le système documentaire normalisé, afin de pouvoir ensuite positionner notre démarche.

2.2.1 Types de connaissances à chaque étape

Ullman décrit le processus de conception comme une succession d'états [Ull 03]. Vadcard les nomme "états de représentation du produit" [Vad 96] ; On trouve également artefact.

Nous préférons utiliser la notion d'**objet intermédiaire de la conception**. Selon Jeantet, les objets intermédiaires sont produits et utilisés au cours du processus de conception, traces et supports de l'action de concevoir. Ils ont un triple rôle de traduction, de médiation et de représentation des actions [Jae 98].

Le futur produit passe par une série d'états et de dimensions (fonctionnelle, structurelle, technologique, géométrique, etc); ces états conduisent à des objets intermédiaires. Dans l'organisation séquentielle de la conception, chaque état correspond à une phase.

Vadcard et Le Coq [Vad 96] [LeC 92], proposent sept "espaces de représentation du produit": le besoin, la fonction, le concept, l'élément indispensable, l'architecture, le composant, le physique. Après le choix des technologies et des principes de fonctionnement, les éléments indispensables sont définis. Ce sont les entités, issues de l'analyse fonctionnelle, qui seront organisées en architecture.

Les espaces de représentation "élément indispensable", "architecture" et "composant" appartiennent à un même niveau d'abstraction (structurel). Ces auteurs identifient donc quatre niveaux d'abstraction : conceptuel, fonctionnel, structurel et physique; ce qui correspond aux composantes du produit proposées par Bocquet [Boc 96].

La Figure 12 indique à quelle phase du processus de conception les différentes représentations du produit interviennent. Les "X" indiquent l'intérêt privilégié d'un espace de représentation durant une phase du processus de conception. L'utilisation de l'espace "physique" est prépondérante durant la phase de conception détaillée, mais peut également avoir un intérêt durant les deux phases précédentes ("Y" sur la Figure 12) : Vadcard cite les représentations sensorielles utilisées lors de la définition préliminaire. Dans le cadre de notre approche, nous proposons une modélisation des phénomènes physiques durant la recherche d'architecture.

Phases du processus de conception Espaces de représentation d'un produit	Phase 1 Caractérisation pluridisciplinaire du besoin	Phase 2 Recherche de concepts	Phase 3 Définition préliminaire du produit	Phase 4 Définition détaillée du produit
				<i>temps</i> →
Besoin	X			
Fonction		X		
Concept		X		
Élément indispensable			X	
Architecture			X	
Composant				X
Physique		Y	Y	X

Figure 12: Processus de conception et espaces de représentation ; modélisation matricielle [Vad 96].

2.2.2 Évolution de l'abstraction vers la complétude

Le niveau d'imprécision dans les connaissances de conception diminue progressivement durant le processus de conception [Gia 97]. Il ne concerne plus que l'incertitude aléatoire (variations dues au processus de production par exemple) pour la phase de conception détaillée (voir Figure 13).

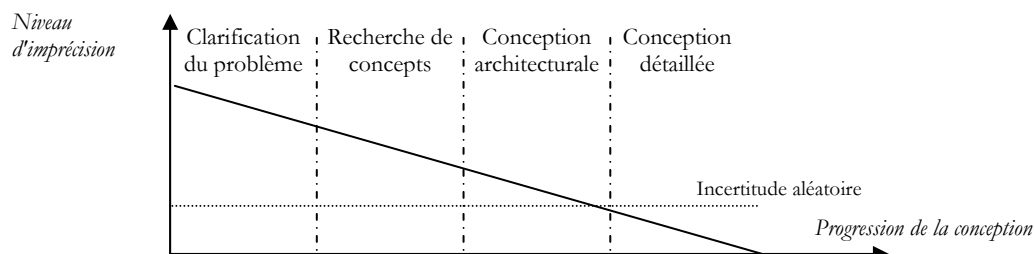


Figure 13: Evolution du niveau d'imprécision durant le processus de conception, d'après [Gia 97].

Selon Ullman, quelles que soient les représentations (sémantique, graphique, analytique, physique), tous les niveaux sont utilisés au fur et à mesure que le produit est affiné (voir Tableau 2).

Langage	Progression de la conception		
	Niveau d'abstraction		
	← maxi	moyen	mini →
Sémantique	Appréciations qualitatives	Référence à des paramètres ou composants spécifiques	Référence à des valeurs de paramètres ou composants spécifiques
Graphique	Croquis	Dessin à l'échelle	Modèle solide avec tolérances
Analytique	Relations qualitatives	Calculs préliminaires	Analyse détaillée
Physique	/	Modèles du produit	Matériel final

Tableau 2: Evolution des représentations du produit en fonction niveau d'abstraction, d'après [Ull 03].

Pahl et Beitz proposent différents objets intermédiaires, matérialisant le produit en fonction de l'état d'avancement du processus de conception (voir Tableau 3).

La combinaison des effets physiques avec des caractéristiques géométriques et matériaux (surfaces, mouvements, matériaux) permet de faire émerger un principe appelé "working principle". La combinaison de plusieurs principes permet d'obtenir une "working structure".

Structure	Éléments	Exemple de représentation
Function structure	Fonctions	
Working structure	Effets physiques, Caractéristiques géométriques ou matériaux	
	Working principles	
Principle solution >> Construction structure	Composants Assemblages Sous ensembles	
System structure	Artefacts Relations avec l'utilisateur et l'environnement	

Déroutement du processus de conception

Tableau 3: Niveaux croissants de concrétisation, d'après [Pah 96].

Avant de les positionner dans le processus de conception, nous pouvons définir plus précisément les différents états d'avancement de la conception.

Chen et Lin proposent des définitions des informations de conception [Che 02] :

- une fonction est un processus ou une tâche qui vise à délivrer énergie, matière ou information;
- un concept est un modèle abstrait d'un artefact physique;
- un paramètre physique est une variable qui spécifie la géométrie ou le matériau;
- une préférence est une tendance désirée sur la valeur d'une variable;
- une contrainte est une relation entre plusieurs variables; elle limite les choix de valeurs pour les variables; elle peut de deux types : domaine et relations.

Nous pouvons compléter ces définitions.

En effet, dans la plupart des recherches expérimentales, un **concept** désigne une classe d'objets déterminée soit par l'existence de propriétés qualitatives communes (forme, couleur, taille, etc.), soit par des propriétés fonctionnelles ou des relations [Off 04].

Un concept de solution est une représentation intermédiaire du produit, à un stade où tous les principes de conception n'ont pas été choisis et où les variables le définissant ne sont pas toutes instanciées [Yan 01].

Yannou propose de mettre sur le même plan : concept de solution, solution de principe, principe de solution, architecture et topologie [Yan 01].

Nous ne partageons pas cette vision et nous proposons sur la Figure 14 de positionner les états d'avancement dans le processus de conception. A mesure que le processus de conception avance, l'abstraction des modèles diminue et les représentations sont de plus en plus explicites sur la définition physique du produit.

Le stade de **concept de solution** (correspondant au "working structure") définit des principes de fonctionnement et décrit la solution sous forme schématique. Ce stade est distinct de celui d'architecture.

L'**architecture**⁶ correspond à l'arrangement d'éléments physiques qui définissent une solution, conçue pour satisfaire un besoin exprimé par une architecture fonctionnelle. Des dimensions principales apparaissent.

La dernière colonne de la Figure 14 illustre les choix réalisés à la fin de cette phase durant la conception d'un mécanisme de remontée de poids d'horloge monumentale; cette application sera traitée dans le Chapitre 6.

⁶ On trouve également topologie ou configuration.

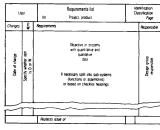
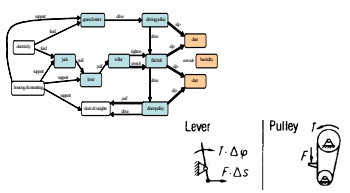
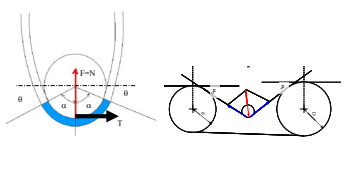
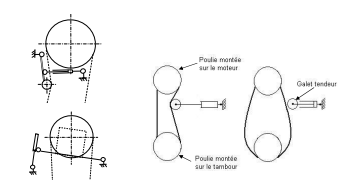
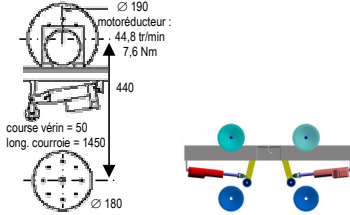
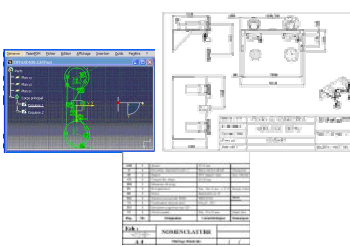
Représentations (Modèles)	Artefacts (Objets intermédiaires)	Données	Choix réalisés (mécanisme horloge)
	Besoin, Liste d'exigences, Cahier des charges	Exigences de performance, de sécurité, économiques, de fabrication, etc.	Fréquence de rotation; effort sur les axes
	Approche fonctionnelle : Relations et structure	Type de fonctions, Critères, niveaux Affectation des fonctions	Energie électrique Utilisation d'une transmission; d'un embrayage
	BDF – GSC Actions entre les éléments Effets physiques	Flux, Type d'énergie, de matière, de signaux Phénomènes physiques	Entraînement par moteur électrique Transmission par poulies-courroie
	Surfaces, comportement des matériaux > principe de fonctionnement > concept	Géométrie, surfaces, mouvements, matériaux Technologies utilisées	Concept : Entraînement par motoréducteur; Embrayage par tension de la courroie (plate); utilisation de vérin
	Concepts de Solution / "Working Structure" (WS)	Architecture de principe, entrées-sorties	2 WS alternatives: -tension par galet -tension par déplacement du motoréducteur
	Architecture /topologie, composants Formes > Configuration Solution de conception	Arrangement de composants, interfaces, principales dimensions Prédimensionnement Eléments de coûts	Choix de WS, des composants standards (vérin, courroie, motoréducteur) Positionnement des éléments
	Documentation Produit	Calculs, dimensionnements Connections Matériaux, traitements Nomenclatures, plans détaillés; Coûts.	Formes et dimensions des supports et pièces intermédiaires.

Figure 14: Modèles et données dans le processus de conception, du besoin à la conception détaillée.

Nous souhaitons modéliser un problème de conception préliminaire. Nous constatons que les connaissances sont imprécises au début de la conception architecturale. Notre approche doit permettre de modéliser ces données imprécises.

D'autre part, le positionnement de notre approche indiquera comme point de départ, l'étape où les concepts de solutions ("working structure") ont été validés. Ils décrivent les principes de fonctionnement sous forme d'architecture sommaire. Ils pourront être décrits simultanément dans un même modèle.

2.2.3 Jalons normalisés

Les recommandations RG Aéro [BNA 99] proposent un système documentaire normalisé, décrit par la DGA [Cav 95]. Les jalons définis sont également utilisés dans d'autres industries que l'aéronautique.

Une représentation du cycle de vie d'un produit (Figure 15) fait apparaître les différents états du besoin et du produit y répondant, selon l'avancement dans le cycle de vie. Différents processus permettent de passer d'un état à un autre. Ces processus se succèdent pour la plupart.

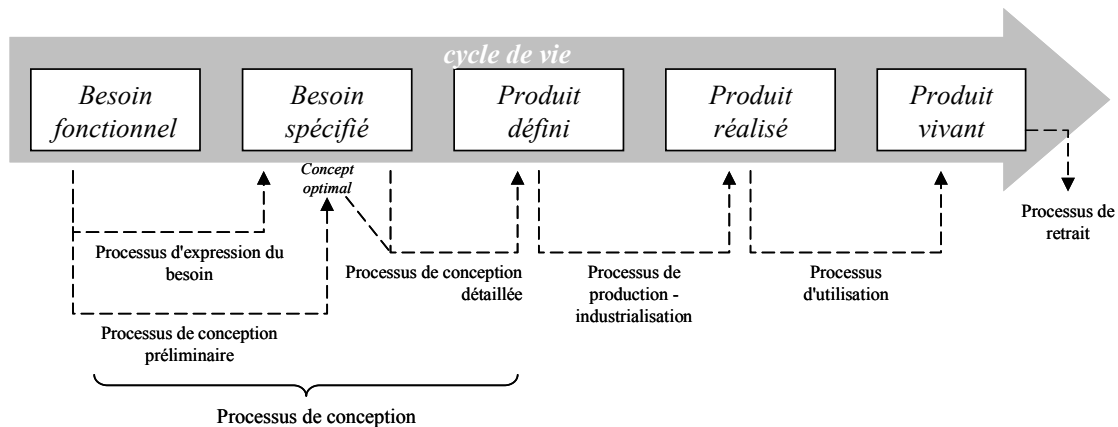


Figure 15: Etats et processus du cycle de vie d'un produit [Cav 95].

Les données associées au cycle de vie livrables aux jalons, sont organisées en un système documentaire dont les définitions issues des normes [AFN 92] sont données ci-dessous.

- Le CdCF est la référence du besoin fonctionnel;
- La STB est la référence du besoin spécifié;
- Le DCP est la référence du concept de solution retenue à la fin du processus de conception préliminaire;
- Le DD est la référence du produit défini.

▪ Le **Cahier des Charges Fonctionnel** (CdCF) définit l'ensemble des performances requises et des contraintes dans un langage d'utilisateur.

Le CdCF est le document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en terme de fonctions de service et de contraintes. Pour chacune d'elles sont définis dans critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux doit être assorti d'une flexibilité [AFN 85-90].

Le CdCF n'exprime que des exigences de résultats et, en principe, aucune exigence de moyens. Il est rédigé indépendamment des concepts de solutions envisageables afin de laisser le plus grand éventail possible aux concepts pouvant répondre au besoin [Cav 95].

Il regroupe tous les résultats des études en amont du programme en matière de besoins perçus (études de marché, études d'évolution du besoin, etc.).

Il permet d'exprimer le besoin technique dans les termes de l'utilisateur, mais il n'est pas suffisamment précis en matière d'exigence de résultat. Le document contractuel de référence est la STB.

Le CdCF contient :

- La définition du profil de vie (missions à assurer) et des conditions d'environnement associées;
- L'énoncé des fonctions de service avec les critères, niveaux et flexibilités associés; pour chaque mission;
- L'énoncé des contraintes de l'utilisateur relatives à la liberté de conception et de production;
- La définition des critères pour optimiser les objectifs entre fonctions, contraintes, coûts et délais.

▪ La **Spécification Technique de Besoin** (STB) est un document à caractère contractuel établi par le demandeur d'un produit, à l'intention du concepteur, et par lequel il exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en termes d'exigences techniques. La STB fixe également les conditions de vérification du respect de ces exigences, pour qualifier la définition telle que décrite dans le dossier de définition.

Elle est élaborée au cours du processus de conception préliminaire et doit être figée au démarrage du processus de conception détaillée (voir Figure 16).

La STB est constituée de quatre parties permettant d'exprimer :

- Les exigences fonctionnelles associées aux divers profils de mission prévus dans les diverses situations d'emploi du profil de vie. Les caractéristiques fonctionnelles du produit devront répondre à ces exigences.
- Les exigences de sûreté de fonctionnement associées à l'aptitude à disposer des caractéristiques fonctionnelles du produit au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement. Ces exigences sont exprimées en termes de fiabilité, de maintenabilité, d'aptitude au soutien, de disponibilité, de sécurité, de survivabilité, de durée de vie, etc.
- Les exigences concernant la conception et la production, liées à des limitations de liberté de conception et de production. Ces limitations peuvent porter sur :
 - . la fourniture de constituants sous la responsabilité du client;
 - . les solutions techniques interdites;
 - . les composants normalisés à utiliser et les listes préférentielles applicables;
 - . les documents normatifs à caractère technique, industriel et/ou logistique;
 - . les interfaces entre le produit et l'extérieur. Ces exigences peuvent être regroupées dans un document annexe souvent appelé "spécification d'interfaces".

- Les exigences concernant la qualification et l'acceptation liées aux justifications à apporter au client par le fournisseur.

La qualification est l'ensemble des tâches qui concourent à fournir des preuves, en se basant sur des justifications théoriques et expérimentales, que le produit défini répond au besoin spécifié et est productible [AFN 92].

▪ Le **Dossier de Concept Produit** (DCP) est le résultat de la conception préliminaire; il est la référence sur laquelle est basée la conception détaillée. En principe le DCP n'évolue plus après la fin de la conception préliminaire.

Il permet de définir les caractéristiques principales du concept de solution développé, caractéristiques appelées "concept de produit". Il ne traite donc pas des autres concepts de solutions étudiées au cours de ce processus ni des études d'optimisation du concept retenu.

Le concept de produit est constitué :

- de l'ensemble des choix technologiques (ou principes) retenus au niveau du produit et de ses constituants,
- de la décomposition du produit en ses principaux constituants,
- de la répartition des fonctions de service et de l'ensemble des exigences entre ces constituants,
- de l'existence des fonctions techniques résultant de ces choix, de cette décomposition et de cette répartition.

▪ Le **Dossier de Définition** (DD) est un ensemble structuré des documents constituant la réponse du concepteur d'un produit aux exigences techniques du demandeur, et dans lesquels il exprime toutes les caractéristiques vérifiables du produit (y compris les critères d'acceptation) et indique les procédés imposés pour le réaliser. Ce dossier permet d'identifier le produit, de préparer son dossier de fabrication et de contrôle ainsi que sa documentation d'utilisation.

La Figure 16 précise la place de chaque élément du système documentaire normalisé dans le processus de conception. Le DCP n'apparaît pas dans la norme RG.Aéro 000 40.

phases	amont	faisabilité	définition	développement		
processus	expression du besoin		conception préliminaire	conception détaillée	qualification	industrialisation
tâches	tâches qui concourent à optimiser l'expression du besoin et à passer du besoin fonctionnel au besoin spécifique		tâches qui concourent à explorer les divers concepts de solution our aboutir au choix du concept répondant aux besoins fonctionnels et spécifiés	tâches qui concourent : - à définir complètement le produit à partir du concept, de produit retenu et du besoin spécifié - à étudier les principaux moyens et procédés assurant la productibilité	tâches qui concourent à fournir des preuves en se basant sur des justifications théoriques et expérimentales, que le produit défini répond au besoin spécifié et est produisible	tâches d'étude, de création et d'organisation des moyens de fabrication et de contrôle
Documents constituant la référence des différents états du produit						
	* CdCF	Doc. ébauche	Doc. provisoire	Doc. de référence	Doc. de référence	Doc. de référence
	* STB système ou produit	Doc. ébauche	Doc. provisoire	Doc. de référence	Doc. de référence	Doc. de référence
	* dossier de définition (DD) :					
	- arborescence produit	Doc. ébauche	Doc. provisoire	Doc. de référence	Doc. de référence	Doc. de référence
	- STB sous-ensembles de rang 1	Doc. ébauche	DD0	Doc. de référence	DD1	DD2
	- STB sous-ensembles ou articles de bas niveau		Doc. ébauche	Doc. provisoire	Doc. de référence	Doc. de référence
	Documents relatifs à la réalisation des produits					
	* dossier d'exécution prototype (DEP)		Doc. ébauche		Doc. provisoire	Doc. de référence
	* dossier d'exécution série (DES)				Doc. ébauche	Doc. provisoire
Documents justificatifs						
* dossier justificatif de définition (DJD) : choix de concepts, matrice de vérification, programme d'essais, PV d'essais, fiches justificatives			DJD0	DJD1	DJD2	
					DJD3	

Figure 16: Etats documentaires du déroulement d'un programme; adapté des normes RG Aéro.

2.3 Pratique des processus

2.3.1 Organisations

Dans le cas d'une organisation fonctionnelle, chaque projet fait appel à plusieurs groupes, organisés dans l'entreprise par fonction, chacun se concentrant sur une discipline (Figure 17-a). Pour un constructeur d'avion par exemple, les fonctions sont l'aérodynamique, la structure, la propulsion, etc. Le projet est coordonné par les managers dans chaque département, qui conservent une responsabilité pour leur segment spécifique.

Dans une organisation d'ingénierie séquentielle, les tâches sont successives et sont effectuées par des départements cloisonnés. Cela conduit à des itérations.

L'**ingénierie simultanée** propose un chevauchement des tâches. L'ingénierie concourante tend à réduire la distribution dans le temps et l'espace [Bri 98].

Dans le cas d'une structure projet (Figure 17-b), une équipe est formée par le chef de projet pour la durée du projet à partir des personnels des départements. Elle est dissoute lorsque le projet est terminé, deux ans après la certification en aéronautique par exemple. Le plateau projet est localisé.

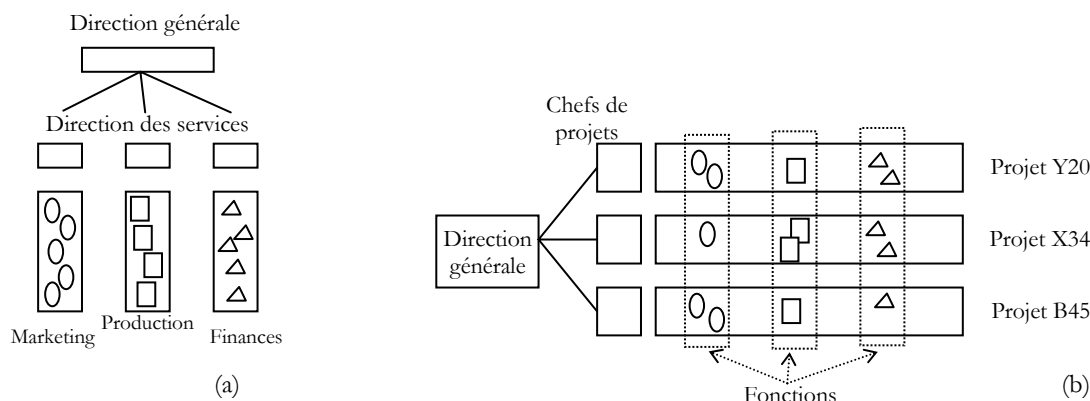


Figure 17: Structures organisationnelles [Mid 93].

Dans le cas de l'**ingénierie collaborative**, le plateau projet est virtuel. Toutes les ressources sont mises en commun, et notamment la maquette numérique. Le partage des données techniques entre les différents métiers, à divers stades du projet est un enjeu important.

Une démarche d'**ingénierie intégrée** impose un traitement conjoint de l'ensemble des connaissances impliquées dans le processus de conception, l'intégration et la confrontation des points de vue des acteurs de la conception, des différents métiers, pour la prise en compte au plus tôt de leurs contraintes respectives [Boc 98] : outre les données techniques, il y a les données marketing (sociologie, marché, concurrence), identité d'entreprise (stratégie, culture, gammes), données environnementales (recyclabilité, retrait, urbanisme, etc.), ergonomie, aspects culturels et symboliques (interculturalité, anthropologie, psychologie), etc.

A tout stade du processus de conception, toute solution envisagée par le concepteur doit donc être compatible avec les connaissances liées :

- aux fonctionnalités du système (connaissance fonctionnelle),
- à l'organisation du système (connaissance organique),
- aux phénomènes physiques impliqués dans le comportement du système conçu (connaissance physique),
- au fonctionnement du système (connaissance technique),
- aux règles métiers impliquées dans la réalisation, la mise en œuvre et le fonctionnement du système (connaissance métier),
- à l'environnement de fonctionnement du système (connaissance environnementale, économique, industrielle).

Toutes ces connaissances ne sont pas forcément exprimées ni intégrées dès le début de la conception préliminaire; mais plutôt à des étapes différentes du processus de conception.

De plus, les concepteurs ont besoin d'une méthode pour capturer l'information sous forme de connaissance [The 03].

Dans un contexte d'ingénierie collaborative, même si la conception est réalisée par des équipes pluridisciplinaires, beaucoup de concepteurs sont spécialisés dans une seule discipline. La communication entre des concepteurs ayant des expériences différentes n'est pas facile [Rey 01]. Chacun n'ayant pas le même langage, le partage des données techniques entre les différents métiers est rendu difficile à divers stades du projet.

Nous souhaitons que la démarche d'aide à la décision permette de réduire les itérations. Le choix du concept de solution et la recherche d'architecture doivent donc se faire en tenant compte des connaissances suivantes liées au produit à concevoir : connaissance fonctionnelle, organique, physique, technique, métier, environnementale, économique et industrielle.

Or, au début de la conception préliminaire, toutes ces connaissances ne sont pas forcément exprimées.

Il est donc nécessaire de mettre en place une démarche qui facilite l'identification systématique et l'écriture de ces connaissances. Elles doivent être prises en compte simultanément durant la phase de conception préliminaire. Ainsi, les architectures solutions répondront à ces multiples contraintes.

2.3.2 Choix, décisions

Durant la conception préliminaire, plusieurs choix sont à valider, afin de passer aux phases suivantes : sélection de concept, choix de concept de solution, détermination de composants et choix d'architecture, etc. Chaque décision de conception change l'état de la conception [Ull 03] et la description du produit s'enrichie.

Sawada citant Andreasen, illustre les "degrés de liberté de conception". L'espace des solutions de conception s'élargit de manière pyramidale (Figure 18), et il est exploré pour

chaque concept, jusqu'à ce qu'une solution de conception soit trouvée. Durant l'exploration des alternatives de conception, le concepteur prend des décisions comme la détermination de valeurs pour des paramètres de conception. Afin d'obtenir une solution de conception optimale, il est nécessaire pour le concepteur d'explorer les alternatives générées par les différentes options de décision, et de les comparer [Saw 01a].

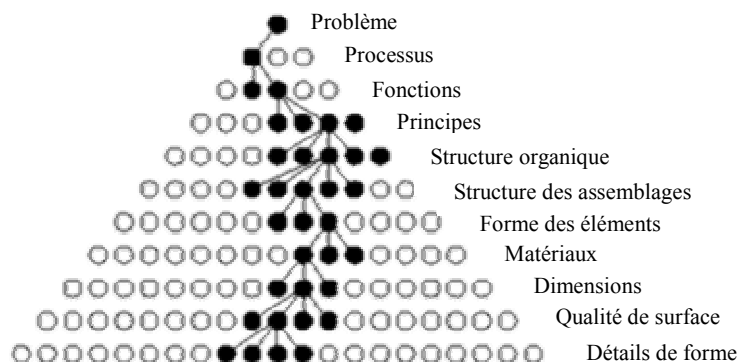


Figure 18: Elargissement de l'espace des solutions de conception.

Le concepteur réalise des choix en appliquant les connaissances qu'il possède et en prenant en compte les contraintes qu'il perçoit [Bel 01]. Les connaissances de conception peuvent être vues comme un savoir implicite obtenu grâce à l'expérience, ou bien un savoir explicite (théories, méthodologies, modèles de conception, etc.) [Rey 01].

Alors que la conception avance, de plus en plus paramètres de conception sont introduits pour décrire des solutions de conception avec plus de précision. Pour choisir des options optimales les concepteurs doivent prendre beaucoup de décisions basées sur des intuitions ; les rapports entre les paramètres de conception sont souvent sous-jacents [Saw 02].

Ainsi, les pratiques sont souvent basées sur des habitudes [Mat 02]. L'expérience et le savoir faire influencent fortement la compétence des concepteurs dans la création d'objets techniques [Hub 01]. C'est notamment le cas pour l'évaluation de la faisabilité d'un concept; qui est basée sur l'expérience et les connaissances des concepteurs [Ull 03].

Cela correspond aux comportements "machinal" ou "procédural", décrits par Leroy et Signoret (voir §2.1.1). Parfois même, le concepteur se dirige directement vers une solution qu'il maîtrise; il y a prégnance de la solution dans le processus mental de conception [Dar 00]. Des alternatives intéressantes peuvent être écartées parce qu'elles ne sont pas connues, usuelles ou évaluées.

Les habitudes peuvent provenir du comportement machinal d'un concepteur, ou s'imposer comme des règles naturelles dans une entreprise, un bureau d'étude : certains types de solutions font partie de la culture de l'entreprise. Déroger à ces règles est considéré comme un risque.

Dans tous les cas, les architectures solutions sont fortement dépendantes de ces décisions [Hic 02c].

Plusieurs décisions s'exercent aux différents niveaux du processus de conception :

Pour ce qui est de l'**évaluation des concepts**, Ullman précise que souvent seul le concept qui semble être le plus prometteur est développé : cela évite d'après lui de passer du temps à structurer les concepts, à les rendre mesurables pour qu'ils puissent être comparés vis-à-vis des objectifs de conception et des spécifications. La difficulté dans l'évaluation de concept c'est que l'on dispose de connaissances et données très limitées sur lesquelles baser la sélection [Ull 03].

Même si des méthodes et outils existent, comme les matrices QFD qui permettent une comparaison de concepts au regard de différentes fonctions, la sélection de concept est une étape critique car toutes les activités suivantes en dépendent [Che 02].

Le Coq souligne le caractère combinatoire de la **recherche d'architecture** et le nombre important de solutions qui en résulte. Cet auteur propose d'explorer les différentes combinaisons possibles d'éléments. Ensuite, l'évaluation des différentes solutions d'architectures doit impliquer les différents acteurs métiers. Cette évaluation est plutôt qualitative et positionne les solutions par rapport à l'existant [LeC 92].

Une fois que l'on dispose de plusieurs architectures réalisables, il faut être capable de choisir donc de les hiérarchiser.

Aussi bien pour le choix d'un concept que durant la détermination d'architecture, des décisions sont basées sur l'intuition et l'expérience des concepteurs, sur les habitudes personnelles ou collectives.

Il est nécessaire de faciliter le choix parmi plusieurs concepts. Nous ne prétendons pas réaliser la sélection de concept. Mais, une fois que des concepts pertinents ont été retenus, nous proposons de faciliter le choix parmi plusieurs alternatives, plusieurs concepts de solution.

Par ailleurs, le système d'aide à la décision doit fournir au concepteur l'ensemble des architectures solutions et un moyen de les discriminer.

2.3.3 Itérations

La démarche de conception de produit est intrinsèquement itérative [Qua 94][Roo 95][Sco 96]. Beaucoup de modèles de processus de conception prévoient d'ailleurs, implicitement, des boucles de retour en arrière [Tat 96][Rey 01]. A chaque niveau de la conception, le processus est itératif et récursif, et fournit un progrès incrémental du problème [Woo 01].

La conception de produit est au cours du projet une série d'aller-retour. Le phénomène d'itération est une caractéristique fondamentale de l'acte de conception de produit selon Vadcard [Vad 96]. Il préconise d'intégrer l'aspect itératif dans la programmation de l'action, plutôt que de la considérer comme un phénomène perturbateur dû à des erreurs de choix.

Les itérations proviennent de la recherche d'architecture. Entre la recherche de concepts ("conceptual design") et la conception architecturale ("embodiment design"), plusieurs itérations sont nécessaires pour faire émerger la conception définitive [Pah 96].

De plus, il existe une séquentialité dans la détermination des caractéristiques de l'architecture. Il est souvent nécessaire de connaître les paramètres d'un élément pour en déterminer un autre. Avec les outils traditionnels d'analyse assistée par ordinateur, les calculs et simulations se font avec des définitions avancées du produit; les concepteurs emploient souvent une approche essai-erreur basée sur des méthodes numériques. Elle produit quelques valeurs solutions sans donner les relations fondamentales entre les paramètres de conception. [Saw 01b].

La conception architecturale induit un processus itératif de génération d'artefacts de produits et d'évaluation de leur capacité à satisfaire les exigences [Ull 03].

Janssen citant Amarel [Jan 90] indique qu'une utilisation a posteriori des spécifications pour évaluer une conception correspond à la méthode "générer et tester" puisque l'évaluation a lieu lorsque la structure de l'objet est entièrement définie.

Les itérations résultent donc également du mode essai-erreur, induit par la causalité dans la détermination des caractéristiques de l'architecture.

Des choix réalisés a priori induisent un mode "essai-erreur" de détermination d'architecture. Les connaissances nécessaires à la conception d'un produit qui réponde aux multiples exigences ne sont pas toujours toutes prises en compte.

Nous souhaitons avec notre approche limiter les itérations ; il faut donc être capable de lister ces connaissances. La recherche de toutes les architectures réalisables doit toutes les prendre en compte simultanément.

2.4 Difficultés en conception préliminaire

Beaucoup d'auteurs le soulignent, il existe peu d'outils et de procédures permettant de supporter cette phase du processus de conception.

Selon Antonsson, il est difficile de fournir des outils informatisés pour les premières phases de la conception de produit [Ant 01], notamment lorsque les concepteurs souhaitent comparer les coûts de différentes configurations [Hic 02b].

L'intégration des outils KBS (Knowledge Based Systems) dans les premières phases de la conception architecturale n'est pas encore satisfaisante [Wel 99].

Suite aux pratiques que nous venons de décrire, nous allons voir les difficultés qu'elles engendrent. Elles seront illustrées dans l'application développée dans le Chapitre 6.

2.4.1 Décisions et faibles connaissances

Comme nous l'avons déjà évoqué, des décisions prises durant les phases ou lors des étapes orientent les étapes ultérieures, et réduisent les voies d'alternatives possibles, ce qui peut constituer un risque : se restreindre à une seule voie est dangereux car la meilleure alternative peut être éliminée [Roo 95]. D'autre part, développer toutes les alternatives mènerait à une explosion combinatoire des études à mener.

Les directives VDI préconisent un processus de divergence et convergence pour chaque phase. La Figure 19 illustre également toutes les alternatives possibles à chaque étape

du processus de conception. Même si une convergence est préconisée, toutes les combinaisons possibles ne sont pas examinées. Par exemple, un seul "concept solution" est choisi à la fin du "conceptual design", seule l'architecture en résultant est évaluée.

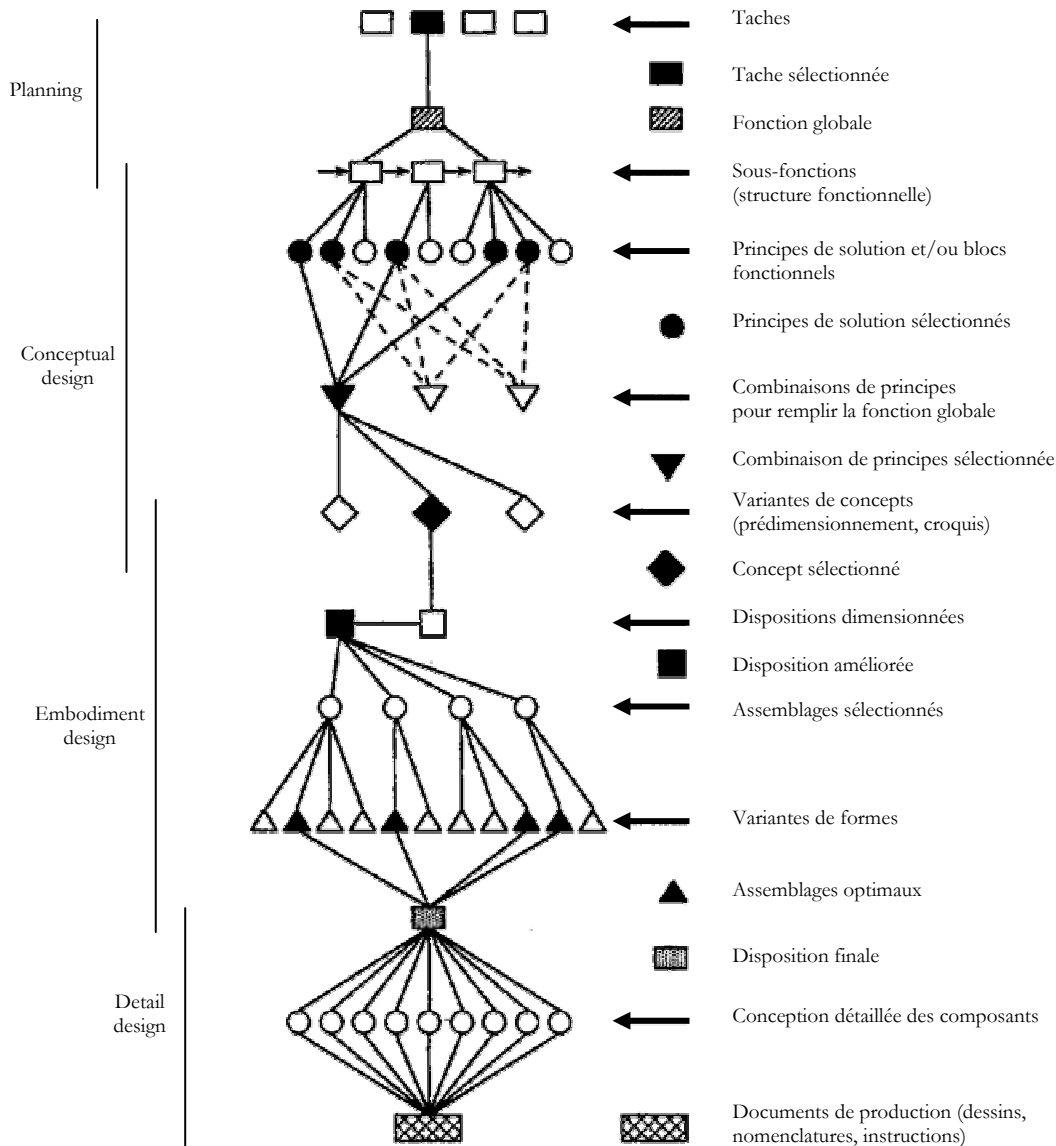


Figure 19: Divergence et convergence dans le processus de conception, d'après les directives VDI.

Nous nous intéressons aux difficultés engendrées par les décisions à prendre durant la conception préliminaire, et plus précisément autour de la conception architecturale.

Une première décision importante est à prendre à la fin de la **phase de recherche de concepts**, pour faire un choix parmi des concepts pertinents ou des concepts de solution (WS).

Selon Ullman, la méthode des matrices de décision (méthode Pugh) permet la pondération des critères et l'évaluation des alternatives pour chaque critère. Ce travail est réalisé par groupe, les décisions sont subjectives. Chaque concepteur a en effet un concept favori, qu'il considère comme une donnée, pour évaluer les autres. De plus, cette méthode peut être

itérative. Enfin, les concepts peuvent être insuffisamment détaillés pour pouvoir être évalués au travers des critères [Ull 03].

Les caractéristiques du produit sont incomplètement définies, les connaissances sont faibles durant les premières phases de la conception préliminaire [Cha 99][Wel 99].

Or, afin de pouvoir commencer la **conception architecturale**, des choix initiaux sont à faire sans lesquels la recherche des autres éléments est impossible. Il faut souvent fixer les principales dimensions, choisir des composants, des technologies, etc. Les concepteurs font alors un prédimensionnement intuitif. De plus, Hubka et Eder parlent de processus de conception intuitive car les concepteurs suggèrent souvent les voies possibles et sélectionnent celles qui apparaissent les plus prometteuses. Finalement, le concepteur expérimenté trouve une solution, mais elle est rarement optimale [Hub 01].

De plus, se pose la question importante du choix des connaissances pertinentes à prendre en compte pour commencer la recherche d'architecture. Seule l'expérience du concepteur (retours d'expérience, savoir faire) permet pour l'instant d'identifier les connaissances de conception nécessaires et suffisantes à ce stade de la conception; nous les appelons caractéristiques structurantes du problème de conception.

Les choix implicites faits durant cette phase figent une famille ou une génération de produits [LeC 92]. L'exploration des différentes combinaisons possibles peut s'avérer fastidieuse si l'on recherche l'exhaustivité.

De plus, il n'existe pas de méthode qui décrive la façon d'obtenir des architectures de produit [LeC 92]. L'expérience et l'intuition du concepteur sont utiles durant la recherche d'architecture. [Hub 01].

Cette nécessité de prendre des décisions a priori rend le recours à l'expérience des concepteurs obligatoire. La conception est à la fois déductive et intuitive ; les solutions obtenues sont rarement optimales. Un besoin d'aide à l'identification des caractéristiques structurantes du problème de conception préliminaire apparaît.

2.4.2 Prise en compte simultanée de données hétérogènes

Selon Darses, les concepteurs ne prennent pas en compte l'ensemble des données disponibles pour concevoir et se fondent sur un ensemble limité pour évoquer une solution [Dar 00]. C'est une des raisons des itérations dans le processus de conception.

Le terme d'utilisateur fait souvent référence à la situation de vie "utilisation". Mais plus globalement, plusieurs "acteurs" sont confrontés au produit durant son cycle de vie, et l'appréhendent de manière différente [LeC 92] : concepteur, utilisateur final, designer, ergonome, producteur, vendeur, réparateur, etc.

Pour la seule situation de vie "conception", ces acteurs génèrent des points de vue différents, qu'il est nécessaire d'intégrer pour que le produit satisfasse ses fonctions d'usage, d'estime, de productivité durant ses différentes positions d'utilisation.

De plus, chaque métier a sa propre idée de la conception et ses spécificités [Dar 00]. La transversalité et la coopération entre métiers se heurtent souvent à l'inadéquation des

outils. Héritiers d'une problématique séquentielle [Jea 98], ils ne permettent difficilement la prise en compte simultanée :

- des différentes exigences et restrictions imposées par les phases du cycle de vie produit;
- des différents points de vue et règles métiers [Bri 98].

Intégrer simultanément l'ensemble des connaissances provenant des différents des acteurs métiers est une réelle difficulté; leurs exigences peuvent être en conflit [Sco 96]. Ces connaissances constituent des contraintes de nature hétérogènes et sont souvent intégrées à des stages différents du processus de conception; ce qui conduit à des itérations.

***Il faudrait donc pouvoir concevoir en utilisant simultanément des données hétérogènes c'est à dire en provenance de divers métiers ou exigées par différentes situations de vie.
Ces données doivent être préalablement exprimées.***

2.5 Synthèse

▪ Afin que nous proposons une approche complémentaire qui s'insère dans les démarches existantes, nous avons décrit dans ce chapitre :

- Les processus de conception existants;
- Les objets intermédiaires de conception rencontrés durant ces processus.

Nous avons constaté que la plupart des modèles de processus de conception proposent, après une phase de traduction du besoin, une phase de conception préliminaire (du CdCF aux spécifications techniques). Vient ensuite la conception détaillée.

Toutefois, certains modèles font apparaître l'état de concept pertinent durant la conception préliminaire, laquelle se poursuit au-delà des spécifications techniques, jusqu'à l'étape définissant une architecture : C'est la phase de conception architecturale qui est comprise entre concept et topologie validée; et qui est concernée par la démarche d'aide à la décision que nous proposons.

▪ Les pratiques actuelles de la conception préliminaire et les difficultés rencontrées ont également été abordées dans ce chapitre.

Tout d'abord, la recherche d'architecture est souvent réalisée par une démarche itérative et du type "essai-erreur", coûteuse en temps [LeC 92].

Plusieurs itérations sont nécessaires pour trouver une combinaison de paramètres qui satisfait les exigences listées, mais qui n'est pas forcément celle respectant au mieux le cahier des charges, les règles métiers, les contraintes de fabrication, etc.

A ce stade de la conception, toutes les connaissances nécessaires à la conception du produit ne sont pas toutes identifiées ni prises en compte simultanément. De plus, les comportements physiques ne sont pas toujours intégrés à ce stade de la conception puisque les outils existants de calculs de validation nécessitent des modèles avancés en définition.

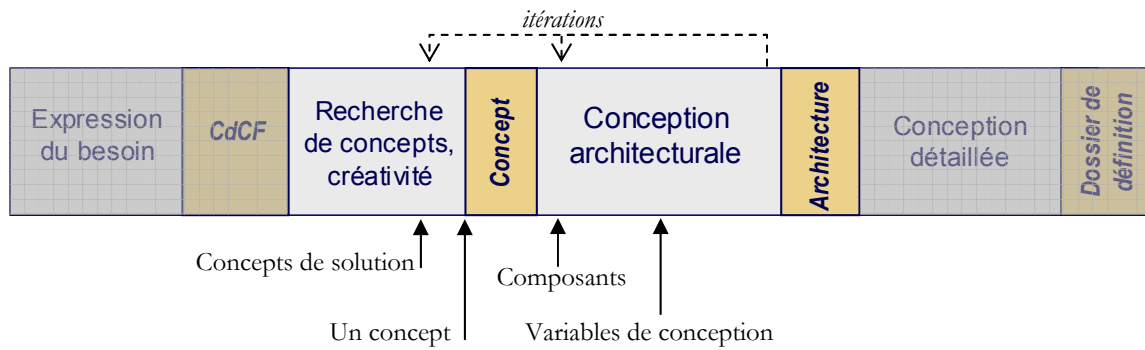


Figure 20: Choix réalisés durant la conception préliminaire, durant une démarche classique.

Ensuite, beaucoup de difficultés en conception préliminaire proviennent des choix à effectuer. Il est en effet nécessaire de prendre des décisions à plusieurs stades (Figure 20), alors que les connaissances sur le produit sont faibles : choix d'un concept, choix de valeurs pour des variables de conception (composants et topologie), etc.

Pour l'instant, la phase de conception préliminaire est réalisée grâce aux habitudes professionnelles et à l'expérience des concepteurs [Mat 02]. La causalité dans la détermination d'architecture amène à prendre des décisions a priori. Ces décisions irréversibles occultent une part de l'espace des solutions et, peut être, une solution plus intéressante.

La décision doit être repoussée à un stade où le concepteur dispose de plus d'éléments; la comparaison et le choix seront plus objectifs, et aucune solution n'est écartée d'ici là.

Pour éviter les décisions arbitraires, Bocquet suggère de définir des espaces admissibles pour les paramètres, et de décider en fin de développement des valeurs à leur affecter. Il précise toutefois que cette stratégie ne peut pas être totalement appliquée car elle nécessite des changements de comportements et des outils particuliers [Boc 98].

Afin d'évaluer une alternative de conception, il faudrait pouvoir évaluer les "champs de performance" de concepts, plutôt que de se restreindre à évaluer ensuite les performances d'une solution particulière, souvent arbitrairement évaluée [Yan 01]. Des stratégies qui réduisent de manière importante l'espace des solutions sont nécessaires [Cha 90].

Ainsi, l'aide à la décision en conception préliminaire est nécessaire pour aider à la recherche d'architectures réalisables et pour fournir les moyens au concepteur de choisir parmi elles.

D'autre part, les connaissances sur le produit étant faibles, l'approche du problème n'est pas aisée. Il apparaît nécessaire de proposer une aide à l'analyse et structuration du problème de conception afin de lister les connaissances nécessaires et suffisantes à prendre en compte au début de la conception architecturale. Le produit conçu doit en effet tenir compte des connaissances fonctionnelles, organiques, physiques, techniques, métiers, environnementales, économiques et industrielles.

Les besoins recensés durant ce chapitre pour un système d'aide à la décision en conception architecturale sont les suivants :

- Pour ne pas nécessiter de choix préalable de concept, il doit permettre la comparaison des concepts de solution;
- Permettre la modélisation des données imprécises;
- Permettre la prise en compte simultanée des exigences des différents métiers;
- Générer toutes les architectures réalisables;
- En préalable à la recherche d'architecture, une démarche d'analyse du problème de conception doit être menée pour en identifier ses caractéristiques structurantes.

Pour qu'une comparaison soit possible entre les concepts de solution, les architectures réalisables obtenues, cette démarche doit également permettre d'exprimer des critères permettant de les hiérarchiser.

La démarche d'aide à la décision en conception préliminaire doit permettre la réduction des itérations et éviter au concepteur d'avoir à prendre des décisions importantes dès le début de cette phase.

Pour l'instant, certains choix sont réalisés trop tôt et limitent fortement les solutions possibles. Nous proposons d'utiliser un système d'aide à la décision permettant la recherche de toutes les architectures solutions à partir de plusieurs concepts de solution et s'insérant dans les différentes visions du processus de conception (universitaires et normatives).

Ce système d'aide à la décision va être défini dans le chapitre suivant.

Il nécessite une démarche préalable d'identification des caractéristiques structurantes du problème de conception, liées aux diverses connaissances nécessaires à intégrer. Cette démarche est l'objectif principal de ce travail de thèse.

Cette démarche devra permettre également d'exprimer des objectifs pour fournir un moyen de comparaison des solutions obtenues en fin de conception architecturale.

Chapitre 3 Vers un système d'aide à la décision

Nous avons vu précédemment que le concepteur doit prendre à plusieurs reprises des décisions a priori dans les premières phases de la conception préliminaire, dans un contexte de connaissances imprécises.

Le processus de conception architecturale se déroule pour un seul concept sélectionné et le concepteur passe peut être à côté d'un concept plus performant; ou bien le processus doit être répété pour évaluer plusieurs concepts.

Nous proposons le recours à un système d'aide à la décision afin de générer, à partir de plusieurs concepts de solution pertinents, toutes les architectures réalisables. Elles seront ensuite discriminées pour faciliter le choix final parmi les solutions les plus performantes aux vues des objectifs de conception.

D'autre part, le concepteur étant confronté au début de la conception préliminaire à une difficulté de recensement des connaissances nécessaires et suffisantes pour réaliser cette phase, le système d'aide à la décision doit inclure une démarche préalable d'analyse du problème de conception permettant d'en identifier les caractéristiques structurantes.

Un système d'aide à la décision est composé des éléments suivants :

- Une démarche méthodologique de traitement du problème de conception préliminaire;
- Une base de connaissances;
- Des modèles de comportement physique du système et de ses composants;
- Un outil de résolution;
- Un moyen de visualisation des résultats.

Aux vues des conclusions du Chapitre 2, le système d'aide à la décision que nous proposons dans ce chapitre doit donc :

- permettre d'avoir une vision complète du problème au début de la phase de conception architecturale (Figure 21);
- définir toutes les architectures solutions du problème;
- permettre la qualification :
 - du modèle et des résultats (travail de thèse de Yoann Vernat [Ver 04]);

- de la conception pour le client;
- de la conception pour le concepteur;
- intégrer des outils⁷ :
 - pour l'aide à la recherche de concepts : la démarche et le logiciel de conduite d'études MAL'IN[®] [Tre 03] propose l'adaptation d'outils issus de la théorie TRIZ et de l'analyse fonctionnelle;
 - pour la résolution de Problème de Satisfaction de Contraintes (PSC) : le logiciel "Constraint Explorer" est présenté dans le §3.3.4;
 - pour visualiser l'espace des solutions : nous n'avons pas d'outil pour l'instant.

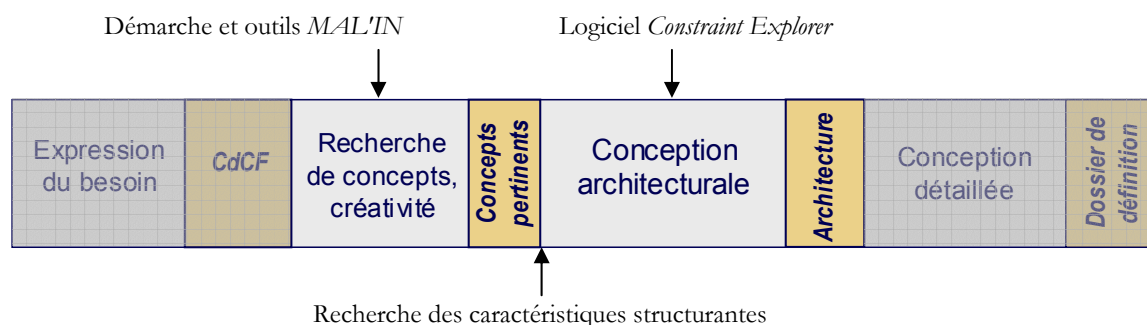


Figure 21: Positionnement de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes et des outils intégrés dans le système d'aide à la décision.

Beaucoup de méthodologies ont été proposées pour structurer le processus de conception [Pah 96][Cav 95][Aou 90][Die 00][Ull 03], etc. Nous ne souhaitons pas en proposer une nouvelle, mais nous positionner par rapport à celles qui sont utilisées.

Nous proposons un déroulement de la phase de conception architecturale modifié du point de vue des décisions à prendre. Inversement au processus décrit Figure 20, il n'est plus nécessaire :

- de sélectionner uniquement un concept à la fin de la phase de recherche de concepts, mais l'on peut conserver plusieurs concepts de solutions;
- d'affecter des valeurs aux variables de conception durant la conception architecturale et de choisir précisément des composants.

De ce fait, la décision importante est repoussée à la fin de la phase de conception architecturale (voir Figure 22) : Il y a un choix à faire parmi les architectures solutions, en utilisant une traduction des objectifs de conception sous forme d'indicateurs, quantifiables dès la conception préliminaire.

Ces solutions proviennent indifféremment des différents concepts de solutions pertinents qui ont été modélisés. A ce stade là, le concepteur dispose d'informations sur les performances des concepts de solution pour pouvoir plus facilement faire un choix.

Le choix est retardé, mais l'évaluation a lieu plus tôt dans le processus : des concepts sont évalués durant la recherche d'architecture, plutôt qu'une solution particulière durant la conception détaillée où le concept pourrait être remis en cause.

⁷ Même si Constraint Explorer est pour l'instant au stade du développement, ce logiciel est néanmoins utilisable.

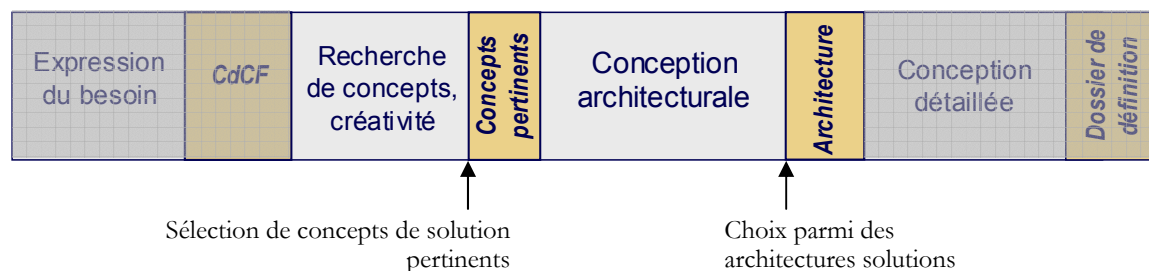


Figure 22: Proposition de positionnement des choix à réaliser par le concepteur durant la conception préliminaire, avec l'utilisation du système d'aide à la décision.

D'autre part, la phase de recherche de concepts n'est pas modifiée. Toutefois, lorsque la démarche d'analyse du problème va mettre en évidence des besoins de créativité, nous proposerons d'utiliser les outils d'aide à l'innovation MAL'IN®.

Les outils de créativité, d'évaluation des concepts doivent toujours être utilisés pour générer et sélectionner des concepts de solution pertinents, mais la sélection d'un unique concept n'est plus nécessaire.

3.1 La Conception Inversée Intégrée

Pour essayer de pallier les difficultés de la conception préliminaire, plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser la programmation par contraintes en phase d'avant-projet [Tho 93a][Yan 01].

Une contrainte est une relation impliquant des variables de conception. Elle peut avoir la forme d'une relation mathématique (égalité, inégalité), mais aussi d'une règle logique (si > alors), d'une définition d'intervalle.

La Conception Inversée Intégrée (CII) suppose une modélisation des différentes aspects du problème de conception (Figure 23) sous forme de contraintes, pour les intégrer lors de la recherche de solutions [Fis 00] : les connaissances métiers, les lois de la physique (conception intégrée), ainsi que les critères d'appréciation du CdCF, les critères de performances (conception inversée). En effet, dans une logique classique, les critères d'appréciation du CdCF servent à valider la conception ultérieurement, alors qu'ici, ils sont intégrés dès le début du processus (raisonnement abductif).

Nous avons vu qu'une utilisation a posteriori des spécifications pour la validation d'une conception génère un mode essai-erreur et des itérations. Comme le souligne Jantet, avec un mode d'intégration des spécifications a priori, celle-ci guident la génération de solutions parmi l'ensemble des choix possibles. L'évaluation n'est plus nécessaire puisque ne sont envisagés que des objets vérifiant les propriétés désirées [Jan 90].

Les solutions sont déterminées par des moteurs d'inférence PSC (Problème de Satisfaction de Contraintes) qui recherchent la satisfaction de toutes les contraintes. Une solution à un PSC est l'affectation à chaque variable d'une valeur dans son domaine, l'ensemble des variables devant respecter toutes les contraintes du problème.

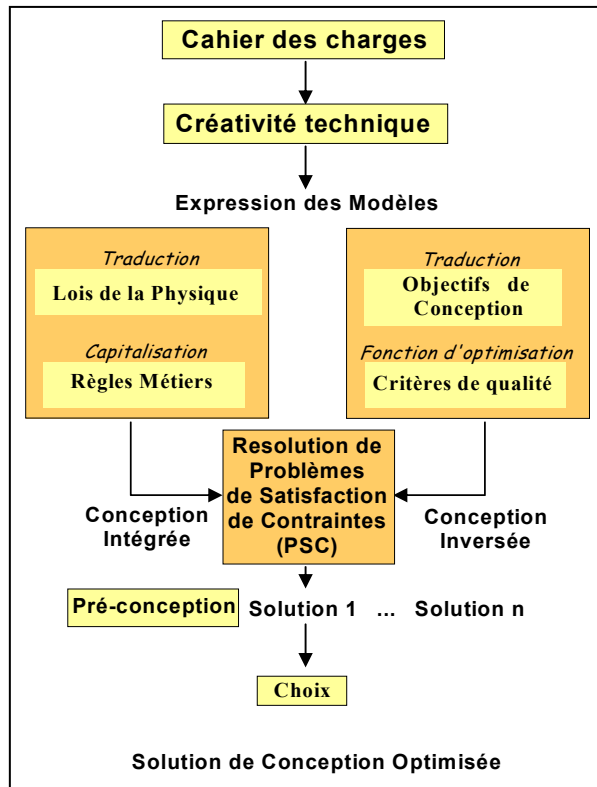


Figure 23: Conception inversée intégrée [Fis 00].

Les outils d'aide à la décision pour **l'ingénierie intégrée** doivent utiliser au même niveau l'ensemble des connaissances qui participent au processus de prise de décisions. Ces connaissances sont fonctionnelles, physiques, organiques, techniques, métiers, environnementales, économiques, industrielles ou normatives.

Les outils d'aide à la décision pour **l'ingénierie inversée** servent à analyser l'espace des solutions d'un problème de conception (analyse abductive) plutôt qu'à valider une solution de conception (démarche inductive). L'intérêt de la satisfaction de contraintes est de pouvoir cerner progressivement l'espace des solutions plutôt que de tester des alternatives de solutions [Jan 90].

3.2 Contraintes en conception préliminaire

3.2.1 Pertinence des PSC en conception préliminaire

Les outils informatisés en avant projet doivent permettre, d'une part, de tester un grand nombre de solutions et de mieux utiliser les conceptions antérieures, et, d'autre part, de pouvoir opérer sur des modèles incomplets (non complètement dimensionnés). Les outils d'analyse existants, basés sur des modèles déterministes (solutions évaluées en entrée) sont inadaptés [Yan 01].

Selon Janssen, les contraintes fournissent un formalisme adéquat à la représentation des connaissances de type évaluation, considérées comme la forme privilégiée pour l'énoncé des spécifications d'un problème de conception [Jan 90].

Par rapport aux difficultés rencontrées durant la conception préliminaire (§2.4), les outils de programmation par contraintes offrent des possibilités intéressantes.

Ils permettent tout d'abord la prise en compte de l'imprécision⁸. Selon Giachetti et al. [Gia 97], l'imprécision se traduit durant le processus de conception d'abord par des variables linguistiques puis par des variables floues (Figure 24).

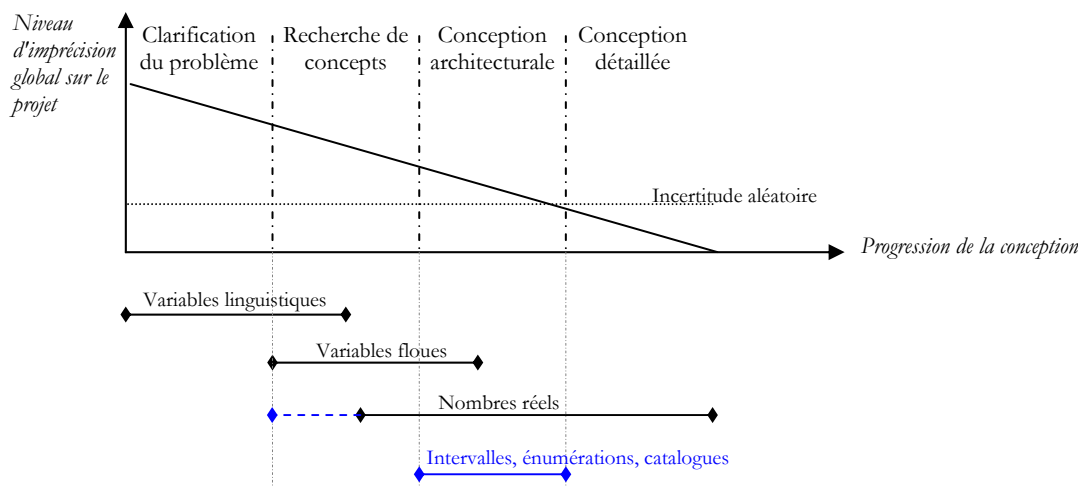


Figure 24: Evolution du niveau d'imprécision durant le processus de conception.

Nous pouvons compléter cette vision en disant que l'imprécision peut également se traduire, durant la phase de recherche d'architecture, par des énumérations, par des domaines de variation des variables (Figure 24). De plus, quelques variables réelles sont connues dès la définition du cahier des charges fonctionnel (niveaux des critères d'appréciation du CdCF et critères de qualification client par exemple).

Un autre intérêt des PSC consiste en la possibilité d'intégrer les catalogues présentant les caractéristiques de composants standards sont aisément intégrés au modèle du problème de conception. Ainsi, le choix est laissé libre parmi les composants disponibles. De plus, les variables pouvant appartenir à des intervalles (entiers ou réels), il n'y a pas de paramètre fixé a priori et les potentialités de chaque concept sont préservées. Les variables linguistiques peuvent également faire partie de la description d'un catalogue.

Les différentes exigences métiers et cycles de vie, les critères d'appréciation du CdCF, les comportements physiques peuvent également être décrits par des contraintes. Une contrainte permet de donner une description partielle de l'objet recherché, sous forme de condition de compatibilité. Pouvoir énoncer des contraintes de manière indépendante correspond bien au caractère hétérogène des conditions qui portent sur l'objet [Jan 90].

⁸ Vernat définit l'imprécision comme l'aspect vague ou flou lié à la distinction entre plusieurs valeurs d'une même variable, qui peut se traduire par un ensemble de valeurs possibles pour la variable (sous forme d'un intervalle par exemple) [Ver 04].

L'écriture de ces exigences variées au sein d'un même modèle assure leur prise en compte simultanée et élimine la séquentialité et la causalité dans la détermination d'architecture.

Ainsi, les décisions à prendre a priori et les itérations sont limitées. Toutefois, il est nécessaire de disposer d'un modèle parcimonieux⁹, en adéquation avec l'outil de traitement [Seb 03]. En effet, le nombre de variables, la taille du problème est souvent limitée par le solveur.

En conséquence, pour commencer la conception architecturale, il faut rechercher les éléments nécessaires et suffisants. C'est l'objet de la méthodologie exposée dans le Chapitre 5.

Enfin, l'acquisition et la structuration des connaissances contribue également à la pérennité du savoir-faire de l'entreprise: l'écriture des règles métier permet leur capitalisation.

L'écriture d'un problème de conception préliminaire sous forme de contraintes et sa résolution avec un solveur PSC permet la prise en compte simultanée de toutes les caractéristiques structurantes du problème. Cela évite séquentialité et causalité lors de la recherche d'architecture.

De plus, en décrivant dans le modèle les différents concepts de solution pertinents, le concepteur n'a pas de choix préalable de concept à faire. Les architectures solutions proviennent de plusieurs concepts.

L'imprécision est notamment traduite par des énumérations ou des intervalles.

Cette écriture du problème suppose l'identification de ses caractéristiques structurantes.

3.2.2 Utilisation des PSC en conception architecturale

La programmation par contraintes est utilisée dans plusieurs domaines : système d'aide à la conception ou à la décision, ordonnancement et gestion de production, reconnaissance de formes, etc. Nous nous intéressons dans le cadre de ce mémoire, aux études appliquées à la phase de recherche et de définition d'architecture.

Une stratégie de résolution de problème de conception préliminaire utilisant la modélisation par contrainte est proposée par Medland et Mullineux [Med 00]. En partant d'une liste d'exigences, les objectifs de conception et facteurs importants pour la réussite de la conception sont collectés d'une manière non structurée. Les exigences de conception peuvent provenir de limitations imposées par la forme, de considérations de ressources disponibles, observation d'interaction d'éléments géométriques et d'expériences antérieures. Chaque exigence est formulée sous forme d'une règle, d'une contrainte pouvant être évaluée. Même si la liste de règles est incomplète, les auteurs précisent que cela peut suffire pour permettre de développer différentes configurations.

⁹ Un modèle parcimonieux nécessite peu de contraintes et de variables.

Selon Hick et al., l'automatisation de la conception architecturale doit permettre au concepteur d'évaluer beaucoup de configurations. Les choix de composants standards doivent satisfaire les critères de performances et satisfaire les contraintes géométriques. Ces auteurs proposent un outil informatique pour faire des choix de composants parmi des catalogues et des déterminations de paramètres de conception, pour une configuration donnée [Hic 02c]. Une solution est générée, mais il n'est pas indiqué s'il y en a plusieurs et comment le choix est effectué.

D'après Thornton et al. [Tho 93/94/96], la conception architecturale est un processus de spécification et de satisfaction de contraintes; ces auteurs proposent un logiciel permettant de le réaliser. L'objectif est d'aider le concepteur dans la génération rapide et l'évaluation de conceptions architecturales réalisables [Bra 00].

La phase de spécification est réalisée en construisant un modèle produit définissant des composants, des interfaces entre composants, des contraintes.

Les composants doivent être dans une bibliothèque de composants génériques, tels que axe, bielle, etc. En effet, selon les auteurs, beaucoup de conceptions peuvent être décrites en utilisant un nombre raisonnable et gérable d'éléments standards [Tho 94]. Ces composants sont définis par des paramètres de conception, des contraintes mécaniques, un matériau, une géométrie.

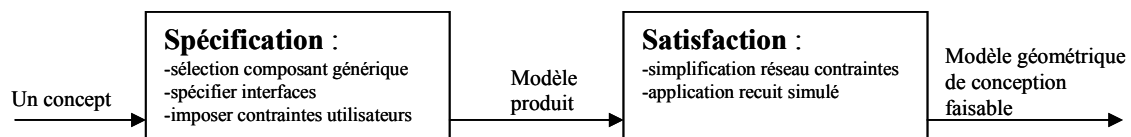


Figure 25: Processus de spécification et de satisfaction de contraintes [Tho 96b].

Toutefois, quelques difficultés apparaissent :

- Le concepteur doit faire des choix pour définir la géométrie et la topologie : par exemple, le nombre d'étages d'un échangeur doit être fixé. Le problème n'est pas entièrement paramétrique. Les auteurs suggèrent [Tho 96b] que cette méthode permet plutôt d'explorer plusieurs concepts et combinaisons de composants, car le temps de génération d'architecture est réduit ; comme en utilisant le KBE (Knowledge Based Engineering) [Cha 99].

Cette méthode permet de traiter des mécanismes simples, de dimensionner automatiquement une conception constituée d'assemblage de composants génériques paramétriques [Bra 00].

Ainsi, partant d'un concept où la conception serait complètement paramétrique, il n'est pas possible de déterminer des paramètres de conception optimaux (nombre d'étage de l'échangeur par exemple). Cela nécessite l'utilisation de modèles complexes de comportement physique, qui ne sont pas intégrés.

Sawada indique qu'il est difficile avec ce système d'évaluer et de comparer différents modèles de produits [Saw 01a].

- Thornton précise que toutes les informations de conception ne sont pas incluses, seulement les plus importantes [Tho 94], mais il n'est pas indiqué comment faire la sélection.

- Les variables discrètes ne sont pas prises en compte, l'introduction de catalogues est impossible. La sélection de matériau, ainsi que la mise en place d'une fonction objectif ne sont pas réalisés [Tho 96b].

- Il s'agit durant la phase d'embodiment design de trouver une conception réalisable, pas nécessairement optimale [Tho 94]. De plus, cette approche ne considère qu'un seul concept (Figure 25).

Une amélioration de ces démarches consisterait à proposer des possibilités de description de concepts différents, ainsi que de comparaison entre les architectures réalisables pour choisir celle qui répond le mieux aux objectifs exprimés.

3.3 Démarche proposée et outil

3.3.1 Positionnement et complémentarité par rapport aux processus existants

Nous avons mis en parallèle des processus de conception représentatifs afin de comparer les états d'avancement du produit par rapport aux jalons proposés. La Figure 26 permet de comparer ces différents états d'avancement dans le temps pour le processus de conception préliminaire "enrichi" par la CII par rapport aux processus selon les normes RG Aéro et selon les directives VDI.

La phase de conception préliminaire où intervient la CII correspond bien à la conception architecturale (embodiment design) du processus décrit par Pahl et Beitz, car des éléments de dimensionnement apparaissent dans une représentation intermédiaire entre concept et définition complète.

Toutefois, plutôt que de partir d'un seul concept, chaque concept de solution pertinent est décrit par un ensemble de contraintes; le choix s'effectuera plus tard. Nous avons résolu un problème de conception où plusieurs concepts de solutions pertinents étaient modélisés [Sca 04a]. La recherche d'architectures utilise ces différentes alternatives. La conception préliminaire "enrichie" part donc de plusieurs concepts de solutions pour mener à une solution en partie dimensionnée; contrairement à la plupart des processus de conception architecturale, qui nécessitent la sélection préalable d'un concept.

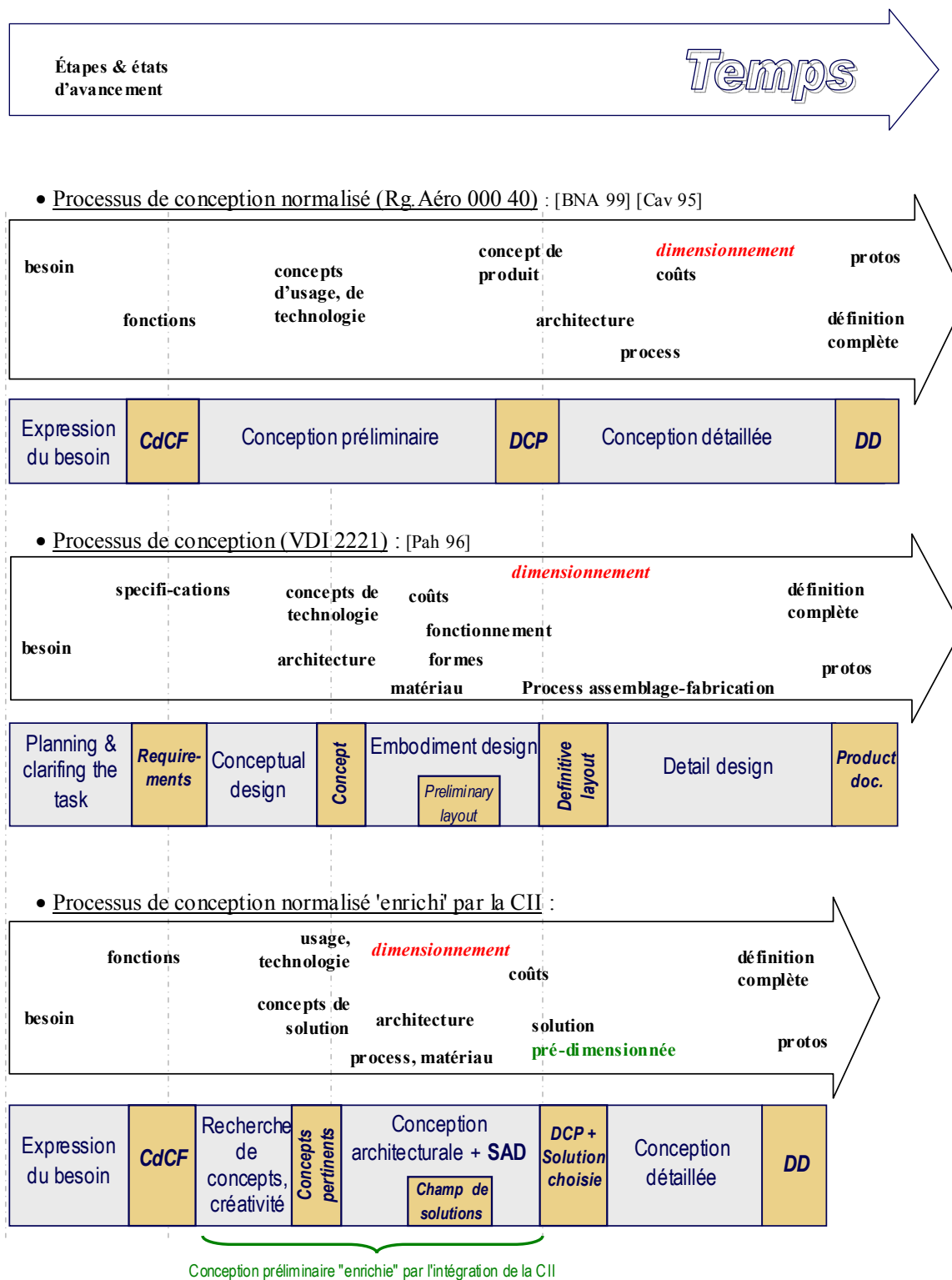


Figure 26 : Comparaison, dans le temps, des états d'avancement des processus de conception.

Par rapport au processus de conception décrit par les normes RG Aéro [BNA 99][Cav 95] (voir Figure 7), des évolutions apparaissent avec l'introduction de la CII dans la conception préliminaire (Figure 27) :

Une différence importante réside dans le positionnement du dimensionnement dans le processus de conception. Le processus "RG Aéro" propose un "concept de produit" au niveau du DCP, c'est-à-dire : choix technologiques, décomposition du produit en ses principaux constituants et répartition des exigences entre ces constituants.

La conception préliminaire enrichie permet d'obtenir une solution (concept et éléments de dimensionnement).

De plus, les itérations remettant en cause le concept disparaissent, puisque son élaboration se fait en prenant en compte les critères d'appréciation du CdCF.

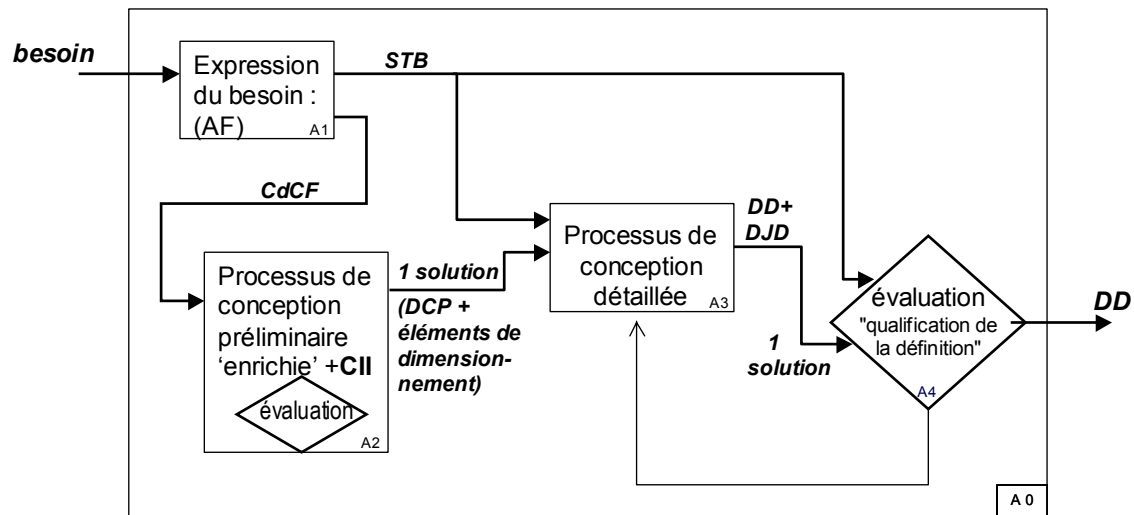


Figure 27: Evolution du processus de conception par l'introduction de la CII.

La Figure 28 détaille la phase de conception préliminaire. On voit que le CdCF intervient dans la recherche de solutions grâce aux critères d'appréciations traduits en contraintes.

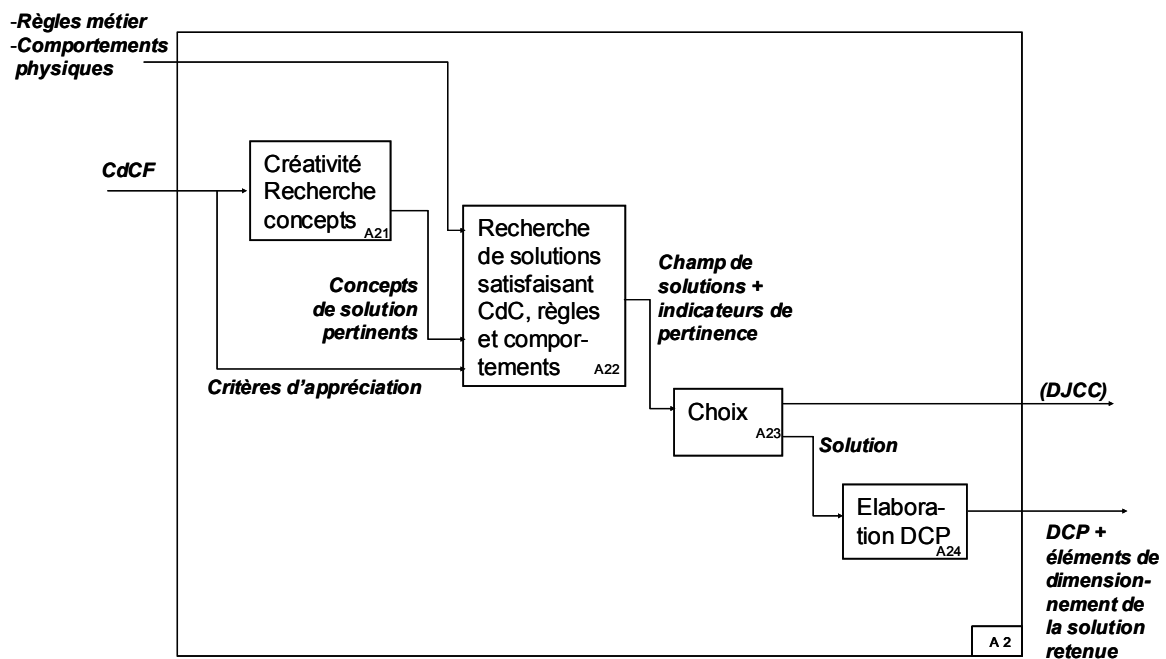


Figure 28: Conception préliminaire "enrichie" par la CII.

Ainsi, le processus de conception enrichi que nous proposons peut se positionner par rapport à la comparaison des processus (§2.1.2.3) et à l'identification des jalons communs aux processus de conception (Figure 11). La Figure 29 met en évidence la similitude entre embodiment design (modèle Pahl & Beitz) et la démarche de conception architecturale exposée dans ce mémoire, utilisant le système d'aide à la décision (SAD), sur la dernière ligne de la figure. Toutefois, la conception architecturale utilisant le SAD déborde du cadre de l'embodiment design, vers le conceptual design, car elle commence avec plusieurs concepts de solution pertinents. Il s'agit du niveau de concept qui constitue le **point de départ** de notre démarche.

Parler d'aide à la décision "en conception préliminaire" paraît donc plus adapté que "en conception architecturale".

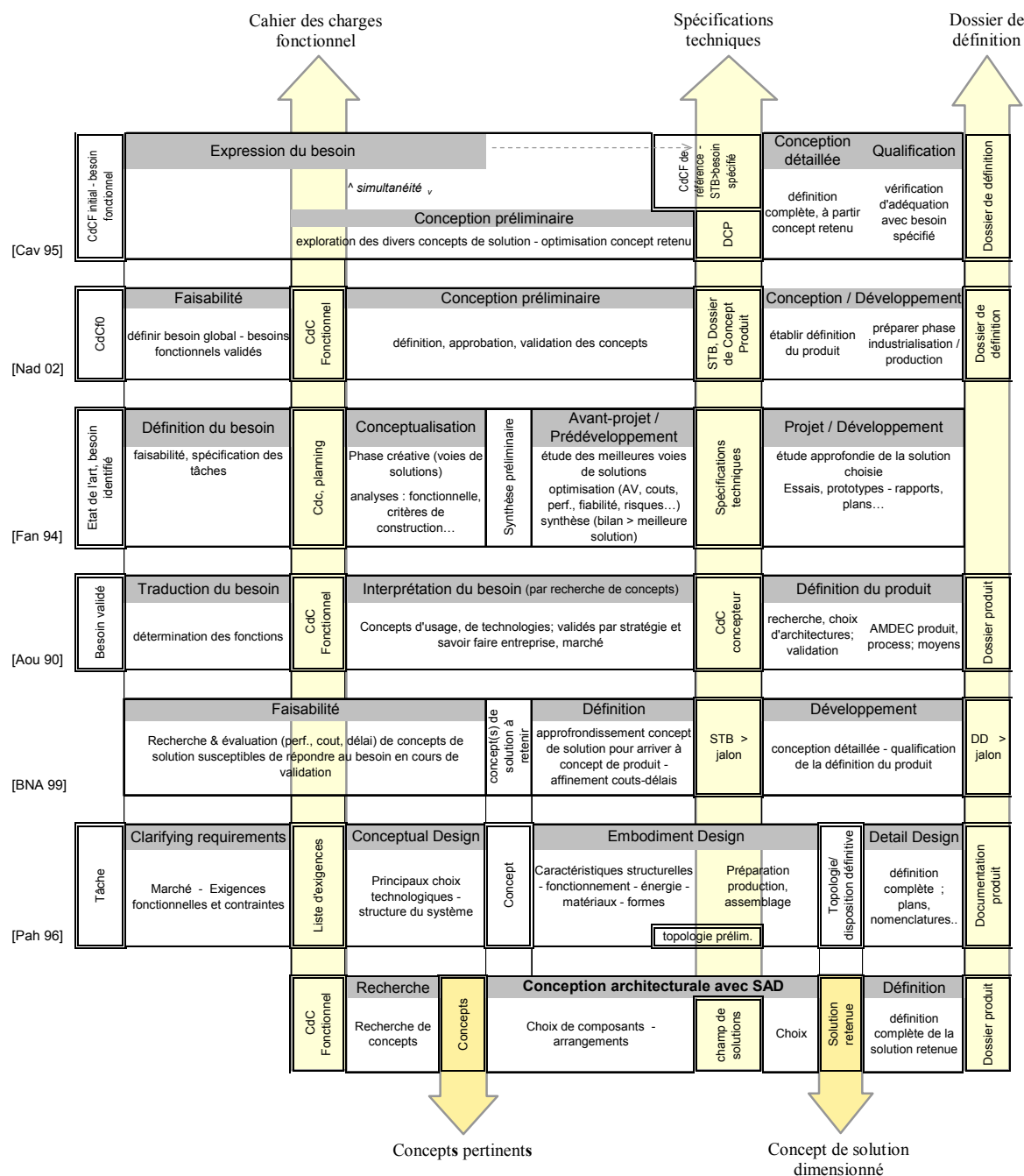


Figure 29: Positionnement de la conception architecturale utilisant le système d'aide à la décision.

3.3.2 Structuration de notre démarche globale

Il nous paraît nécessaire de structurer la Conception Inversée Intégrée par des phases. Nous proposons la démarche illustrée Figure 30. En amont de la conception architecturale où intervient la CII, les Méthodes d'Aide à L'INnovation (MAL'IN[®]) interviennent dans la phase de **recherche de concepts** [Tre 03]. Le solveur Constraint Explorer (CE) intervient pour la

résolution du PSC. Ensuite, il est nécessaire de représenter l'espace des solutions pour faciliter leur exploitation.

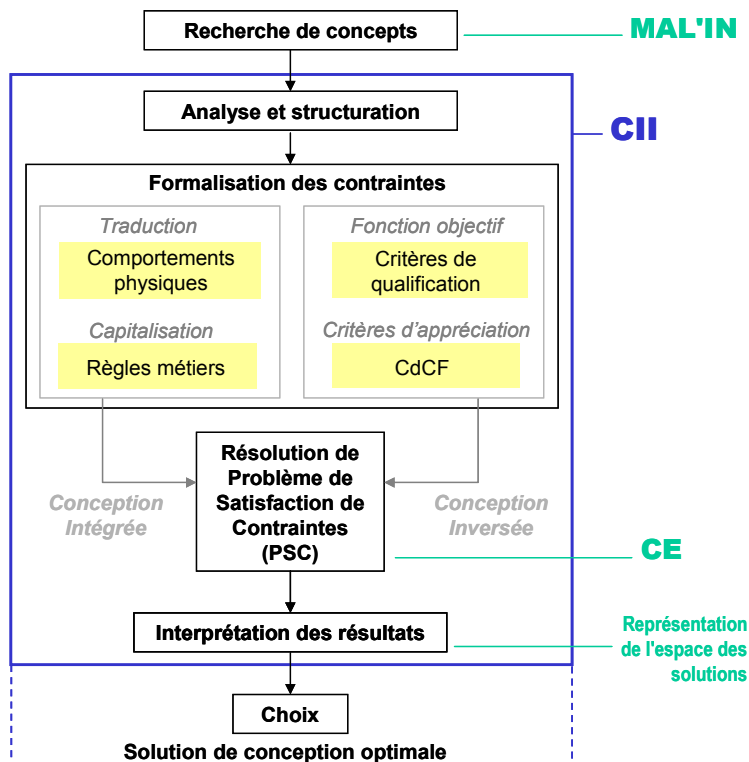


Figure 30: Structuration de la CII et outils intervenant dans le processus.

Nous l'avons évoqué dans le chapitre Chapitre 2, il est difficile de commencer la conception architecturale dans un contexte de connaissances faibles. De plus, afin de disposer d'un modèle du problème de conception parcimonieux, il faut rechercher les éléments nécessaires et suffisants à ce stade. Nous proposons pour cela une méthodologie d'**analyse et structuration du problème** de conception.

Des descriptions structurelle et physique du produit à concevoir mettent en évidence deux possibilités :

- Un concept ou des éléments de solution sont à définir. Une démarche d'aide à l'innovation interfacée avec l'analyse fonctionnelle est alors mise en œuvre.
- Des éléments sont à choisir ou à dimensionner. L'utilisation ultérieure des Problèmes de Satisfaction de Contraintes (PSC) réalise la recherche des architectures possibles en utilisant les éléments disponibles ou en affectant des valeurs qui les dimensionnent.

Ensuite, l'étape suivante consiste à la **formalisation des connaissances** sous forme de contraintes :

- traduction des critères d'appréciation du CdCF;
- écriture des objectifs à partir des critères de qualification du client et du concepteur;
- écriture des règles métiers (règles de conception, contraintes de fabrication, etc.);
- traduction des comportements physiques pertinents.

Un solveur PSC est ensuite utilisé pour **rechercher les solutions**. Une solution est un ensemble de variablesinstanciées vérifiant l'ensemble des contraintes.

Enfin, il est nécessaire d'**interpréter les résultats** et de les ordonner afin de faciliter le choix parmi les solutions.

Nous proposons une description plus précise de la démarche globale (Figure 31). Elle comporte plusieurs phases. Toutefois, ce processus n'est pas séquentiel au sens de la prise en compte des contraintes pour la recherche d'architectures réalisables.

La phase de formalisation des contraintes nécessite le CdCF, des modèles techniques, de indications économiques et des modèles de comportements physiques.

La hiérarchisation des solutions est obtenue grâce aux indicateurs de pertinence, nous le verrons dans le §4.2.

Même si le système d'aide à la décision sélectionne les architectures réalisables et fourni des moyens de comparaison, un choix est alors à faire ; c'est à ce moment là que la stratégie de l'entreprise peut intervenir.

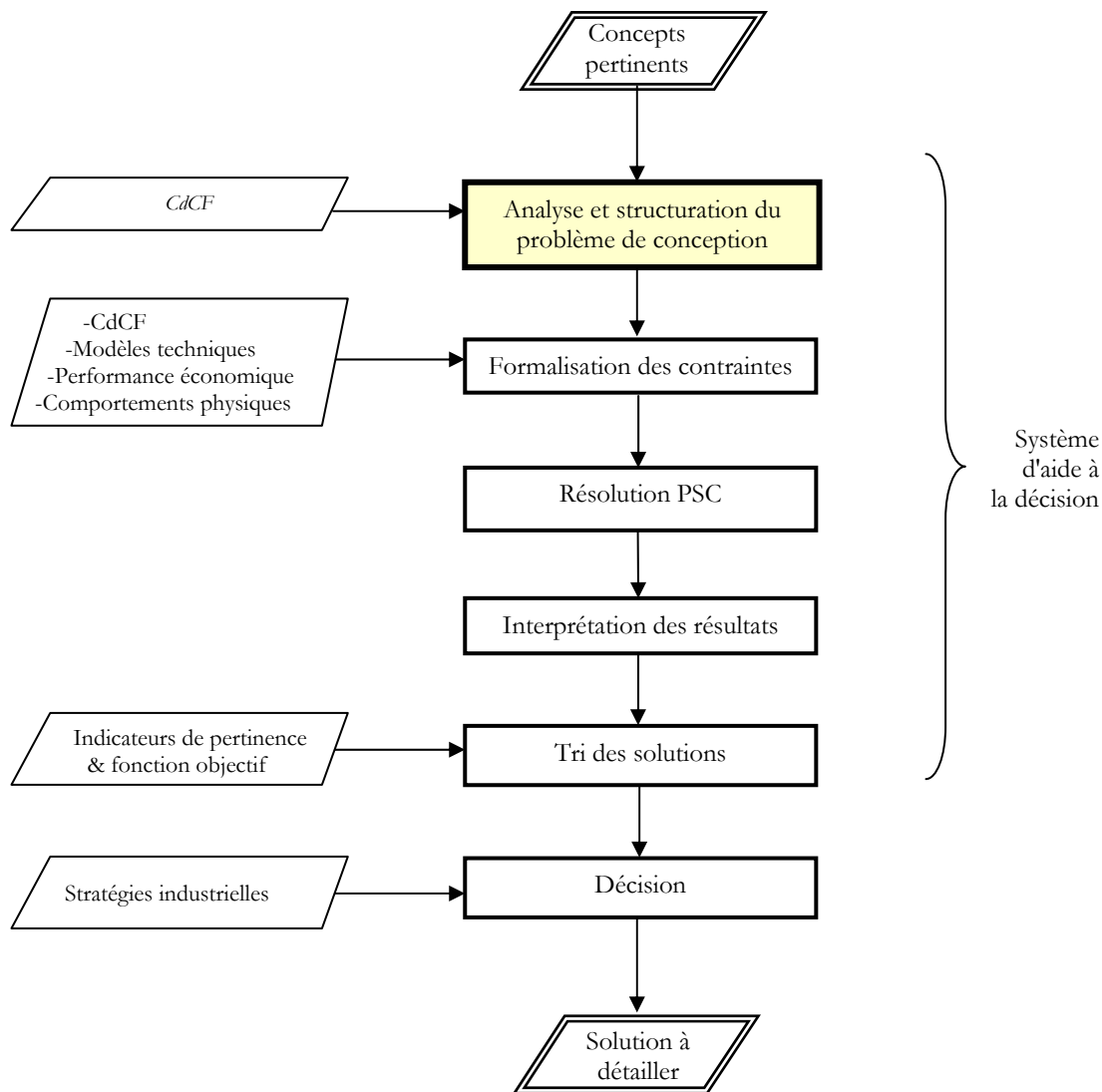


Figure 31 : Processus global d'aide à la décision.

Nous détaillerons ensuite dans ce document la première étape d'analyse et structuration du problème de conception (Chapitre 5) : elle permet d'extraire les caractéristiques structurantes du problème, à traduire ensuite sous forme de contraintes.

La Figure 32 synthétise les étapes de cette phase, avec quatre niveaux d'analyse : besoin, fonctionnel, organique, physique. A chacun des niveaux, des caractéristiques structurantes sont identifiées.

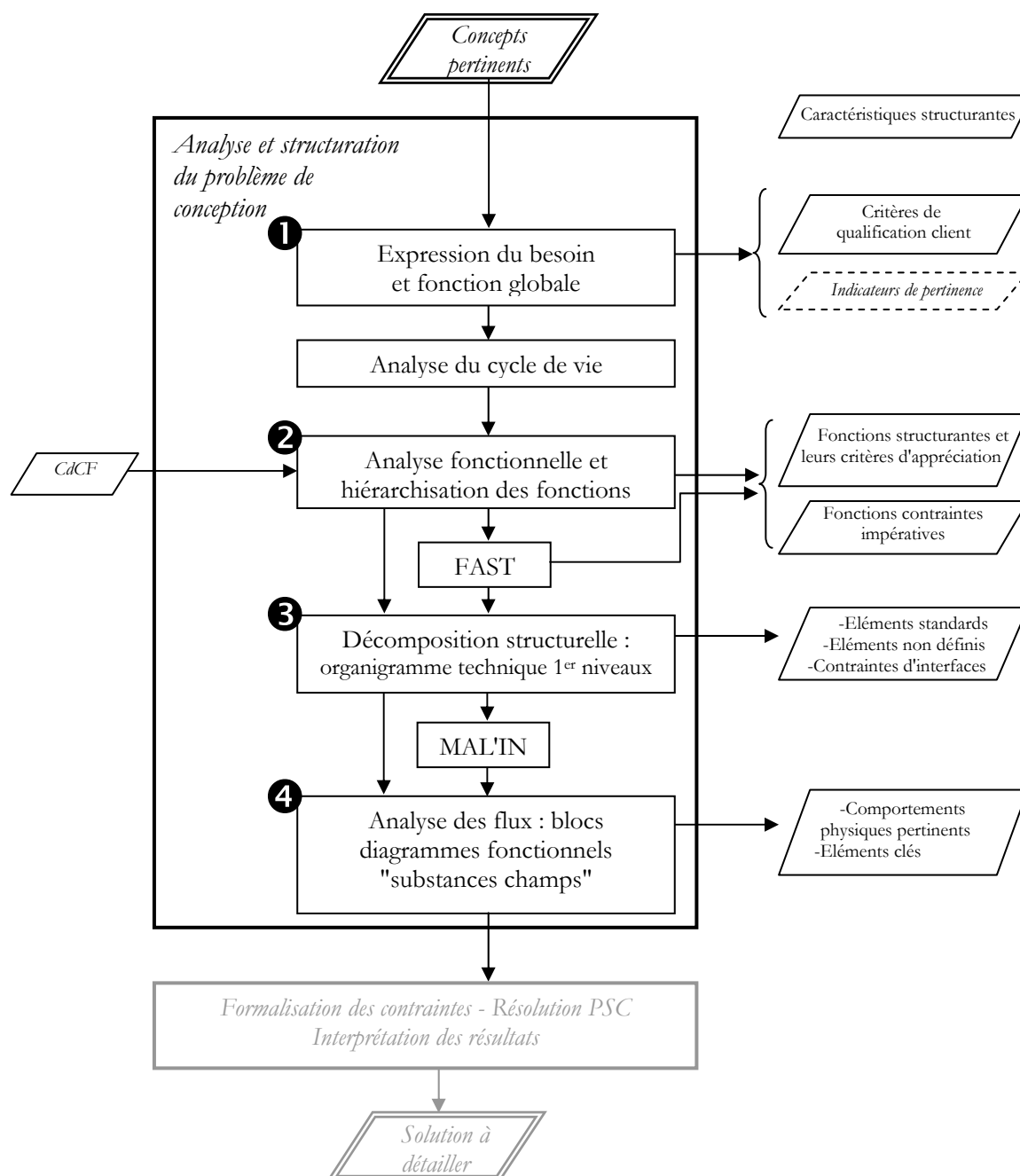


Figure 32: Structuration détaillée de la phase d'analyse et structuration du problème de conception.

3.3.3 Base de connaissances

Une base de connaissances est un inventaire de relations, de variables et de domaines. Elle regroupe un ensemble d'informations destinées à être exploitées par un programme informatique, le solveur PSC.

Les **variables** permettent de décrire différentes grandeurs physiques [Ver 04] : géométrie, caractérisation physique (module élastique, viscosité, etc.), variables d'état (pression, température, masse volumique, etc.), variables dérivées (déplacement, vitesse, accélération, etc.), variables adimensionnées (Reynolds par exemple).

Pour la description de phénomène physique, Vernat [Ver 04] propose plusieurs types de variables structurantes du modèle, notamment :

- des **variables de conception** : elles permettent de distinguer entre elles les configurations de conception. L'affectation de valeurs à toutes les variables de conception permet de définir totalement une solution de conception; à savoir une architecture.
- des **variables critères** : elles traduisent les propriétés, l'état ou la qualité d'une configuration de conception et permettent de la qualifier. Les variables utilisées pour l'écriture des critères de qualification client ou concepteur sont des variables critères.
- des variables intermédiaires.

Les variables structurantes sont les variables juste nécessaires pour la description et la qualification du modèle du problème de conception architecturale. Toutefois, l'écriture des relations, le traitement, la résolution du PSC imposent l'utilisation de variables intermédiaires, comme les variables adimensionnées par exemple.

Les **relations** entre les variables traduisent les connaissances. Ce sont des égalités, des inégalités ou des règles logiques.

Nous verrons que dans l'étape 4 de l'analyse et structuration du problème de conception, les comportements physiques pertinents à prendre à compte sont d'identifiés. A partir de tableaux, on en déduit les variables et les relations mis en jeu.

Les variables sont définies sur des **domaines** discrets ou continus. Pour éviter d'éliminer des solutions potentielles, les domaines des variables peuvent être laissés assez larges. Une première opération dite "de filtrage" réalisée par le solveur permettra de restreindre ces domaines (voir § suivant).

Une base de connaissances peut s'enrichir au fur et à mesure des conceptions; les règles métiers de l'entreprise ainsi formalisées peuvent aisément être réutilisées.

Le CdCF est lui plus contextuel. Les contraintes qui en découlent ne peuvent faire partie d'une base de connaissances générique.

Dans tous les cas, face à un problème de conception, qu'il s'agisse de reconception ou de conception innovante, la difficulté est de formaliser la base de connaissances afin qu'elle soit cohérente, non redondante et complète¹⁰ [Seb 03]. Il est donc nécessaire de mettre en place une aide à l'identification et à l'expression des contraintes.

¹⁰ Une base de connaissances est dite cohérente si elle est sans contradiction; non redondante si une information ne se retrouve pas plusieurs fois; complète si elle décrit exhaustivement le système.

3.3.4 Le solveur "Constraint Explorer"

Un solveur PSC numérique est dédié à la résolution de problèmes dont la plupart des variables prennent leurs valeurs dans des domaines définis par des intervalles de réels.

Le solveur explore complètement l'espace des solutions (exploration séquentielle). Il converge vers des domaines qui sont des approximations de l'espace des solutions.

Nous utilisons le logiciel "Constraint Explorer" (CE), développé par Dassault Aviation, dans le cadre du projet RNTL (Réseau National des Technologies Logicielles) "CO2" [Zim 01b]. Ce projet regroupe Dassault Aviation, CRIL Technology, les laboratoires TREFLE-ENSAM (équipe systèmes énergétiques et conception) et LIPSI (ESTIA), ainsi que des laboratoires d'informatique LINA (Université de Nantes) et LIP6 (Paris VI).

Les travaux du TREFLE permettent de tester et de valider les préconisations et procédures d'utilisation du logiciel.

Ce solveur intègre à la fois des variables discrètes (nombres entiers, variables symboliques) et des variables continues (variables réelles dont le domaine de valeur est un intervalle).

Les variables peuvent être tabulées, ce qui est utile à la description des catalogues de composants par exemple.

Une première étape de filtrage vérifie la compatibilité des domaines entre eux. Ainsi, le concepteur sait rapidement si le problème qu'il a décrit est cohérent.

Le solveur recherche ensuite exhaustivement les combinaisons de variables vérifiant toutes les contraintes, et les stocke dans un tableau. Le résultat fourni par CE est une liste des solutions du problème, c'est-à-dire une combinaison des valeurs possibles pour chaque variable respectant la totalité des contraintes du problème. Lorsqu'une variable est définie sur un intervalle, la valeur de la variable d'une solution est un sous-domaine du domaine initial de la variable dont la taille est conditionnée par la précision de la résolution souhaitée. En revanche, la résolution par CE est complète, au sens où toutes les solutions existantes au problème font partie des restrictions des domaines trouvées.

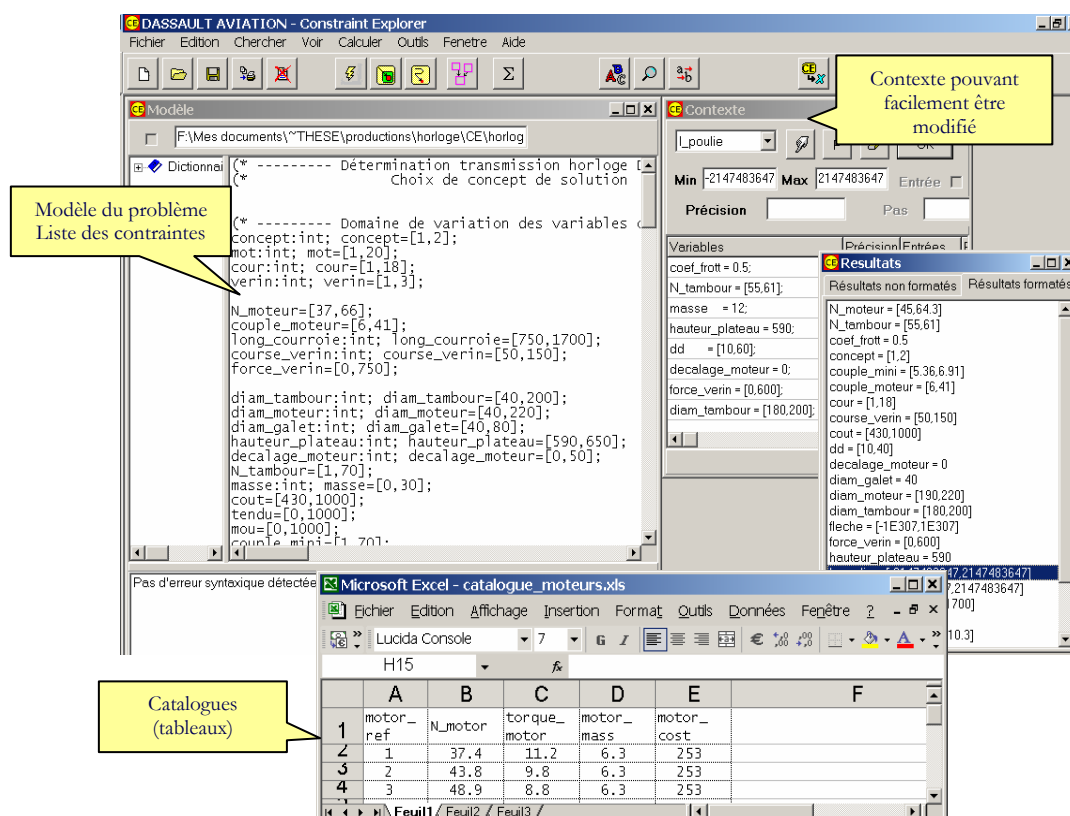


Figure 33: Aperçu de l'interface du logiciel Constraint Explorer.

3.4 Définition d'un problème de conception sous forme de PSC

Un problème de conception préliminaire traduit sous forme de PSC se définit par les éléments suivants :

- Un ensemble de variables définissant l'architecture du produit à concevoir. Ce sont les **variables de conception**. Elles peuvent concerner une dimension, une caractéristique de composant standard, un matériau, une masse, un nombre d'éléments, etc.
- Un ensemble de variables permettant de qualifier les performances ou la qualité d'une configuration de conception : Ce sont les **variables critères**. Les variables critères sont issues des critères de qualification du client ou du concepteur.
- Des **relations** entre ces variables, qui traduisent les fonctions du produit, sa constitution, les comportements physiques mis en jeu.

Les contraintes au sens de la programmation par contraintes sont donc des **domaines** pour ces variables, ainsi que des relations entre elles (inégalités, égalités, règles logiques).

L'affectation de valeurs à toutes les variables de conception constitue une configuration particulière du produit. Nous appellerons **solution** du problème un ensemble de valeurs des variables de conception vérifiant toutes les contraintes. Chaque solution génère des valeurs de variables critères différentes.

Les variables critères interviendront dans le calcul des **indicateurs de pertinence** de la conception. Ces indicateurs seront utilisés pour hiérarchiser les solutions en fin de conception architecturale.

3.5 Synthèse des besoins recensés pour le système d'aide à la décision

La synthèse du chapitre Chapitre 2 indiquait que le système d'aide à la décision en conception architecturale devait permettre la comparaison de concepts de solution, la modélisation de données imprécises, la prise en compte simultanée d'exigences variées, la génération d'architectures réalisables. Nous avons vu qu'un système basé sur un solveur PSC numérique accompagné d'une base de connaissances permet de satisfaire ces exigences.

Ce chapitre a mis en évidence les besoins suivants pour le système d'aide à la décision en conception préliminaire :

- la nécessité d'aide à l'identification et à l'expression des contraintes;
- la nécessité d'informations parcimonieuses afin de limiter la taille du problème au nécessaire et suffisant;
- la nécessité d'interpréter les résultats obtenus et de les ordonner en fonction des objectifs de conception.

Ces besoins entraînent la nécessité d'une aide à l'analyse et structuration du problème de conception pour la recherche de ses caractéristiques structurantes.

Nous avons défini dans ce chapitre les éléments du système d'aide à la décision en conception préliminaire : les outils utilisés, la base de connaissance, la structuration et le positionnement de la démarche.

Nous allons voir dans le Chapitre 4 les moyens de qualifier les solutions de conception et d'obtenir des données permettant de hiérarchiser les solutions générées par le solveur PSC.

Nous proposons dans le Chapitre 5 une démarche d'analyse permettant d'identifier les caractéristiques structurantes du problème de conception au stade préliminaire. Cette analyse systématique aide le concepteur à traduire ce problème sous forme de contraintes, en vue de l'utilisation du solveur PSC.

Chapitre 4 Qualification de la conception

À partir de la définition d'un problème de conception préliminaire au stade où plusieurs concepts de solution pertinents sont retenus, le système d'aide à la décision proposé dans le chapitre précédent permet de générer toutes les architectures solutions, grâce à la modélisation du problème sous forme d'un PSC.

Ainsi que l'indiquait la Figure 31, une phase de tri des solutions obtenues est nécessaire. En effet, en traitant des cas concrets de conception, nous avons constaté qu'un grand nombre de solutions est généralement généré, dans la mesure où la base de connaissances est cohérente. Nous proposons de les hiérarchiser en fonction de leur pertinence.

Même si l'exploitation des résultats intervient après les phases de formalisation des contraintes et de résolution (Figure 31), elle doit être préparée dès la phase d'analyse du problème pour identifier les variables critères :

La pertinence de la conception doit avant tout s'exprimer par rapport au client, et aux besoins recensés. La démarche d'analyse et structuration du problème proposée dans le Chapitre 5 doit donc permettre de formuler des objectifs de conception.

Toutefois, le concepteur peut être amené à exprimer lui aussi des critères de qualification¹¹ de la conception, car pour vérifier la satisfaction à une exigence, il peut mettre en place des indicateurs non exprimés par le cahier des charges; ce sont des informations qui ne sont pas directement utiles au client ou à l'utilisateur final.

Selon Le Coq [LeC 92], les critères de choix d'une architecture demandent une vision globale du produit dans son environnement; Ils sont différents des critères d'évaluation relatifs aux différents métiers.

¹¹ La qualification en fin de conception vérifie que le produit respecte les exigences de la STB et qu'il est productible.

Nous allons voir dans un premier temps comment, dans le cas général, le concepteur peut qualifier le résultat de la conception préliminaire et quels sont les critères de pertinence de son point de vue.

Ensuite, le §4.2 indique comment peut s'exprimer la pertinence de la conception dans le cadre du système d'aide à la décision et la manière d'obtenir des données chiffrées permettant de hiérarchiser les solutions obtenues :

Aux critères de qualification du concepteur et du client correspondent des variables critères.

Pour traduire la pertinence de la conception, les indicateurs de pertinence utilisent les variables critères et sont des fonctions de ces variables.

L'intégration des indicateurs est réalisée, par exemple, sous la forme de fonctions objectifs à optimiser [Cia 98]. Le concepteur peut être confronté au problème de l'optimisation multi-critères [Col 02] et il aura à trouver un consensus ou à accepter des compromis. L'analyse par front de Pareto apporte une réponse assez satisfaisante à ce type de problème.

4.1 Qualification de la conception pour le concepteur

Nous allons ici préciser comment le concepteur s'assure de la pertinence de sa conception, comment il réalise ses choix, sur quels faits il s'appuie pour s'assurer de la cohérence des solutions qu'il sélectionne durant la phase de conception préliminaire.

La pertinence de la conception résulte de la comparaison des solutions à des solutions de référence souvent non exprimées ou exprimées sous forme d'heuristiques (règles de Polovinkin [Sav 00] par exemple), de règles de conception ou d'aide en ligne "maison" associées aux logiciels de CAO [Vil 94]. Ces règles capitalisent l'expérience des concepteurs, intègrent le retour d'expérience des utilisateurs et la sûreté de fonctionnement du système. A cette fin, il est donc nécessaire de définir sur quels paramètres, sur quels critères génériques ces règles se basent et quelles références sont utilisées.

Les critères du concepteur sont variés. En effet, la vision qu'un concepteur ou le groupe projet a du produit intègre souvent tout son environnement qui conduit de l'industrialisation à son achat ou sa prescription :

- Produit manufacturé;
- Chaîne de fabrication, de montage et investissements;
- Emballage de protection;
- Emballage de transport;
- Documents réglementaires et agréments;
- Documents publicitaires;
- Produit logiciel d'accompagnement, de production de document, d'aide à la prescription;
- Services associés;
- Consommables.

De plus, la conception d'un produit s'insère dans une logique d'entreprise, l'acte de conception est donc soumis aux orientations, aux contraintes, aux choix marketing globaux. Ces directives échappent au chef de projet et a fortiori aux intervenants en conception du groupe projet. Elles constituent des contraintes de conception et permettent de définir une partie des critères de qualification de la conception du produit ou du procédé.

Si le produit s'insère dans une gamme, il subit des choix a priori liés à l'existant.

Au-delà de l'entreprise, la pertinence de la conception doit de plus en plus tenir compte d'orientations à l'échelle de la nation, de l'Europe ou même du monde, c'est le cas, par exemple, du développement durable.

A tout cela il s'agit d'adjoindre les éléments liés à la notion de "bonne conception", notion issue à la fois de la compétence du groupe projet mais aussi de l'état de l'art associé au secteur industriel concerné.

Nous allons tout d'abord définir la vision globale du produit en terme d'entreprise et en terme de politique de développement. Les critères globaux concernent notamment les coûts mais aussi d'autres paramètres globaux que nous définissons.

Le développement durable et l'éco-conception fournissent des critères sous forme de directives et d'indicateurs.

Nous donnons ensuite des éléments permettant de qualifier la réalisation des fonctions du produit.

Pour terminer, nous décrivons les critères liés à la maîtrise des risques, à partir de l'étude de la sûreté de fonctionnement.

4.1.1 Vision globale du produit conçu

4.1.1.1 Critères globaux de conception

Les critères globaux interviennent et sont utilisés dans les situations de vie initiales du produit lorsque qu'il évolue sous la forme d'artefact, c'est-à-dire depuis l'expression du besoin jusqu'à son industrialisation.

Ils apparaissent et sont définis lors de l'analyse fonctionnelle externe sous la forme de fonctions contraintes. Ils s'expriment par ce que le CdCF appelle les critères d'appréciation, leur niveau exprime les valeurs limites.

4.1.1.2 Maîtrise des coûts et de la valeur

▪ Définitions

- Coût :

Charge ou dépense supportée par un intervenant économique par la suite de la production ou de l'utilisation d'un produit ou de l'ensemble des deux.

Les coûts intègrent toutes les dépenses engagées pour la conception et la réalisation du produit. Lors de l'analyse de conception d'un produit, on peut prendre en compte aussi les coûts d'utilisation voire de destruction.

Durant la conception, le coût d'un produit est un critère d'évaluation insuffisant selon Lonchamp et al.; la valeur est préférable [Lon 02].

- Valeur :

Jugement porté sur la base des attentes et des motivations de l'utilisateur. Il est exprimé par une grandeur qui croît lorsque, toutes choses égales par ailleurs, la satisfaction du besoin de l'utilisateur augmente et/ou que la dépense afférente au produit diminue.

La valeur intègre généralement un coût monétaire :

$$\text{VALEUR} = \frac{\text{SATISFACTION DU BESOIN}}{\text{COUT}}$$

On peut définir un autre classement pour l'expression de la valeur de réalisation d'une fonction :

- Valeur d'usage : Jugement lié à la partie fonctionnelle;
- Valeur d'estime : Jugement lié aux satisfactions subjectives;
- Valeur d'échange : Jugement économique lié aux dépenses générées par comparaison avec un autre produit rendant un service équivalent.

- Coûts non récurrents (CNR) :

Les coûts non récurrents sont les coûts de développement d'un produit pour l'amener à la phase de production. Pendant la phase des CNR, le projet coûte à l'entreprise et ne rapporte pas.

Ces coûts concernent toutes les phases de la conception, ils s'arrêtent à la première phase de production et à la fabrication du premier outillage opérationnel.

- Coûts récurrents (CR) :

Les coûts récurrents sont les coûts de production d'un produit. Ils sont donc liés à l'obtention du produit définitif et vendu.

Durant cette phase, le produit commence à être vendu et l'amortissement commence.

La Figure 34 récapitule les positions des différents coûts de développement dans le déroulement du projet.

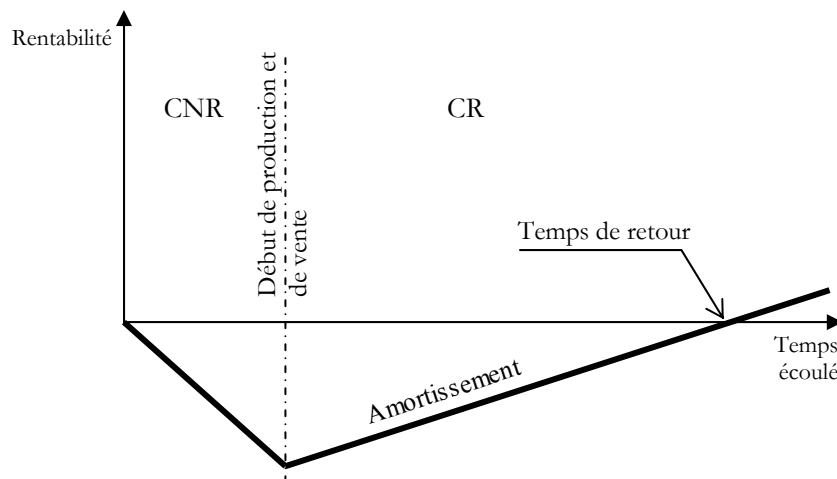


Figure 34: Diagramme des coûts d'un développement.

- Coûts objectifs (CO) :

Ce sont les coûts prévus de réalisation du produit, d'éléments du produit ou d'une fonction. Ces coûts sont fixés au début du développement et parfois révisés en cours d'étude. Ils sont fixés en fonction de l'histoire de l'entreprise et à partir des tableaux d'analyse fonctionnelle. On conçoit alors avec ces coûts objectifs.

Ils constituent la base des discussions avec les fournisseurs. En fin de projet, ils constitueront les coûts réels (coûts récurrents) des composants du produit

(approvisionnement matière, fabrication outillage et main d'oeuvre, montage). L'emballage est aussi un composant.

Ils permettent de fixer le prix de vente du produit ou alors ils sont fixés à partir du prix de vente acceptable par le marché.

La fixation des coûts objectifs peut prendre en compte le coût global de possession pour l'utilisateur :

- coût d'achat pour l'utilisateur (prix de vente);
- coût d'utilisation (énergie, main d'oeuvre, consommables, etc.);
- coût de maintenance (curative, préventive, pièces de rechange, stockage, etc.);
- coût d'adaptation;
- coût d'indisponibilité (matériel de réserve, location matériel de rechange);
- coût de destruction.

▪ **Conception à coûts objectif**

La fixation des coûts objectifs donne des références au concepteur et oriente ses choix.

L'analyse de la valeur propose de classer des coûts liés au juste nécessaire et au non demandé. La notion de juste nécessaire correspond à la réalisation des fonctions de service, nous la prolongeons par la notion de caractéristiques structurantes.

Le concepteur fixe au préalable les coûts de réalisation de chaque fonction concernée.

▪ **Rendement de conception**

Le rendement de conception est un outil de pertinence :

$$\text{Rendement de conception} = \frac{\text{coût du juste nécessaire (fonctions structurantes)}}{\text{Coût de la solution}}$$

On remarque que dans ce cas, la référence est constituée par la somme des coûts des fonctions concernées.

L'analyse de la valeur cherche améliorer ce rendement et à dépasser la valeur minimum de 0,6. Cette référence constitue un critère de conception.

Lorsqu'il s'agit de conception innovante, les nouvelles idées peuvent aussi remettre en cause les valeurs "juste nécessaires" qui sont associées aux concepts initiaux.

▪ **Evolution de la notion de coût**

La notion de coût peut s'élargir et concerner d'autres coûts que les coûts monétaires et ainsi prendre en compte des paramètres faisant référence à des notions de :

- **Temps** : Il s'agit des temps relatifs aux opérations de fabrication, de montage mais aussi des temps liés à l'utilisation du produit (temps de mise en température, temps d'arrêt, etc.). Les temps de démontage après obsolescence du produit interviennent aussi dans le chapitre éco-conception.

- **Energie** : L'énergie concernée est en premier lieu l'énergie consommée lors des situations de vie importantes. Cette vision énergétique peut aussi concerner les situations de vie liées à la réalisation du produit depuis la conception jusqu'à l'industrialisation (consommations des procédés de fabrication et de toute l'intendance autour du produit). L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) permet d'aller encore plus loin et d'intégrer alors les coûts énergétiques de fin de vie et de production des matériaux utilisés [Rou 00].

L'analyse en terme d'utilisation des ressources énergétiques propres [Sav 00] [Tre 03] constitue un indicateur important de conception. En effet, l'évolution des produits passe par un fonctionnement autarcique, comme pour les véhicules hybrides par exemple.

De surcroît, aussi bien dans le secteur automobile que dans le secteur aéronautique, on va vers la disparition de la notion de servitude, c'est-à-dire que l'énergie nécessaire aux fonctions contraintes et au fonctionnement des systèmes de confort ne pourra plus être soutirée au moteur mais devra être issue d'un stockage ou se régénérer elle-même.

- Masses : Les masses du système constituent des paramètres pertinents. Pour qualifier sa conception, le concepteur doit s'intéresser à la notion de masse des bruts. Le ratio entre masse du système et masse des bruts devient un ratio pertinent puisqu'il traduit la masse de matière générée lors des opérations de fabrication (copeaux, jets de coulée, masselottes, chutes de tôles, etc.). Il faut aussi parler des masses ou débits de produit entrants lors du fonctionnement ou des diverses situations de fabrication et des masses ou débits de déchets formés qui constituent un indicateur classique en éco-conception.

- Volumes occupés par le produit : Les volumes occupés relèvent de la même analyse que les masses. Cependant on peut lier l'optimisation des différents emballages à la minoration des volumes.

- Sûreté de fonctionnement : La sûreté de fonctionnement est abordée dans le §4.1.3.

4.1.1.3 Développement durable et éco-conception

La notion d'éco-conception [Ven 97] peut se définir à une échelle locale et à une échelle globale :

L'échelle locale implique l'environnement proche du produit, elle concerne les possibilités de nuisance sonore et odoriférante, d'action sur les milieux extérieurs environnants et la production de déchets.

L'échelle globale va faire intervenir la maîtrise des ressources énergétiques, l'implication dans les changements climatiques (effet de serre, trou dans la couche d'ozone).

L'ADEME qui s'est vu confier la tâche de susciter l'apparition de produits écologiques, a édicté des conseils en direction des concepteurs [ADE 01]. On peut en déduire les attitudes que doit avoir le concepteur :

- Connaître et optimiser les flux de matière et d'énergie;
- Anticiper et respecter au moindre coût les réglementations environnementales;
- Diminuer les risques, les situations de crise et les contentieux;
- Répondre aux attentes naissantes du marché en terme d'éco-conception;
- Accroître la confiance du consommateur.

▪ Critères d'éco-conception

On retrouve dans les préconisations de l'éco-conception les variables critères déjà mentionnées [ADE 01] :

- Masse vierge entrant dans la composition du produit;
- Kilomètres parcourus par les pièces, les sous-ensembles jusqu'à l'assemblage;
- Energie spécifique des matériaux entrant dans composition du produit;
- Consommation énergétique du produit lors de son utilisation;
- Masse des matériaux entrant dans la composition du produit pour lesquels il n'y a pas de filière de valorisation;
- Contributions notables à des problèmes de pollution ou de déchets;

- Estimation de la durabilité du produit;
- Temps de démontage;
- Volume des emballages.

▪ **Indicateurs environnementaux**

La méthode la plus connue pour évaluer les impacts environnementaux est l'Analyse des Cycles de Vie (ACV) [SET 93][Sau 96][Jan 00]. Elle consiste à évaluer les risques au travers d'indicateurs pertinents des dommages causés [Goe 95] :

- Accidents mortels : dégradation de la couche d'ozone, métaux lourds, substance cancérogène, etc. ;
- Dégradation de la santé : smog d'été (composés volatiles), smog d'hiver (poussière), etc.;
- Dégradation de l'écosystème : pesticides, effet de serre, atmosphère acide, eutrophisation de l'eau, etc.

Les références [ISO 02][SET 93] proposent des grilles d'évaluation concernant ces indicateurs. L'ADEME, propose un bilan carbone autour des indicateurs traduisant l'effet de serre [Jan 02].

Des normes sont même mises en place et fixent par exemple des seuils à respecter pour l'industrie automobile : les constructeurs doivent, à l'échelle 2012, proposer des véhicules n'émettant que 120 grammes de CO₂ au kilomètre. Cette gageure oblige les industriels à qualifier chaque choix technologique au travers de cet indicateur [Rou 00].

▪ **Démontage, démantèlement**

Les nouveaux produits doivent être facilement démontés et permettre rapidement le tri des différents matériaux ou la purge des différents fluides sans volume de rétention. On doit aussi éviter les pollutions intempestives car certains fluides ou métaux sont maintenant interdits (le mercure par exemple).

Les outils de l'analyse fonctionnelle permettent de traduire cette situation de vie, en particulier l'organigramme technique dans sa version étendue, c'est-à-dire comprenant les milieux extérieurs récupérables.

Le concepteur s'attache à définir en terme fonctionnel les prescriptions de facilité de démontage. Ces contraintes vont s'ajouter aux contraintes d'interface entre blocs fonctionnels classiquement définies à chaque niveau de l'organigramme technique.

Ces contraintes vont se traduire par l'utilisation ou l'interdiction d'éléments d'interface, par la préconisation d'outils de démontage et la réduction de leur nombre.

▪ **Recyclage, valorisation du produit usagé**

La valorisation du produit usagé peut se voir sous différentes formes avec leurs critères associées :

- La réutilisation de blocs fonctionnels : le critère peut être un ratio faisant intervenir les blocs fonctionnels récupérés et l'ensemble des blocs fonctionnels d'un niveau défini. La base peut être le nombre, le coût monétaire des blocs neuf ou à la revente, la masse.
- La réutilisation de composants élémentaires : même type de critère que ci-dessus.
- La réutilisation de matériaux ou fluides : même type de critère que ci-dessus.
- La réutilisation de composants transformés : même type de critère que ci-dessus mais en tenant compte, en minoration, des effets de transformation (coût, masse, etc.).
- La transformation en énergie thermique : le critère est le contenu énergétique lié aux masses et au pouvoir calorifique de chaque matériau combustible.

Les critères peuvent évoluer en minorant les gains par le coût du démantèlement.

4.1.2 Qualification de la réalisation des fonctions

4.1.2.1 Résultat final : satisfaction des critères d'appréciation du CdCF

Le concepteur s'assure en premier lieu de la qualification chiffrée du résultat attendu précisé dans les critères d'appréciation du CdCF.

L'utilisation des règles métier assure la maîtrise de la réalisation d'une fonction en liaison avec une action de conception, de fabrication ou d'industrialisation. Elle se traduit par un éloignement par rapport à une référence (expérience des intervenants, état de l'art acquis de l'entreprise, limites admissibles de codes de calculs professionnels).

4.1.2.2 Qualification des choix de solution

Les trois premières lois d'évolutions proposées par Altshuller [Alt 99] (voir annexe IV) permettent de qualifier la réalisation correcte des fonctions. Leur utilisation permet une maîtrise et contrôle des flux fonctionnels.

Le concepteur analyse la réalisation des fonctions en observant le cheminement et l'évolution de l'énergie qui permet la réalisation de l'action.

La **loi d'intégralité des parties** identifie une entité motrice, un transmetteur, un opérateur et une entité de contrôle (Figure 35).

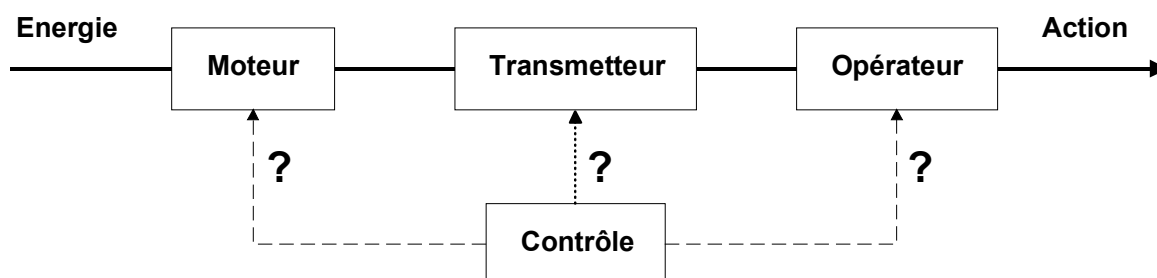


Figure 35: Loi d'intégralité des parties.

La présence d'un contrôle et la qualification de son effet donne un critère de pertinence de la conception. Le contrôle de l'opérateur à proximité de la réalisation de l'action est un gage de bon fonctionnement. Plus on s'éloigne de l'action, plus on a des risques de dysfonctionnement dû à la dilution de l'information.

Le critère pour cette loi est le nombre d'entités concernées par le contrôle ainsi que la proximité de l'entité contrôlée et de l'action.

La **loi de la conductivité énergétique** trouve ici toute sa cohérence en fournissant un critère évident, en l'occurrence, les pertes énergétiques au long de l'évolution du flux fonctionnel entre chaque entité. On peut lui adjoindre, lors des transformations d'énergie, des variables traduisant la responsabilité des choix, tel les niveaux exergétiques liés à l'évolution des températures à chaque transformation thermique.

Pour finir, la **loi de coordination des rythmes** permet de s'assurer du bon fonctionnement dynamique du système. Les fréquences, vibrations, périodicités doivent être cohérentes dans toutes les entités du système lors la réalisation de l'action.

4.1.3 Sûreté de fonctionnement

4.1.3.1 Contexte

La sûreté de fonctionnement est l'aptitude au maintien dans le temps de la qualité du service que délivre le produit. Elle regroupe la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

- La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise;
- La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue;
- La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être dans l'état d'accomplir une fonction requise;
- La sécurité est l'aptitude d'une entité à ne pas générer des événements critiques.

L'analyse fonctionnelle permet l'analyse qualitative de la sûreté de fonctionnement. La modélisation du système permet d'évaluer les variables pertinentes sur lesquelles on peut ensuite conduire des études de sensibilité.

L'analyse des Modes de Défaillances et de leur Etat de Criticité (AMDEC) est un outil permettant l'évolution de la conception dans le sens de la sûreté de fonctionnement.

4.1.3.2 Sûreté de fonctionnement locale

Cette vision locale concerne les fonctions à risques que le concepteur définit comme structurantes parce que, soit il s'agit de fonctions sur la réalisation desquelles il n'a aucune expérience, soit par le retour d'expérience issu des services après-vente.

La maîtrise de la réalisation de la fonction et l'expertise du fonctionnement attendu fait appel aux critères exprimés ci-avant (§4.1.2.2).

4.1.3.3 Sûreté de fonctionnement globale

▪ Fiabilité

L'outil RELIASEP [Pit 97] utilisé industriellement, se base sur une gestion statistique à partir des qualifications connues de chaque bloc fonctionnel du produit. L'analyse fonctionnelle permet donc, au stade de la conception préliminaire, d'avoir des indications sur la fiabilité. L'analyse des blocs fonctionnels et de leurs interfaces permet de définir ces critères.

Pour la fiabilité, les critères sont notamment :

- Nombre d'éléments et d'interfaces, complexité des couplages entre ces interfaces à chaque niveau concerné;
- Fiabilité de chaque entité névralgique;
- Variables de traitement statistique.

▪ Maintenabilité

Il s'agit de s'assurer des possibilités d'intervention sur le produit

A ce stade, la définition des interfaces donne une idée des possibilités de maintenance. On peut minimiser et standardiser les outils utilisés et diminuer les montages et démontages.

L'analyse des tâches et des moyens de maintenance va permettre de définir la fréquence et la durée des interventions.

Pour la maintenabilité, les critères sont notamment :

- Nombres d'interfaces;
- Variables intervenant dans les modèles d'interaction entre les blocs fonctionnels;
- Temps cumulé d'intervention.

▪ **Disponibilité**

La disponibilité peut se voir à deux niveaux :

- le produit doit être rapidement en état de fonctionner lorsqu'on veut l'utiliser;
- le produit doit être rapidement opérationnel en cas de panne ou d'action corrective.

On doit pouvoir mettre le produit en fonctionnement quelle que soit la période d'arrêt ou les conditions de mise en route. Le produit doit, par exemple, être rapidement mis en température, ce qui se traduit par une minimisation des masses thermiques du système ou par une orientation des flux thermiques et des dilatations au démarrage ; cela permet d'éviter les risques de bridage, de serrage ou pour s'assurer d'une humidité compatible avec le bon fonctionnement de l'ensemble. Cette analyse rejoint les risques liés aux problèmes de dysfonctionnements électriques ou électroniques dus à des isolations (encrassement, oxydation, vieillissement, fatigue) ou à des courts-circuits intempestifs qui vont empêcher le démarrage. Il faut aussi ajouter les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM).

Dans le second cas, les critères pertinents sont des temps de disponibilité (Mean Up Time MUT), d'indisponibilité (Mean Down Time MDT), de durée d'action corrective (Mean Time To Repair MTTR), d'attente d'intervention due au personnel (Mean Personal Delay Time MPDT), à la gestion des stocks (Mean Storage Delay Time MSDT) ou à l'administration (ADM) [PRE 94].

Pour la disponibilité, les critères sont les suivants :

- Masse thermique globale, locales;
- Flux thermiques;
- Dilatations, déformations, jeux, etc. ;
- Variables d'état (température, pression, teneur en eau);
- Potentiels chimique;
- Champs magnétiques.

▪ **Sécurité**

La sécurité des systèmes, pour les grands secteurs industriels, est liée à des réglementations et des labels (EuroNCAP par exemple : European New Car Assessment Program, directives européennes pour le secteur automobile) qui définissent des règles et critères. On ne peut ici les énumérer tous.

L'intervention des hommes amène des facteurs moraux et physico-sociologiques difficilement quantifiables.

Les risques en terme de sécurité de fonctionnement du système peuvent se juguler en bornant des variables pertinentes et en s'assurant d'un écart significatif entre la valeur maximale atteinte et la valeur maximale admissible.

Ces variables concernent des tenues sous sollicitations mécaniques, des tenues au feu, des risques d'explosion ou d'emballement chimiques ou nucléaire.

Les codes de calculs professionnels (CODAP, ASME, EUROCODES, Règles sismiques, RCCM,...) fournissent des éléments pour traduire les effets que l'on veut éviter.

Ils quantifient la sécurité par des limites admissibles pondérées de coefficients de sécurité. On peut accroître la sécurité en traduisant l'éloignement à ces références admises par les syndicats professionnels ou les organismes publics garants de la construction.

Pour la sécurité, les critères sont les suivants :

- Variables particulières liées à la sécurité du système;
- Eloignement à des références.

4.1.4 Synthèse

Nous avons proposé un panorama des méthodes et critères qu'utilisent les concepteurs pour s'assurer de la pertinence des choix au stade de la conception préliminaire. L'analyse effectuée couvre la qualification de la réalisation des fonctions, la pertinence des choix, l'évolution vers le développement durable et l'éco-conception. Enfin, on traduit le fonctionnement en terme de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de sécurité.

Ces différents critères sont évalués par des variables critères : ils sont récapitulés dans le Tableau 4. Nous allons voir dans le paragraphe suivant comment intégrer ces variables critères dans le modèle du problème.

La démarche présentée Chapitre 5 doit permettre de les identifier à chaque stade de l'analyse et structuration du problème.

Type	Critère de qualification concepteur	Variables critères
Vision globale du produit	Coûts	-Coûts non récurrents
		-Coûts récurrents
		-Coûts objectifs
		-Coûts en temps
		-Coûts en énergie
		-Coûts en masses (masse de bruts)
		-Coûts en volume (emballage, ...)
	Rendement de conception	-Coût du juste nécessaire / coût de la solution
Développement durable	Critères d'éco-conception	-Masse vierge
		-Km parcourus par les pièces avant assemblage
		-Energie spécifique des matériaux
		-Consommation énergétique du produit (utilisation)
		-Masse des matériaux non valorisés
		-Contributions à de la pollution
		-Durabilité du produit
		-Temps de démontage
		-Volume des emballages
	Indicateurs environnementaux	-Indicateurs des dommages causés : dégradation de la santé, de l'écosystème
	Démontage, démantèlement	-Coût -Outils
	Recyclage, valorisation	-Taux de réutilisation -Contenu énergétique (transformation en énergie)
Qualification de la réalisation des fonctions	Satisfaction des critères d'appréciation du CdCF	-Variables pertinentes de la réalisation d'une fonction -Variables de référence des codes de calculs professionnels ou des acquis de l'entreprise.
	Loi d'intégralité des parties	-Nombre d'entités concernées par le contrôle
	Loi de la conductivité énergétique	-Pertes énergétiques -Niveau exergétique
	Loi de coordination des rythmes	-Fréquence, phase, amplitude
Sûreté de fonctionnement	SDF locale : fonctions à risque	-Variables pertinentes des fonctions à risque
	SDF globale : -Fiabilité	-Nombre d'éléments et d'interfaces -Fiabilité d'entité -Variables de traitement statistique
		-Maintenabilité
	-Disponibilité	- Nombres d'interfaces - Variables intervenant dans les modèles d'interaction entre les blocs fonctionnels - Temps cumulé d'intervention
	-Sécurité	- Masse thermique globale, locales - Flux thermiques - Dilatations, déformations, jeux - Variables d'état (température, pression, teneur en eau) - Potentiels chimique - Champs magnétiques - Variables particulières liées à la sécurité du système - Eloignement à des références

Tableau 4: Critères de qualification du point de vue concepteur et variables critères associées.

4.2 Données pour l'aide à la décision

4.2.1 Indicateurs de pertinence

Afin de qualifier la performance ou la qualité d'une configuration de conception, il est nécessaire d'identifier les critères de qualification, ainsi que les variables critères qui leur sont associées.

Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'en utilisant le système d'aide à la décision en conception préliminaire, il faut être capable d'interpréter les résultats obtenus et de les ordonner en fonction des objectifs de conception. Nous proposons pour cela l'utilisation d'indicateurs, qui permettent au client et au concepteur d'évaluer la pertinence d'une solution. Nous les appelons **indicateurs de pertinence** de la conception.

Les indicateurs de pertinence sont calculés à partir des variables critères. Ils peuvent correspondre à une seule variable critère ou à une fonction.

Nous distinguons indicateurs de pertinence et variables critères car dans certains cas, la pertinence d'exprime à un niveau plus global que celui des variables critères.

Par exemple pour une courroie, les variables de conception sont : longueur, largeur, matériau, profil, etc. Une variable critère correspond à la tension maximum et permet, avec d'autres variables critères, de choisir la courroie.

Dans l'application traitée dans le Chapitre 6 comportant une transmission par poulies-courroie, un des indicateurs de pertinence du client est l'effort radial engendré sur la poulie réceptrice (effort qu'il veut minimiser). Cet indicateur de pertinence sera fonction des deux variables critères de tension (brin mou et brin tendu, qui sont utiles par ailleurs pour déterminer le vérin de tension par exemple). Une contrainte vérifie d'autre part le respect de la tension maximum admissible, mais elle n'intéresse pas directement le client.

Nous verrons dans le Chapitre 5 que chaque étape du processus d'analyse et structuration permet d'exprimer une partie des indicateurs de pertinence (Figure 36).

Ullman a listé des caractères pour l'élaboration des spécifications [Ull 03]. Ils peuvent s'appliquer aux indicateurs de pertinence. Ils doivent être :

- discriminants, pour aider à distinguer les alternatives;
- mesurables;
- orthogonaux¹²;
- universels, pour concerner l'ensemble des alternatives.

¹² Orthogonalité dans le cas des spécifications : chaque spécification doit correspondre à une caractéristique technique unique; il ne doit pas y avoir recouvrement des spécifications.

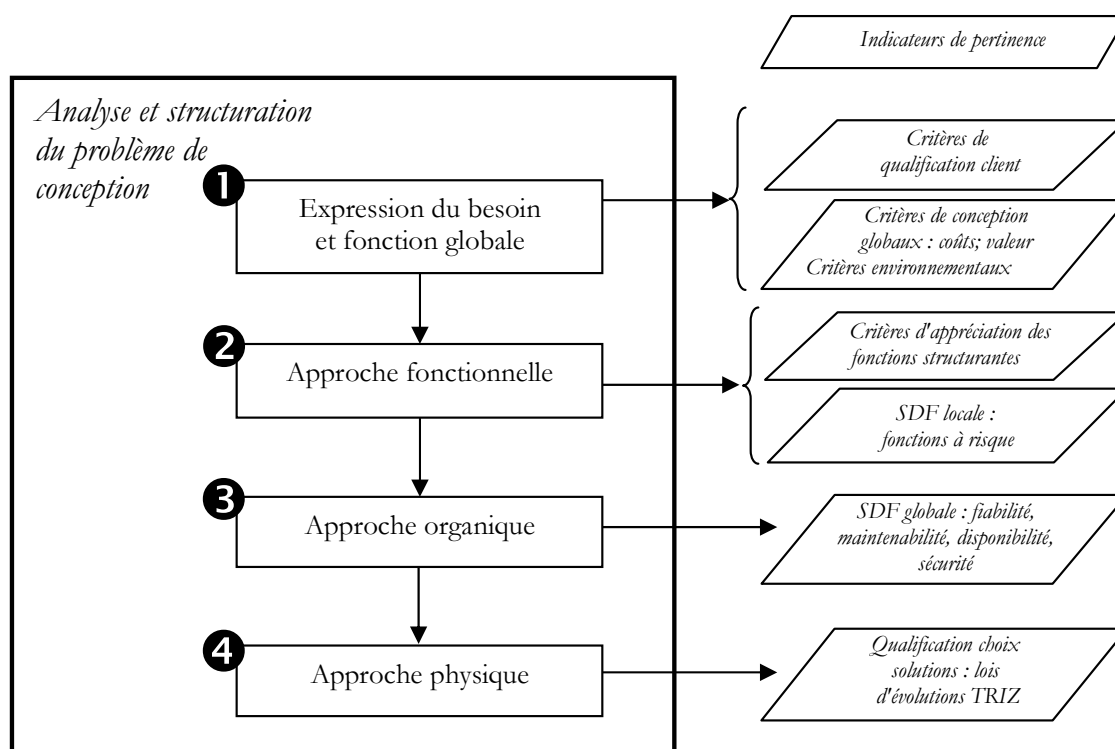


Figure 36: Indicateurs de pertinence identifiés durant la démarche d'analyse et de structuration du problème de conception.

Ces indicateurs doivent donner au concepteur des éléments pour prendre des décisions en fin de conception architecturale. Nous proposons deux façons de trier les solutions obtenues, pour rechercher celles qui répondent le mieux aux indicateurs de pertinence :

- Utilisation des indicateurs dans une fonction objectif permettant le classement des solutions;
- Recherche du front de Pareto de l'espace des solutions, ensemble des solutions non dominées entre elles par rapport aux indicateurs.

4.2.2 Indicateurs de performance

Les objectifs qui peuvent être exprimés au stade de la conception préliminaire sont relatifs à des éléments de coût, des exigences géométriques, des comportements physiques attendus. Au cours des différentes étapes de recherche des caractéristiques structurantes, des indicateurs de pertinence de la conception vont être exprimés.

Afin de traduire complètement un objectif de conception, il faut avoir une référence. Nous proposons l'écriture d'**indicateurs de performance**.

Un indicateur de performance traduit la proximité ou l'éloignement d'un indicateur de pertinence par rapport à une **référence**.

Nous choisissons un indicateur à minimiser. Un indicateur de performance s'écrit donc :

$$I_p = I / I_{\text{réf}}, \text{ si la performance correspond à l'éloignement par rapport à la référence}$$

$$I_p = I_{\text{réf}} / I, \text{ si la performance correspond à la proximité par rapport à la référence}$$

Selon Ullman, une comparaison entre concepts de solution peut être [Ull 03] :

- absolue : chaque concept est comparé à des objectifs grâce à des critères;
- relative : les concepts sont comparés entre eux en utilisant des mesures définies par les critères.

De la même manière, la référence ($I_{réf}$) peut être :

- Fixe : Il s'agit d'un élément chiffré, imposé par le client, la norme, etc. La référence fixe est intrinsèque au problème, et indépendante du contexte. Si elle peut être exprimée; il est préférable de l'utiliser.

La connaissance d'une référence permet, en outre, de rendre tangible un risque. On peut quantifier par exemple l'éloignement d'un paramètre par rapport à une norme.

- Relative : Il s'agit de la valeur minimale ou maximale d'un indicateur de pertinence pour un ensemble de résultats. Pour une configuration et un contexte donnés, cela permet de comparer les solutions entre elles, au regard de l'indicateur.

4.2.3 Fonction objectif

Une **fonction objectif** regroupe l'ensemble des indicateurs de performance à minimiser, pondérés par les facteurs λ_n (équation 1). Son calcul permet de classer les solutions obtenues.

$$fonction_objectif = \left(\lambda_1 \cdot \frac{I_1}{I_{1max}} \right) + \left(\lambda_2 \cdot \frac{I_2}{I_{2max}} \right) + \dots + \left(\lambda_n \cdot \frac{I_n}{I_{n_max}} \right) \quad \text{avec } \sum \lambda_n = 1. \text{ Equation 1.}$$

La pondération des indicateurs de performance dans la fonction peut être réalisée grâce à la hiérarchisation des indicateurs de pertinence. Mais l'affectation de valeurs aux facteurs de pondération reste souvent un problème [Ash 00].

Dans l'exemple du mécanisme de remontée de poids d'horloge traité dans le Chapitre 6, la fonction objectif ne nécessite que deux indicateurs de performance (l'effort radial sur le tambour et le coût). La fonction objectif doit être minimisée et s'écrit :

$$fonction_objectif = \left(\lambda \cdot \frac{Cout}{Cout_max} \right) + \left((1 - \lambda) \cdot \frac{Effort_radial}{Effort_radial_max} \right), \lambda \in [0,1]. \text{ Equation 2.}$$

Le facteur de négociation λ permet de donner un poids plus important dans la fonction objectif à des indicateurs : Ainsi, un concepteur qui veut privilégier dans ce cas l'importance du coût fixera un λ plus proche de 1.

4.2.4 Front de Pareto

Pour éviter d'avoir à choisir une pondération des indicateurs dans la fonction objectif, il est possible de rechercher parmi les solutions l'ensemble de celles qui ne sont pas meilleures

les unes par rapports aux autres au regard des indicateurs de performance. L'ensemble de ces solutions qui ne se dominant pas est appelé front de Pareto.

Chaque solution architecturale est représentée par un point, dans un espace à n dimensions (n étant le nombre d'indicateurs de performance). Les coordonnées du point correspondent aux valeurs des indicateurs de performance I_n (Figure 37).

On dit qu'une solution (a) domine une autre solution (b) si les deux conditions suivantes sont vérifiées [Cor 03] :

- La solution (a) n'est pas moins bonne que la solution (b) pour tous les objectifs;
- La solution (a) est strictement meilleure que la solution (b) pour au moins un des objectifs.

Nous avons opté pour des indicateurs à minimiser; ces conditions se traduisent par :

- $\forall i, \quad I_i(a) \not\geq I_i(b)$
- $\exists m$ tel que $I_m(a) < I_m(b)$.

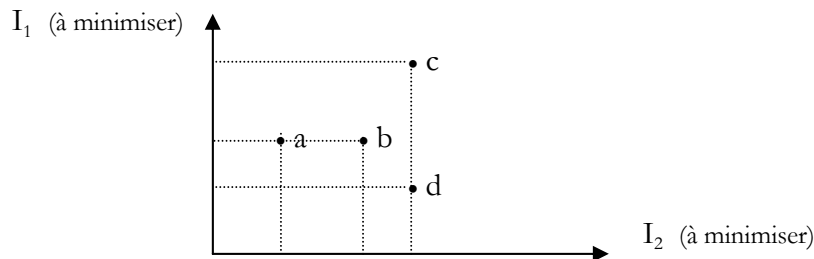


Figure 37: Exemple d'espace des solutions.

Dans l'exemple de la Figure 37, (a) domine (b) et (c). Par contre, (a) et (d) ne se dominant pas car chacune de ces solutions est strictement meilleure que l'autre pour un objectif : $I_2(a) < I_2(d)$ et $I_1(d) < I_1(a)$.

Parmi un ensemble de solutions P , l'**ensemble des solutions non-dominées** P' est formé par les individus qui ne sont pas dominés par un quelconque membre de l'ensemble P .

Pour un ensemble donné de solutions, on peut réaliser toutes les comparaisons possibles d'individus, paire par paire, et identifier ainsi quel individu domine quel autre individu, et quels individus ne se dominant pas mutuellement. On obtient finalement un ensemble d'individus qui ne se dominant pas entre eux et qui dominant tous les autres individus de la population [Cor 03].

Dans notre cas, ces solutions sont celles qui réalisent le mieux les objectifs (minimiser les indicateurs de performance); et aucune d'entre elles ne se distingue des autres au regard de la satisfaction de tous les objectifs.

4.2.5 Choix

En utilisant une fonction objectif ou le front de Pareto, les solutions obtenues par le système d'aide à la décision sont ainsi classées ou discriminées. Il est clair qu'aucun choix n'est réalisé, sauf dans le cas (non rencontré) où une seule solution apparaîtrait.

Il s'agit plutôt d'une réduction du champ des solutions, en utilisant des critères traduisant les objectifs du client ou du concepteur. L'aide à la décision réside dans l'intégration pour la recherche de solutions d'architecture des critères d'appréciation du CdCF, ainsi que dans l'extraction des solutions qui répondent le mieux aux objectifs exprimés.

Un choix reste donc à réaliser parmi les solutions sélectionnées, mais l'on est assuré de n'avoir pas exclu de champ de solutions et de disposer des solutions apparaissant comme les plus satisfaisantes au regard des indicateurs.

Ce choix s'exprime dans l'importance relative donnée aux indicateurs de pertinence et doit être réalisé en accord avec les priorités du client, de l'entreprise ou de sa stratégie. Il permet soit la pondération des indicateurs dans la fonction objectif, soit un choix parmi les solutions non dominées du front de Pareto.

Chapitre 5 Analyse et structuration du problème de conception

Nous avons vu qu'une méthodologie d'analyse et de structuration du problème de conception préliminaire est nécessaire pour faciliter son approche et la formulation des contraintes par le concepteur. Elle doit aider à identifier les caractéristiques structurantes du problème de conception et rendre parcimonieuse la vision du problème qu'il faudra traduire sous forme de contraintes.

Nous allons dans un premier temps nous intéresser aux différentes façons d'approcher les problèmes de conception; Puis nous définirons les caractéristiques structurantes, avant de détailler la proposition de méthodologie d'analyse et de structuration.

5.1 Approche du problème de conception

5.1.1 Comparaison de l'approche axiomatique et d'autres approches

Selon Suh [Suh 90], le processus de conception est un cheminement itératif et séquentiel entre quatre espaces : le domaine client, le domaine fonctionnel, le domaine physique, le domaine des processus de mise en œuvre.

Il énonce deux axiomes qui permettent l'évaluation et le choix des meilleures alternatives de solution :

- L'axiome d'indépendance : les exigences fonctionnelles (EF) doivent être indépendantes les unes des autres. Ainsi on évite l'amélioration d'une fonction en dégradant une autre.

Les conceptions qui ne satisfont pas l'axiome d'indépendance sont dites couplées. Le couplage fonctionnel ne doit pas être confondu avec le couplage physique (qui est souvent désirable pour satisfaire l'axiome suivant).

Selon Suh, les EF doivent être indépendantes. Toutefois, il y a forcément des liens entre les paramètres de conception (PC) satisfaisants des EF indépendants.

- L'axiome d'information : une bonne conception correspond à un minimum d'information, à une complexité minimale.

Suh donne l'exemple de l'aile d'oiseau : les tentatives de l'homme pour reproduire cette aile ont été des échecs; il y a en effet trop d'exigences fonctionnelles. Les frères Wright ont eu le génie de minimiser les EF, en ne retenant que celles nécessaires au décollage presque horizontal, au vol lent et à des changements de direction limités.

L'axiome d'indépendance permet de décomposer un problème complexe en sous problèmes indépendants, de complexité acceptable. La décomposition réduit la complexité d'un problème de conception et aide le concepteur à se concentrer sur un plus petit nombre d'exigences fonctionnelles [Suh 90].

L'analyse fonctionnelle [AFN 90] permet également d'étudier les relations entre les fonctions et les constituants d'un produit et d'optimiser ainsi le concept de produit en minimisant autant que possible les fonctions techniques qui n'apportent pas de "valeur" au produit vu par l'utilisateur. Les deux axes d'optimisation de la conception d'un produit sont la réduction des fonctions techniques et la simplification de l'architecture du produit [Cav 95]. La qualité d'une conception peut aussi se mesurer à la proportion de fonctions techniques par rapport aux fonctions de service [Tas 03].

5.1.1.1 Approche axiomatique et approche algorithmique

Durant le conceptual design des **directives VDI**, adaptées par Palh et Beitz [Pah 96], l'accent est mis sur les fonctions. Cette phase doit permettre d'obtenir un concept, ou un ensemble de concepts combinés, capable de remplir les fonctions.

L'étude du comportement énergétique est également utile dans cette phase [Pop 99]. La réalisation d'une fonction induit une transformation d'énergie, de matière, d'information (des objectifs d'ordre esthétique par exemple ne peuvent donc pas être traités).

La fonction globale est décomposée en sous fonctions principales (qui contribuent directement à la globale) ou auxiliaires (Figure 38). Cette distinction n'est toutefois pas forcément facile à faire [Oos 01]. Elle affecte l'ordre de résolution de problème.

Il est judicieux de commencer à traiter le flux principal entre les fonctions principales. La structure fonctionnelle mise en place facilite la décomposition du problème et la mise en évidence de parties pour lesquelles des solutions existent [Oos 01].

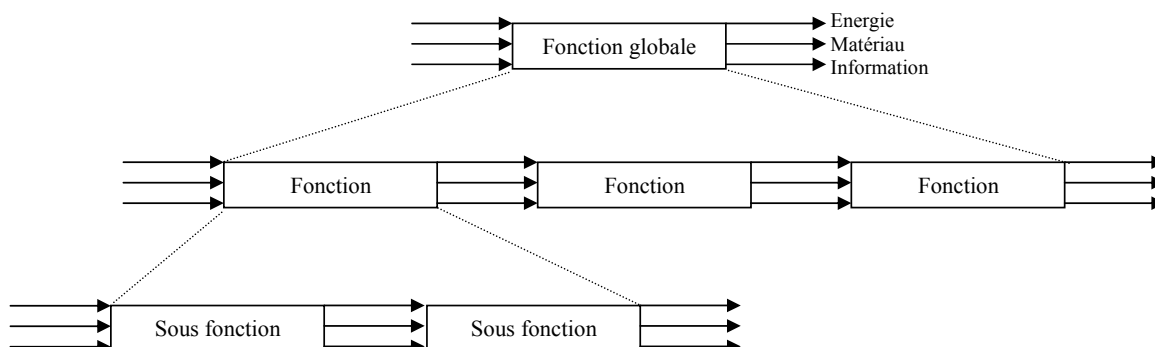


Figure 38: Structure fonctionnelle d'après Palh et Beitz [Oos 01].

Avec la **conception axiomatique** (axiomatic design), il existe un processus nécessaire d'itération entre les exigences fonctionnelles et les attributs de conception physiques. Il n'est pas suffisant de définir un jeu d'EF et de procéder à leur traduction en paramètres de conception. Les paramètres de conception (PC) doivent pouvoir influencer la forme et le contenu des EF. La Figure 39 décrit ce processus. La définition des PC de niveau système est nécessaire pour que les EF du niveau inférieur puissent être définies, etc. Chaque niveau doit être achevé pour passer au niveau inférieur.

Les hiérarchies fonctionnelles et physiques sont interdépendantes, et il n'est pas possible de construire la hiérarchie fonctionnelle complète sans se référer au domaine physique à chaque niveau.

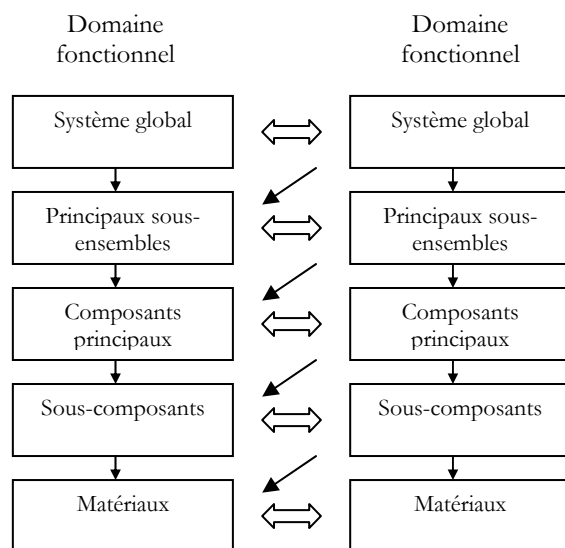


Figure 39: Nature hiérarchique des domaines [MAN 99].

La Figure 40 compare la décomposition fonctionnelle entre les directives VDI et l'axiomatic design (AD) :

- L'axiomatic design préconise de mettre en relation les domaines fonctionnels et physiques à chaque niveau de la hiérarchie. La conception est simplifiée par la décomposition des EF et PC en niveaux.
- L'approche VDI favorise d'abord une décomposition descendante de la fonction principale (domaine des EF), avant d'approcher de manière ascendante la solution finale dans le domaine des PC. Toutefois, il apparaît qu'une fonction ne peut pas être décomposée sans considérer sa traduction physique à chaque niveau.

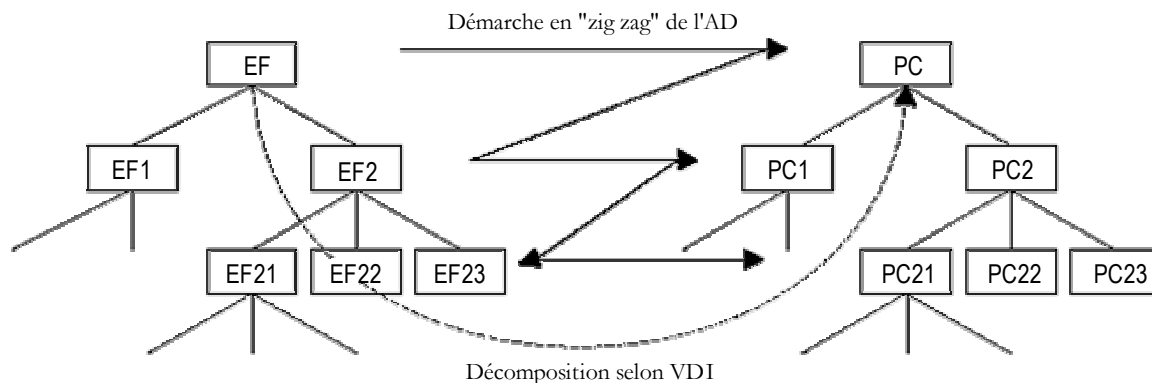


Figure 40: Stratégies de décomposition comparées.

Une séquence de travail avec l'axiomatique design est basée sur la décomposition hiérarchique : Il faut partir d'une EF générale et lorsque la solution est trouvée, continuer avec les EF inférieures. Les relations entre fonctions et solutions sont établies.

La structure fonctionnelle issue de l'approche VDI indique plutôt comment les entrées et les sorties interagissent, ainsi les flux entre les fonctions.

Ces approches proposent des analyses qui donnent au concepteur une vision analytique, combinatoire et exhaustive.

5.1.1.2 TRIZ et les règles de Polovinkin

La théorie TRIZ n'est pas une méthode de conception et reste cantonnée à la recherche de concept. Elle a été développée en Russie, indépendamment de beaucoup de stratégies de conception développées à l'extérieur du pays. Une analyse exhaustive de brevets a montré que seulement 1% des solutions sont vraiment innovatrices, les autres utilisent des idées ou des concepts déjà connus, mais d'une façon nouvelle. Ainsi, le principe de solution à un nouveau problème est souvent déjà connu, la difficulté étant d'en trouver l'idée. C'est une approche systématique de la technologie.

Cette analyse a également montré qu'il existe des lois de base pour le développement des systèmes techniques (modèles d'évolution). Leur compréhension augmente la capacité de résolution. L'axiome principal de TRIZ, issu de l'analyse de brevets, est que l'évolution des systèmes technologiques est dirigée par des modèles objectifs.

Pour la résolution d'un problème, son analyse et la connaissance du système dans lequel il existe sont importants. La théorie TRIZ propose des outils et techniques pour aider le concepteur à la recherche de solutions, et évite l'approche empirique et les nombreuses itérations essai-erreur.

Des outils analytiques sont employés pour la modélisation du problème. Ils regroupent des règles et des heuristiques et généralisent une situation spécifique par la représentation d'un problème comme une contradiction ou un modèle entités-relations.

La phase d'analyse initiale du problème n'est pas intégralement supportée par cette théorie. Si elle propose une vision algorithmique (ARIZ ou ses évolutions [Orl 03]) dès que le problème à résoudre est identifié, elle ne donne pas de démarche d'analyse complète.

Les méthodes d'aide à l'innovation MAL'IN[®] pallient cette carence [Tre 03] en liant les outils de l'analyse fonctionnelle (Organigramme Technique, Bloc Diagramme Fonctionnel) à une méthodologie intégrant des outils adaptés de la théorie TRIZ.

Des tentatives ont eu lieu pour dépasser l'émergence des concepts et aller vers la matérialisation des solutions, c'est-à-dire vers la conception. Savransky [Sav 00] cite Polovinkin qui a regroupé des règles (une traduction est proposée en annexe II) intégrant à la fois les principes d'innovation, la logique de ressources de la théorie TRIZ et des heuristiques dues à l'expérience de concepteurs. Ces règles sont regroupées en neuf chapitres, de la transformation de forme, de structures, dans l'espace et dans le temps jusqu'à des évolutions des systèmes mécaniques ou de matériaux pour finir vers des modifications intégrant les ressources et les tendances d'évolutions. Un chantier est à ouvrir pour mieux formaliser ces règles, les compléter et les ordonner.

5.1.1.3 Complémentarités et divergences des approches TRIZ et AD

La conception axiomatique propose deux axiomes et plusieurs corollaires. Afin de prendre des décisions, il faut connaître les principes de conception; la résolution dépend du contexte et de l'expérience du concepteur. Or un ingénieur connaît entre 50 à 100 effets physiques et phénomènes, alors que la littérature scientifique en décrit plus de 6000 [Yan 00b]. Chaque effet peut permettre de résoudre le problème, mais lesquels utiliser et comment les appliquer ?

La base de connaissance proposée par TRIZ liste des fonctions souvent rencontrées. Les effets correspondants et les exemples d'application peuvent servir de guide.

Ces deux approches présentent des points communs et des divergences.

Dans les deux cas, l'objectif de conception est défini en terme d'exigences fonctionnelles.

D'après la démarche de conception axiomatique, la conception est un compromis. La méthode TRIZ propose une recherche d'idées sans compromis, puisqu'elle préconise l'élimination des contradictions plutôt que leur accommodation.

Le nombre de solutions pour un ensemble d'EF dépend de l'expérience et de l'imagination du concepteur. TRIZ propose des aides, des outils et des bases de connaissances qui s'appliquent bien à la phase "recherche d'idée et créativité" de la conception axiomatique. TRIZ fonctionne bien quand un système existe et dysfonctionne, ou pour traiter un cas d'exigence fonctionnelle. Mais ses limites apparaissent dans des situations plus complexes et pour des structures à plusieurs niveaux.

L'Axiomatic Design peut apporter une meilleure compréhension de la nature hiérarchique de la conception et de la nécessité de prendre en compte les interconnexions entre les différents niveaux hiérarchiques, permettant d'améliorer la définition du problème. Cette approche offre également des moyens d'évaluation d'un concept et des critères quantitatifs.

Si l'on regarde les détails des règles proposées, des relations sont possibles entre celles des deux approches (Tableau 5). D'autres principes sont en opposition ou n'ont pas de correspondance (Tableau 6).

Axiomatic Design	TRIZ
Préconisation de <u>conception découplée</u> , avec le <u>moins d'information</u> possible Le nombre de composants physiques doit être réduit. Intégration de parties sans couplage d'EF.	La règle d'évolution " <u>mo-bi-poly</u> " donne des directives pour réduire la complexité d'un système. Le modèle d'évolution "complexité accrue suivie de simplification".
<u>Conception couplées</u> : Découpler ou séparer les parties d'une solution si les EF sont couplées ou deviennent interdépendantes	La <u>contradiction</u> dans un système technique : Le fait de surmonter une contradiction correspond au déplacement du couplage fonctionnel
<u>Minimisation d'EF</u> et simplicité maximum dans la conception (caractéristiques physiques et fonctionnelles)	Le " <u>Résultat Idéal Final</u> " aide à se concentrer sur les concepts qui réduisent les exigences, l'énergie et la complexité du produit et du process.
Théorème 1 : si le nombre de PC < nombre d'EF, la conception est couplée ou les EF ne peuvent être satisfaits. Théorème 2 : si la conception est couplée car EF > PC, il faut ajouter de nouveaux PC jusqu'à ce que la matrice soit triangulaire.	<u>L'analyse substances-champs</u> révèle l'existence de problèmes. De plus, lors de la construction de ce modèle, si un objet n'est pas réceptif aux changements exigés, alors le problème peut être résolu en complétant le modèle avec l'élément manquant.
Quand un ensemble d'EF est modifié, une nouvelle solution doit être cherchée.	Lors de l'ajout d'EF, le modèle SC doit évoluer pour améliorer les fonctions.

Tableau 5: Règles similaires des deux approches, d'après [Yan 00a].

Axiomatic Design	TRIZ
Conception couplée : il faut considérer l'effet d'une décision sur une EF sur d'autres EF et PC. Le concepteur essaie de découpler par essai-erreur.	Une conception couplée met en évidence l'existence d'une contradiction. Elle est surmontée en appliquant des principes inventifs ou de séparation.
S'applique à un objet physique, un procédé de production, une organisation	Limite le plus souvent ses applications aux systèmes technologiques (ses méthodes et outils sont issues de l'analyse de brevets)
Préconisation d'emploi de formes et de locations d'entités de manière <u>symétrique</u>	Le principe <u>d'asymétrie</u> est en opposition
Préconisation d'emploi de pièces, méthodes, opérations <u>standards</u> (minimisation des coûts et de l'information)	
Préconisation de la plus grande tolérance dans la déclaration d'EF	
Minimiser le nombre d'EF	Ne va pas dans le sens d'une évolution pour augmenter la valeur, la satisfaction du client
Part des exigences fonctionnelles vers les paramètres de conception.	Démarre avec l'identification des contradictions, et les paramètres de conception ; pour revenir ensuite vers les exigences fonctionnelles.

Tableau 6: Divergences des deux approches, d'après [Yan 00a].

5.1.1.4 Synthèse

La définition du problème, la formulation et la minimisation des exigences fonctionnelles sont les clés d'une conception réussie [Suh 90].

Pour aborder correctement un problème de conception, il apparaît souhaitable de :

- **Décomposer le problème**, du point de vue fonctionnel et des paramètres de conception.

Il existe toutefois un paradoxe du processus de conception : un problème complexe doit être structuré, mais il est difficile de le décomposer car des données nouvelles émergent à tout moment. Il y a donc évolution des objectifs, du cahier des charges [Dar 00].

- Faciliter l'accès aux **effets physiques**. Plusieurs travaux de notre groupe s'attachent à cela :
 - les méthodes et outils MAL'IN[®] proposent une aide à l'identification des flux physiques (voir annexe III);
 - des méthodes d'écriture et de qualification des modèles physiques sont proposées par Y. Vernat [Ver 04];
 - R. Doré travaille sur la liaison entre les variables de conception et les variables critères sensorielles [Dor 03].

- Réunir les **informations nécessaires et suffisantes**, minimiser les exigences; cela implique qu'il faut pouvoir les sélectionner.

Mulyanto distingue trois types de connaissances nécessaires pour le déroulement de l'activité de conception [Mul 02] :

- connaissances sur l'objectif (performances, caractéristiques, etc.); représentées par le cahier des charges;
- connaissances sur le domaine : connaissances sur l'objet à concevoir, sur son environnement, sur ses interactions pendant l'utilisation, sur les réglementations.
- connaissances sur la démarche, notamment basées sur l'expérience (guides de conception).

Janssen [Jan 90] différencie les connaissances de validité qui engendrent des contraintes que doit obligatoirement satisfaire la structure de l'objet, des connaissances de préférence qui engendrent des contraintes que doit respecter au mieux la structure de l'objet. Il suggère que le concepteur spécifie progressivement son problème, par ajouts et retraites de contraintes de préférence.

Suh englobe dans les exigences fonctionnelles les contraintes suivantes [Suh 90] :

- contraintes d'entrée : limites, restrictions de poids, taille, coût, matériau, performance;
- contraintes système : imposées par l'environnement d'exploitation : comportement physique, capacités de production, etc.

Nous partageons donc l'idée de Janssen selon laquelle résoudre un problème de conception consiste à partir de spécifications fonctionnelles d'un objet, d'en construire une représentation vérifiant :

- le respect des lois physiques;
- la prise en compte des données impératives provenant de la phase de réalisation ou de fabrication de l'objet : matériaux ou ressources disponibles par exemple, limitations de coût, de temps, etc.;
- la prise en compte de critères portant sur l'objet (robustesse, coût, simplicité) ou sur sa réalisation (coût, facilité, temps, habitudes, etc.).

Une partie importante de mon travail consiste à proposer une méthodologie systématique pour examiner le CdCF, les normes, les critères de qualification, les règles métiers, les comportements physiques mis en jeu.

Des analyses au niveau fonctionnel, organique et structurel, physique permettent d'identifier les caractéristiques nécessaires et suffisantes du problème de conception préliminaire, à prendre en compte pour la recherche d'architecture.

La démarche d'analyse et de structuration d'un problème de conception préliminaire doit permettre la décomposition du problème et l'identification de ses caractéristiques structurantes :

- *connaissances issues du CdCF; notamment performances, coûts, etc.;*
- *contraintes provenant des interactions avec l'environnement du produit, des normes, etc., et qui engendrent des limitations, des restrictions, des impositions;*
- *démarches et règles métier;*
- *flux physiques et phénomènes mis en jeu;*
- *connaissances permettant de vérifier la validité de la conception et de la qualifier.*

5.1.2 Outils existants

5.1.2.1 Décomposition du produit

Le PBS (Project Breakdown Structure) se compose du Product Tree et du WBS [MIL 98] (Work Breakdown Structure) ou organigramme des tâches [IN2 02].

Dans une optique d'assistance à la reconception de produits industriels, Vargas et al. ont proposé un modèle générique des connaissances de conception liées au produit à concevoir, aux différentes contraintes de conception à respecter, au processus de conception à mettre en œuvre [Var 95].

Ces auteurs représentent sous forme "d'arbre des tâches" (Figure 41) la structure détaillée des problèmes à résoudre. Les tâches de plus bas niveau correspondent à des activités de calcul, les tâches supérieures définissent une structure de gestion et de contrôle. Ces tâches correspondent en fait aux fonctions à réaliser.

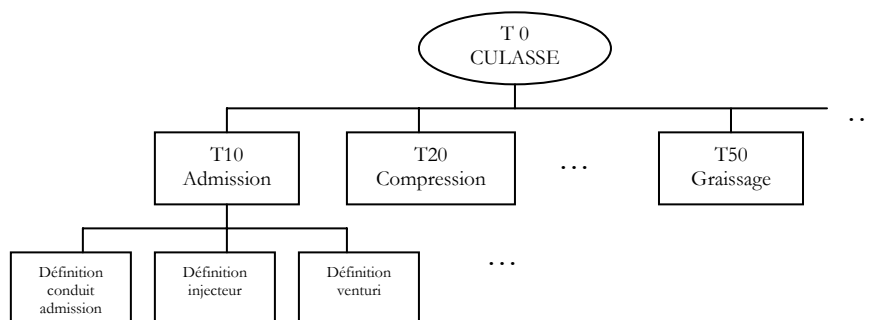


Figure 41: Modèle du processus de conception "arbre des tâches" [Var 95].

L'arborescence produit [Cav 95] (product tree) est également appelé organigramme produit. Ce n'est pas une nomenclature (liste de matériels rangés par fonction) mais une décomposition cohérente et organisée du système. Si l'on complète les éléments du produit avec des spécifications "assemblage/intégration/essais", "moyens spécifiques", cela devient l'organigramme technique (Figure 42) [Chv 93]. Il ne peut être établi qu'après une première définition préliminaire du système [IN2 02].

Il importe, durant toute la durée du projet, qu'un seul et même découpage soit utilisé pour l'organisation, le suivi des coûts et des délais. L'organigramme technique est le support de la gestion de configuration qui 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.

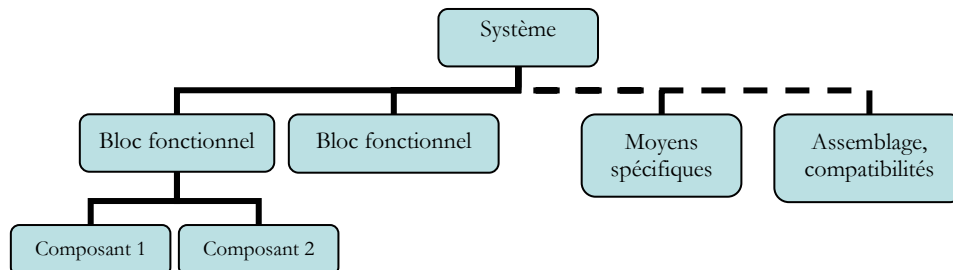


Figure 42: Organigramme technique.

Deux points de vue de découpage sont possibles. Les deux types de découpages conduisent à la définition des mêmes composants, mais selon une organisation différente :

- Découpage des éléments par niveaux, avec critère fonctionnel : niveau système, niveau des sous-systèmes, niveau des constituants principaux des sous-systèmes, niveau des composants de ces constituants principaux, etc.

Toutefois, il n'existe pas de terminologie bien figée pour définir ces niveaux [Cav 95].

- Il est possible de réaliser, dès le niveau des sous-systèmes, un découpage métier par métier et non pas élément par élément. Tout système assez simple peut être découpé suivant trois fonctions (informatique, électronique, mécanique). Il est cependant nécessaire d'effectuer d'abord un découpage élément par élément pour être exhaustif, avant de procéder à un découpage métiers, facilitant par la suite le découpage en tâches (organigramme des tâches) et l'organisation du projet dans l'entreprise.

L'organigramme technique permet de définir les éléments standards et donc de discerner les éléments à concevoir (hors standards). Les éléments standards impliquent des contraintes d'assemblage aux éléments de même niveau

Pour passer à l'étude du fonctionnement, il est nécessaire d'intégrer les milieux extérieurs avec lesquels agissent les blocs fonctionnels [Nad 02]. Cet organigramme incluant les milieux extérieurs sera appelé organigramme technique étendu.

5.1.2.2 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est utilisée dans les premières phases d'un projet pour créer ou améliorer un produit. Les outils utilisés se présentent le plus souvent sous forme de graphe ou diagramme d'analyse. Son objectif est de recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions du produit.

- Recenser : déterminer et identifier les fonctions du produit;
- Caractériser : énoncer les critères d'appréciation, les niveaux et la flexibilité de ces fonctions;
- Ordonner : classer les fonctions en fonctions de service et fonctions techniques;
- Hiérarchiser : évaluer l'ordre d'importance des fonctions retenues;
- Valoriser : attribuer à chaque fonction un poids ou une valeur liée à son importance.

Une démarche d'analyse fonctionnelle conduite entre client et fournisseur permet :

- de s'assurer de l'exhaustivité du besoin, évitant des remises en cause importantes lorsque certains éléments du besoin ne sont identifiés qu'à un stade avancé du programme
- de s'assurer que le besoin est bien perçu à l'identique par le client et par le fournisseur
- de prendre en compte des contraintes propres au fournisseur (harmonisation avec d'autres besoins, normalisation, etc.).

Les performances requises correspondent à des ensembles "fonction de service-critère d'appréciation-niveau assorti d'indications de flexibilité". Certaines performances caractérisent la nature et le niveau du besoin à satisfaire par une fonction (performances fonctionnelles) et les autres caractérisent l'aptitude à disposer au moment voulu, pendant la durée voulue, et sans dommage pour le système et son environnement des performances fonctionnelles (performances de sûreté de fonctionnement). Les performances de sûreté de fonctionnement peuvent être communes à plusieurs fonctions et même à plusieurs missions.

A ces performances requises, fonctionnelles et de sûreté de fonctionnement, optimisées par l'application de la démarche d'analyse fonctionnelle, il faut ajouter des contraintes dues au fait que le produit doit s'intégrer dans un système d'ordre supérieur (limitations à la liberté de conception et de production) et des exigences d'assurance de la qualité permettant de s'assurer que le produit répondra au besoin (exigences sur la qualification et sur l'acceptation).

L'ensemble des performances requises et des contraintes est défini par l'acquéreur dans un langage d'utilisateur dans le CdCF.

Il existe deux niveaux dans l'analyse, mettant en évidence des fonctions liant le système à son environnement ou des fonctions internes : l'analyse fonctionnelle externe et interne.

▪ **Analyse fonctionnelle externe** :

L'analyse du cycle de vie permet tout d'abord l'identification exhaustive des situations de vie.

Pour une situation donnée, sont ensuite identifiés les milieux extérieurs et les **Fonctions de Service (FS)** : C'est l'action attendue d'un produit (ou réalisée par lui) pour répondre à un élément du besoin de l'utilisateur [AFN 90].

- Une fonction à valeur d'usage est une fonction de service liée à l'aspect utilitaire du produit; elle définit l'utilité matérielle d'un produit.
- Une fonction à valeur d'estime est une fonction de service ayant un impact psychologique ou affectif sur l'utilisateur du produit (esthétique, image, style, etc.).

Les fonctions de service sont caractérisées par leurs critères d'appréciation (comportant chacun un niveau¹³, une flexibilité¹⁴, une limite d'acceptation¹⁵). Ces critères sont

¹³ Niveau d'un critère d'appréciation : dans l'échelle de mesure choisie, c'est le niveau souhaité ou attendu par la fonction testée du produit.

¹⁴ Flexibilité d'un critère : elle précise les variations possibles du niveau exigé d'un critère d'appréciation (amplitude de l'intervalle de tolérance). C'est une des caractéristiques fondamentales du cahier des charges.

¹⁵ Limites d'acceptation : ce sont les limites de l'intervalle de tolérance définissant la flexibilité. Au-delà ou en deçà de ces limites il y a non-satisfaction ou non-qualité.

des paramètres valués et permettent d'apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée [AFN 90]. Les fonctions de services peuvent être ainsi hiérarchisées.

Une fonction de service lie deux milieux extérieurs via le système.

Une **Fonction Contrainte** (FC) traduit une relation de contrainte, imposée sur le système par un milieu extérieur.

La représentation fonctionnelle du produit Figure 43 illustre la méthode d'inventaire systématique des milieux environnants ou méthode APTE®. La norme X50-153 prend l'exemple d'un aspirateur ménager [AFN 85]. Durant la situation de vie "utilisation normale", les fonctions sont les suivantes :

FS1 : permettre à l'utilisateur de récupérer la poussière se trouvant sur le sol

FC1 : s'adapter et se déplacer sur le sol

FC2 : ne pas rejeter de poussière dans l'atmosphère

FC3 : fonctionner avec l'énergie électrique

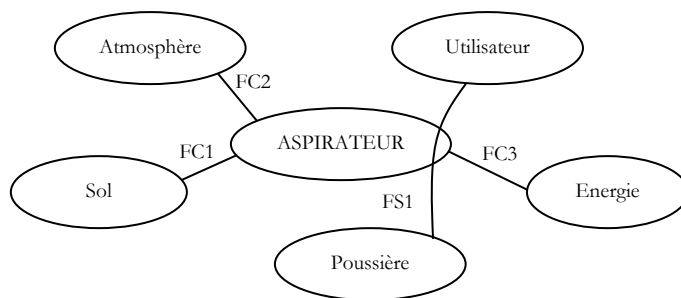


Figure 43: Fonctions de service et contraintes de l'aspirateur ménager

▪ Durant **l'analyse fonctionnelle interne**, les **fonctions techniques** sont mises en évidence : Ce sont les fonctions internes au produit (entre ses constituants), choisies par le concepteur, dans le cadre d'une solution, pour assurer des fonctions de service [AFN 90]. Les fonctions de service sont voulues et sont directement perçues par le client; elles font la valeur d'un produit. Tandis que les fonctions techniques sont le plus souvent ignorées du client et ne donnent pas directement de la valeur au produit. Elles résultent d'actions internes au produit et dépendent de la conception et des solutions technologiques choisies pour réaliser les fonctions de service. Cependant, la qualité du produit et la parfaite réalisation de ses fonctions de service en dépendent.

- Le **diagramme FAST** (Functional Analysis System Technique) [Tas 03] est une modélisation du système technique. Il permet d'identifier et de représenter les principales fonctions techniques d'un système, explicitant ce qu'il doit réaliser pour répondre au besoin, et commence à présager des solutions techniques pour y parvenir.

La Figure 44 présente une partie du FAST de l'exemple de l'aspirateur. On sait qu'un élément doit laisser passer l'air et retenir la poussière : on recherche donc un élément filtrant.

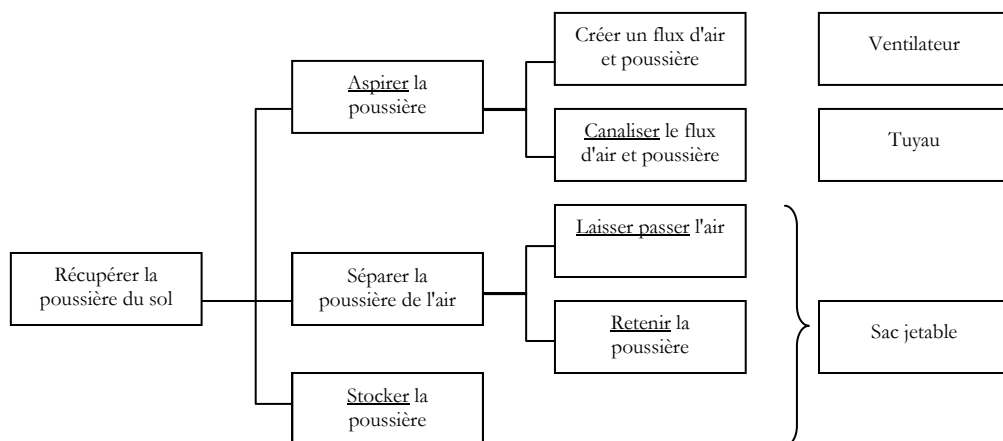


Figure 44: Extrait du diagramme FAST de l'aspirateur.

Le FAST peut permettre de lister les composants "juste nécessaires", mais il ne permet pas de visualiser les relations entre les composants; le fonctionnement d'un système ne peut pas être complètement décrit.

- Le **Bloc Diagramme Fonctionnel** (BDF) est un outil permettant de mettre en évidence la relation fonction-solution, dans le cas de produits mécaniques, pour une situation de vie donnée. Il présente le cheminement des flux fonctionnels au sein du système et des composants.

Le Coq utilise le BDF pour l'étude et l'évaluation des solutions, comme outil d'analyse de l'architecture [LeC 92]; Il s'agit là d'une action a posteriori. Mais il est plus généralement utilisé comme outil de conception.

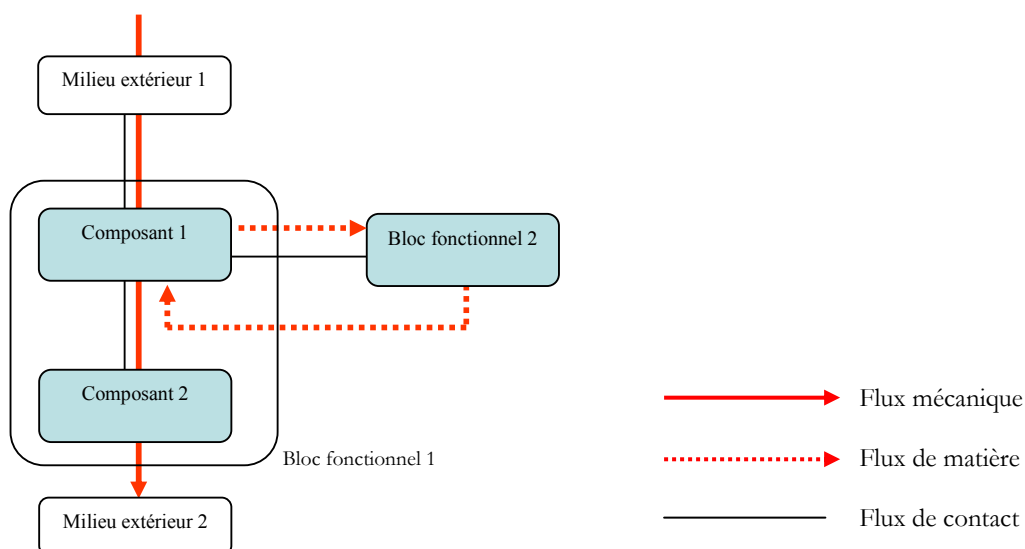


Figure 45: Exemple de Bloc Diagramme Fonctionnel.

L'utilisateur a besoin que le produit réalise des fonctions de service. Il les réalise grâce à des composants élémentaires effectuant des fonctions techniques.

Cette représentation schématique superpose le point de vue fonctionnel et technologique. Elle permet de mettre en évidence les interactions entre les composants et les milieux

extérieurs, ainsi que les flux transitant par le produit (Figure 45). Ces flux fonctionnels sont de différentes natures : matière, énergie, contact, estime de l'utilisateur.

Il peut s'agir d'un flux fonctionnel lié à la réalisation de la fonction principale. Le BDF renseigne ainsi sur les éléments par lesquels il transite, et permet d'identifier les composants importants.

La connaissance des interactions et des flux permet de lister les fonctions techniques liées à chaque composant. Vis-à-vis des flux fonctionnels, les composants peuvent être considérés comme générateur de flux, transmetteur, transformateur, récepteur, interrupteur [TAS 03].

A chaque concept de solution et à chaque situation de vie correspond un BDF. Il sera différent selon le niveau systémique décrit.

Pour l'exemple de l'aspirateur, le BDF, pour la situation de vie "utilisation" est représenté Figure 46. Un flux d'air transite par les trois éléments présents, mais on ne sait pas à priori lequel crée ce flux. De plus, cette description n'indique pas comment le sac jetable sépare la poussière de l'air.

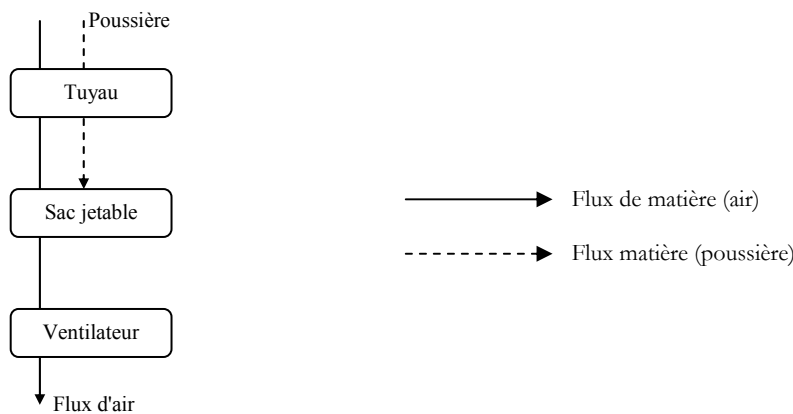


Figure 46: Extrait du BDF de premier niveau de l'aspirateur.

Le BDF ne met pas en évidence les éventuels couplages physiques entre les différents flux, ni que les phénomènes physiques n'étant pas des flux fonctionnels, par exemple des phénomènes physiques induits et non souhaités sur le plan fonctionnel (dilatation, etc.). C'est pourquoi nous proposons dans le paragraphe suivant une évolution du bloc diagramme fonctionnel.

5.1.2.3 Evolution du BDF

En représentant les flux, le BDF permet une représentation des phénomènes physiques mis en jeu dans le système. Toutefois, les phénomènes physiques induits et non souhaités sur le plan fonctionnel ne sont pas facilement identifiables.

De plus, dans un BDF classique, les matériaux transitant dans le système ne sont présents qu'au travers des flux, matérialisés par des traits.

Nous proposons d'intégrer ces milieux extérieurs comme autant de blocs à part entière dans le diagramme. La Figure 47 représente une évolution du BDF vers le **Grphe des associations Substances-Champs**¹⁶ (GSC).

¹⁶ Une substance est définie comme un élément à masse non nulle et/ou volume non nul. Un champ est défini comme un effet physique réalisant une action. Une association est définie comme la combinaison de deux substances reliées par un champ : une substance émettrice d'un champ et une substance réceptrice.

Mettre en place, par exemple, le matériau "poussière" permet de le relier aux blocs-éléments par les verbes d'action (désirées) énoncés dans le FAST (verbes soulignés sur la Figure 44).

On constate que les milieux extérieurs ne font que subir des actions, car ils sont ici l'objet de flux, de transport ou de stockage. Utiliser les composants et les actions listés par le FAST permet d'être assez exhaustif dans la description du fonctionnement désiré du système.

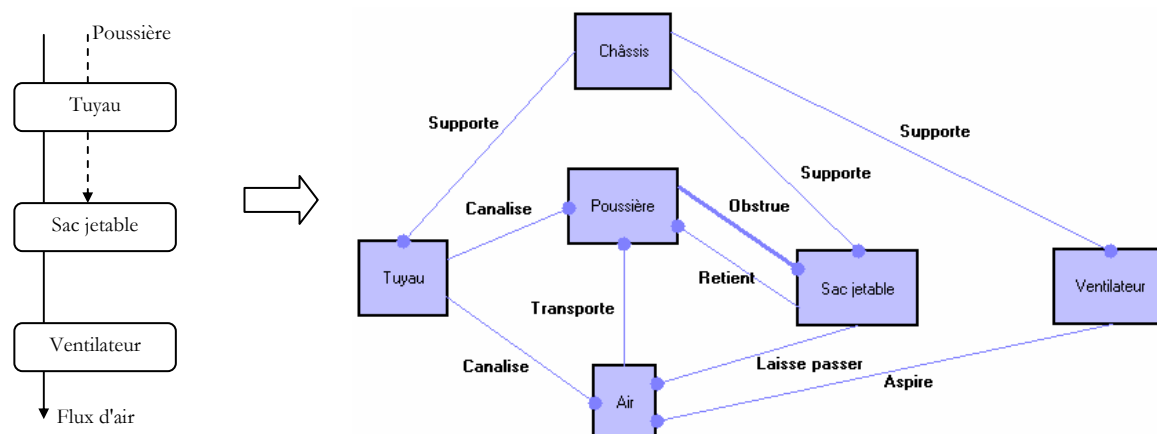


Figure 47: Du BDF au GSC, pour l'exemple de l'aspirateur.

Les comportements physiques mis en jeu sont identifiés, en visualisant les actions entre les composants et les éléments du milieu extérieur. La démarche et les tableaux fournis en annexe III permettent de faciliter cette identification.

Cette représentation sous forme de GSC est employée dans la théorie TRIZ [SAV 00]. Une information supplémentaire peut être rajoutée sur les interactions entre les substances : l'effet peut être utile, utile insuffisant, néfaste ou nuisible, par exemple : "poussière obstrue sac". Ces actions non désirées peuvent être identifiées grâce à une AMDEC, ou résulter de retours d'expériences.

Ces graphes aident également à identifier et à classer les interactions physiques qui s'opposent aux spécifications. Les zones posant des problèmes et donc les éléments à concevoir sont mis en évidence. De plus, les contradictions physiques et/ou techniques sont mises en évidence grâce aux verbes, surtout s'ils sont antinomiques.

Une fois les requêtes antinomiques identifiées, deux possibilités s'offrent pour les traiter :

- Triz propose des outils pour traiter les contradictions et recherche de nouveaux concepts.

Cela constitue un "biais d'attaque" de la méthode TRIZ. Il s'avère par exemple que l'accumulation de poussière dans le sac, gêne de plus en plus le passage de l'air. Le diagramme substances-champs indique que le même composant est utilisé pour séparer l'air de la poussière et stocker celle-ci. La fonction "laisser passer l'air" est incompatible avec "retenir et stocker la poussière", puisque l'air doit également passer à travers la poussière. C'est une contradiction physique. Pour éviter cette contradiction, une voie qui a été suivie a été, par exemple, d'éliminer cet élément filtrant, pour ne garder que sa fonction de stockage. Ainsi, les aspirateurs sans sac séparent l'air de la poussière par des effets centrifuge.

- Ces requêtes antinomiques peuvent être conservées pour rechercher un compromis; elles sont modélisées grâce à la logique floue [Fis 00].

Enfin, la représentation du fonctionnement d'un système sous une forme fonctionnelle permet de faciliter la réalisation de l'analyse des modes de défaillance [Pit 97].

Une approche semblable est proposée par Kawakami et al. [Kaw 96] pour la recherche de concepts (Conceptual design). Le système est représenté sous forme d'un réseau sémantique, où les composants sont reliés par des "liens étiquetés". Ils présentent également une décomposition, sous forme d'un diagramme hiérarchique, à travers différents espaces : but de la conception, fonctions, lois physiques, attributs de la structure. En utilisant les principes de la conception axiomatiques, les auteurs tendent vers une structure minimale du réseau sémantique; mais ils n'indiquent pas comment leur approche permet d'identifier les points sensibles de la conception et les fonctions structurantes.

Le graphe substances-champs met en évidence sur une représentation unique les flux qui existent entre les composants du système, ainsi qu'avec les milieux extérieurs. On y trouve aussi bien les flux souhaités pour la réalisation de fonctions, que les flux induits. Ainsi, les comportements physiques pertinents pour la description du fonctionnement du produit peuvent être identifiés assez exhaustivement. Nous utiliserons le GSC et le BDF durant l'étape 4 (approche physique) de la phase d'analyse et structuration du problème de conception. Ces graphes permettent d'écrire les lois de conservation et les lois de comportement traduisant les comportements physiques qu'entraînent les flux fonctionnels.

5.2 Caractéristiques structurantes du problème de conception

A l'occasion de ce travail sur la formulation préalable d'un problème de conception préliminaire en vue de l'aide à la décision, nous proposons la notion de caractéristiques structurantes du problème.

Les **caractéristiques structurantes** au sens du raisonnement du concepteur sont celles qui lui permettent de débiter le travail de conception et de définir une première architecture. Ce sont les critères (cf. §3.3.1) et fonctions structurant l'acte de conception.

Avant d'utiliser le système d'aide à la décision en conception préliminaire, il est nécessaire d'identifier les caractéristiques structurantes du problème de conception.

En effet, nous proposons d'exprimer à la fois les critères d'appréciation du CdCF, les comportements physiques, les règles métiers sous forme de contraintes. Ces contraintes peuvent être très nombreuses, ce qui ne serait pas compatible avec le solveur [Seb 03]. Il faut faire un tri parmi les fonctions issues de l'analyse fonctionnelle (qui traduit le besoin complet).

De même, durant les premières phases de la conception préliminaire, le concepteur cherche à limiter l'étendue du problème de conception. Il ne prend pas en compte toutes les fonctions du CdCF, il en sélectionne certaines pour obtenir une première architecture validée.

De plus, il ne faut pas utiliser uniquement la vision fonctionnelle, mais prendre en compte également les comportements physiques qui la traduisent ou qu'elle induit.

En partant de la connaissance du concept de solution et de la situation physique dans laquelle il doit fonctionner, Chakrabarti et al. indiquent que les contraintes physiques et fonctionnelles importantes doivent être identifiées, afin de commencer la phase de conception architecturale [Cha 92].

Pahl et Beitz [Pah 96] proposent, pour commencer la phase de conception architecturale d'identifier les exigences qui ont une portée cruciale sur cette phase :

- les exigences liées à des interfaces dimensionnelles (sorties, connecteurs, etc.);
- les exigences déterminantes pour la disposition de composants (direction de flux, mouvement, position, etc.);
- les exigences déterminantes pour le choix de matériaux (résistance à la corrosion, durée de vie, etc.);
- les contraintes spatiales déterminantes ou restreignant la recherche d'architecture (jeu, position d'axe, etc.);
- les assemblages et composants accomplissant les fonctions principales.

Les caractéristiques structurantes d'un problème de conception préliminaire sont donc :

- des **situations de vie** qu'il faudra impérativement décrire;
- des **fonctions** incontournables ou comportant un risque;
- des **éléments standards** à choisir ou à dimensionner: ils génèrent des variables et des contraintes;
- des **variables de conception** permettant de définir l'architecture du produit;
- des **variables critères** permettant de qualifier une conception;
- des **domaines de variation** des variables;
- des **comportements physiques** pertinents pour décrire le fonctionnement du produit et leurs effets induits, se traduisant par des relation entre les variables de conception.

5.3 Démarche d'analyse et structuration en quatre étapes

La première phase du processus global d'aide à la décision (Figure 31) va être détaillée ci-dessous. Il s'agit de "l'analyse et structuration du problème de conception".

Nous proposons pour cela une démarche de recherche des caractéristiques structurant l'acte de conception depuis l'émergence du concept jusqu'aux choix et réalisation d'une solution. Elle se déroule en quatre phases, chacune correspondant à un niveau d'analyse différent : analyse du besoin, analyses fonctionnelle, organique et physique (Figure 32, page 63).

L'utilisation des outils de l'analyse fonctionnelle est privilégiée. Ils sont toutefois parfois complétés comme nous l'avons vu dans le §5.1.2. La Figure 48 représente les outils utilisés lors des quatre phases et les résultats obtenus :

- La première étape d'analyse de besoin permet d'exprimer également les critères de qualification du client ainsi que ses situations de vie de référence.
- Durant l'approche fonctionnelle (phase 2), l'analyse fonctionnelle externe liste les fonctions liées au produit à concevoir; seules les fonctions structurantes seront retenues.
- La phase 3 permet une décomposition structurelle du produit grâce à l'organigramme technique étendu, afin d'identifier les éléments standards et les contraintes qu'ils engendrent.
- Le BDF et le GSC permettent l'analyse des flux fonctionnels et induits. Ainsi, l'approche physique (phase 4) met en évidence les comportements physiques pertinents à prendre en compte.

Cette démarche a fait l'objet de publications : [Sca 04a] traite du déroulement de cette phase d'analyse et structuration, au travers d'un exemple de conception architecturale résolu. La méthodologie est plus détaillée dans [Sca 04b], mais cet article ne comporte pas d'application concrète.

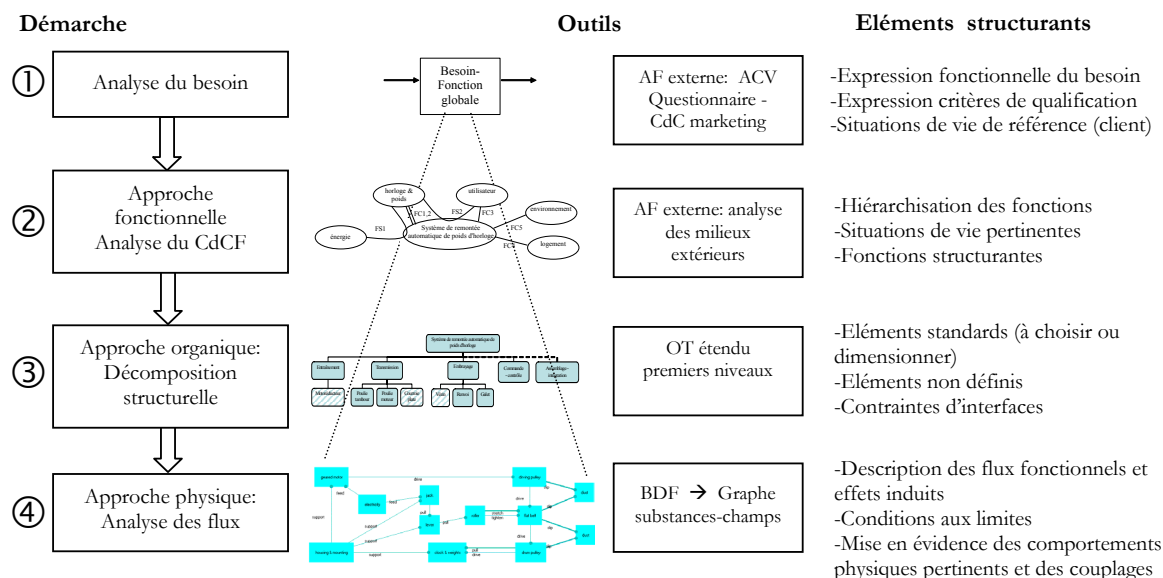


Figure 48: Démarche de recherche, outils associés et caractéristiques structurantes identifiés à chaque étape.

5.4 Etape 1 : analyse du besoin

5.4.1 Expression fonctionnelle du besoin

La démarche de conception, pour être rationnelle et efficace, commence par une formulation exhaustive du besoin exprimé ou implicite des utilisateurs [AFN 90].

On dispose à ce stade de l'expression du besoin du client en termes marketing, économiques, de résultats attendus, de délais.

L'analyse fonctionnelle permet de traduire et d'intégrer dans le processus de conception, l'expression du besoin pour l'utilisateur final, le client, le concepteur [Pru 03].

Toutefois, le besoin, exprimé sous forme fonctionnelle, ne préjuge pas de la constitution du système à concevoir. Ainsi, le champ des solutions n'est pas restreint.

La validation du besoin permet de vérifier que celui-ci est clairement identifié et correctement formulé, ainsi que d'apprécier sa stabilité dans le temps [AFN 90].

La fonction globale traduit la raison d'être du système. C'est une fonction structurante.

5.4.2 Critères de qualification client

Le client doit exprimer ses **critères de pertinence de la conception**. Ce sont ces critères qui vont lui permettre de qualifier la conception proposée.

Aoussat parle de critères de tri, qui sont exprimés dans la phase de traduction du besoin, et qui permettent en phase finale d'effectuer le tri et le choix de concepts [Aou 96].

Le client de la conception peut être :

- Le client final du produit à concevoir; auquel cas certains critères et fonctions internes ne le concernent pas et ne font pas partie de ses critères de qualification;
- Un service de l'entreprise, un donneur d'ordre, un prescripteur, un organisme vérificateur : il peut être intéressé par des critères liés à des fonctions internes, des critères permettant d'évaluer le comportement physique attendu par le client final, qui seront exprimés au cours des étapes suivantes de la démarche.

Beaucoup de méthodes de la littérature listent des critères d'évaluation de concepts ou d'architectures. Nous vérifierons ultérieurement (§0) que ces critères se retrouvent dans ceux que nous proposons dans cette étape ou les suivantes.

Les différents critères de qualification client inventoriés ont été classés en trois catégories : critères technologiques (fonctionnels ou structurels), critères économiques et critères de qualification propres au service marketing ou pertinents du point de vue de l'entreprise cliente de la conception.

Les trois paragraphes suivants vont lister et expliciter ces critères. Ils sont ensuite récapitulés dans le Tableau 7 (§5.4.3).

5.4.2.1 Critères technologiques

- Critères fonctionnels : Ils concernent la vérification de la réalisation de fonctions du produit.

- Performances attendues par le client (on les retrouve ensuite dans les fonctions de service).
- Durée de vie minimale.
- Sûreté de fonctionnement : Ces critères correspondent à ceux qui ont été énoncés pour la qualification concepteur (§4.1). Les indicateurs opérationnels sont [Mon 00] :
 - Fiabilité;
 - Disponibilité;
 - Maintenabilité :
 - aptitude à être maintenu, caractérisée en maintenance par un temps (MTTR)
 - contraintes technologiques (facilité de démontage, réparabilité, accessibilité, outillage spécifique, etc.).
 - Sécurité : sa quantification passe par une analyse du risque [Pre 94]; les exigences de certification aéronautiques par exemple (JAR, etc.) imposent des contraintes liées à la sécurité.
- Robustesse : faible dépendance aux facteurs extérieurs ; susceptibilité du système à des facteurs nuisibles ou à des effets qu'il génère (froid, corrosion, chaleur, etc.).
- Autonomie.
- Risque de conception : le §1.2 a listé les facteurs de risque en conception. Leurs conséquences sont essentiellement relatives aux coûts ou aux délais.
D'autre part, l'indice de criticité ou Indice de Priorité de Risque (IPR) permet de quantifier les risques liés à un ensemble, à un composant [Lan 02].

▪ Critères structurels : Ils concernent des attributs du produit relatif à sa structure.

- Masse.
- Encombrement.
- Résistance à l'environnement : atmosphère, vibrations, corrosion, etc.
- Complexité : elle se définit comme $C = \sum j * F_j$, où j est le niveau de la décomposition fonctionnelle et F_j le nombre d'éléments ou composants à ce niveau [Bas 99] [Ull 03].
La description fonctionnelle que ces auteurs utilisent correspond en fait à l'organigramme technique. Il faut que celui-ci descende jusqu'au niveau composant pour pouvoir évaluer correctement la complexité d'une conception. Cette évaluation peut être relative et permet de comparer des solutions de conception entre elles. S'il s'agit de reconception, la référence est la complexité de la solution existante.

5.4.2.2 Critères économiques

- Coûts :
 - financier (industrialisation, production, recyclage maintenance; coût de possession);
 - énergétique;
 - en temps (montage, etc.).

Plusieurs modèles d'estimation des coûts sont utilisés aux différentes phases du cycle de vie du produit. Durant la conception préliminaire, Lonchamp et al. proposent décrivent deux modèles :

- Le modèle paramétrique : Selon cette approche, le coût est relié à des paramètres techniques du produit (masse, volume, etc.). Son évaluation est basée sur des calculs statistiques à partir de coûts de conceptions précédentes [Lon 02]. S'il s'agit de conception innovante sa mise en œuvre est délicate.
- La modèle analogique : Le coût d'un produit est calculé à partir du coût de ses fonctions, en se basant sur des fonctions de produits précédents. Cela suppose que des fonctions similaires de produits différents engendrent des coûts similaires. De plus, cette approche nécessite une base de donnée de fonctions et de leurs coûts [Lon 02].

- Possibilités d'investissement : outil de production (machines, procédé..), outillages; évaluer les risques encourus vis-à-vis des choix concernant les processus et méthodes de fabrication.

- Développement durable : C'est une approche plus globale que l'éco-conception [Jan 00]. Il s'agit d'un type de développement qui permet de satisfaire les besoins des générations présentes, sans réduire la possibilité des générations futures de satisfaire les leurs [IFE 03]. Plusieurs indicateurs spécialisés existent. D'une manière plus globale, l'indicateur d'éco-efficacité [Jan 00] ou d'éco-efficience [Ver 00] consiste à mettre en regard la performance économique et la performance environnementale. Il s'agit d'une mesure relative de l'impact sur l'environnement. Il est également possible de prendre en compte la totalité du coût du cycle de vie (Life Cycle Costing).

Ces critères se rajoutent aux critères de qualification concepteur relatifs à l'éco-conception (§4.1.1.3).

5.4.2.3 Critères de qualification société, marketing

Ce sont les critères relatifs à des contraintes globales de l'entreprise ou du service marketing.

- Le "Time to market" peut se traduire par "temps de mise sur le marché" : délais, date de fin de développement, planification de projet et contrôle, date livraison. [Ull 03] indique que la durée d'un projet peut s'évaluer ainsi :

$$\text{Temps (heures)} = A * \text{complexité} * D^{0.85}$$

- A est une constante dépendant de la taille de l'entreprise et de la circulation de l'information (A=30 pour une petite entreprise avec une bonne communication, A=150 pour une grande entreprise avec une communication moyenne).

- D est la difficulté du projet (1: peu difficile, utilisant des technologies connues ; 2: difficile, peu de technologies nouvelles ; 3: très difficile).

- Coûts objectifs, marge, quantités.

- Coût de possession produit : achat, mise en service, entretien, emploi, évacuation.

- Risques encourus en matière de coûts et de délais. Pour une phase du cycle de vie, le risque est défini comme grandeur à deux dimensions caractérisant un événement

redouté : la probabilité d'occurrence et la gravité des conséquences (définie en terme de perte de performance ou de coûts) [Gre 99].

- Exportabilité (règlements, normes en vigueur dans les pays visés).
- Ergonomie, facilité de contrôle, accessibilité, interface homme/machine, sécurité.
- Effets sur l'environnement : génération de bruit, vibrations, odeurs; variation de température, humidité, etc.
- Mise en œuvre du produit (facilité, rapidité).
- Perception : esthétique, finition et surface, qualité perçue ; image de marque, de gamme ; tendances ; culture.
- Fonctions socio-économiques du matériau : mode, pollution ou recyclabilité (respect de l'environnement), sécurité, etc.

5.4.3 Caractérisation

Le Tableau 7 indique les moyens de caractérisation (deuxième colonne) des critères de qualification que nous venons de lister.

La colonne "écriture" précise le formalisme d'écriture d'une contrainte permettant l'évaluation quantitative du critère. Il s'agit souvent d'inégalités, par rapport à un référence dont l'origine est précisée dans la colonne suivante.

Critère de qualification	Caractérisation	Ecriture (évaluation quantitative)	Origine des valeurs références	Evaluation qualitative	Référence
▪ Critères technologiques					
- Critères fonctionnels					
Performances attendues	Rendement \ puissance \ paramètre physique (force, vitesse, température, pression) Productivité (nombre d'actions par unité de temps)	Performance $\in [x,y]$ Performance $\in \{x,y,z\}$ Performance $> x$	$[x,y]$: cahier des charges $\{x,y,z\}$: catalogue		
Réglementation	Critères des normes	Paramètre $\in [x,y]$ Paramètre $< x$	Normes		
Durée de vie minimale	MTTF : mean time to (first) failure	MTTF $> x$	Cahier des charges (CdC)		[Lig 92]
Fiabilité	MTBF : mean time between failure	MTBF $> x$	CdC		[Lig 92]
Disponibilité	Indicateur de disponibilité opérationnelle : $D^{op} = MTBF / (MTBF + MTTR)$	$1 > D^{op} > x$	CdC		[Mon 00]
Maintenabilité	-MTTR : mean time to repair -Taux de composants standards	MTTR $> x$	CdC		[Lig 92]
	-Facilité de nettoyage			Oui \ Non	
Sécurité	-Critère AMDEC: Criticité= niveau gravité * proba. occurrence * proba. non détection	Criticité $< x$	Choix R&D		[Lan 02] [Gar 94]
	-Exigences de certification	Critère $< x$	Normes		
Robustesse	S/B (Signal/Bruit)	S/B maxi	Choix R&D		[Tag 03]
Autonomie	-Énergétique (durée de fonctionnement)	Autonomie $> x$	CdC		

	-Ne pas nécessiter d'intervention humaine			Oui \ Non	
- Critères structurels					
Masse	Masse totale, maximum (ou minimum)	Masse < x	CdC		
Encombrement	Dimensions minimum (ou maximum)	Dimension > x	CdC; normes, réglementation		
	Coefficient volumique de l'emballage : $CVE = Vol. \text{ parallélépipède emballage } / Vol. \text{ contenu }$	$1 < CVE < x$	CdC; Normes, réglementation		[CEN00]
Résistance à l'environnement	Niveau maxi de température \ pression \ humidité \ salinité \ vibrations (amplitude, fréquence) etc.	Température < x ...	CdC		
Complexité	Complexité $C = \sum j * Fj$	$C < C \text{ réf. } \setminus C_{min}$	Choix R&D		[Bas 99]
▪ Critères économiques					
Coût d'industrialisation	Coûts outillages+machines \ main d'œuvre Coûts de mise au point	Coût < x	Management projet		
Coût de production	-Coûts fonctionnement machine \ unité de production \ main d'œuvre -Coûts création/suppression emploi	Coût < x	Management projet		[Fen 00]
	-Durée de production, séries	Durée < x	CdC		
Coût de possession	-Consommation énergétique -Coût du cycle de vie (acquisition, exploitation, maintenance)	Coût < x Consommation < x Contenu énergétique < x	CdC, Marketing		[Mil 03]
Coût de maintenance préventive	Coûts intervention \ pièces	Coût < x	CdC; Marketing		
	Temps de démontage	Temps < x			[Sod 04]
Coût de recyclage	Coûts démontage \ traitement etc.	Coût < x	Normes, réglementation		[Mil 03]
Coûts objectifs	Coût de revient (composants, matériaux, fabrication, matière, emballage, etc.) Bénéfice	Coût < x Bénéfice > x	Analyse de la valeur CdC; Marketing		
Capacité investissement	Investissement nécessaire \ investissement possible	Coût < x	Management projet		
Recyclabilité	-% masse totale recyclable -Irréversibilité des liaisons (démontable \ non démontable) -Compatibilité des matériaux (oui \ non) -Nombre de matériaux	%masse < %maxi Nbre matériaux < x	Normes, réglementation	Démontable compatibles Oui \ Non	
Développement durable	Indicateur d'éco-efficience=valeur des produits / impact environnemental	Indicateur < x	Normes, réglementation Marketing		[Jan 00] [Ver 00]
Impact environnemental (durant les différentes phases du cycle de vie :	Consommation d'énergie	Consommation < x	CdC; Marketing		
	-Consommation de matière, d'eau -Indicateur d'impact sur les ressources	Consommation < x IIR < x	Normes, réglementation		[Bre 04]

fabrication, distribution, utilisation, retrait etc.)	Emission de gaz, de polluants, de déchets: -indicateur d'impact "effet de serre": kg de CO ₂ équivalent émis -indicateur d'impact "destruction couche d'ozone": kg de CFC-11 équivalent émis etc.	Rejet < x	Normes, réglementation		[Mil 03]
	Génération de chaleur : flux de chaleur	Flux < x	Normes, réglementation		
	Génération d'humidité : flux de matière	Flux < x	Normes, réglementation		
■ Critères de qualification société, marketing					
Délais de développement	-Temps (h) = $A * \text{complexité} * D^{0.85}$ -Taux d'éléments nouveaux (cf organigramme technique)	Temps < x %élém. nouveaux < x	Management projet		[Bas 99]
Risques: conception, coûts, délais	-IPR = gravité*occurrence*validation -Dépassements potentiels : coûts, délais	IPR < x Dépass. potentiel < x	Management projet		[Lan 02]
Mise en fonctionnement	Temps \ qualification nécessaire	Temps < x	CdC; Marketing	Qualification Oui \ Non	
Mise en route	Mise en température , etc.	Temps < x	CdC		
Impact environnemental (nuisances)	Niveau de bruit généré	Niveau de bruit < x	Normes, réglementation		
	Génération d'odeur			Oui \ Non	
	Nuisance visuelle			Oui \ Non	
Perception utilisateur	-Qualité environnementale -Sensations perçues (sécurité, ergonomie, confort, performance, solidité, esthétique, etc.)	Voir critères éco. Travail en cours (thèse R. Doré)	CdC; Marketing		[Dor 03]

Tableau 7: Caractérisation et écriture des critères de qualification client.

5.4.4 Cycle de vie du produit

Le client liste et hiérarchise les situations de vie qui lui paraissent importantes. Nous les appellerons **situations de vie de référence** (client). Il est ensuite utile de les connaître.

De nouvelles situations de cycle de vie émergent en raison de l'évolution du contexte politique, économique, industriel, comme la fin de la vie et le recyclage par exemple. Ces évolutions rendent prématurément obsolètes les produits qui n'ont pas intégré, pendant leur conception, les contraintes relatives à ces situations de vie. Ces nouvelles exigences deviennent incontournables et sont imposées par exemple par des normes.

La Figure 49 énumère les situations de vie liées aux étapes du cycle de vie du produit. Le CdCF exprimé par le client définit les attentes pour le produit, mais dans la plupart des cas, il ne mentionne pas systématiquement les situations de cycle de vie du produit. Dans ce cas, il est nécessaire de déterminer ces situations à partir des fonctions exprimées et de les hiérarchiser en fonction de l'organisation hiérarchique des fonctions.

Ces situations de cycle de vie de référence pour le client, initialement exprimées ou pas, vont faire partie des **situations structurantes**.

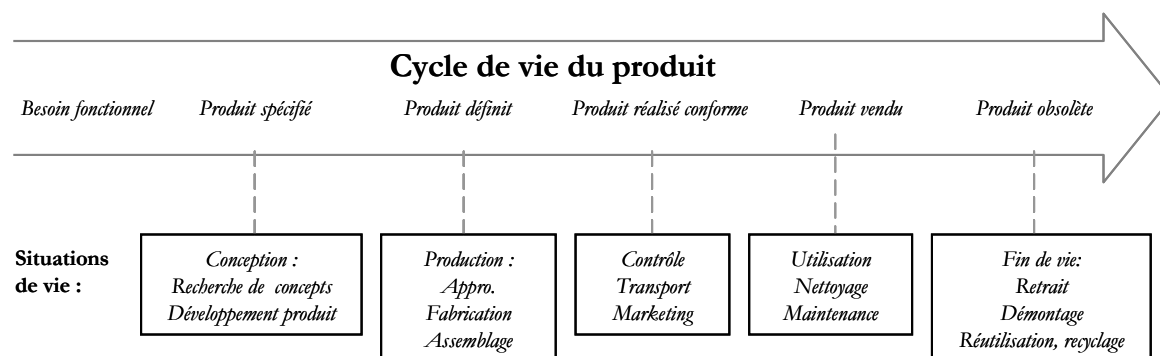


Figure 49: Cycle de vie du produit et situations de vie correspondantes.

5.4.5 Indicateurs de pertinence

Tous les critères de qualification client qui peuvent varier, qui sont négociables et quantifiables sont alors traduits en indicateurs de pertinence; Les variables critères sont alors les variables citées dans le Tableau 7 (colonne "évaluation quantitative").

Du point de vue concepteur, des critères supplémentaires peuvent apparaître. Même si des critères concepteur sont redondants avec des critères de qualification client, il se peut que le CdCF ne les exprime pas et que le concepteur juge utile de les intégrer parmi les indicateurs de pertinence.

Parmi les critères listés dans le §4.1.1, les différents coûts, le rendement de conception constituent des variables critères.

La manipulation des indicateurs environnementaux et leurs valeurs de référence sous forme de contraintes est aisée. Ils constituent aussi directement des variables critères.

5.5 Etape 2 : Approche fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle externe réalisée pour toutes les situations de vie apporte l'exhaustivité des fonctions et des milieux extérieurs (environnement). Le diagramme APTE® permet de représenter les relations fonctionnelles entre système et milieux extérieurs.

Il s'agit ici de retenir les situations de vie pertinentes fonctionnellement pour la conception préliminaire et d'identifier les fonctions qui sont structurantes pour le problème de conception.

Pour ces fonctions, il faudra exprimer les critères d'appréciation et les variables qu'ils font intervenir. Un critère d'appréciation est le caractère retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée [AFN 90]. Les critères d'appréciation de ces fonctions structurantes permettront de les exprimer sous forme de contraintes.

Une redondance peut apparaître entre ces critères d'appréciation de fonctions et les critères de qualification du point de vue client.

5.5.1 Fonctions structurantes

Les différents types de fonctions structurantes sont explicités ci-dessous. Ces fonctions sont recherchées pour les situations de vie pertinentes.

▪ **Choix des situations de vie pertinentes** :

Nous retenons comme pertinentes les situations de vie (SV) suivantes :

- SV pertinentes client;
- SV directement liées à la satisfaction de la fonction globale;
- SV mal maîtrisées et identifiées grâce aux retours d'expériences;
- SV conception et/ou fabrication et/ou maintenance (phases où l'entreprise intervient et utilise des règles métier);
- SV liées à la sûreté de fonctionnement (sécurité, disponibilité, fiabilité, maintenabilité).

▪ **Fonctions liées aux critères de qualification** : Les fonctions directement liées aux critères de qualification client retenus à l'étape précédente sont des fonctions structurantes.

▪ **Fonctions à flexibilité zéro** : Le CdCF permet de définir le besoin et de connaître les fonctions de service et les fonctions contraintes du produit, dont il énumère les critères d'appréciation (niveau d'un critère, flexibilité d'un niveau, limite d'acceptation, etc.). Nous retenons celles dont la flexibilité des niveaux est très faible ou nulle.

▪ **Fonctions à risque** sur le plan technique, sûreté de fonctionnement :

Une fonction à risque peut être identifiée grâce à des problèmes déjà rencontrés, à des retours d'expériences, etc. Il est nécessaire de capitaliser l'information.

Selon Ullman [Ull 03], les fonctions les plus critiques sont celles qui semblent les plus difficiles à réaliser et pour lesquelles les connaissances sont faibles ou celles étant les plus importantes dans les exigences client. Ainsi, une fonction à risque peut résulter d'une précision ou exactitude imposée par le client.

Une fonction jamais réalisée peut également être risquée. L'analyse du risque dépend de la nouveauté, de la complexité, des événements survenus et de la gravité des conséquences [Ler 92].

Enfin, pour réaliser une mission, un système doit posséder de l'énergie, être capable d'en acquérir, pouvoir filtrer, réduire ou éliminer tout excédent d'énergie. Un risque fonctionnel peut exister et être lié à la mauvaise gestion de l'énergie, entraînant un dysfonctionnement [Des 99].

▪ **Fonctions contraintes impératives** : Ces fonctions contraintes au sens de l'analyse fonctionnelle [AFN 90] sont imposées par les milieux extérieurs (environnement, technologie, marché, situation et choix de l'entreprise). On peut distinguer les fonctions contraintes qui concernent le comportement ou les performances du système (exigences légales ou réglementaires, imposition de solution ou de matériau, etc.), des contraintes structurelles qui ne concernent pas directement la réalisation d'une fonction (délais, approvisionnement, etc.).

▪ **Règles métier** : Elles sont identifiées par l'analyse fonctionnelle durant les situations de vie conception et/ou fabrication et/ou contrôle et/ou maintenance. Elles interviennent chaque fois que l'entreprise doit, par exemple, fabriquer "avec le potentiel de l'entreprise".

- Règles de savoir faire de l'entreprise : Il peut s'agir de règles de conception, de calcul, de fabrication, d'évaluation de coûts ou de durées, etc.

- Un constructeur automobile dispose par exemple de référentiels techniques, qui capitalisent le savoir faire et donnent des critères à respecter : garde au sol, protection des faisceaux électriques, commande des sièges (ergonomie), préconisations de conception en vue du recyclage, etc.

- Des règles de développement de produit (guidelines) "intégrant le paramètre environnement" existent chez certains fabricants [Jan 00]. Outre les matériaux proscrits ou conseillés, elles listent des instructions de conception, en vue par exemple de faciliter leur démontage, leur recyclage.

- Des règles de fabrication liées au savoir faire de l'entreprise, aux capacités machines. Elles induisent des contraintes de conception (rayons de courbures de tubulures, épaisseurs minimums de carter, etc.).

- Règles générales de conception : Les règles de conception architecturale [Pah 96] concernent le choix des formes appropriées aux procédés de fabrication ou facilitant le montage.

- Pour obtenir une certaine finition ou tolérance, des règles métier indiquent le type d'outil ou de matériau à employer.

- Règles métier liées à l'application des codes¹⁷. Ces codes de dimensionnement concernent un type de produit ou un secteur d'activité.

Par exemple, les codes "règles de conception et de construction" (RCC) de l'industrie nucléaire française, ont été rédigés afin de couvrir, pour différentes familles de matériels (génie civil, matériels mécaniques, matériels électriques, combustibles, etc.), les phases de conception, réalisation et mise en service.

Les types de calculs seront fonction des types d'événements auxquels devront faire face les structures :

- statiques (efforts, déplacements différentiels, etc.)

- dynamiques (séisme, explosion, impact, vibrations, etc.)

Ils permettent de garantir les structures contre différents dommages potentiels : déformation excessive, instabilité, fatigue, fluage.

Les codes imposent la démarche pour concevoir, les solutions proscrites, les modes de fabrication, les contrôles et la maintenance à effectuer.

D'autre part, ils imposent également les règles de calcul liées à des matériaux et procédés de fabrication prescrits. Les modèles physiques sont fournis. Ce type de contrainte est relevé dans l'étape 4 (approche physique).

Ainsi, des critères concepteur non exprimés dans le CDC peuvent apparaître. Ces éléments de calcul intermédiaires sont utiles à comparaison des alternatives de conception. Ces critères concepteur sont des indicateurs de pertinence de la conception (voir §5.5.3) : Même s'ils ne sont pas exprimés par le client, ils sont introduits par le concepteur pour lui permettre de qualifier une fonction.

¹⁷ CODAP (appareils à pression), EUROCODE, BAEL (génie civil), PS (règles parasismiques), RCCM, FEM, CM66, ASME, NEIGE, VENT, etc.

5.5.2 Récapitulatif

Nous proposons le Tableau 8 qui récapitule les différents types de fonctions structurantes et leur nature.

Type de fonction structurante	Nature
Fonction liée aux critères de qualification client	
Fonction à flexibilité zéro	
Fonction à risque	-Problème déjà rencontré, retours d'expérience -Fonction jamais réalisée -Précision, exactitude imposée par le client -Gestion d'énergie
Fonction contrainte impérative	▪ <u>Comportement ou performances du système</u>
	-Respect norme ou règlement : documents normatifs à caractères technique, industriel et/ou logistique, relative au degré de protection (IP) des personnes ou des matériels ou au contrôle.
	-Interchangeabilité
	-Interdiction ou imposition du principe d'une solution : -contexte industriel, technologies utilisables -concept qualifié (aéronautique ; industries chimiques et pharmaceutiques, etc) -propriété industrielle -risque connu
	-Critères environnementaux [JAN 00] : -exigences légales, normes : impact sur l'environnement (rejets, pollution, déchets, bruits, consommation de ressources, recyclabilité), réutilisation, retraitement, stockage -démontabilité, en vue de la séparation des matériaux (matériaux, liaisons) -coûts environnementaux : équipements, mises en conformité, matériaux (type et nombre de matériaux différents dans le produit), assemblages, reprise emballages
	-Matériau : -imposition : alimentaire, vieillissement, résistance (mécanique, chimique, thermique, etc.) -coût
	▪ <u>Contraintes structurelles</u>
	-Délai aboutissement
	-Matériau : -indisponibilité -interdiction (danger, norme, etc), dans le produit ou dans le process -dépendance matériau/procédé (si procédé imposé) -approvisionnement, fournisseur -fonctions de mise en œuvre (usinabilité, facilité d'assemblage, traitement de surface, etc.)
Règles métier	▪ <u>Règles de savoir faire de l'entreprise</u>
	-Référentiels techniques
	-Règles de développement de produit (guidelines)
	-Règles de fabrication propres au métier de l'entreprise, capacités machines
	▪ <u>Règles générales</u>
	-Règles de conception architecturale [PAH 96]
	-Règles de fabrication
	▪ <u>Règles métiers liées à l'application des codes</u>
	-Manière de concevoir, solutions proposées
	-Modes de fabrication
	-Contrôles, maintenance

Tableau 8: Différents types de fonctions structurantes et nature des fonctions.

5.5.3 Indicateurs de pertinence

Nous avons vu dans le §4.1.2 les différents critères de pertinence du concepteur du point de vue fonctionnel.

Un indicateur de pertinence doit permettre la qualification de la réalisation de la fonction : leurs critères d'appréciation énoncés dans le CdCF constituent les variables critères.

Du point de vue des règles métier, l'éloignement par rapport à une référence permet de quantifier la maîtrise de la réalisation d'une fonction en liaison avec une action de conception, de fabrication ou d'industrialisation.

L'éloignement à une référence peut également traduire un risque.

D'autre part, certaines situations de vie liées à l'éco-conception prennent de l'importance. Le démontage par exemple impose de nouvelles fonctions contraintes. Les temps de démontage, le nombre d'éléments d'interface et d'outils associés différents constituent des variables critères.

Les variables critères sont :

- Variables pertinentes de la réalisation d'une fonction;
- Variables de référence des codes de calculs professionnels ou des acquis de l'entreprise.

5.6 Etape 3 : Approche organique

Le concept de solution que l'on souhaite modéliser, est à cette étape décrit par un premier organigramme technique, assemblage de blocs fonctionnels. Toutefois, afin de mieux percevoir les contraintes d'interfaçage, les méthodes MAL'IN préconisent de rajouter à l'organigramme technique les milieux extérieurs [Tre 03]. L'organigramme technique ainsi étendu est représenté Figure 50.

Cet organigramme permet d'identifier et de définir les caractéristiques structurantes suivantes :

- les éléments standards - à choisir
 - à dimensionner;
- les éléments non définis, à dimensionner;
- les contraintes d'interfaçage.

Cependant, seuls les premiers niveau uniquement définissent le produit au stade du concept. Au-delà, d'autre choix sont réalisés (conception architecturale).

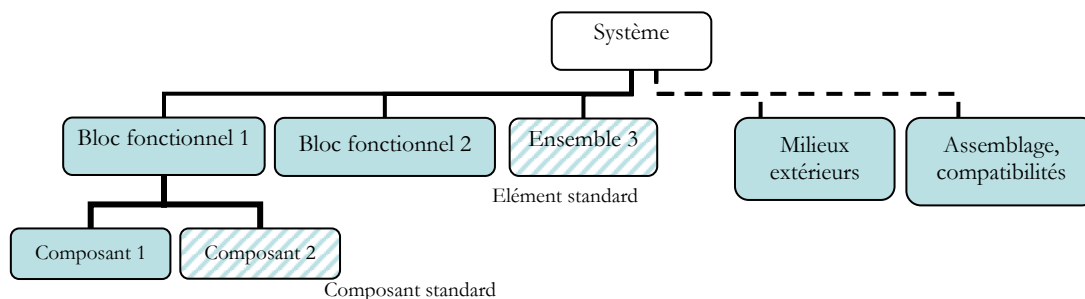


Figure 50 : Organigramme Technique étendu.

5.6.1 Eléments standards

Dans une conception pour production série, le nombre de réutilisations est plus important que pour les conceptions de produits unitaires. Les composants standards peuvent représenter entre 50 et 80% des éléments mécaniques d'une conception [Hic 02c].

- Les **composants standards à choisir** sont des composants sur catalogues, prêts à l'emploi. Leur choix se fait sur des paramètres pertinents, relatifs aux fonctions qu'ils remplissent. Ils sont déterminés à partir d'abaques, de tableaux, de relations constructeurs, etc.

Ces éléments standards imposent leurs contraintes intrinsèques : contraintes dimensionnelles, d'interfaces, d'alimentation en énergie. Il s'agit de variables identifiées du problème, mais qui ne peuvent prendre que des valeurs standards.

Il existe d'autre part des contraintes de situations de vie, non directement liées à leurs fonctions de service et listées par les fabricants (contraintes de montage, d'utilisation, de stockage ou transport, etc.). L'effort de démontage d'une vis par exemple, dépend de plusieurs facteurs : [Sod 04] propose des fonctions pour le calculer, selon les composants. Des coefficients sont définis pour des intervalles de longueur ou de diamètre, pour des types de tête de vis ou de rondelle utilisée. Ces connaissances peuvent être traduites en contraintes sous forme de règles.

Enfin, il faut également vérifier la susceptibilité des composants standards à des facteurs nuisibles.

- Les **standards à dimensionner** sont des concepts déjà maîtrisés dans l'entreprise (blocs fonctionnels connus ou seuls certains paramètres sont ajustés). Des règles de dimensionnement existent pour ces éléments types.

5.6.2 Eléments non définis

Leur conception est incontournable et donc structurante. Le risque de conception est évalué et les choix doivent se faire en fonction du risque pressenti. Les alternatives mal connues sont écartées, celles qui ont déjà posé des problèmes sont l'objet d'attentions. Ils sont à dimensionner.

L'organigramme technique met en évidence les blocs fonctionnels qui n'ont pas déjà été réalisés, qui ne sont pas déjà connus. Les outils d'aide à l'innovation MAL'IN[®] permettent de trouver de nouveaux concepts. Une fois qu'un concept général pertinent est retenu, il peut y avoir plusieurs façons de le réaliser : la sélection entre plusieurs concepts de solutions (WS) peut ensuite être facilitée par le système d'aide à la décision que nous proposons.

5.6.3 Contraintes d'interfaces

Lors de l'étape fonctionnelle, les relations entre le système et les milieux extérieurs sont listées.

Les interfaces étudiées ici sont les compatibilités des éléments entre eux ou avec les milieux extérieurs; mais il se peut que certaines contraintes d'interface aient déjà été identifiées à l'étape précédente.

Il existe plusieurs types d'interfaces [Cav 95] :

- Interface fonctionnelle, liée à la compatibilité des liaisons mécaniques, électriques, électroniques :
 - connexions, fixations;
 - assemblage;
 - tensions, ampérages;
 - signaux : entrée et sortie, forme;
 - interface informatique (protocoles, langages).
- Interface physique, liée à la compatibilité de caractéristiques de constituants voisins :
 - compatibilité électromagnétique;
 - compatibilité géométrique (encombrements, assemblage, etc.).

Pour les interfaces, la similarité entre deux éléments doit être vérifiée et la conservation d'énergie doit être caractérisée.

5.6.4 Récapitulatif

Nous proposons le Tableau 9, qui récapitule les différents types d'éléments structurants de la description organique du produit.

Elément structurant	Caractérisation	Ecriture (évaluation quantitative)	Evaluation qualitative
Elément standard	▪ <u>A choisir</u>		
	-Contraintes intrinsèques : -dimensions, masse -interfaces -alimentation en énergie	$x,y,z \in \{\text{catalogue}\}$	
	-Contraintes de situations de vie : -contraintes d'utilisation -temps de montage \ démontage -contraintes de stockage ou transport ...	Selon les composants et constructeurs; vitesse < x par exemple temps montage < x Temp. Stockage < x etc.	
	-susceptibilité à des facteurs nuisibles		Sensibilité: oui/non
	▪ <u>A dimensionner</u>		
	-Règles de dimensionnement	Codes de calcul, documents constructeurs	
Eléments non définis			
Contraintes d'interfaces	▪ <u>Voulues, utiles</u>		
	-Contact -géométrie encombrement, connexion fixation, -assemblage -tension ampérage -énergétique	Lois conservation : -énergie -quantité de mouvement -masse	
	-A distance -informatique -thermique (rayonnement) -magnétique	-Protocoles / flux d'info -Lois conservation énergie, quant. de mvt.	
	▪ <u>Non voulues</u> (nuisibles)		
	-Contact -énergétique : échanges, pertes		
	-A distance -CEM (perturbations), magnétique -thermique (rayonnement) ...		Sensibilité: oui/non

Tableau 9: Eléments structurants de la description organique du produit.

5.6.5 Indicateurs de pertinence

L'organigramme technique donne une idée de la complexité du produit à concevoir et des risques inhérents. Il donne en effet une vision quantitative de cette complexité en sériant les composants standards, les composants standards à dimensionner et les éléments à concevoir. De surcroît, il permet de lister les différentes interfaces.

La répartition en standards, entités standard à dimensionner et entités à concevoir fournit une vision des risques de fonctionnement.

Le concepteur a ainsi un outil de maîtrise des risques globaux ou par niveau d'analyse.

Les variables critères sont listées dans le §4.1.3.3. On peut citer :

- Nombre d'éléments et d'interfaces, complexité des couplages entre ces interfaces;
- Nombre d'outils de montage;
- Masses thermiques globales ou locales;

- Flux thermiques;
- Dilatations;
- Teneurs en eau;
- Variables liées à la sécurité;
- Eloignements à des références.

5.7 Etape 4 : Approche physique

Nous avons vu que la résolution d'un problème de conception consiste à partir de spécifications fonctionnelles d'un objet, d'en construire une représentation, qui doit vérifier, entre autres, des lois qui traduisent les principes physiques.

Le modèle du problème de conception architecturale doit comporter une description des phénomènes physiques pertinents mis en jeu dans le fonctionnement. Pour être capable de les lister, il faut pouvoir analyser le comportement du système et identifier les variables structurantes mises en jeu.

Nous proposons pour cela une description du produit mettant en évidence les flux. Elle permet d'identifier les phénomènes physiques nécessités par la réalisation des fonctions, mais également les phénomènes qui sont induits et peuvent même s'avérer nuisibles.

5.7.1 Identification des comportements physiques structurants

Chakrabarti et al. utilisent une représentation du concept et de la situation physique, basée sur des phrases comprenant des informations sur la fonction, la structure, les variables physiques [Cha 92]. Ils proposent une démarche pour identifier les contraintes importantes, à partir de la connaissance sur le concept de solution initial. L'analyse de phrases décrivant les actions, permet d'identifier ce qui relève de la structure, de la fonction, et de variables physiques. Il faut par contre, pour lister les contraintes physiques, identifier les interactions fonction-comportement. Il faut alors utiliser des bases de données de types de contacts, de composants, de fonctions (et verbes associés), d'effets physiques. Différents diagrammes sont nécessaires pour représenter les relations et interactions entre variables physiques, entre effets physiques présents dans le concept.

Une fonction est un flux d'énergie, de matière ou d'information entre des objets; où le changement d'état causé par un (ou plus) de ces flux [Ull 03].

Nous proposons de réaliser les blocs diagrammes fonctionnels avec les éléments des premiers niveaux de l'organigramme technique, et d'y représenter les flux entre les éléments du produit suivants : contact, énergie, matière, estime, information.

Cette représentation permet de visualiser le chemin fonctionnel minimal pour réaliser les conditions fonctionnelles, et ainsi d'identifier les éléments clés faisant transiter le flux fonctionnel principal.

Les flux fonctionnels font appel à des phénomènes physiques. Les comportements physiques pertinents apparaissent. A chaque flux physique correspond une (ou plusieurs) contrainte(s) :

- Pour les flux véhiculant de la matière, de l'énergie, les conditions de passage sont identifiées grâce aux lois de conservation. Il convient donc d'écrire les bilans (conservation de la masse, de l'énergie, etc.) et les conditions aux limites.

- Les flux induits résultent des gradients de variables d'état (CEM, pertes de charges, etc.). Les outils MAL'IN[®] facilitent l'écriture d'un graphe exhaustif (Figure 51) et l'identification des flux : L'aide à la construction des graphes (annexe III) propose notamment d'identifier les effets induits (Tableau 10).

- En intégrant les milieux extérieurs, le fonctionnement du système peut être complètement décrit. Le bloc diagramme substances-champs est ordonné en terme de proximité des composants; leurs interactions sont établies plus aisément.

Les interactions avec des milieux extérieurs peuvent être un flux fonctionnel utile ou nuisible. Le comportement, la tenue du composant lui même doit être prise en compte si il est victime des effets nuisibles.

- Ainsi, des critères matériaux complémentaires peuvent être identifiés. Il peuvent être liés à des fonctions mécaniques (rigidité, élasticité, etc.), ou à des fonctions spécifiques (thermique, chimique, etc.).

Gradients	Effet produit	Effet induit
Température	Flux de chaleur	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Fluage
	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Pression	Débit de fluide	Fuites
	Migration de fluide dans le solide	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Pollution, Encrassement
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Pollution, Dépôt, Encrassement Givrage, Prise en glace
Potentiel Electrique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
	Champ magnétique	Polarisation
Champ magnétique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Corrosion

Tableau 10: Effets induits par les effets générés par des gradients (cf. annexe III).

Pour l'exemple de l'aspirateur, l'effet produit par la différence de pression est le débit d'air; l'effet induit est l'encrassement du sac. Le GSC (Figure 51) identifie l'action suivante : la poussière obstrue le sac.

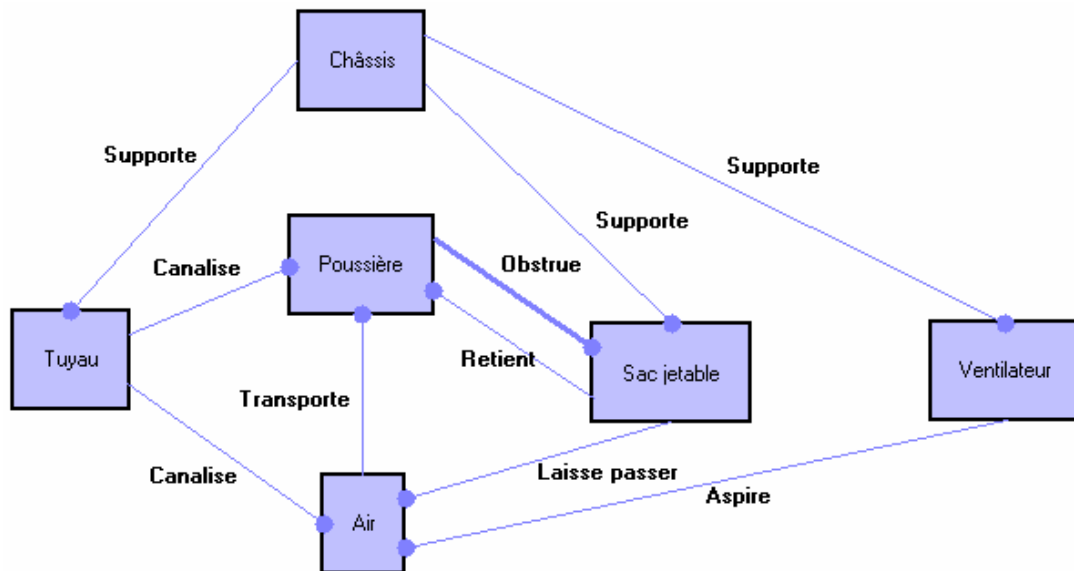


Figure 51: Graphe des associations Substances-Champs de l'aspirateur.

Chaque action du graphe, entre deux composants, permet d'identifier les variables pertinentes dans le phénomène physique mis en jeu, ainsi que les relations à écrire (Tableau 11).

Les paramètres pertinents au niveau système, ne le sont pas forcément au niveau composant. Il convient de discerner le niveau systémique pertinent à décrire.

Description du graphe			Comportement physique	
Composant	Action	Composant	Variables	Relations
Ventilateur	Aspire	Air	Débit, pression	Conservation
Sac jetable	Laisse passer	Air	Débit, pression, porosité	Conservation du débit Pertes de charges
etc.	etc.	etc.	etc.	etc.

Tableau 11: Exploitation du GSC et identification des comportements physiques à traduire.

5.7.2 Récapitulatif

Le Tableau 12 récapitule les différents types de caractéristiques structurantes liées aux comportements physiques.

Caractéristique structurante	Ecriture (évaluation quantitative)
Eléments clés, faisant transiter le flux fonctionnel principal.	
Comportements physiques pertinents et prépondérants	▪ <u>Lois de conservation</u> -de la masse -de l'énergie (chaleur, énergie mécanique ou de déformation...) -de la quantité de mouvement
	▪ <u>Conditions aux limites</u>
	▪ <u>Relations de couplage induites</u> -Pertes de charges -Modèles de contact, frottement -Interaction électromagnétique
Tenue de composant aux effets nuisibles	
Règles de calcul imposées par les codes	-CODAP (Code de construction des appareils à pression), -CODETI (Code de construction des tuyauteries industrielles), -CODRES (Code français de construction des réservoirs cylindriques en acier), -COVAP (Code de construction des générateurs de vapeur), -Eurocodes (Règles de calcul de structures en acier, béton, bois, etc.), -PS92 (Règles de construction parasismique), -Règles NV 65 modifiées 99 et N 84 modifiées 2000 (définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions), -Règles BAEL 91 modifiées 99 et BPEL 91 (Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé et précontraint), -Règles FEM (règles de dimensionnement des appareils de levage), -Code RCCM : Règles de conception et de construction de matériels nucléaires, etc.
Critères matériaux	-Fonctions mécaniques (rigidité, élasticité, résistance fatigue, usure, chocs ...)
	-Fonctions spécifiques : thermique, chimique (résistance à la corrosion...), électrique, optique, magnétique, acoustique ...

Tableau 12: Différents types de caractéristiques structurantes liées aux comportements physiques.

5.7.3 Ecriture des modèles

Même si l'écriture des modèles se fait à un stade ultérieur de la démarche d'aide à la décision (voir Figure 52), il est intéressant au niveau de l'analyse et structuration du problème de savoir si l'on est capable d'écrire les modèles afférents aux caractéristiques structurantes.

Les outils que nous avons décrits servent aussi dans la phase de formalisation des contraintes et d'écriture des modèles. Vernat [Ver 04] propose une approche de formalisation de modèles adaptée à la prise de décision en conception architecturale. Cette méthodologie

visé à obtenir des modèles à la fois parcimonieux et exacts. Ainsi, les modèles sont plus faciles à exploiter en conception préliminaire et cohérents avec les attentes du concepteur.

La méthode développée repose sur : une approche globale basée sur la décomposition fonctionnelle pour conserver une cohérence entre les modèles des différents composants, l'utilisation de quatre critères de qualification des modèles permettant de s'assurer de leur adéquation avec les objectifs de la conception préliminaire, l'utilisation des techniques d'adaptation de modèles, permettant de faire des choix de conception à l'aide de solveurs de PSC.

Les quatre critères de qualification utilisés sont : la parcimonie du modèle, liée au nombre minimal de variables et d'équations décrivant correctement le comportement du système, l'exactitude du modèle, estimant l'adéquation entre les résultats du modèle et des résultats issus d'un modèle de référence, la précision du modèle, évaluant l'étendue du domaine de variation de chaque variable, due à un manque de connaissance ou à une incertitude et la spécialisation du modèle, qui est une mesure de la restriction du domaine d'application du modèle, relativement à la quantité d'information introduite dans le modèle. Les quatre critères retenus sont pertinents de la conception préliminaire dans la mesure où : la parcimonie assure la simplicité du modèle, la spécialisation contribue à définir l'étendue du domaine d'application du modèle, et donc les limites de l'espace de conception, enfin, l'exactitude et la précision donnent une mesure de la fidélité du modèle à la réalité. Utilisés au cours de la méthodologie proposée, ces critères constituent un moyen de contrôle des modèles jusqu'à atteindre la forme souhaitée.

On ne dispose pas toujours des modèles dans la phase d'analyse du problème, ce qui constitue un risque. L'écriture des modèles des comportements physiques identifiés et pertinents est alors structurante.

5.7.4 Pertinence de la conception

Les trois premières lois d'évolutions proposées par Altshuler permettent de qualifier la réalisation correcte des fonctions, du point de vue de la maîtrise et du contrôle des flux fonctionnels.

Pour la loi d'intégralité des parties, la variable critère est le nombre d'entités concernées.

Pour la loi de la conductivité énergétique, les variables critères sont les pertes énergétiques pour chaque succession d'entités, le niveau exergetique.

Enfin, pour la loi de coordination des rythmes, les variables critères sont la comparaison des rythmes par les fréquences, les positionnements de phase et les amplitudes.

5.8 Synthèse

Au cours des autres étapes de notre démarche d'analyse et structuration du problème de conception, nous avons identifié différentes typologies de caractéristiques structurantes :

- Il peut s'agir d'éléments **fonctionnels** :
 - Fonction à flexibilité zéro du CdCF;
 - Fonction liée aux critères de qualification client;
 - Fonction contrainte impérative;
 - Élément standard, identifié dans l'organigramme technique;
 - Élément clé dans la réalisation du flux fonctionnel principal;
 - Fonction à risque de conception important;
 - Contrainte d'assemblage des blocs fonctionnels : contraintes de compatibilités (liaison mécanique, informatique, compatibilité électromagnétique, etc.).
- Des éléments chiffrés, pertinents de la conception sont également structurants : Ces **critères de pertinence** structurants peuvent être des critères énoncés par le client ou le concepteur comme qualifiant la conception, mais également les critères d'appréciation des fonctions structurantes. Ils sont reliés à des variables critères, qui participent à l'écriture des indicateurs de pertinence.
- Enfin, les **comportements** physiques intervenant dans le fonctionnement du concept sont également structurants.

Une caractéristique structurante peut apparaître plusieurs fois durant les quatre phases de la démarche. La redondance de l'information n'est pas gênante et peut permettre de qualifier le niveau structurant de cette fonction.

L'analyse et structuration du problème de conception constitue la première étape du processus global d'aide à la décision (Figure 31, page 62). Cette phase livre les caractéristiques structurantes du problème de conception architecturale. La Figure 52 détaille dans les phases ultérieures du processus global d'aide à la décision et indique où ces caractéristiques sont ensuite utilisées.

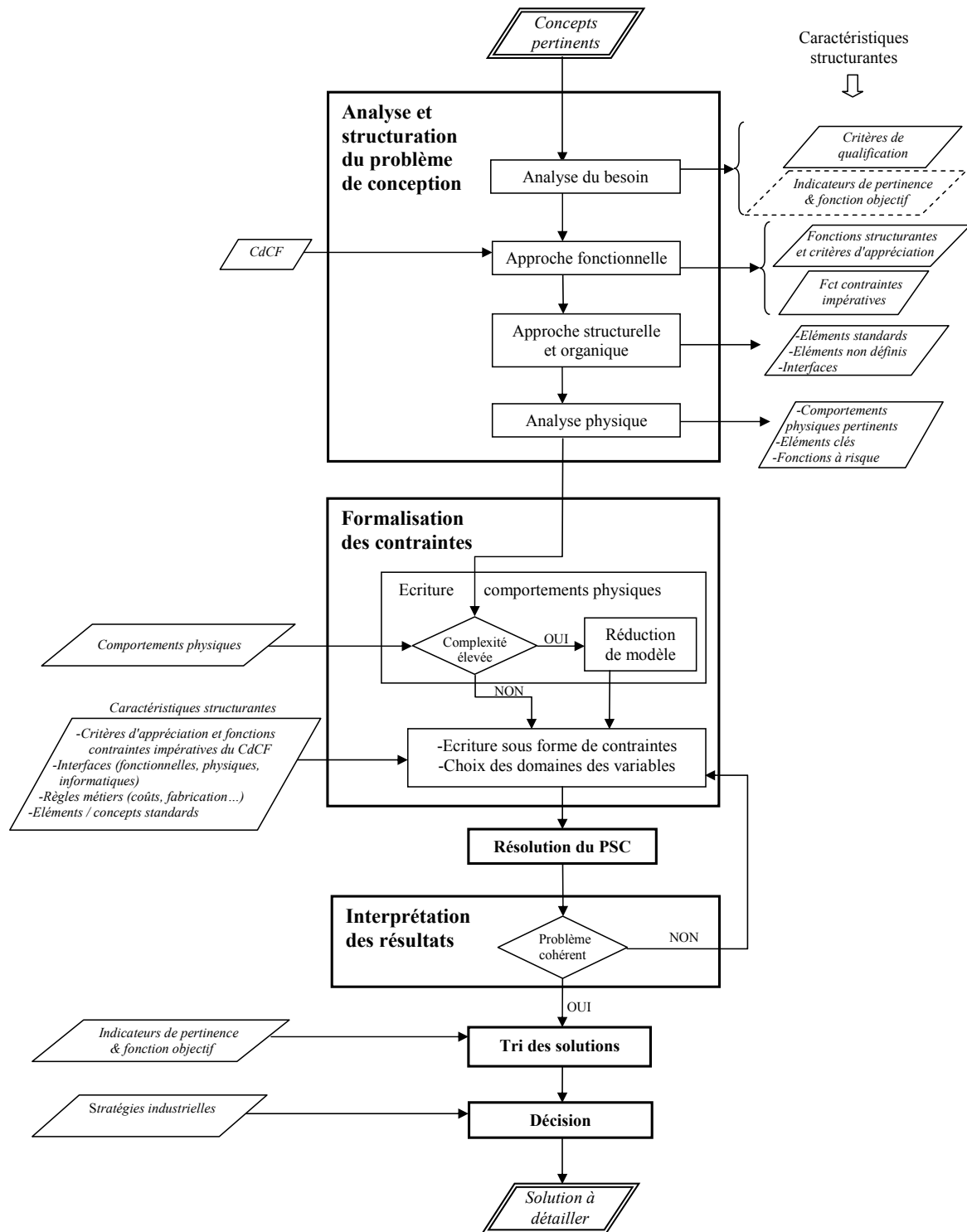


Figure 52: Structuration détaillée de la démarche de conception préliminaire enrichie.

5.9 Vérification de l'exhaustivité

Plusieurs auteurs proposent des listes de spécifications déterminantes pour la phase de conception architecturale. Les tableaux suivants (Tableau 13 à Tableau 18) mettent en relation ces spécifications, exigences, ou indicateurs avec les étapes de notre démarche de recherche des caractéristiques structurantes du problème de conception préliminaire.

Pugh notamment propose le PDS (Product Design Specification) [Pug 91] (Tableau 14), qui contient les résultats attendus du développement du produit et les contraintes imposées sur la conception [Die 00].

Pahl et Beitz proposent également d'inventorier les objectifs de conception afin d'identifier des critères d'évaluation. Les listes de contrôle (checklists) assurent une approche systématique. La checklist pour la conception architecturale [Pah 96] a pour but d'aider le concepteur à identifier toutes les exigences pertinentes (Tableau 13).

Ces tableaux vérifient que toutes les indications des listes de la littérature se retrouvent au moins dans une des étapes de notre démarche de recherche des caractéristiques structurantes.

Checklist pour l'établissement des exigences [Pah 96]		Etape(s) de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes
Géométrie	Taille, hauteur, largeur, diamètre, espace nécessaire, nombre, disposition, connexion,	Critères de qualification client (structurels)
Cinématique	Type de mouvement, direction du mouvement, vitesse, accélération	-Approche fonctionnelle (solllicitations extérieures) -Performances attendues par le client
Forces	Direction, norme de force Chargement, fréquence, déformation, rigidité, élasticité	-Approche fonctionnelle (solllicitations extérieures) -Performances attendues par le client
Energie	Rendement, pertes, dissipation, pression, température Alimentation, stockage, conversion, capacité	-Performances attendues par le client -Approche physique
Matériau	Propriétés physiques et chimiques du produit final, matériaux proscrits	-Critères marketing (client) -Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle) -Fonctions mécaniques ou spécifiques (approche physique)
Signaux	Entrées, sorties, forme, visualisation	Contraintes d'interface (approche organique)
Sécurité	Normes, protection des systèmes, protection de l'environnement et de l'opérateur	Critères de qualification client
Ergonomie	Relation homme-machine, type d'opération, clarté de l'interface, esthétique	-Critères marketing (client) -Règles métiers (approche fonctionnelle)
Production	Limitations de l'entreprise, dimensions possibles maximums, moyens de productions, qualité et tolérances	-Critères économiques (client) -Règles métiers (approche fonctionnelle)
Contrôle qualité	Possibilités de test et mesures, application de normes et réglementations	-Approche fonctionnelle -Interfaces (approche organique)
Assemblage	Installation, implantation	-Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle) -Contraintes d'interface (approche organique)

Transport	Limitations, autorisations, moyen de transport (dimensions, poids)	Critères de qualification client (structurels)
Fonctionnement	Bruit, usure, usage spécial, atmosphère et conditions de fonctionnement particulières	-Critères de qualification client (structurels et marketing) - Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle) -Critères matériau (approche physique)
Maintenance	Intervalle d'intervention, changements de pièces, réparation, nettoyage	-Critères de qualification client (fonctionnels) -Durée de vie des éléments standards (approche organique)
Recyclage	Réutilisation, déchets et résidus, stockage	- Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)
Coûts	Coût de fabrication maximum, coût d'outillage, investissement et dépréciation	Critères de qualification client (économiques et marketing)
Délais	Délais de développement, planning de projet et jalons, date de livraison	-Critères marketing (client) - Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)
Identification des exigences déterminantes pour la phase de recherche d'architecture [Pah 96]		
Exigences liées à des interfaces dimensionnelles		Contraintes d'interface (approche organique)
Exigences déterminantes pour la disposition de composants (direction de flux, mouvement, position, etc.)		-Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle) -Approche physique
Exigences déterminantes pour le choix de matériaux (corrosion, durée de vie, etc.)		-Fonctions contraintes impératives -Approche physique
Contraintes spatiales déterminantes ou restreignant la recherche d'architecture		-Critères de qualification client (structurels) -Standards et interfaces (approche organique)
Assemblages et composants accomplissant les fonctions principales		-Approche organique

Tableau 13: Liste de spécifications selon [Pah 96].

Product Design Specification [Pug 91]		Etape(s) de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes
<u>Exigences fonctionnelles</u>		
Performances fonctionnelles	Rendement ; précision Flux d'énergie, d'information, de matière	-Performances attendues par le client -Approche physique
Exigences physiques	Taille poids, forme, surface	Critères de qualification client (structurels et marketing)
	Environnement: gammes de température, pression, humidité ; poussière, environnement corrosif ; vibrations, bruit	-Critères de qualification client (structurels) -Approche fonctionnelle -Critères matériau (approche physique)
Cycle de vie	Fiabilité ; Robustesse ; Maintenabilité ; Réparabilité ; Recyclabilité	Critères de qualification client (fonctionnels)
	Testabilité	-Approche fonctionnelle -Interfaces (approche organique)
Facteurs humains	Esthétique	Critères marketing (client)
	Interface homme-machine	Critères marketing (client)
<u>Contraintes d'entreprise</u>		
Stratégie	Time to market	-Critères marketing (client)
	Marché, concurrence	-Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)

Exigence de fabrication	Pratiques, attitudes, directives entreprise Capabilités machines Matériaux proscrits	-Règles métiers (approche fonctionnelle) -Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)
Fournisseurs	Relations avec des fournisseurs limitant les choix	-Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle) -Eléments standards (approche organique)
Propriété industrielle	Marques, logos	Critères marketing (client)
Performances financières	Retour sur investissement prévu	Critères de qualification client (économiques)
<u>Exigences légales, sociales, politiques</u>		
Règles de sécurité et environnementales	Exportabilité	Critères de qualification client
Normes, lois	Sécurité, pièces critiques	Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)
Propriété industrielle	Brevets	Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)

Tableau 14: Liste de spécifications selon [Pug 91].

Types d'exigences client [Ull 03]		Etape(s) de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes
Performance fonctionnelle	Flux d'énergie, d'information, de matière Séquence d'opérations	Approche physique
Facteurs humains	Apparence Force et mouvement de contrôle Facilité de contrôle et sensations	Critères de qualification société, marketing
Exigences physiques	Enveloppe spatiale disponible Propriétés physiques	-Critères de qualification client (structurels) -Eléments standards et interfaces (approche organique) -Approche physique
Fiabilité	MTBF, sécurité	Critères de qualification client (fonctionnels)
Eléments liés au cycle de vie	Distribution Maintenabilité, facilité de diagnostic, testabilité, réparabilité, nettoyabilité Facilité d'installation, déclassement	Critères de qualification client (fonctionnels) -Eléments standards (approche organique) -Critères environnementaux (approche fonctionnelle)
Ressources	Temps, coût, capital, équipement, normes, environnement	Critères de qualification client (économiques, marketing)
Exigences de fabrication	Matériaux, quantités, capacités entreprise	-Règles métiers (approche fonctionnelle) -Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)

Tableau 15: Liste de spécifications selon [Ull 03].

Propriétés des systèmes techniques [Hub 01]		Etape(s) de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes
<u>Propriétés externes</u>		
Propriétés fonctionnelles	Fonctions principales, auxiliaires Fonctions de propulsion, régulation, contrôle, connexion	-Approche fonctionnelle -Interfaces (approche organique)
Performances	Vitesse, puissance, capacité, dimensions fonctionnelles, taille	Performances attendues (critères de qualification client)

Propriétés opérationnelles	Fiabilité, sécurité, durée de vie, aptitude à la maintenance Exigences en espace, énergie, entretien	-Critères de qualification client (fonctionnels) -Eléments standards et interfaces (approche organique)
Fabrication	Fabrication, contrôle qualité, test	Approche fonctionnelle
Distribution	Stockage, emballage, transport, publicité	-Approche fonctionnelle (si situation de vie pertinente) -Approche organique
Délais	Engagements et délais de livraison Service client, étude de marché	Critères marketing (client)
Fin du cycle de vie et environnement	Déclassement, désassemblage, recyclage, décontamination, élimination des déchets	-Critères de qualification client (économiques) -Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)
Ergonomie	Aptitude à être utilisé (confort, sécurité)	Critères de qualification société, marketing
Esthétique	Apparence : forme, couleur, surface; coordination avec l'environnement; mode Sensations, odeur, bruit	Critères de qualification société, marketing
Conformités (loi et société)	Lois, responsabilités Normes, brevets Ethique, culture	-Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle) -Critères marketing (client)
Propriétés économiques	Coût cycle de vie: fabrication, assemblage, usage Productivité, retours	Critères de qualification client (économiques)
<u>Propriétés internes</u>		
Caractéristiques de conception	Principe technique Opérations de transformation	-Approche organique -Approche physique
Propriétés de conception élémentaires	Structure (composants, arrangement) Eléments (forme, dimensions, matériaux, fabrication, surface et tolérances)	-Approche organique -Règles métiers (approche fonctionnelle)
Propriétés de conception générales	Résistance : corrosion, usure, pollution Rigidité, dureté Génération de bruit	- Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle) -Critères matériau (approche physique) -Critères de qualification société, marketing

Tableau 16: Liste de spécifications selon [Hub 01].

Indicateurs globaux de performance [Tom 02]		Etape(s) de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes
Indicateurs sociaux	Emplois supprimés, créés, etc.	Critères de qualification client (économiques)
Indicateurs environnementaux	Taux de recyclage Taux de pollution	Critères de qualification client (économiques)
Indicateurs de marché	Conquête	Critères de qualification société, marketing Fonctions contraintes impératives
Indicateurs de valeur interne de l'entreprise	Savoir faire Bénéfice, économie d'énergie Temps de conception, fabrication	-Règles métier -Critères de qualification client
Indicateurs de coût	Coût de conception, de fabrication, d'usage, de recyclage	Critères de qualification client (économiques)
Indicateur de valeur client	Volume de vente, satisfaction Confort, esthétisme, Performance, sécurité	Critères de qualification économiques Critères de qualification société, marketing

Tableau 17: Liste de spécifications selon [Tom 02].

Contraintes d'identification du problème [Qua 94]		Etape(s) de la démarche de recherche des caractéristiques structurantes
Contraintes fonctionnelles	Données d'usage : Service fonctionnel	Fonctions structurantes
	Données écologiques : Nuisances possibles, Modification du milieu par l'objet, Modification de l'objet par le milieu	-Critères de qualification société, marketing (impact environnemental) -Critères de qualification client (robustesse, résistance à l'environnement)
	Données ergonomiques : Manipulations nécessaires, Poids, Montage, démontage, Sécurité, entretien	-Critères de qualification société, marketing -Critères de qualification client (structurels, économiques, technologiques)
Contraintes techniques	Fonctionnement, performances	Critères de qualification client (fonctionnels)
	Matériaux nécessaires	Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)
	Moyens de production	Fonctions contraintes impératives (approche fonctionnelle)
	Ordonnancement des éléments, structure	-Règles métier (approche fonctionnelle) -Contraintes d'interface (approche organique)
Contraintes économiques	Série envisagée	Critères de qualification client (économiques)
	Prix de revient, prix de vente	
	Conditionnement	

Tableau 18: Liste de spécifications selon [Qua 94].

Chapitre 6 Application et résolution

6.1 Confrontation de notre approche à la démarche classique

Nous avons souhaité mettre en œuvre le système d'aide à la décision que nous proposons sur une application concrète de conception architecturale devant déboucher sur une conception détaillée et la fabrication du mécanisme.

D'autre part, nous souhaitons qualifier notre démarche. C'est pourquoi, pour un même problème de conception architecturale, nous proposons l'approche expérimentale suivante :

- Nous avons observé un processus de conception complet, mené par une petite équipe de concepteurs : un groupe d'étudiants a travaillé durant un semestre. Afin de ne pas interférer sur leur comportement, nous avons récupéré leurs rapports et analysé leur démarche a posteriori.

Nous nous intéresserons surtout à la phase de recherche d'architecture, et détaillerons donc leur processus à partir d'un choix de concept : Nous verrons comment ces concepteurs ont procédé et quel résultat ils obtiennent.

- Puis nous comparerons cette démarche à celle que nous proposons avec l'utilisation du système d'aide à la décision, et les améliorations qu'elle peut apporter.

Après l'analyse et la formalisation du besoin, le §6.3 décrit la démarche utilisée pour une conception architecturale classique. Les difficultés qu'elle engendre illustrent celles que le §2.4 a listées.

Cet exemple illustrera également les propos du Chapitre 5 :

- l'analyse et la structuration du problème de conception sera traité dans le §6.4.1;
- l'expression des contraintes ainsi que la résolution et l'exploitation des résultats seront exposés à partir du §6.4.2.

6.2 Analyse du besoin du client et cahier des charges

Il s'agit d'automatiser la remontée périodique des poids d'une horloge monumentale (Figure 53) et de remplacer l'action manuelle sur les manivelles.

L'horloge comporte deux tambours; l'un entraîne le mécanisme d'horlogerie, l'autre permet la sonnerie de la cloche.

Une fois la corde enroulée sur un tambour et le poids remonté, le tambour doit pouvoir tourner librement en sens inverse sous l'effet du poids, pour jouer son rôle moteur sur l'horloge ou le mécanisme de sonnerie.

Le client est la mairie d'un petit village, peu habituée à formuler des spécifications techniques. Toutefois, pour la conception de ce mécanisme, les exigences suivantes ont été exprimées par le client :

- Durée de vie élevée sans entretien (un an minimum);
- Simplicité de mise en œuvre et de dépannage;
- Résistance à l'environnement poussiéreux;
- Coût minimum;
- Il est imposé de ne pas toucher au mécanisme déjà existant. Le dispositif à concevoir devra donc entraîner les axes inchangés des tambours.
- Possibilité de remontée manuelle des poids par l'utilisateur avec la manivelle.

En rédigeant le cahier des charges, les contraintes suivantes sont également apparues :

- Un encombrement maximum doit être respecté.
- Les sollicitations mécaniques engendrées sur l'horloge doivent être comparables à celles engendrées lors de la remontée manuelle des poids.

Il faut, de plus, respecter une fréquence de rotation des tambours correspondant à l'action manuelle (à peu près 1tr/seconde).

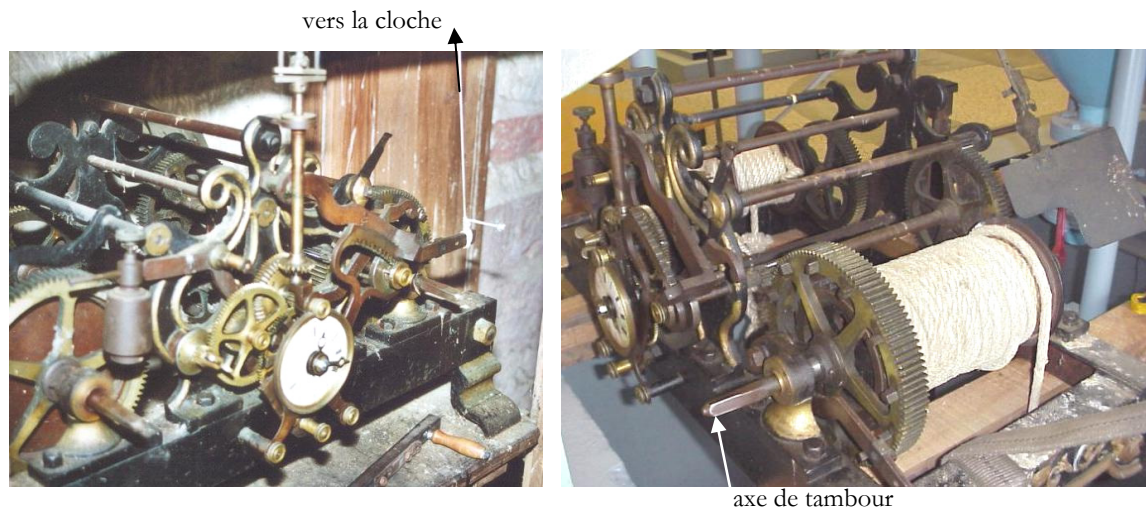


Figure 53: Horloge monumentale.

La Figure 54 recense les fonctions du système à concevoir, pour la situation de vie "utilisation".

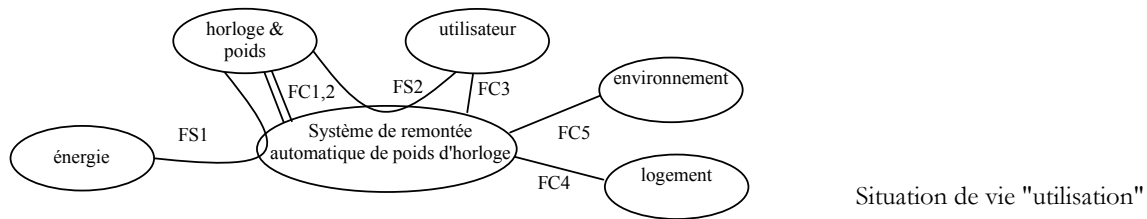


Figure 54: Analyse fonctionnelle externe: analyse systématique des milieux extérieurs.

- FS1: Remonter les poids avec de l'énergie électrique
- FS2: Permettre la remontée manuelle des poids par l'utilisateur
- FC1: S'adapter à l'horloge sans la modifier
- FC2: Ne pas dérégler le fonctionnement de l'horloge
- FC3: Nécessiter un minimum d'intervention humaine
- FC4: Résister à l'environnement poussiéreux
- FC5: Se loger dans l'espace disponible

A partir des fonctions contraintes identifiées, les implications technologiques suivantes sont apparues :

- Engendrer des contraintes sur l'horloge comparables à celles engendrées par la remontée manuelle :
 - Efforts radiaux sur l'arbre tambour $F < 300$ Newton;
 - Fréquence de rotation $N \approx 1$ tour/seconde.
- S'adapter à l'horloge sans la modifier :
 - Le mécanisme devra donc entraîner les axes des tambours inchangés. Remonter les poids en exerçant un couple sur les arbres des tambours (comme la clé de remontée manuelle);
 - Respecter les contraintes dimensionnelles de l'armoire, de l'horloge; ce qui impose de placer une transmission pour déporter l'actionneur.
- Ne pas altérer le fonctionnement de l'horloge dans le temps (déréglage des heures) :
 - Laisser le tambour tourner librement en sens inverse sous l'effet du poids, donc générer un frottement minimum.
- Résister à l'environnement poussiéreux :
 - Utilisation de composants ne craignant pas la poussière; Protéger certaines parties du système.
- Durée de vie élevée sans entretien; Nécessiter un minimum d'intervention humaine :
 - Utilisation de composants sans entretien; conception de mécanisme sans entretien périodique.
- Coût minimum :
 - Minimum de pièces et composants; Utilisation de composants standards.
- Permettre à l'utilisateur la remontée manuelle des poids :
 - Préserver l'extrémité carrée de l'axe d'origine accessible, pour pouvoir utiliser la manivelle.

6.3 Démarche de conception classique

6.3.1 Recherche de concepts

Une première recherche de concepts s'est intéressée à la réalisation du couplage entre tambours et actionneurs :

- Un couplage temporaire nécessite un embrayage;
- Avec un couplage permanent, l'actionneur doit être réversible pour être entraîné par le poids lorsque celui-ci redescend. Cette réversibilité était incompatible avec une fréquence de rotation faible, imposée par le cahier des charges.

Différentes solutions et emplacement d'embrayage et de transmissions ont été évaluées et comparées. Les systèmes "roue libre" ne pouvant fonctionner ici, la nécessité d'un débrayage commandé est apparue.

Cette recherche de concepts a permis de s'orienter vers les choix suivants (voir Figure 55) :

- Chaque tambour est entraîné par un motoréducteur, garantissant une vitesse de rotation du tambour suffisamment lente.
- La transmission s'effectue par poulies et courroies (plates).
- Un plateau support pour l'ensemble du mécanisme est fixé au mur et situé au dessus de l'horloge (voir Figure 55).
- L'embrayage se fait par tension de la courroie (solution cohérente avec le choix de transmission) grâce à un vérin électrique. Au repos, le diamètre de la poulie motrice étant supérieur, la poulie tambour peut tourner librement (voir Figure 57).

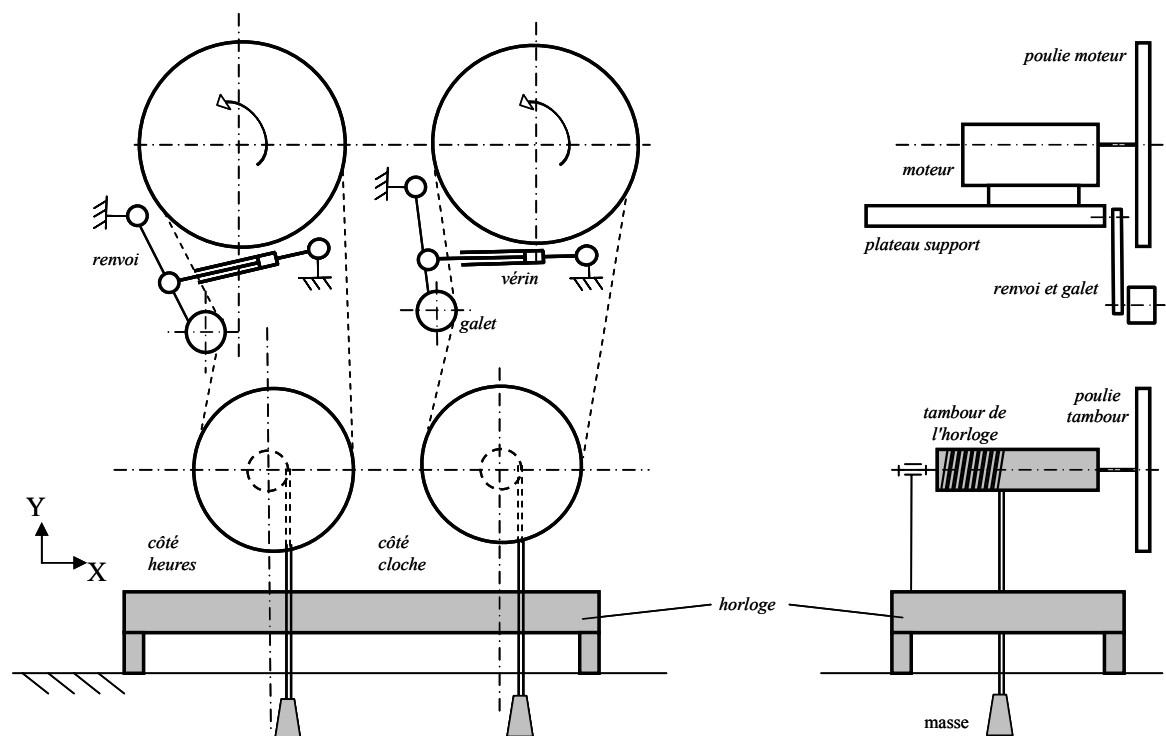


Figure 55: Schéma de l'architecture globale du mécanisme de remontée des poids, situé par rapport à l'horloge.

Une recherche plus avancée dans les concepts a permis de retenir deux concepts de solutions¹⁸ pour la tension de la courroie.

Le diagramme FAST ordonne logiquement les fonctions pour aboutir aux solutions techniques de réalisation. La Figure 56 représente les choix réalisés pour le mécanisme de remontée de poids, notamment les deux alternatives de concepts de solution : Soit la tension de la courroie est réalisée par un galet (WS#1), soit en déplaçant le motoréducteur (WS #2). L'actionneur est un vérin dans les deux cas.

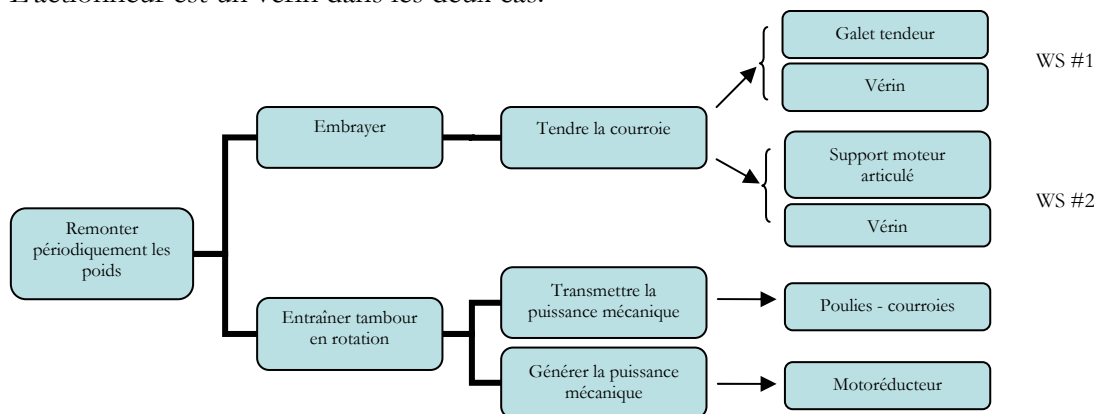


Figure 56: FAST pour la fonction "remonter les poids".

La Figure 57 illustre dans les positions embrayée et débrayée, les deux concepts de solution pertinents qui ont été retenus pour réaliser la fonction d'embrayage. Soit le vérin actionne un levier de renvoi pour déplacer un galet tendeur, soit le vérin déplace un plateau articulé sur lequel est fixé le motoréducteur.

Il s'agit du niveau de concept qui constitue le **point de départ** de notre démarche; les "concepts de solution" (voir §2.2).

Pour la suite du processus de conception, nous allons décrire ci dessous la démarche du groupe de concepteurs, puis détailler l'utilisation de notre démarche (§ 6.4).

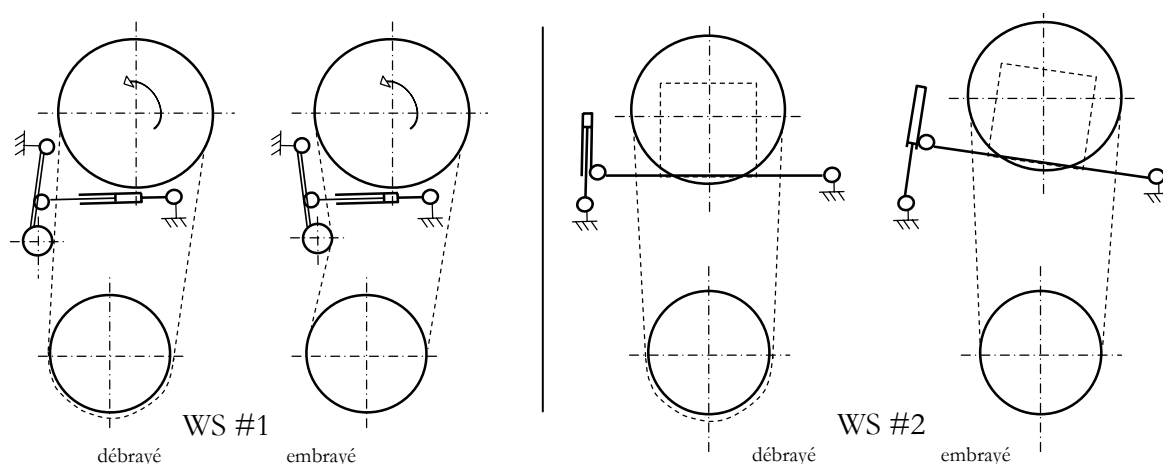


Figure 57: Les deux concepts de solutions (WS) retenus.

¹⁸ Cela correspond à la notion de "working structures" (WS), notamment décrite par Pahl et Beitz [Pah 96]. Elle est définie dans le §2.2.2.

6.3.2 Difficultés identifiées

Suite à l'observation du groupe de concepteur, nous avons pu retrouver plusieurs difficultés évoquées dans le §2.4.

A partir des concepts de solutions définis, il a fallu tout d'abord choisir le concept de solution : l'alternative de tension de la courroie par le levier et galet (WS #1) a été retenue. Les concepteurs ont fait ce choix par intuition, sans avoir à ce stade la possibilité de faire des évaluations.

Le groupe de concepteurs a utilisé une démarche classique de recherche d'architecture. Les problèmes suivants se sont posés :

- Choix d'éléments standards dans des catalogues (motoréducteur, courroie, vérin) : Malgré ici le petit nombre d'éléments standards, et le nombre restreint d'éléments disponibles (3 vérins, 18 courroies, 20 motoréducteurs), les combinaisons d'éléments et leurs positionnements amènent à un nombre important de possibilités.
- Choix de paramètres géométriques (positions relatives des poulies, du galet tendeur; longueurs du renvoi).

Ces caractéristiques du problème de conception sont illustrées Figure 58 :

- les éléments en bleu sont des composants standards, avec leur variables de conception;
- les caractéristiques en rouge sont les variables de conception du mécanisme.

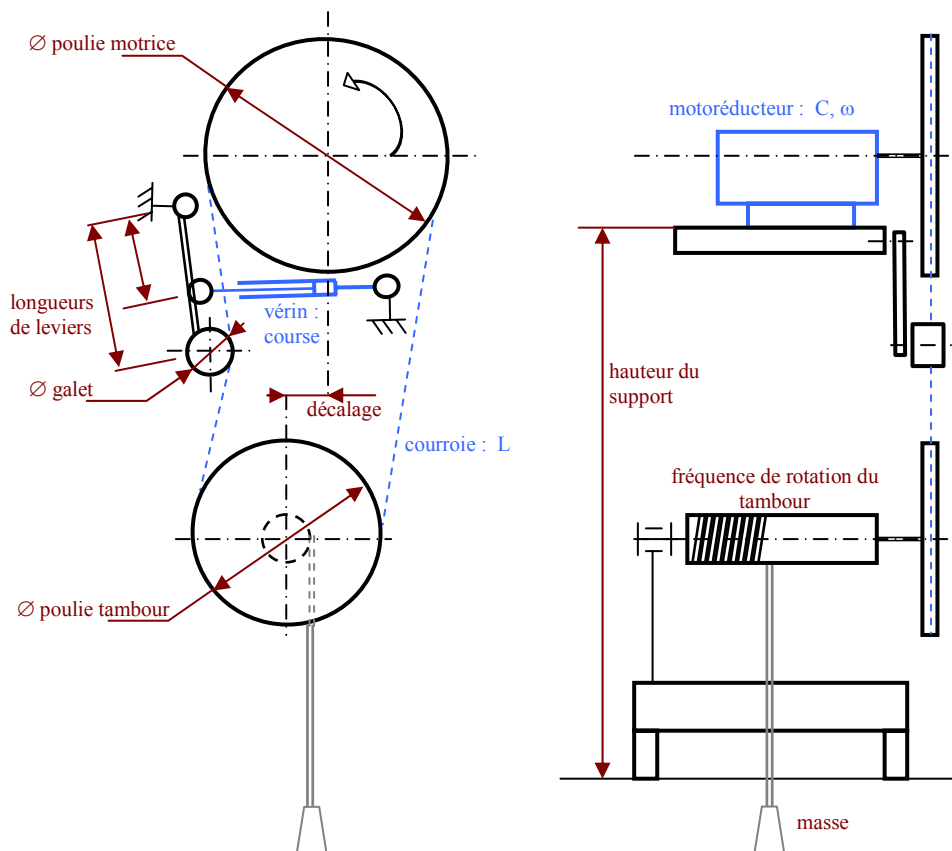


Figure 58: Variables de conception du problème de conception architecturale.

Les **variables de conception** (V_{co}) permettent de distinguer deux configurations de conception [Ver 04]. Recenser uniquement les variables nécessaires et suffisantes à la recherche d'architecture constitue une difficulté. Ici, elles sont recensées intégralement. En réalité, les concepteurs du groupe ne les ont pas toutes prises en compte, en faisant des choix implicites : alignement vertical des poulies par exemple, donc la variable "décalage" disparaît.

Les **variables critères** (V_{cr}) doivent être également identifiées. Elles permettent de qualifier les performances ou la qualité d'une configuration de conception.

Une autre difficulté provient du fait que ces paramètres topologiques et les paramètres mécaniques sont liés entre eux :

- l'effort à développer par le vérin dépend des tensions de courroie, donc du couple, ainsi que de paramètres géométriques (longueurs du renvoi, position du galet);
- la fréquence de rotation et le couple à fournir par le motoréducteur dépendent des diamètres des poulies (le CdCF fixe les masses à remonter ainsi que la fréquence de rotation de tambours);
- la longueur de la courroie dépend des diamètres des poulies, la position du galet nécessaire à la transmission du couple, de la hauteur du support

Ainsi, l'équipe de concepteurs a été obligée de commencer par fixer des diamètres de poulies, avec un écart de diamètre minimum entre poulie motrice et réceptrice (minimum pour garantir l'écartement de la courroie en position débrayée; voir Figure 57).

Cela permet de connaître la fréquence de rotation de la poulie motrice et le couple du moteur nécessaire.

En fixant l'entraxe entre les poulies, l'expression de la longueur de la courroie permet de déterminer la flèche. Plusieurs essais ont été réalisés pour trouver une longueur de courroie normalisée, en calculant ensuite l'effort presseur pour chaque cas.

Enfin, la course du vérin est prise supérieure à la course nécessaire.

Le processus adopté est résumé dans la Figure 59. Plusieurs itérations ont été nécessaires pour trouver une topologie et un choix de composants pouvant fonctionner.

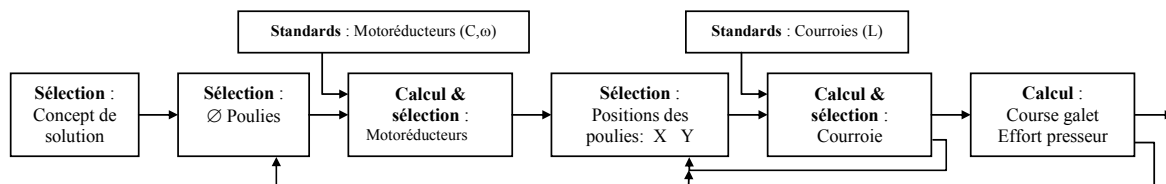


Figure 59: Processus de détermination d'architecture séquentiel et itératif.

Il est nécessaire en adoptant cette démarche, de commencer par fixer certains paramètres de conception, pour pouvoir en déterminer d'autres. La causalité et la séquentialité dans la détermination des paramètres obligent à procéder par essai-erreur.

Outre le temps qu'il nécessite, ce processus a été arrêté lorsqu'une solution a été trouvée; alors qu'il ne s'agit pas forcément de la meilleure. L'équipe de conception a obtenu une architecture satisfaisant les contraintes qu'elle avait listé. L'effort radial maximum engendré sur un tambour de l'horloge est de 123 N pour cette solution. Ce résultat chiffré nous permettra de comparer cette architecture à celle obtenue grâce à notre approche.

6.4 Utilisation du système d'aide à la décision

L'ensemble de la démarche de conception préliminaire enrichie est représenté Figure 52 page 125. Elle nécessite comme point de départ la description des concepts de solution pertinents. La sélection d'un concept unique n'est pas indispensable.

La première phase de cette démarche consiste en l'analyse et structuration du problème de conception architecturale, afin d'en identifier les caractéristiques structurantes. Son déroulement a été détaillé dans le Chapitre 5.

L'ensemble de ces caractéristiques est ensuite transcrit sous forme de contraintes (PSC), dans la deuxième phase de formalisation du modèle de connaissances.

L'exploitation du modèle de connaissances passe par la résolution du PSC, l'interprétation des résultats et le tri des solutions¹⁹.

C'est seulement à ce moment là qu'intervient la décision, pour faire un choix parmi des solutions qui sont toutes des conceptions architecturales valides par rapport aux contraintes énoncées.

La Figure 60 illustre les différents états d'avancement de la conception durant la phase de conception architecturale, pour le mécanisme de remontée de poids.

Cette phase du processus de conception se divise sur la figure en deux parties principales :

- Analyse et structuration : à partir des concepts de solutions pertinents, jusqu'à l'identification des paramètres structurants du problème;
- Formalisation des contraintes et résolution du PSC : jusqu' à des solutions triées.

La démarche globale d'aide à la décision mène finalement au choix, parmi l'espace des solutions, de l'architecture la plus satisfaisante.

La partie basse du tableau sur la Figure 60 indique les résultats de chaque sous-étape.

¹⁹ Rappelons que comme nous nous intéressons au résultat de la conception préliminaire, nous appelons solution de conception, une architecture du mécanisme pour laquelle les valeurs des variables de conception sont telles que cette configuration respecte toutes les contraintes listées.

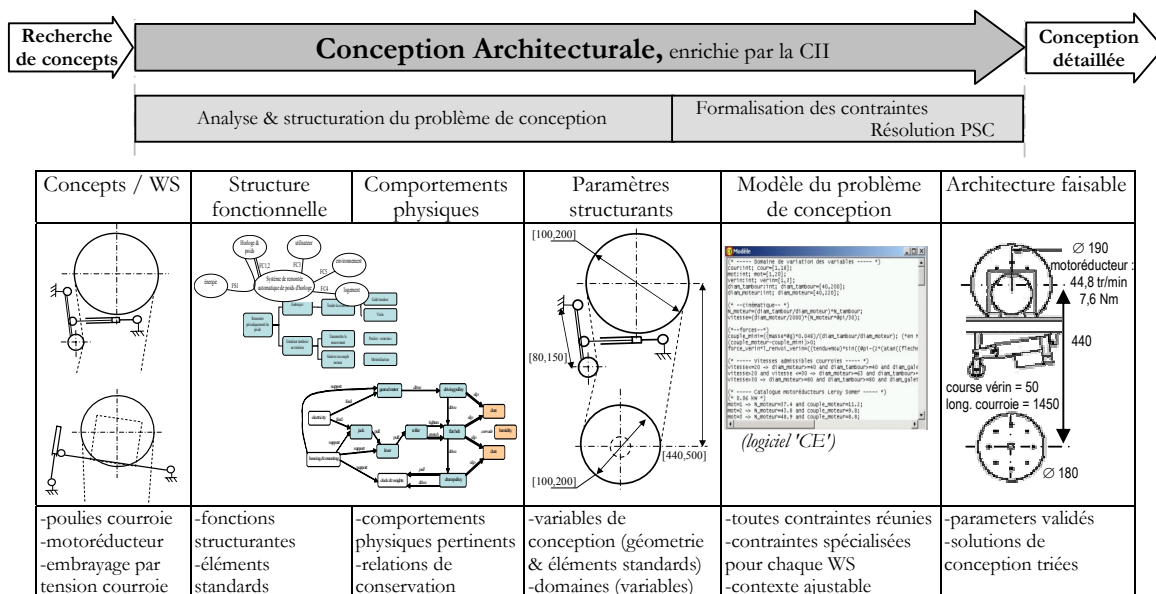


Figure 60: Différents états d'avancement de la phase de conception architecturale enrichie par la CII, pour la conception du mécanisme de remontée de poids.

6.4.1 Analyse et structuration du problème de conception

Cette phase d'analyse et structuration va permettre d'identifier les caractéristiques structurantes du problème de conception, qui seront ensuite traduites sous forme de contraintes

Rappelons qu'il peut s'agir de situations de vie, de variables, de fonctions, de éléments standards, d'interfaces, de comportements physiques (cf. §5.2).

A la fin de chaque étape, un tableau récapitule les variables structurantes obtenues (variable de conception et variable critère), les contraintes qu'il faudra traduire dans le modèle du problème, ainsi que les caractéristiques structurantes utilisées de manière plus qualitative ou qui sont déjà prises en compte dans les choix effectués au niveau concept.

Les fonctions structurantes, les éléments standards, les comportements physiques pertinents vont se traduire par des contraintes du type "domaines de variation" des variables ou "relations" entre les variables.

6.4.1.1 Etape 1 : Analyse du besoin

▪ **Fonction globale** : Ce système rend service à la personne chargée de remonter les poids, en agissant sur l'horloge pour en remonter les poids.
Sa fonction globale est : Entraîner en rotation les tambours pour remonter les poids.

▪ **Critères de qualification client** :

- sollicitations sur l'horloge : effort radial, fréquence de rotation inférieurs aux valeurs générées par la remontée manuelle (voir §6.2);
- durée de vie importante sans entretien, entretien minimum, résistance à l'environnement;
- coût minimum.

Pour cette conception prototype, ni le client ni le concepteur n'avait au départ une idée du coût du mécanisme. Toutefois, ce critère important pour le client servira à classer les solutions obtenues.

Le Tableau 19 synthétise les caractéristiques structurantes identifiées durant l'étape 1, les variables de conception (Vco) ou variables critères (Vcr) qui leurs sont associées, ainsi que les contraintes à traduire dans le modèle.

Dans la dernière colonne de ce tableau, les critères d'entretien, de durée de vie et de résistance à l'environnement ne seront pas traduits en contraintes car ils ont été pris en compte au moment du choix de la transmission par courroie. Ils impliquent également un carter de protection, mais il n'est pas concerné par cette conception architecturale.

	Vco	Indicateurs de pertinence et Vcr	Contraintes à traduire	Utilisation qualitative
Fonction globale	-couple à fournir sur le tambour -masse du poids à remonter		couple moteur > couple à fournir	
Critères de qualification client	-tensions courroie (2 brins)	-effort radial sur axe tambour - ω tambour -coût global	-effort radial $\leq$ effort radial manuel - $\omega \leq \omega$ manuel -coût mini	
				durée de vie et résistance à l'environnement

Tableau 19: Caractéristiques structurantes identifiées à l'étape 1.

6.4.1.2 Etape 2 : Approche fonctionnelle

▪ Situations de vie (SV) pertinentes :

- fabrication : les capacités des machines disponibles limitent les dimensions des pièces;
- fonctionnement horloge : il ne doit pas être perturbé par la présence du mécanisme à concevoir;
- remontée automatique (fonctionnement du mécanisme à concevoir), directement liée à la satisfaction de la fonction globale.

▪ Fonction à flexibilité faible ou nulle :

- encombrement maximum (logement existant) en x,y,z;
- ne pas dégrader l'horloge : engendrer des sollicitations minimales / inférieures aux sollicitations engendrées par la remontée manuelle (cf critères de qualification client).

▪ Fonctions contraintes impératives :

- utiliser l'énergie électrique;
- masse à remonter.

▪ Fonction à risque : ne pas perturber l'horloge (SV : fonctionnement de l'horloge). Le concept prévoit un relâchement de la courroie pour débrayer, mais elle peut occasionner un frottement résiduel dans cette situation. Une différence de diamètre entre la poulie moteur (en position supérieure) et la poulie du tambour permet d'assurer un écartement de la courroie par rapport à la poulie du tambour.

Le Tableau 20 synthétise les caractéristiques structurantes identifiées durant l'étape 2. L'unité utilisée pour les dimensions, dans ce tableau et les suivants, est le millimètre.

	Vco	Vcr	Contraintes à traduire	Utilisation qualitative
SV pertinentes: -fabrication -fonct. horloge -remontée auto.	-diamètres poulies		- $\varnothing$ tournage < 300mm - $\varnothing$ électroérosion ²⁰ <240 -cf fonction globale	-courroie relâchée
Fct flexibilité 0 -encombrement -solllicitations	-effort radial - $\varnothing$ tambour		-hauteur totale $\leq$ 650 -effort radial minimum - $\varnothing$ minimum	
Fct contraintes impératives: -énergie élec. -masse	-masse -couples		-catalogue vérins et motoréducteurs électriques -couple moteur > couple à fournir	choix d'actionneurs électriques
Fct à risque: ne pas perturber le déroulement du tambour	- $\varnothing$ poulie tambour - $\varnothing$ poulie moteur		jeu suffisant : $\varnothing$ poulie tambour+20 $\leq$ $\varnothing$ poulie moteur	frottement résiduel (forme courroie difficile à vide inconnue)

Tableau 20: Caractéristiques structurantes identifiées à l'étape 2.

6.4.1.3 Etape 3 : Approche organique

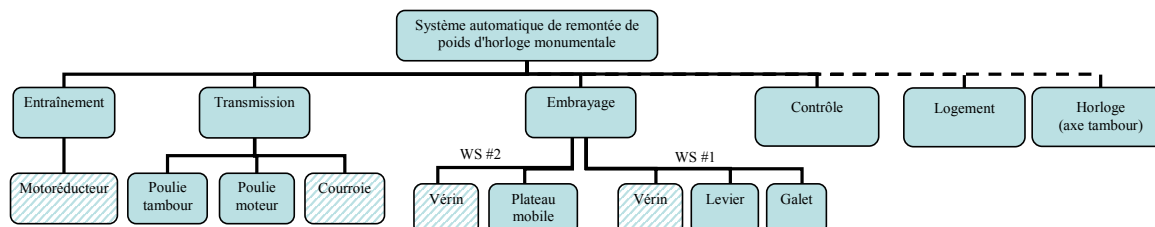


Figure 61: Organigramme Technique étendu du système de remontée de poids d'horloge; avec les deux alternatives de concepts de solution.

L'organigramme technique étendu (Figure 61) décrit la constitution des deux alternatives de concepts de solution pour la tension de la courroie (galet ou plateau mobile). Cet organigramme permet d'identifier les caractéristiques structurantes suivantes :

- Eléments standards : moto réducteur, courroie, vérin.

Ils sont pris dans des catalogues. Leurs variables ne prennent que les valeurs standards. La Figure 62 donne un extrait des tableaux contenant les composants et leurs variables de conception. D'autre part, les éléments standards imposent des règles d'utilisation, données par le constructeur.

²⁰ L'électroérosion est utilisée pour usiner dans la poulie du tambour, le logement de forme carrée permettant l'entraînement de l'axe du tambour.

tr/min		N.m	kg	€	mm			€	mm			€
mot	N_moteur	couple_moteur	masse_moteur	cout_moteur	cour	long_courroie	cout_courroie		verin	cOURSE_verin	cout_verin	
60w1	37.4	11.2	6.3	253	1	750	15		1	50	166	
60w2	43.8	9.8	6.3	253	2	800	16		2	100	182	
60w3	48.9	8.8	6.3	253	3	850	17		3	150	198	
...	...	...	...	...	...	...	...		...	...	...	
20	64.4	24.1	10.3	319	18	1700	34					

Figure 62: Extraits des tableaux des composants standards et leurs variables de conception.

▪ Contraintes d'utilisation des composants standards :

- effort radial maximum admissible pour le motoréducteur : le constructeur indique qu'il dépend de la vitesse de rotation et du couple transmis : $F_{rmax} \approx -7 * \text{couple} + 2000$.
- diamètre minimal des poulies admissibles pour la courroie : il dépend de la vitesse linéaire de la courroie V :
 - si $V \leq 20$ m/s alors $\varnothing_{min} = 40$ mm;
 - si $V > 20$ m/s et $V \leq 30$ m/s alors $\varnothing_{min} = 63$ mm;
 - si $V > 30$ m/s alors $\varnothing_{min} = 80$ mm.
- effort maximum pour le vérin : $F_{max} = 750$ N.

▪ Eléments à définir (géométrie) :

- poulies;
- levier et galet (WS#1) ou plateau mobile (WS#2).

▪ Interfaces fonctionnelles :

- poulie/courroie;
- poulie/axe tambour;
- mécanisme/logement.

Le Tableau 21 synthétise les caractéristiques structurantes identifiées durant l'étape 3.

	Vco	Vcr	Contraintes à traduire	Utilisation qualitative
Composants standards -motoréducteurs -courroies -vérins	-N, couple, masse, coût -longueur, coût -course, coût		catalogues	
Règles utilisation des composants standards: -motoréducteur -courroie -vérin	-effort radial axe moteur -Ø poulies, Ø galet, vitesse linéaire courroie -effort vérin		-effort radial < (-7 * couple à fournir + 2000) -si $V \leq 20$ m/s alors $\varnothing \geq 40$ si $V > 20$ & $V \leq 30 \rightarrow \varnothing \geq 63$ si $V > 30$ m/s alors $\varnothing \geq 80$ -effort vérin ≤ 750 N	
Eléments à définir: -poulies -levier+galet / plateau	-Ø poulies -longueurs levier/plateau -Ø galet		Encombrement disponible: -Ø poulie tambour ≤ 200 -Ø poulie moteur ≤ 220 -l. levier vérin ≤ 100 -l. levier galet ≤ 300 -l. plateau vérin ≤ 230 -l. plateau moteur ≤ 90 -Ø galet ≤ 80	
Interfaces: -poulie/courroie -poulie/axe tambour -mécanisme/logement	-coef. de frottement -largeurs courroie+poulie -assemblage carré -hauteur/largeur totales		-adhérence -largeur courroie = l. poulie -usinage carré (cf §6.4.1.2) -h ≤ 650 -largeur ≤ 880	poussière non prise en compte dans coefficient de frottement

Tableau 21: Caractéristiques structurantes identifiées à l'étape 3.

6.4.1.4 Etape 4 : Approche physique

Afin d'identifier les comportements physiques pertinents, les blocs diagrammes substances-champs sont tracés, pour la situation de vie "fonctionnement du mécanisme".

La Figure 63 décrit le fonctionnement du concept de solution WS#1, tandis que la Figure 64 correspond au fonctionnement du concept de solution WS#2.

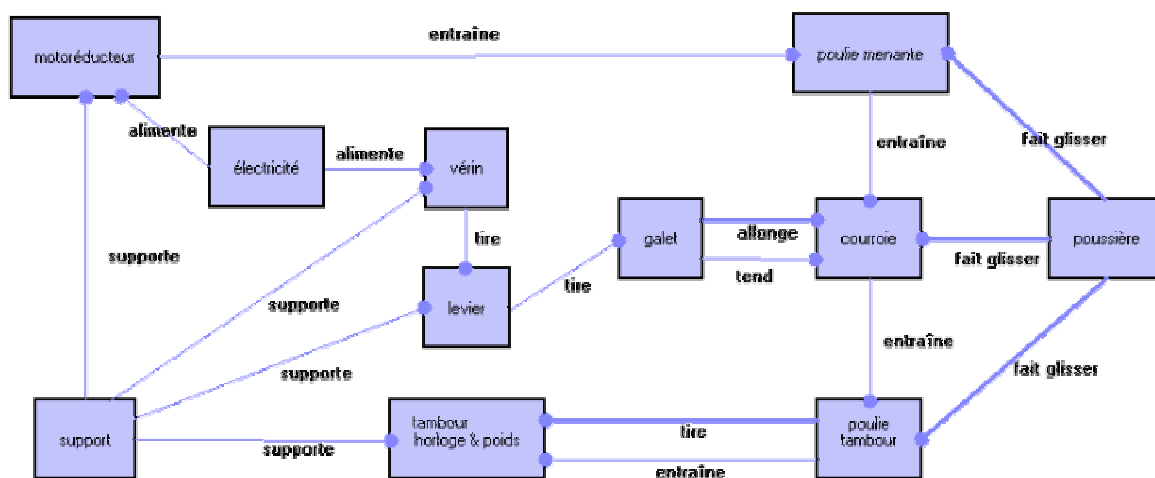


Figure 63: Bloc diagramme substances-champs du concept de solution WS#1.

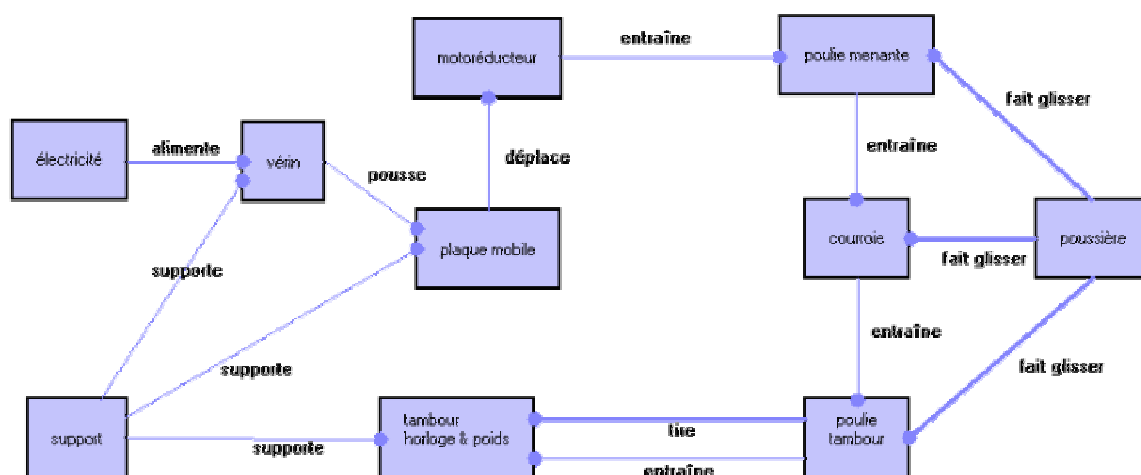


Figure 64: GSC du concept de solution WS#2.

Chaque action des graphes précédents permet d'identifier un ou plusieurs modèles physiques, et les variables pertinentes à prendre en compte (Tableau 22). Dans ce tableau, les verbes d'action en italique correspondent aux effets induits.

Composant	Action	Composant	Variables de conception	Relations
Poulie menante	Entraîne / <i>Glisse</i>	Courroie	C , ω , $\varnothing$, tensions de la courroie, coefficient de frottement	Conditions d'adhérence, rapports des vitesses, transmission de couple
Galet	Tend	Courroie	Effort du vérin, $\varnothing$ des poulies, tensions de la courroie et longueur	Equilibre des forces, géométrie
Vérin	Pousse	Levier	Longueurs du levier, forces, course du vérin	Equilibre des forces & moments, géométrie
Poulie tamb.	Entraîne	Tambour	C , ω , $\varnothing$, poids à remonter	Calcul de moments
Poulie	<i>Tire</i>	Tambour	Tensions de la courroie, effort radial	Equilibre des forces
Galet	<i>Allonge</i>	Courroie	Moments, allongement %	Recommandations du fabricant de courroies
etc.	etc.	etc.	etc.	etc.

Tableau 22: Identification des paramètres et des comportements physiques pertinents (étape 4) pour la WS #1.

6.4.1.5 Paramètres structurants

Chaque fois que cela est possible, nous proposons de larges domaines de variation aux variables. Leurs limites sont les plus larges possibles pour ne pas limiter l'espace de recherche. Afin que le problème ait des solutions, des intervalles s'avèrent obligatoires : Même si le cahier des charges indique par exemple une fréquence de rotation de 60 tr/min pour le tambour de l'horloge (N_{tambour}), cette variable doit appartenir à un intervalle. En effet les contraintes imposées par les moteurs standard (fréquences de rotation discrètes) ne peuvent engendrer une valeur de N_{tambour} rigoureusement égale à 60 tr/min. Cet intervalle traduit la flexibilité admise par cette variable.

L'opération de filtrage réalisée par le solveur (§3.3.4) réduit les intervalles à des domaines compatibles entre eux.

A partir des variables de conception des éléments standards et des variables pertinentes identifiées pour la description des phénomènes physiques, nous pouvons lister les variables de conception que comporte le problème de conception (Figure 65), dans le cas du concept de solution #1.

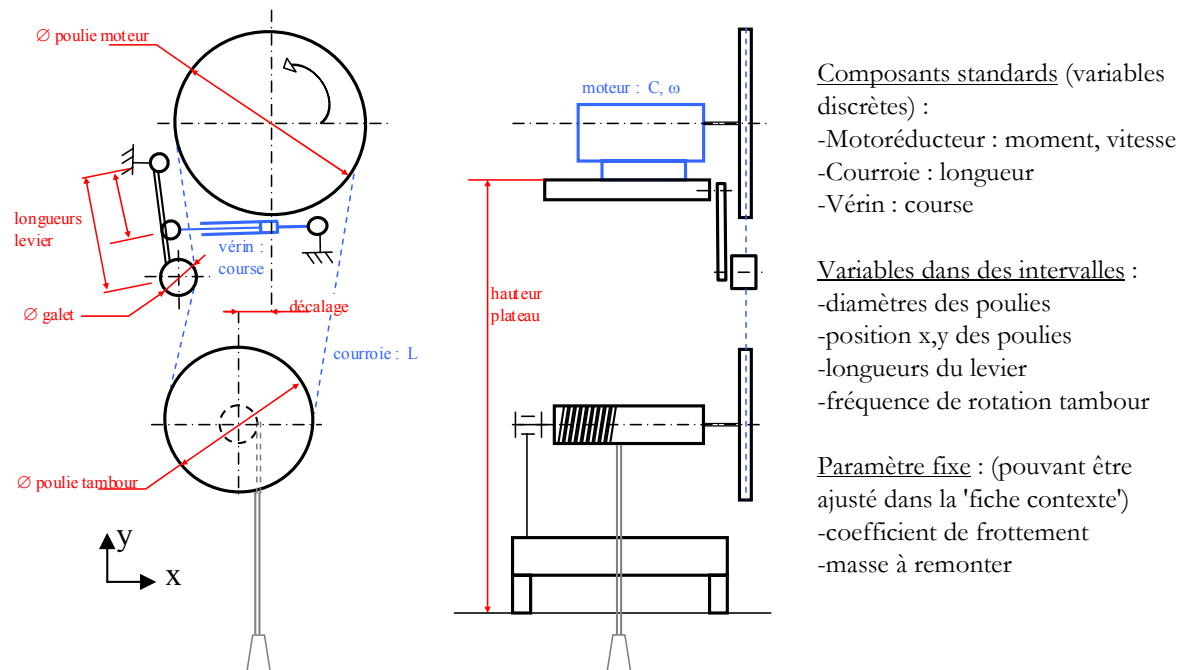


Figure 65: Variables de conception, pour le concept de solution #1.

6.4.2 Comparaison entre les concepts de solution

Nous proposons d'aider à la génération d'architecture en partant de plusieurs concepts pertinents. Pour chaque alternative de concepts de solution, toutes les conditions que le mécanisme doit satisfaire (géométriques, comportements physiques, éléments standards, règles métier, contraintes de fabrication, éléments de coûts, etc.) doivent être transcrites sous forme de contraintes.

Dieter note qu'il est important que les concepts à comparer soient représentés au même niveau d'abstraction [Die 00].

Nous allons voir sur l'exemple du mécanisme de remontée de poids d'horloge que formuler au sein d'un même modèle du problème de conception l'expression de différents concepts de solution n'est pas toujours facile.

Les deux concepts de solution (WS) retenus sont représentés sur la Figure 66 : La tension de la courroie est réalisée par un galet tendeur (WS#1) ou par le mouvement du motoréducteur fixé sur un plateau mobile (WS#2).

Plusieurs difficultés ont été rencontrées pour décrire les deux concepts au sein d'un même modèle.

Un premier modèle a mené à des erreurs. Nous expliquons ci-dessous comment elles ont été résolues sur l'exemple des variables de conception qui sont illustrées sur la Figure 66. Le Tableau 23 explicite les légendes de cette figure pour ces variables et donne leur nom dans les différentes versions des modèles.

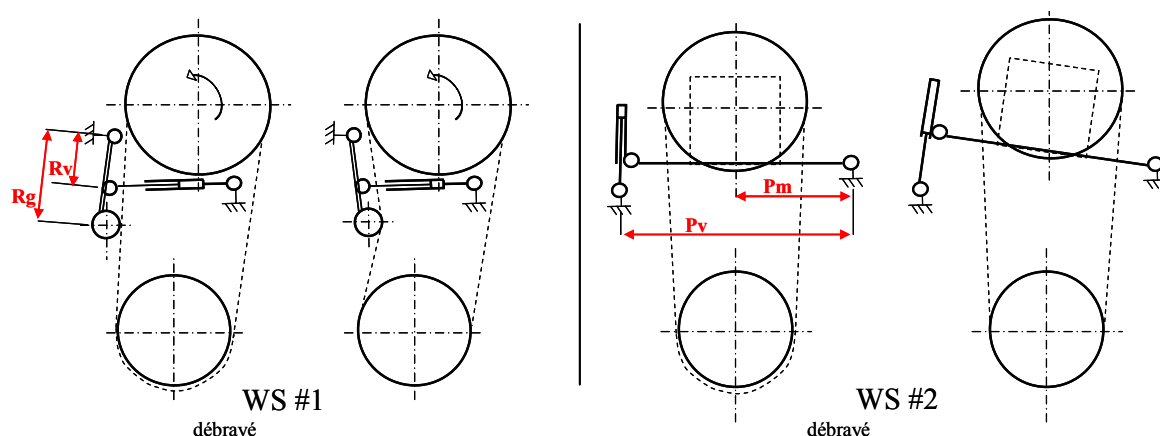


Figure 66: Exemple de variables différentes sur les deux concepts de solutions sélectionnés.

Légende de la Figure 66			1 ^{ère} version du modèle	2 ^{ème} version du modèle
WS#1	Rv	Long. du renvoi jusqu'au vérin	l_renvoi_verin	l_verin
WS#1	Rg	Long. du renvoi jusqu'à l'axe galet	l_renvoi_galet	l_poulie
WS#2	Pv	Long. du plateau jusqu'au vérin	l_plateau_verin	l_verin
WS#2	Pm	Long. du plateau jusqu'à l'axe moteur	l_plateau_moteur	l_poulie

Tableau 23: Légende de la Figure 66, et nom des variables correspondantes dans les modèles du problème de conception.

▪ Tout d'abord, le calcul d'une même variable de conception peut être différent selon les concepts. C'est le cas, par exemple, de la longueur de courroie (*long_courroie*), car la forme de la courroie tendue est différente.

Pour pouvoir écrire cela avec le solveur Constraint Explorer (CE), le formalisme de la règle logique a été utilisé. Dans le modèle, la variable "concept" est un entier pouvant uniquement prendre les valeurs 1 ou 2, correspondant aux concepts de solution #1 et #2. L'écriture sous forme de contraintes, avec le formalisme de CE est le suivant :

concept=1 → *long_courroie*= F(*diam_moteur*,*diam_tambour*,*hauteur_plateau*,
 decalage_moteur,*fleche*)

concept=2 → *long_courroie*= F(*diam_moteur*,*diam_tambour*,*hauteur_plateau*,
 decalage_moteur,*l_plateau_moteur*,
 course_verin,*l_plateau_verin*)

Ainsi, les contraintes de calcul de longueur de courroie ne sont prises en compte que lorsque le solveur examine le cas du concept correspondant.

▪ Lorsque l'on liste les variables de conception des composants standards, on ne retient que les paramètres pertinents pour le problème. Toutefois, selon le concept de solution, certaines données sont utiles ou non. Ainsi, dans un premier temps nous avons écrit le catalogue des motoréducteurs sans en lister les masses. De plus, le solveur limite pour l'instant le nombre de paramètres dans les catalogues.

Ce paramètre n'est utile que pour le concept de solution #2.

Nous l'avons donc rajouté. Pour le #1, le paramètre ne sert pas, mais il fait partie variables instanciées dans la description de la solution.

▪ Il y a également des contraintes n'existant que dans un cas de concept de solution : c'est le cas par exemple de la flèche (déplacement du galet tendeur entre les deux positions), qui doit être inférieure au diamètre de poulie, pour ne pas que les deux brins se touchent lors de la tension.

`concept=1 → fleche<diam_tambour;`

Ces contraintes propres à un concept de solution entraînent la présence de variables n'existant que dans un cas. Or, tout doit cohabiter dans le même modèle, toutes les variables et toutes les contraintes sont traitées simultanément. Il faut dans l'autre cas affecter une valeur à la variable inutilisée :

`concept=1 → fleche=0;`

▪ Enfin, le fait qu'une même contrainte s'exprime différemment et dépende de variables différentes selon le concept, a posé des problèmes lors de l'utilisation du solveur lorsqu'il s'agit de variables d'entrée.

En effet, La résolution dans le logiciel CE est guidée par le graphe causal (Figure 67) qui spécifie les variables d'entrée (qui sont instanciées) et les variables de sorties, qui sont calculées.

La force à développer par le vérin par exemple dépend notamment dans la WS#1 des longueurs du renvoi (Rv et Rg sur la Figure 66) et dans la WS#2 des longueurs du plateau support moteur (Pm et Pv sur la Figure 66).

`concept=1 → force_verin= F(l_renvoi_verin,tendu,mou,fleche,diam_moteur,
diam_tambour,hauteur_plateau,
decalage_moteur,l_renvoi_galet)`

`concept=2 → force_verin= F(l_plateau_verin,tendu,mou,course_verin,masse_moteur,
masse_plateau,l_plateau_moteur,l_plateau_verin)`

Dans ce cas, la variable "force_verin" dépend à la fois de (l_renvoi_verin , l_renvoi_galet) pour la WS#1 et de (l_plateau_verin , l_plateau_verin) pour la WS#2.

Nous avons été contraints d'utiliser des variables communes, "l_verin" remplaçant par exemple l_renvoi_verin et l_plateau_verin :

`concept=1 → force_verin= F(l_verin,tendu,mou,fleche, diam_moteur,diam_tambour,
hauteur_plateau,decalage_moteur,l_poulie)`

`concept=2 → force_verin= F(l_verin,tendu,mou,masse_moteur,
l_poulie,course_verin)`

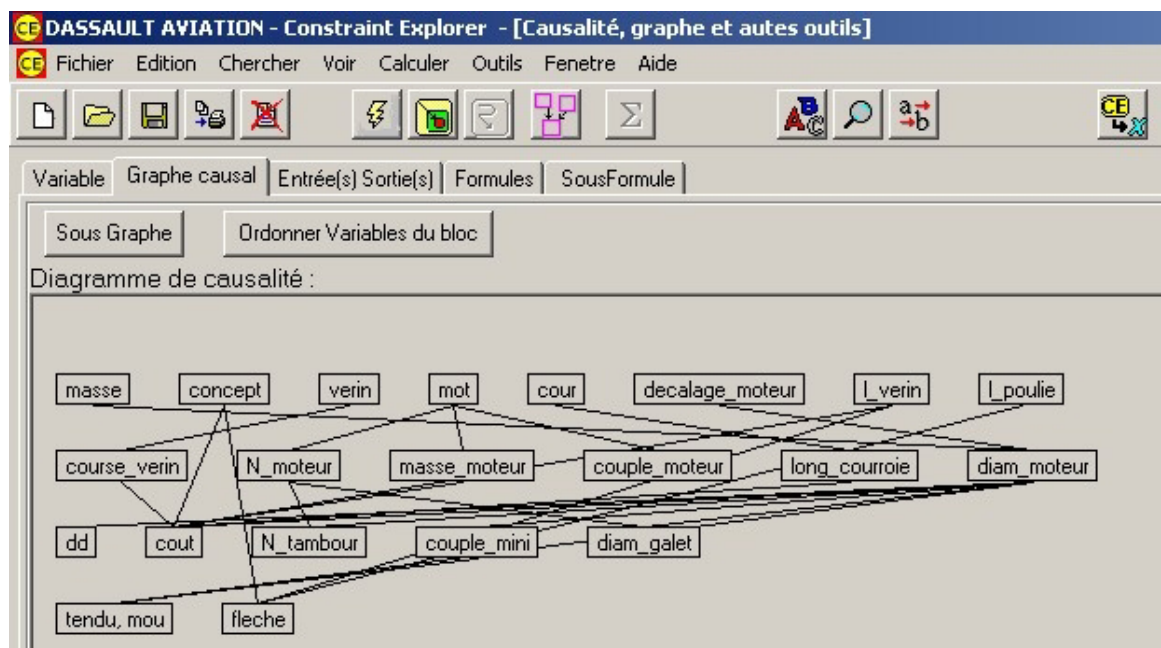


Figure 67: Graphe causal de résolution du solveur Constraint Explorer.

▪ Ainsi, des variables présentent dans tous les cas peuvent varier sur des intervalles différents selon le concept de solution :

concept=1 → l_verin=[40,100];
concept=2 → l_verin=[180,230];

Cette écriture n'est pas non plus satisfaisante car les déclarations d'intervalles varient selon les cas. Une écriture avec des inéquations est préférable :

concept=1 → l_verin>40; concept=1 → l_verin<100;

*Il est évident que ces adaptations ont été possibles dans ce cas particulier, ou les géométries des concepts de solutions sont proches.
Les futures évolutions du solveur devront permettre de rédiger des "sous modèles" indépendants, où il sera possible d'utiliser des contraintes et variables différentes; une partie de la résolution sera indépendante.*

6.4.3 Formalisation des contraintes

Nous avons vu précédemment l'identification des caractéristiques structurantes du problème de conception, ainsi que la manière de décrire les différents concepts de solutions dans le modèle de connaissances.

N_moteur	N_tambour	coef_frott.	WS	couple_min	couple_moteur	course_verin	coût	décalage	Ø_galet	Ø_poulie_moteur	Ø_poulie_tambour	décalage_galet	effort_verin	hauteur_support	l_poulie	l_verin	long_courroie	masse	masse_moteur	tension_brin_mou	tension_brin_tendu	effort_radial
----------	-----------	-------------	----	------------	---------------	--------------	------	----------	---------	-----------------	------------------	----------------	--------------	-----------------	----------	---------	---------------	-------	--------------	------------------	--------------------	---------------

Figure 68: Variables de conception et variables critères du problème.

Le problème comporte 23 variables (Figure 68) :

▪ **21 variables de conception :**

- Les catalogues concernent les variables de conception du motoréducteur, de la courroie, du vérin. Les variables suivantes sont donc tabulées : `N_moteur`, `couple_moteur`, `masse_moteur`, `long_courroie`, `course_verin`.

- Des domaines sont définis pour les autres variables de conception : `ws`, `force_verin`, `diam_tambour`, `diam_moteur`, `diam_galet`, `hauteur_plateau`, `decalage_moteur`, `N_tambour`, `masse`, `tendu`, `mou`, `couple_mini`, `coef_frott`, `l_verin`, `l_poulie`, `fleche`

▪ **2 variables critères** (coût et effort radial). L'effort radial n'est pas calculé dans le modèle, mais dans le tableur (à partir des tensions de courroie), ce qui évite une variable supplémentaire.

Les caractéristiques structurantes sont maintenant traduites sous forme de contraintes. Quelques exemples sont détaillés ci-dessous; le modèle complet est disponible en annexe V.

▪ Contexte variant suivant le problème : il peut être facilement ajusté dans une fenêtre de l'interface du logiciel CE; sans avoir à modifier l'écriture du modèle :

- masse : 28 kg (tambour côté cloche), 12 kg (tambour côté heures);
- diamètre maximum poulie tambour : côté heures= $\varnothing 200$ mm, côté cloche= $\varnothing 110$ mm.

▪ Domaines des variables :

`Ø_tambour=[40,200];` ($\varnothing$ of the drum pulley)
`hauteur_plateau=[590,650];`
`N_tambour=[55,61];` etc.

▪ Catalogues :

- Liste des composants disponibles, avec les paramètres correspondants. Par exemple, pour les moteurs, le logiciel ne pourra utiliser qu'un couple de données existant. Dans une première version du logiciel, les catalogues devaient s'écrire sous forme de règles logiques. Cela correspond au modèle proposé, traité avec cette version. Désormais, le logiciel peut lire directement ces données dans des tableaux :

`mot=1 → N_moteur=37.4 and couple_moteur=11.2;`
`mot=2 → N_moteur =43.8 and couple_moteur=9.8;`
`mot=3 → N_moteur =48.9 and couple_moteur=8.8;`

- Conditions d'utilisation des standards, imposées par les fabricants : Par exemple, la vitesse linéaire de la courroie entraîne des diamètres minimum admissibles. Elle est traduite sous forme de règles logiques :

`vitesse<=20 → Ø_moteur>=40 and Ø_tambour>=40 and Ø_galet=40;`
`vitesse>20 and speed<=30 → Ø_moteur>=63 and Ø_tambour>=63 and Ø_galet=63;`
`vitesse>30 → Ø_moteur>=80 and Ø_tambour>=80 and Ø_galet=80;`

▪ Comportements physiques :

`T/t=e^(f*θ);` (T & t : tensions courroie; f : coef. de frottement; θ : angle d'enroulement)
`couple=(T-t)*Ø_drum/2;`
`couple_moteur > couple;`

```
long_courroie*1.02=( $\pi$ *( $\varnothing_{\text{moteur}}+\varnothing_{\text{drum}}$ )/2)+((distance^2+( $\varnothing_{\text{moteur}}-\varnothing_{\text{tambour}}$ )^2)^0.5)*2; (ws#2)  
N_tambour=N_moteur*( $\varnothing_{\text{moteur}}/\varnothing_{\text{tambour}}$ );          etc.
```

La longueur de la courroie est multipliée par 1.02 pour traduire la règle du constructeur indiquant un allongement de 2% en tension, par rapport à la longueur initiale.

6.4.4 Résolution et exploitation des résultats

La résolution du problème effectuée le solveur consiste à rechercher exhaustivement les architectures solutions. Chaque solution correspond à une instanciation particulière de toutes les variables de conception; cette étape affecte donc des valeurs aux variables de conception et calcule les variables critères. Ces variables sont listées sur la Figure 68.

Comme aucune décision n'est intervenue à partir de la sélection des concepts pertinents, le solveur génère un espace de solutions qui n'est pas restreint a priori.

L'exploitation de cet espace est nécessaire pour aider à la décision et consiste soit à hiérarchiser les solutions, soit à réduire l'espace et recherche de l'ensemble des solutions non dominées.

Cette étape nécessite les variables critères pour exprimer la pertinence de la conception.

Il y a ensuite une décision à prendre, mais qui n'est plus située dans une phase où le concepteur manque d'éléments chiffrés d'évaluation. De plus, l'espace des solutions dont il dispose n'a pas été arbitrairement restreint par des choix initiaux.

6.4.4.1 Résolution du PSC

Le logiciel Constraint Explorer a été mis en œuvre pour chaque contexte (une fois par côté car la masse à remonter diffère). Les valeurs des variables de conception pour chaque solution sont exportées vers un tableur.

L'espace disponible du logement donne les limites maximums aux dimensions. Un premier calcul a permis de voir qu'il existait beaucoup de solutions avec la hauteur du plateau à sa valeur minimale. Elle a été ensuite fixée à cette valeur (dans la "fiche contexte"); cela permet de plus de diminuer la longueur nécessaire de courroie.

La fonction objectif (6.4.4.2) est calculée par le tableur à partir des deux indicateurs de performance. Le Tableau 24 montre les premières solutions obtenues pour le côté "heures", chaque ligne correspond à une solution. La colonne 1 indique le numéro de solution dans l'ordre d'apparition.

Elles sont classées grâce à la fonction objectif (dernière colonne à droite), pour un poids égal des indicateurs de performance ($\lambda=0,5$).

1	2	3	4	5	6	7	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	28	29	30	31
sol. n°	N moteur	N tambour	coef frot.	WS	couple min	couple moteur	course vélin	coût	décalé ge	Ø galet	Ø poulie moteur	Ø poulie tambour	décalage galet	effort vélin	hauteur support	L poulie	L vélin	long. courroie	masse	masse moteur	tension brin mou	tension brin tendu	effort radial	indic. coût	indic. effort radial	fonct. OBJ.
	tr/min	tr/min			N/m	N/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	mm	kg	kg	N	N	N			λ=0.5
12	56.3	60.80	0.5	1	6.10	7.6	50	516.0	0	40	216	200	100.82	168.03	590	111	51	1550	12	6.3	14.82	71.31	86.13	0.829	0.9	0.865
6	48.9	55.17	0.5	1	6.37	8.8	50	515.9	0	40	220	195	100.25	177.28	590	115	51	1550	12	6.3	15.20	73.14	88.34	0.829	0.923	0.876
22	57.1	60.81	0.5	1	6.02	12.4	50	532.0	0	40	213	200	107.04	173.81	590	109	48	1550	12	7.3	14.82	71.31	86.13	0.855	0.9	0.877
21	56.3	60.97	0.5	1	6.12	7.6	50	512.7	0	40	209	193	60.29	116.43	590	112	82	1500	12	6.3	15.36	73.90	89.28	0.824	0.933	0.878
10	56.3	60.13	0.5	1	6.03	7.6	50	511.5	0	40	204	191	78.57	143.13	590	114	67	1500	12	6.3	15.52	74.67	90.19	0.822	0.942	0.882
16	49.6	55.17	0.5	1	6.28	14.2	50	532.2	0	40	218	196	102.83	177.72	590	107	47	1550	12	7.3	15.13	72.77	87.89	0.855	0.918	0.887
137	56.3	59.129	0.5	2	5.93	7.6	100	541.1	0	40	209	199	0	146.14	590	90	209	1550	12	6.3	14.90	71.67	86.57	0.87	0.905	0.887
17	49.6	55.20	0.5	1	6.29	14.2	50	531.9	0	40	217	195	106.35	182.94	590	115	49	1550	12	7.3	15.20	73.14	88.34	0.855	0.923	0.889
20	57.1	60.93	0.5	1	6.03	12.4	50	529.0	0	40	207	194	63.87	119.03	590	114	81	1500	12	7.3	15.28	73.52	88.80	0.85	0.928	0.889
136	56.3	59.444	0.5	2	5.96	7.6	100	539.1	0	40	208	197	0	164.98	590	90	180	1550	12	6.3	15.05	72.40	87.45	0.866	0.914	0.89
3	48.9	55.14	0.5	1	6.37	8.8	50	512.4	0	40	212	188	63.35	130.64	590	107	71	1500	12	6.3	15.77	75.86	91.63	0.823	0.957	0.89
58	48.9	55.17	0.5	1	6.37	8.8	100	533.9	0	40	220	195	190.948	131.96	590	118	58	1650	12	6.3	15.20	73.14	88.34	0.858	0.923	0.891
9	56.3	60.82	0.5	1	6.10	7.6	50	510.5	0	40	202	187	90.71	165.24	590	110	56	1500	12	6.3	15.85	76.27	92.12	0.82	0.963	0.892
108	56.3	59.263	0.5	2	5.95	7.6	50	521.0	0	40	200	190	0	162.19	590	90	206	1500	12	6.3	15.60	75.06	90.67	0.837	0.947	0.892
2	48.9	55.18	0.5	1	6.37	8.8	50	512.1	0	40	211	187	68.43	139.19	590	111	69	1500	12	6.3	15.85	76.27	92.12	0.823	0.963	0.893
106	56.3	59.279	0.5	2	5.95	7.6	50	519.7	0	40	199	189	0	177.94	590	90	187	1500	12	6.3	15.69	75.46	91.15	0.835	0.952	0.894
21	57.1	60.97	0.5	1	6.03	12.4	50	529.3	0	40	205	192	132.79	211.18	590	117	42	1550	12	7.3	15.44	74.28	89.72	0.851	0.938	0.894
107	56.3	59.577	0.5	2	5.98	7.6	50	520.3	0	40	200	189	0	170.28	590	90	196	1500	12	6.3	15.69	75.46	91.15	0.836	0.952	0.894
1	48.9	55.74	0.5	1	6.44	8.8	50	512.1	0	40	212	186	67.88	140.62	590	110	68	1500	12	6.3	15.94	76.68	92.62	0.823	0.968	0.895
4	48.9	56.52	0.5	1	6.53	8.8	50	512.6	0	40	215	186	59.25	129.53	590	118	80	1500	12	6.3	15.94	76.68	92.62	0.824	0.968	0.896
60	56.3	59.25	0.5	1	5.94	7.6	100	529.0	0	40	201	191	183.52	129.11	590	115	61	1600	12	6.3	15.52	74.67	90.19	0.85	0.942	0.896
109	56.3	60.792	0.5	2	6.10	7.6	50	521.8	0	40	203	188	0	154.27	590	90	218	1500	12	6.3	15.77	75.86	91.63	0.838	0.957	0.898
147	57.1	59.969	0.5	2	5.93	12.4	100	557.6	0	40	209	199	0	151.53	590	90	209	1550	12	7.3	14.90	71.67	86.57	0.896	0.905	0.9
13	49.6	55.11	0.5	1	6.28	14.2	50	528.7	0	40	210	189	66.83	133.00	590	116	75	1500	12	7.3	15.69	75.46	91.15	0.85	0.952	0.901
59	56.3	60.77	0.5	1	6.10	7.6	100	529.2	0	40	204	189	181.02	130.48	590	115	61	1600	12	6.3	15.69	75.46	91.15	0.85	0.952	0.901
14	49.6	55.11	0.5	1	6.28	14.2	50	529.7	0	40	210	189	127.60	213.22	590	116	42	1550	12	7.3	15.69	75.46	91.15	0.851	0.952	0.902
35	50	55.64	0.5	1	6.29	19.8	50	548.4	0	40	217	195	106.34	182.94	590	115	49	1550	12	8.3	15.20	73.14	88.34	0.881	0.923	0.902
5	48.9	58.47	0.5	1	6.75	8.8	50	514.2	0	40	220	184	115.72	213.97	590	115	43	1550	12	6.3	16.11	77.51	93.62	0.826	0.978	0.902
146	57.1	60.288	0.5	2	5.96	12.4	100	555.6	0	40	208	197	0	171.04	590	90	180	1550	12	7.3	15.05	72.40	87.45	0.893	0.914	0.903
94	48.9	55.17	0.5	1	6.37	8.8	150	549.9	0	40	220	195	190.948	87.97	590	118	87	1650	12	6.3	15.20	73.14	88.34	0.884	0.923	0.903
53	48.9	55.14	0.5	1	6.37	8.8	100	529.4	0	40	212	188	125.35	106.76	590	114	83	1550	12	6.3	15.77	75.86	91.63	0.851	0.957	0.904
82	57.6	60.77	0.5	1	5.96	17.2	100	565.2	0	40	211	200	159.206	113.57	590	112	68	1600	12	8.3	14.82	71.31	86.13	0.908	0.9	0.904
97	57.1	60.81	0.5	1	6.02	12.4	150	566.0	0	40	213	200	196.441	85.66	590	115	85	1600	12	7.3	14.82	71.31	86.13	0.91	0.9	0.905
55	48.9	55.14	0.5	1	6.37	8.8	100	530.4	0	40	212	188	169.97	128.49	590	111	61	1600	12	6.3	15.77	75.86	91.63	0.852	0.957	0.905
116	57.1	60.105	0.5	2	5.95	12.4	50	537.5	0	40	200	190	0	168.08	590	90	206	1500	12	7.3	15.60	75.06	90.67	0.864	0.947	0.906
68	57.1	60.97	0.5	1	6.03	12.4	100	545.3	0	40	205	192	132.786	105.59	590	117	84	1550	12	7.3	15.44	74.28	89.72	0.876	0.938	0.907
7	56.3	59.43	0.5	1	5.96	7.6	50	506.5	0	40	190	180	60.56	120.25	590	118	90	1450	12	6.3	16.47	79.23	95.70	0.814	1	0.907
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tableau 24: Premières solutions pour la masse à remonter de 12kg (côté heures).

6.4.4.2 Fonction objectif

Nous avons vu que les critères de qualification sont liés à la fréquence de rotation du tambour, à l'effort radial sur le tambour, au coût :

- **N_tambour** est supposé satisfaisant s'il appartient à l'intervalle [55,61]tr/min (§6.4.1.5);
- l'effort radial est calculé dans le modèle (à partir des tensions des brins de courroie);
- des éléments relatifs au coût peuvent être également calculés (voir ci-dessous).

La fonction objectif ne nécessite donc que deux indicateurs de pertinence : coût et effort (colonnes 10 et 28 du tableau des résultats). N'ayant pas ici de référence absolue, les indicateurs de performance (colonnes 29 et 30) sont calculés grâce à la valeur maximum de l'indicateur de pertinence pour la série de résultats.

La fonction objectif doit être minimisée et s'écrit :

$$fonction_objectif = \left(\lambda \cdot \frac{Coût}{Coût_max} \right) + \left((1 - \lambda) \cdot \frac{Effort_radial}{Effort_radial_max} \right), \lambda \in [0,1]. \text{ Equation 2.}$$

Les coûts des éléments standards sont connus et dépendent de la gamme, du modèle, de la puissance, etc. Les coûts matières sont également assez faciles à calculer.

Pour les pièces à usiner, on cherche à exprimer plus des indicateurs économiques, que des coûts réels. Il s'agit juste de permettre de comparer les solutions entre elles, de comparer le coût des pièces calculé à partir des données géométriques. Nous traduisons par le coût les différences de temps d'usinage entre pièces.

Dans notre cas, les deux solutions impliquent des fabrications de poulies; la variation de diamètre possible influe peu sur le temps total d'usinage. Nous n'avons donc pas tenu compte de la variation de ces coûts d'usinage, mais uniquement des coûts des éléments standards et de la matière première.

6.4.4.3 Front de Pareto

L'espace des solutions est représenté sur la Figure 69-a : chaque solution est positionnée sur ce graphique par rapport à ses valeurs d'indicateurs de performance : effort radial et coût.

Rappelons qu'une solution est pour nous un ensemble de variables valuées, représentant une configuration architecturale particulière.

Les deux indicateurs de performance doivent être minimisés. Nous recherchons l'ensemble des solutions :

- qui satisfont au mieux les objectifs;
- qui ne sont pas plus performantes les unes par rapport aux autres.

Cet ensemble de solutions non-dominées forme le front de Pareto (Figure 69-b).

Par exemple, la solution n°7 n'est pas moins bonne que la n°12 du point de vue des deux indicateurs car :

$$I_{\text{coût}}(7) < I_{\text{coût}}(12) \text{ et } I_{\text{effort radial}}(12) < I_{\text{effort radial}}(7).$$

L'espace des solutions initial comporte 193 solutions. Un tri important est effectué car l'ensemble des solutions non dominées ne comporte que 6 éléments.

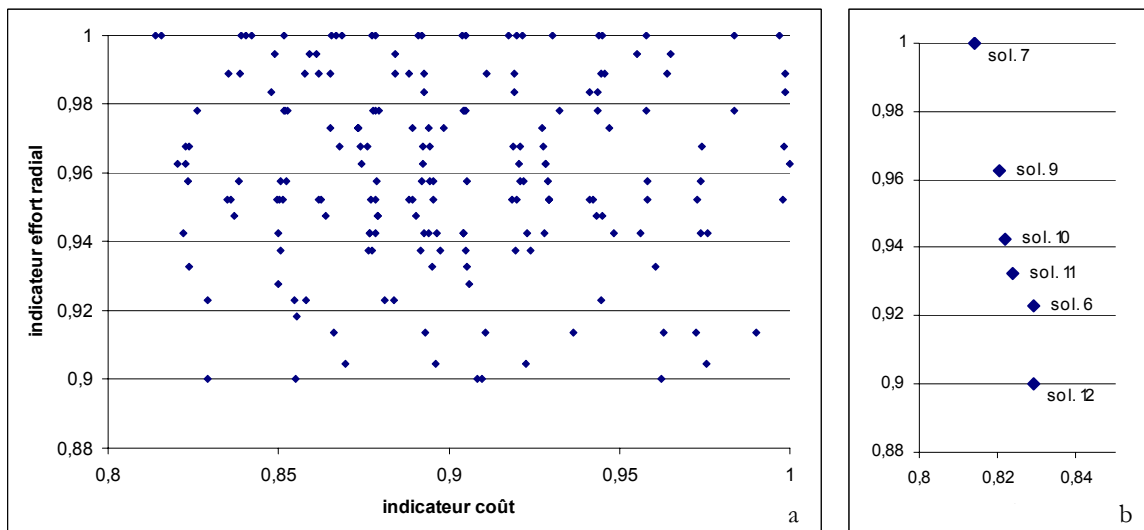


Figure 69: Espace des solutions et sa frontière de Pareto.

6.4.4.4 Analyse des résultats

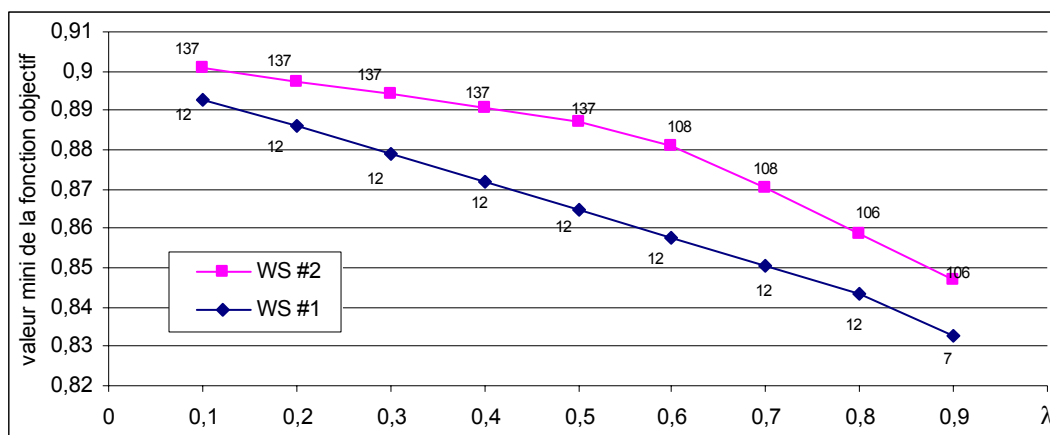


Figure 70: Evolution de la valeur minimum de la fonction objectif et la solution correspondante, en fonction de λ .

La Figure 70 indique les valeurs minimales de la fonction objectif pour chaque concept, en fonction de λ .

Les meilleures solutions apparaissent avec le concept de solution #1. La fonction objectif combinant tous les résultats donne les mêmes résultats, puisque la meilleure solution du concept de solution #1 est toujours plus performante que la meilleure du #2, quel que soit λ (sauf pour $\lambda=0,9$). La solution 12 est quasiment toujours la plus performante.

Les solutions non dominées (Figure 69-b) sont repérées par un fond gris sur le Tableau 24. Nous constatons qu'elles n'apparaissent pas forcément dans les premières solutions classées par la fonction objectif. Cela peut remettre en cause la pondération (λ). Toutefois, en examinant le front de Pareto, la solution n°12 apparaît également comme la solution la plus pertinente, car l'écart entre les solutions n°7 et n°12 est faible selon le critère coût et important selon le critère effort radial.

La méthode des facteurs de pondération pose le problème de l'affectation des valeurs aux facteurs, mais ici la solution n°12 étant la plus pertinente quel que soit λ , l'intérêt d'une telle pondération n'apparaît pas.

En réalité, l'ensemble des critères a une incidence sur le coût. Une méthode plus pertinente que la pondération serait d'écrire une fonction objectif globale de type coût. Dans notre cas, l'effort radial peut être relié à la durée de vie des paliers des tambours, et donc à une durée d'amortissement en fonction du coût. Ce travail est à entreprendre.

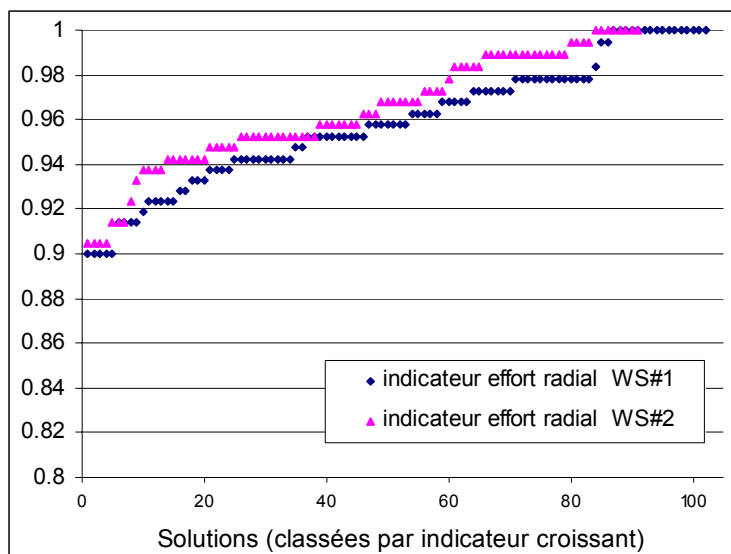


Figure 71: Valeurs croissantes de l'indicateur de performance "effort radial", pour chaque concept.

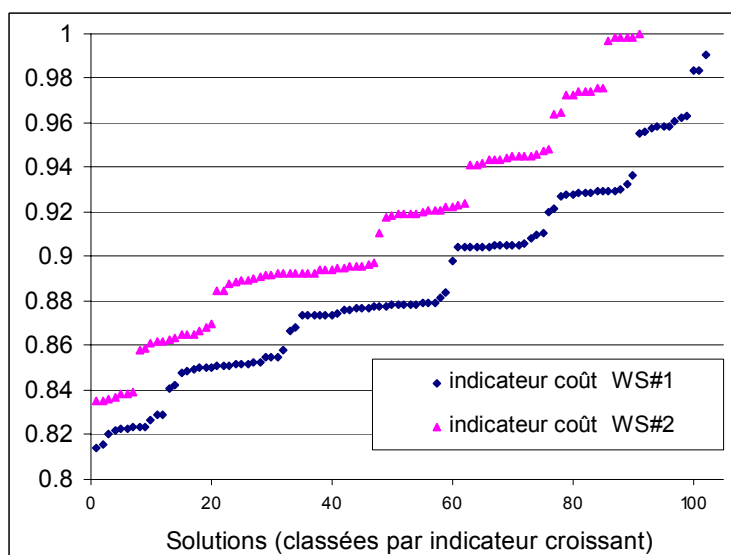


Figure 72: Valeurs croissantes de l'indicateur de performance "coût", pour chaque concept.

Enfin, en classant les solutions par indicateurs croissants (Figure 71 et Figure 72), on se rend compte que le concept de solution #1 est globalement plus performant que le #2. Des écarts existent surtout sur les coûts. Toutefois, aucune solution ne présente les deux indicateurs à la valeur minimum. Ainsi, de bons compromis peuvent apparaître également avec le concept de solution #2, par exemple la 7ème solution du Tableau 24 (n°137). Les "escaliers" sur la Figure 71 et la Figure 72 correspondent notamment aux changements brusques de valeur (variables de conception énumérés) induits par les éléments standards.

6.4.4.5 Conception détaillée

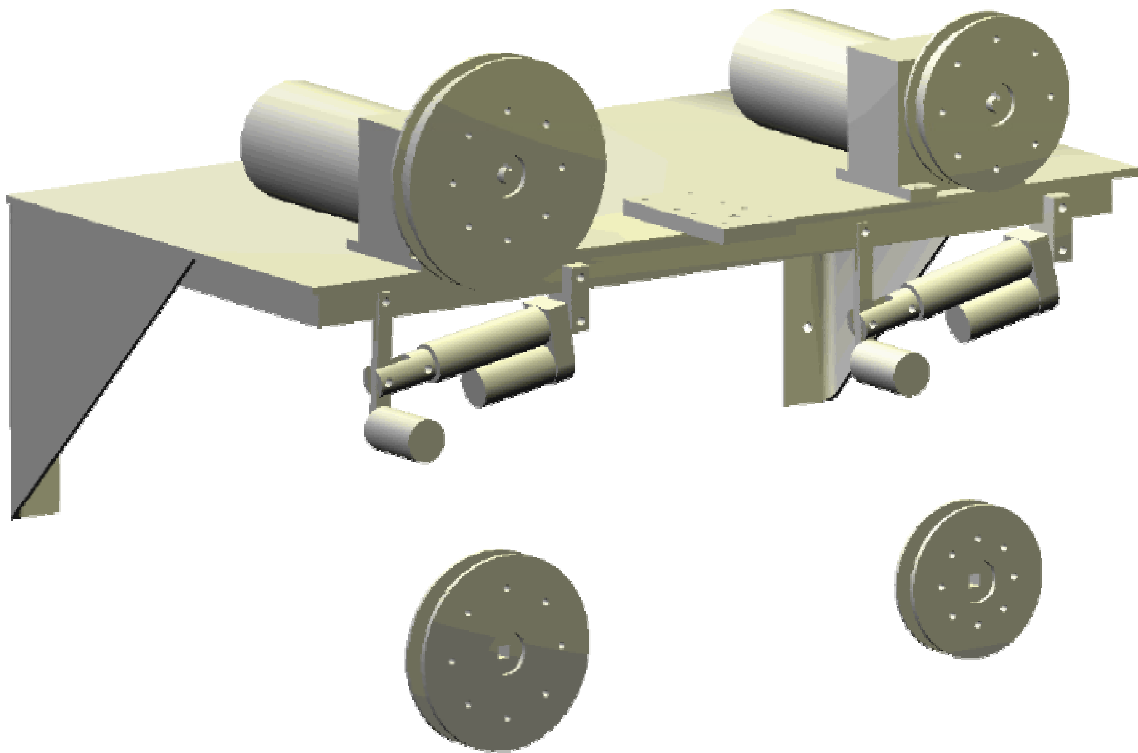


Figure 73: Vue 3D (CAO) du mécanisme de remontée de poids.

Ces résultats de la conception architecturale enrichie ont été directement utilisés. Les éléments standards ainsi que tous les paramètres d'architecture définis ont permis de réaliser rapidement la phase de conception détaillée (Figure 74) et la fabrication des pièces. La Figure 73 représente le mécanisme monté sur son support, défini en trois dimensions avec un système de CAO.

Avant une implantation sur son site final, le mécanisme a été monté en atelier au dessus de l'horloge monumentale (Figure 75) pour la mise au point de l'automatisme.

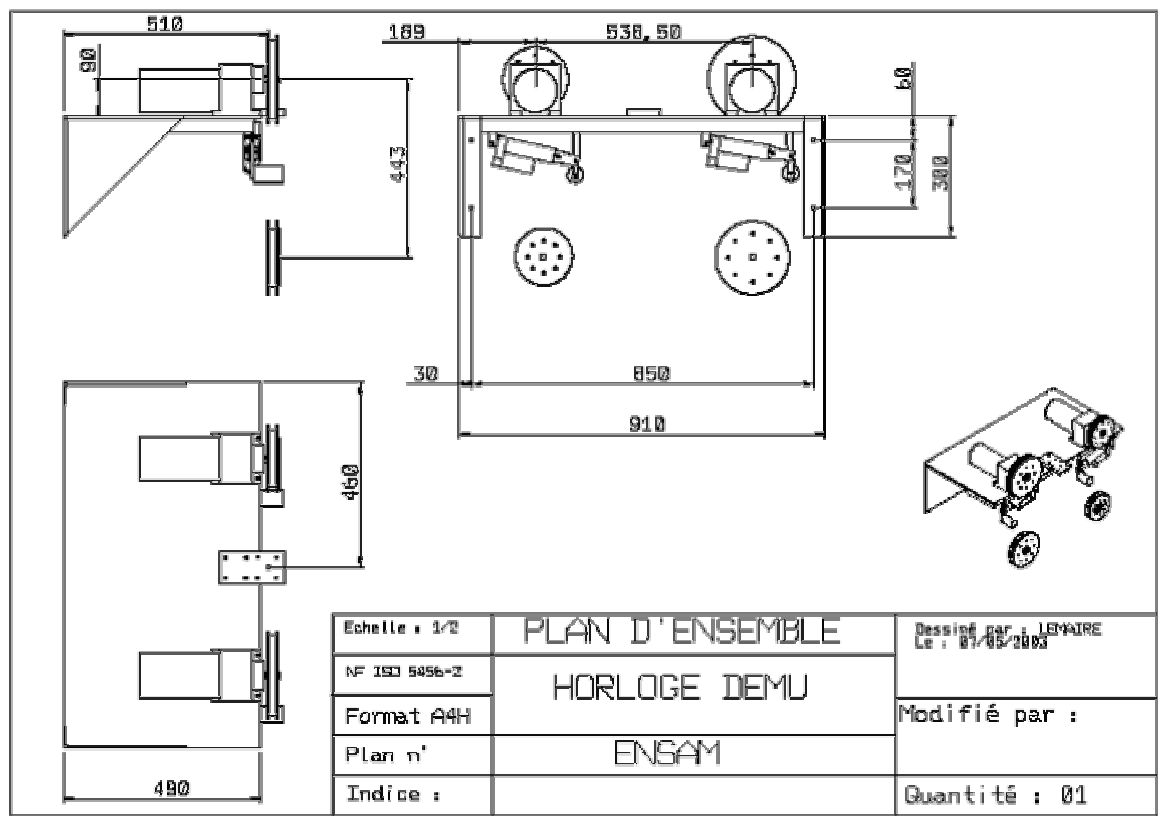


Figure 74: Plan d'ensemble du mécanisme de remontée de poids.

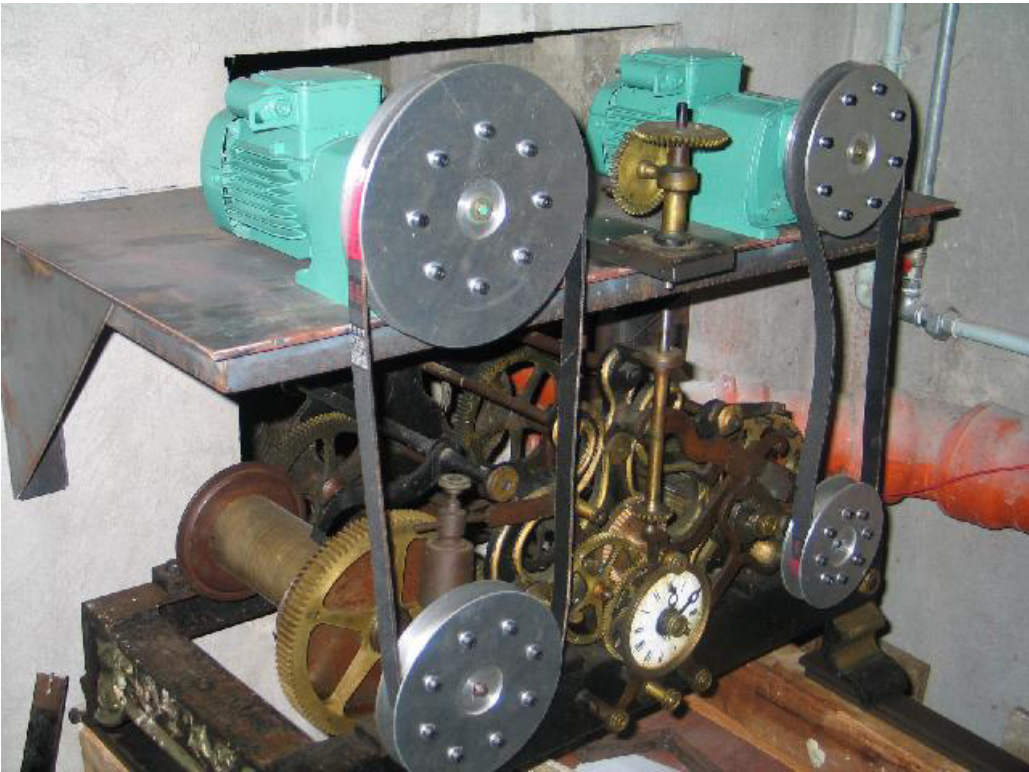


Figure 75: Mécanisme en cours de montage.

6.4.5 Synthèse de la comparaison des démarches

Pour cette application, le problème de conception architecturale consistait à l'adéquation du choix d'éléments standards dans des catalogues (motoréducteur, courroie, vérin) et de paramètres géométriques (positions relatives des poulies et du galet tendeur, longueurs du renvoi ou du plateau).

Or ces paramètres sont liés entre eux et imposent d'en fixer certains pour déterminer les autres. Une méthode classique de conception impose une recherche itérative d'éléments standards, des adaptations topologiques et des calculs répétés; ce qui est coûteux en temps.

L'approche que nous avons proposée permet de s'orienter rapidement vers une architecture garantissant le respect des contraintes géométriques et mécaniques, des règles métiers, utilisant uniquement des composants standards; tout en minimisant leur coût et minimisant l'effort radial s'exerçant sur l'horloge.

Cela évite les calculs a posteriori et les retours en arrière dans le processus de conception.

L'espace des solutions a été réduit en utilisant d'une part une fonction objectif, et d'autre par la recherche du front de Pareto.

La fonction objectif procure un classement et permet de distinguer une solution. Par contre, elle nécessite des choix pour la pondération des indicateurs de performance.

Le front de Pareto fournit un ensemble de solutions non dominées, a priori pas plus performantes les unes que les autres au regard de tous les indicateurs. Un choix reste à faire parmi elles.

Le concepteur et le client doivent donc s'entendre sur l'importance relative des indicateurs de performance, et ainsi choisir parmi les meilleures alternatives en fin de conception architecturale. Mais il n'y a plus de décision à prendre au début de cette phase pour fixer des variables de conception. De plus, en triant les solutions, les indicateurs de performance peuvent en effet être minimisés.

Ainsi, pour la solution n°12 retenue, l'effort radial maximum engendré sur un axe d'horloge est de 86 N (côté heures). Ce résultat est de 30% inférieur à celui obtenu par la méthode classique (123 N).

Nous avons obtenu toutes les solutions issues de deux concepts de solution et ainsi les comparer. 102 solutions sont issues de WS#1 et 91 de WS#2, ce qui est assez équilibré. Par contre, en les comparant avec les indicateurs de performance, nous avons constaté que la WS#1 était plus performante que l'autre du point de vue des objectifs de conception exprimés par le client.

Enfin, nous avons observé avec l'exemple traité que les itérations durant la conception architecturale sont très limitées; ce qui a permis de raccourcir la durée de cette phase.

Certes l'écriture du modèle de connaissances demande du temps, mais le modèle peut être utilisé par la suite pour adapter ou modifier la conception. Cette démarche génère de la capitalisation de connaissances utile pour une entreprise.

De plus, les catalogues d'éléments standards sont fournis par leurs fabricants, parfois directement sous forme de tableaux.

L'application traitée ici nécessite peu de variables et de contraintes, ce qui donne des temps de calculs courts (quelques minutes maximum). Toutefois, la description de la conception d'un système complexe dans son ensemble n'est pas envisageable; ou alors pour en déterminer des variables de conception générales, comme par exemple dans le cas d'un

avion, le rayon d'action, la consommation, etc. en fonction des principales dimensions ou du nombre de moteurs [Zim 01a].

Le système d'aide à la décision que nous proposons est pertinent pour des déterminations d'architectures qui nécessitent des algorithmes de résolution et une expertise avancée pour leur utilisation : c'est le cas, par exemple des boîtes de vitesses de voitures, où le problème de configuration consiste à déterminer notamment le nombre d'étages, les caractéristiques des engrenages, les entraxes, etc. Chaque constructeur automobile a développé sa démarche séquentielle "maison", durant laquelle des choix jalonnent la résolution du problème. Plusieurs algorithmes de résolutions différents existent selon les cas. Une fois ce type de problème modélisé sous forme de PSC, on comprend l'intérêt de la capitalisation des connaissances pour ne modifier par exemple que les rapports de vitesses et adapter la boîte à un autre modèle de véhicule.

Le système d'aide à la décision facilite le choix de concept de solution, la recherche d'architecture et la prise de décision en fin de conception préliminaire car :

- le concepteur peut savoir si une configuration est réalisable, si les domaines des variables sont compatibles;*
- les performances d'un concept et les conséquences d'un choix sont rapidement connues;*
- toutes les architectures solutions sont recherchées; les solutions obtenues sont classées selon des indicateurs de pertinence.*
- même s'il s'agit d'une conception architecturale limitée et unitaire, un gain de temps a été observé avec notre approche.*

Toutefois, cette approche est appliquée à des sous ensembles, à des problèmes que le concepteur est capable de décrire et pour lesquels différentes configurations sont possibles.

Conclusion

Constat

A partir de la définition d'un besoin sous forme fonctionnelle, la conception préliminaire consiste, d'une part, à rechercher et sélectionner des concepts, et, d'autre part, à donner corps (embodiment) au concept retenu, en recherchant une architecture de produit. Une analyse des processus de conception existants nous a conduit à observer que durant cette phase, les prescriptions de la plupart de ces processus induisent une **démarche itérative** et un **processus essai-erreur** :

Chaque étape du processus de conception permet de spécifier les artefacts et représentations du produit à concevoir, afin qu'ils soient de plus en plus précis et détaillés. Durant chaque étape, le concepteur est amené à faire une succession de choix, qui déterminent définitivement les solutions alternatives restantes. Cependant ces choix peuvent être remis en cause ultérieurement lors de validations.

A ce moment, valider un choix est délicat, car le concepteur ne dispose pas d'éléments suffisants pour comparer les différentes options qui s'offrent à lui ou les confronter aux multiples contraintes que le produit doit satisfaire. C'est notamment le cas :

- à la fin de la phase de recherche de concepts, pour le choix du concept à développer (durant la conception architecturale) parmi les concepts retenus à l'issue de la phase de créativité;
- pendant la conception architecturale, pour le choix de valeurs de certaines variables de conception²¹, indispensables pour déterminer d'autres variables. La détermination d'architecture est **séquentielle et causale**.

Le concepteur base sa recherche d'architecture sur les **caractéristiques qu'il estime structurantes**. Seule son expérience intervient et il n'a pas l'assurance d'être **exhaustif**, surtout dans le cas de problèmes nouveaux.

En définitive, le concepteur ne sait pas forcément si les choix qu'il effectue sont en adéquation avec l'ensemble des exigences et contraintes portant sur le produit à concevoir. Il

²¹ Variables structurantes relatives à des dimensions, des composants, des comportements physiques, etc.

ne sait pas non plus si ces choix là déterminent l'alternative la plus performante au regard des objectifs de conception.

Face au risque que constituent ces prises de décision a priori, le **recours aux habitudes** personnelles ou collectives, aux règles "maison" est sécurisant. Les choix induits par ces démarches habituelles ou "machinales" occultent une part de l'espace des solutions possibles.

En conséquence, la démarche adoptée le plus souvent consiste à procéder par essai-erreur, jusqu'à l'obtention d'une configuration opérationnelle; mais qui n'est **pas nécessairement optimale**. Ces **itérations** sont coûteuses en temps.

Besoin

Afin d'éviter les décisions a priori et limiter les itérations en conception préliminaire, nous avons proposé dans ce mémoire un système d'aide à la décision, qui puisse s'intégrer dans des démarches industrielles.

Nous avons positionné ce système par rapport aux processus déjà formalisés et utilisés.

A partir de **plusieurs concepts de solution** pertinents, nous proposons de sélectionner **une architecture** validée et prédimensionnée.

Les grandes étapes de la démarche globale d'aide à la décision sont :

- **L'écriture du problème** de conception préliminaire sous forme de Problème par Satisfaction de Contraintes (PSC), dont le formalisme est adapté à la modélisation et qui permet d'énoncer des contraintes de manière indépendante.
- La **recherche exhaustive des architectures solutions** par un solveur PSC, qui permet la prise en compte simultanée de toutes les contraintes, sans séquentialité ni priorité entre elles. Nous définissons une solution comme un ensemble de variables de conception valuées.
- **L'exploitation et la réduction de l'espace des solutions** pour aider à la décision : soit par la hiérarchisation des solutions, soit par la réduction de l'espace et la recherche de l'ensemble des solutions non dominées à partir du front de Pareto.
C'est seulement ensuite qu'un choix est à faire parmi ces solutions, mais l'espace des solutions dont le concepteur dispose n'a pas été arbitrairement restreint par des choix initiaux.
De plus, le concepteur peut désormais disposer d'éléments chiffrés d'évaluation. Cette étape nécessite donc des variables critères pour exprimer la pertinence de la conception.

Le système d'aide à la décision nécessite l'écriture du problème de conception préliminaire sous forme de contraintes et la formalisation de la base de connaissances décrivant le problème. Il est nécessaire d'identifier les variables de conception pertinentes permettant de décrire l'architecture du produit, notre artefact solution. Il faut également identifier les variables critères permettant de qualifier les solutions obtenues et ainsi de les hiérarchiser au regard des objectifs de conception.

Une analyse préalable doit être menée pour tout cela.

Contributions

La **pertinence de la conception** s'exprime par le client lors de l'analyse du besoin, mais également par le concepteur avec des critères parfois différents.

Nous nous sommes intéressés tout d'abord aux critères de qualification du point de vue du concepteur.

Puis, nous avons mis en place des indicateurs de performance, éléments chiffrés issus des variables critères. Ils sont directement utilisés dans une fonction objectif permettant de hiérarchiser les solutions ou pour la recherche du front de Pareto permettant de réduire l'espace des solutions.

Nous avons ensuite présenté une **démarche en quatre étapes**, facilitant l'expression du problème de conception au stade où les concepts de solutions pertinents sont retenus; pour le restreindre aux seules caractéristiques nécessaires et suffisantes pour la conception architecturale, les **caractéristiques structurantes** :

- Etape 1 - Analyse du besoin : Expression du besoin du client et des critères de qualification de la conception de son point de vue : critères technologiques (performances, durée de vie, masse, etc.), critères économiques (coûts, impact environnemental, critères de qualification au niveau de l'entreprise ou du marketing (risques, nuisances, perception, etc.). Ces critères de qualification proviennent principalement du cahier des charges et de normes ou réglementations.
- Etape 2 - Approche fonctionnelle : Enumération des situations de vie et fonctions structurantes du produit (règles métiers, fonctions contraintes impératives, fonctions à risque, etc.).
- Etape 3 - Approche organique : Description de la structure du produit, en utilisant un organigramme technique étendu. Les éléments standards à choisir ou dimensionner, les contraintes d'interfaces, etc. sont répertoriés.
- Etape 4 - Approche physique : Identification, grâce à des outils de description des flux, de tous les phénomènes physiques pertinents, qui permettent de décrire le comportement du produit. Il s'agit aussi bien des phénomènes liés à la réalisation de fonctions, que des phénomènes induits, souvent nuisibles.

A chaque étape, cette démarche permet également d'exprimer les critères de qualification de la conception du concepteur.

Nous avons proposé des **tableaux récapitulatifs**, qui constituent des guides pour réaliser cette démarche : ils spécifient, par exemple, pour un critère de qualification client, la variable critère correspondante, une indication bibliographique de référence, etc.

A la fin de cette démarche d'analyse et structuration, nous disposons donc d'un modèle du problème de conception, constitué de ses variables structurantes (variables de conception et variables critères), de leurs domaines de variation et des relations qui les lient.

Nous avons également **validé l'exhaustivité** des résultats de cette démarche et des différents aspects abordés durant les quatre étapes. Une analyse de listes existantes de spécifications ou d'exigences pour la conception architecturale a permis de vérifier qu'elles se retrouvent au moins une fois dans une des étapes de notre démarche de recherche des caractéristiques structurantes.

Application

Nous avons souhaité confronter notre approche avec une démarche spontanée de conception, adoptée naturellement par un groupe de concepteurs. Cette expérience a été menée pour la conception architecturale d'un mécanisme de remontée de poids d'horloge monumentale.

Nous avons constaté que les concepteurs ont été amenés à prendre des décisions déterminantes. Malgré cela, la recherche d'une architecture valide a nécessité un nombre important d'itérations. De plus, la solution proposée pouvait être améliorée pour minimiser les indicateurs de performance.

Les **améliorations** qui ont pu être constatées en utilisant le système d'aide à la décision sont les suivantes :

- obtentions de solutions optimales par rapport aux objectifs (la solution sélectionnée minimise de 30% un indicateur de performance par rapport à la solution obtenue par la démarche "classique");
- choix du concept le plus performant;
- obtention d'architectures-solutions validées et d'éléments dimensionnels pour poursuivre en conception détaillée;
- suppression des itérations engendrées par le processus essai-erreur, ce qui génère un gain de temps.

L'aide à la décision en conception préliminaire que nous proposons facilite donc les actions suivantes :

- le choix du concept de solution parmi plusieurs pertinents;
- la détermination pour chaque architecture-solution des valeurs des variables de conception;
- le choix des éléments standards parmi des catalogues.

Certes cette approche nécessite un temps d'analyse et de modélisation mais elle produit une capitalisation de connaissances.

Perspectives

Nous avons dans notre application restreint l'espace des solutions aux seuls indicateurs de performance et il était dans ce cas facile à exploiter.

Nous souhaitons tout d'abord améliorer l'exploitation des résultats. La représentation de l'espace des solutions (variables de conception) est un travail à entreprendre.

De plus, beaucoup de conceptions nécessitent évidemment plus d'indicateurs. La hiérarchisation des solutions sera alors moins évidente : Soit le choix des facteurs de pondération de la fonction objectif peut poser un problème; Soit la recherche du front de Pareto d'un espace complexe à plusieurs dimensions sera difficile.

C'est pourquoi nous entreprendrons de compléter la démarche d'analyse et structuration de problème par une hiérarchisation des caractéristiques structurantes. Elle peut permettre de ne retenir que les caractéristiques structurantes les plus importantes, ou de générer un classement des indicateurs de pertinence facilitant par exemple la pondération dans la fonction objectif.

L'application développée dans ce mémoire est simple et comporte un nombre restreint de variables et contraintes. Mais elle était intéressante pour mettre au point la

démarche d'analyse et structuration, ainsi que pour mettre en place la confrontation de la démarche de conception 'classique' avec l'utilisation du système d'aide à la décision.

Dans l'année à venir, cette méthode d'analyse préalable sera appliquée aux projets de notre équipe de recherche et par les industriels impliqués dans le consortium existant (RN'TL CO2) et à venir.

Nous souhaitons utiliser le système d'aide à la décision pour des systèmes plus complexes et fortement couplés. Il est actuellement mis en oeuvre pour la conception de systèmes de conditionnement d'air en aéronautique. Nous traiterons d'autres applications, dans d'autres secteurs industriels et pour des produits de grande série.

Enfin, nous avons vu que les exigences des différents groupes de conception, des différents métiers peuvent être en conflit. Dans un modèle complexe, ces requêtes antinomiques sont délicates à identifier. Les évolutions du solveur devront permettre d'identifier les contraintes en conflits et proposer au concepteur des moyens de résolution des contradictions. Les pistes à explorer concernent l'utilisation de la logique floue et la mise en place de méthodes de relâchements des contraintes.

Nous souhaitons poursuivre après le projet RN'TL ayant initié la collaboration entre laboratoires de recherche en informatique et en conception, avec un projet du type plateforme. La phase préalable d'analyse et ses outils seront intégrés au logiciel solveur. Ainsi, le concepteur disposera d'un outil-guide facilitant la réalisation de la phase de conception préliminaire.

Bibliographie

- [ADE 01] ADEME, "Pilote d'éco-conception", traduction du logiciel ECODESIGN PILOT, TU Wien, Institut für Konstruktionslehre, ECODESIGN, ADEME, 2001.
- [AFA 94] AFAV. "Management et démarches de projet- Projet de guide d'intégration des démarches qualité dans la conception de produits", Association Française pour l'Analyse de la Valeur, 1994.
- [AFN 85] AFNOR . "NF X50-153, analyse de la valeur, recommandations pour sa mise en œuvre", Association Française de NORmalisation, Paris, 1985.
- [AFN 90] AFNOR "NF X50-150/151, analyse de la valeur, analyse fonctionnelle : vocabulaire NF", "X50-152, analyse de la valeur, caractéristiques fondamentales", Association Française de NORmalisation, Paris, 1990-1991.
- [AFN 92] AFNOR . "NF L00-007 : Industrie aéronautique et spatiale - Vocabulaire - Termes généraux", Association Française de NORmalisation, Paris, mai 1992.
- [Alt 99] G.S. ALTSHULLER. "TRIZ, The innovation algorithm systematic innovation and technical creativity", Technical Innovation Center Inc., Worcester, 1999.
- [Ant 01] Erik K. ANTONSSON. "Imprecision in Engineering Design", Engineering Design Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 2001.
- [Aou 90] Améziane AOUSSAT. "La pertinence en innovation : nécessité d'un approche plurielle", Thèse de doctorat, ENSAM, mai 1990.
- [Aou 96] Améziane AOUSSAT. "Contribution à la modélisation du processus de conception de produits industriels", Rapport de synthèse en vue d'obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [Ash 00] M.F. ASHBY. "Choix des matériaux en conception mécanique", Dunod Editeur, Paris, 2000.
- [Bai 04] Yoan BAIZET. "La Gestion des Connaissances en Conception", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, mars 2004.
- [Bas 99] H. BASHIR, V. THOMPSON. "Estimating Design Complexity", Journal of Engineering Design, vol. 16, n°3, 1999.

- [Bax 95] Mike R. BAXTER. "Product Design – Practical methods for the systematic development of new products", Chapman & Hall, London, 1995.
- [Bel 01] P. BELLOY, E. FOUCARD, B. EYNARD, P. LAFON, L. ROUCOULES. "Prise en compte des connaissances, savoir et savoir faire dans la conception de produits mécaniques : application à la conception d'une liaison pivot", Dynamique des connaissances en conception: acquisition, capitalisation et réutilisation, AIP-PRIMECA, Grenoble, mai 2001.
- [Ber 88] C. BERLINER, J.A. BRIMSON. "Cost management for today's advanced manufacturing : The CAM-I conceptual design", Harvard Business School Press, 1988.
- [BNA 99] BNAE, Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace. "Recommandation générale pour la spécification de management de programme, RG.Aéro 000 40", 1999.
- [Boc 96] Jean-Claude BOCQUET. "Product/manufacture a systemic approach for simultaneous engineering", Proceedings of Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Nantes, avril 1996.
- [Boc 98] Jean-Claude BOCQUET. "Ingénierie simultannée, conception intégrée", in Conception de produits mécaniques – Méthodes, modèles et outils, Michel TOLLENAERE (Dir.), Editions Hermès, Paris, 1998.
- [Bra 00] R.H. BRACEWELL, J.E.E. SHARPE, A.L. JOHNSON. "The use of object oriented modelling and simulation tools in constraint satisfaction for embodiment design", IEE Seminar on tools for simulation and modelling, London, march 2000.
- [Bre 04] A.C. BRENT and J.K. VISSER. "An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry", Journal of Cleaner Production, Available online 27 February 2004.
- [Bri 98] Daniel BRISSAUD, Olivier GARRO. "Conception distribuée, émergente", in Conception de produits mécaniques – Méthodes, modèles et outils, Michel TOLLENAERE (Dir.), Editions Hermès, Paris, 1998.
- [Cav 95] Jean CAVAILLES. "Méthodes de management de programme", 2ème édition, DGA-Teknea , 1995.
- [CEN 00] CEN, European Committee for Standardization. "European standards: Packaging requirements EN13427, 13428", Comité Européen de Normalisation, 2000.
- [Cha 90] B. CHANDRASEKARAN. "Design Problem Solving: A task analysis", AI Magazine, 1990.
- [Cha 92] Amaresh CHAKRABARTI, Thomas P. BLIGH, Tony HOLDEN. "Towards a decision-support framework for the embodiment phase of mechanical design", Artificial Intelligence in Engineering, n°7, 1992.
- [Cha 99] C.B. CHAPMAN, M. PINFOLD. "Design engineering- a need to rethink the solution using knowledge based engineering", Knowledge-Based Systems, n°12, march 1999.
- [Chi 02] Li-Chieh CHEN, Li LIN. "Optimization of products configuration design using functional requirements and constraints", Research in Engineering Design, n°13, 2002.
- [Chv 93] Ivan CHVIDCHENKO, Jean CHEVALLIER. "Conduite et gestion de projets - Principes et pratiques pour petits et grands projets", Cépaduès éditions, 1993.
- [Cia 98] P. CIARLET, J.L. LIONS. "Introduction à l'Analyse Numérique Matricielle et à l'Optimisation", Dunod Editeur, Paris, 1998.

- [Col 02] Y. COLLETTE, P. SIARRY, "Optimisation multiobjectif", Editions Eyrolles, 2002.
- [Cor 03] Christophe CORRE. "Optimisation par algorithmes génétiques – Applications en sciences de l'ingénieur", Cours de l'école doctorale, ENSAM, Paris, 2003.
- [Cul 95] P.F. CULVERSOUSE. "Constraining designers and their CAD tools", Design Studies, n° 16, 1995.
- [Dar 00] Françoise DARSEES. "Que sait on des processus cognitifs de conception ?", Cours de DEA CPN, ENSAM, Paris, 2000.
- [Den 02] Dominique DENEUX. "Méthodes et modèles pour la conception concourante", Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, janvier 2002.
- [Des 99] Alain DESROCHES. "Aspects conceptuels des risques", Le risque, la sûreté de fonctionnement, la fiabilité en phase de conception des produits et des systèmes, Journée PRIMECA, Paris, janvier 1999.
- [Die 00] George E. DIETER. "Engineering design - A materials and processing approach", 3rd ed., Mc Graw-Hill International Editions, 2000.
- [Dor 03] Raphaëlle DORE, Xavier FISCHER, Jean-Pierre NADEAU, Jérôme PAILHES. "Méthodologie avancée pour la conception conforme utilisateur", colloque AIP-PRIMECA, La Plagne, 2003.
- [Fan 94] Jean-Louis FANCHON. "Guide des Sciences et technologies industrielles", AFNOR-Nathan, 1994.
- [Fen 00] Shaw C. FENG, Eugene Y. SONG. "Information modeling of conceptual process planning integrated with conceptual design", Proceedings of DETC2000, Baltimore, September 2000.
- [Fow 98] William Y. FOWLKES, Clyde M. CREVELING. "L'ingénierie robuste - Utiliser la démarche Taguchi pour concevoir des produits et des systèmes robustes", Dunod Editeur, 1998.
- [Fer 91] Sandrine FERNEZ-WALCH. "L'innovation de produit au quotidien en entreprise industrielle", Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, mars 1991.
- [Fis 00] Xavier FISCHER. "Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception mécanique intégrée ; application aux appareils à pression", Thèse de doctorat, ENSAM, décembre 2000.
- [Gar 94] Hervé GARIN. "AMDEC / MADE / AEEL - L'essentiel de la méthode", AFNOR, 1994.
- [Gia 97] Ronald E. GIACHETTI, Robert E. YOUNG, Axel ROGGAZ, Walter EVERSHEIM, Giovanni PERRONE. "A methodology for the reduction of imprecision in the engineering process", European Journal of Operational Research, n°100, 1997.
- [Goe 95] M. GOEDKOOOP. "The Eco-indicator 95 : Manual for designer", National reuse of waste research programme (NOH), rapport n°9524, 1995.
- [Gre 99] Jean-Christophe GRENOUILLEAU, Alain DESROCHES, Pierre DEJAX, François PERES. "Analyse des risques opérationnels liés à la gestion des éléments de rechange d'un système spatial complexe en phase de conception", Le risque, la sûreté de fonctionnement, la fiabilité en phase de conception des produits et des systèmes, journée PRIMECA, Paris, janvier 1999.

- [Gui 93] Claudine GUIDAT, Vincent BOLY, Christine NOEL-ARNOULD. "L'analyse de la valeur : outil de base pour une nouvelle démarche d'amélioration de produits intégrant technique, marketing, ergonomie, design, sécurité et normalisation", Congrès international Valeur & Design, Paris, avril 1993.
- [Hac 91] Dictionnaire de la langue française, Hachette, 1991.
- [Hic 02a] B.J. HICKS, S.J. CULLEY, R.D. ALLEN, G. MULLINEUX. "A framework for the requirements of capturing, storing and reusing information and knowledge in engineering design", International journal of information management, n°22, 2002.
- [Hic 02b] B.J. HICKS, S.J. CULLEY, G. MULLINEUX. "Cost estimation for standard components and systems in the early phases of the design process", Journal of Engineering Design, vol. 13, n°4, 2002.
- [Hic 02c] B.J. HICKS, S.J. CULLEY. "An integrated modelling environment for the embodiment of mechanical systems", Computer-Aided Design n°34, 2002.
- [Hub 88] Vladimir HUBKA, Myrup ANDREASEN, Ernst EDER. "Practical Studies in systematic design", Butterworths, London, 1988.
- [Hub 01] Vladimir HUBKA, Ernst EDER. "Design Science", Edited for the web by Filippo A. SALUSTRI, 2001.
- [IFE 03] IFEN, Institut Français de l'Environnement. <http://www.ifen.fr> , site consulté en novembre 2003.
- [IN2 02] IN2P3 CNRS. "La conduite de projet", Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, <http://qualite.in2p3.fr/index.html> , site consulté en septembre 2002.
- [ISO 02] ISO. "Prise en compte de l'environnement en conception", XP ISO/TR 14062, Norme ISO, 2002.
- [Jan 90] Philippe JANSEN. "Aide à la conception : Une approche basée sur la satisfaction de contraintes", Thèse de doctorat, Université de Montpellier, février 1990.
- [Jan 00] Marc JANIN. "Démarche d'éco-conception en entreprise - Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus", Thèse de doctorat, ENSAM, avril 2000.
- [Jan 02] J.M. JANCOVICI. "Méthode Bilan Carbone", ADEME, Version 2.1, 2002.
- [Jea 98] Alain JEANTET. "Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception", Sociologie du travail, n°3, 1998.
- [Kaw 96] H. KAWAKAMI, O. KATAI, T. SAWARAGI, T. KONISHI, S. IWAI. "Knowledge acquisition method for conceptual design based on value engineering and axiomatic design theory", Artificial intelligence in Engineering, vol. 10, n°3, 1996.
- [Lan 02] Gérard LANDY. "AMDEC Guide pratique", AFNOR, 2002.
- [Lar 96] Nick LARSON, Andrew KUSIAK. "Managing design processes : A risk assessment approach", IEEE transactions on systems, man and cybernetics, vol. 26 n°6, november 1996.
- [LeC 92] Marc LE COQ. "Approche intégrative en conception de projet", Thèse de doctorat, ENSAM, décembre 1992.
- [Ler 92] Alain LEROY, Jean-Pierre SIGNORET. "Le risque technologique", Presses Universitaires de France, Paris, 1992.

- [Lig 92] J.C LIGERON, P. LYONNET. "Fiabilité en exploitation", Lavoisier éditions, 1992.
- [Lon 02] Pierre LONCHAMPT, Guy PRODHOMME, Daniel BRISSAUD. "Assessment of mechanical products during the conceptuel design stage using value criteria", Proceedings of Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont-Ferrand, mai 2002.
- [Mal 96] Johan MALMQVIST, Roger AXELSSON, Mikael JOHANSSON. "A comparative analysis of the theory of inventive problem solving and the systematic approach of Pahl and Beitz", Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference, Irvine, 1996.
- [Man 99] Darrell MANN. "Axiomatic Design and TRIZ : compatibilities and contradictions", TRIZ Journal, juin et juillet 1999.
- [Mat 02] P.C. MATTHEWS, L.T.M. BLESSING, K.M. WALLACE. "The introduction of a design heuristics extraction method", Advanced Engineering Informatics, vol. 16, 2002.
- [Med 00] A.J. MEDLAND, Glen MULLINEUX. "A decomposition strategy for conceptual design", Journal of Engineering Design, vol. 11, n°1, 2000.
- [Mid 93] Christophe MIDLER. "L'auto qui n'existait pas", InterEditions, Paris, 1993.
- [MIL 98] MIL-HDBK-881. "Work Breakdown Structure for defense material items", Department of Defense Handbook, USA 1998.
- [Mil 03] Dominique MILLET (sous la direction de). "Intégration de l'environnement en conception - l'entreprise et le développement durable", Lavoisier-Hermes Sciences, 2003.
- [Mis 90] F. MISTREE, W.F. SMITH, B.A. BRAS, J.K. ALLEN, D. MUSTER. "Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design", Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 98, 1990.
- [Mon 00] François MONCHY. "Maintenance - Méthodes et organisation", Dunod Editeur, Paris, 2000.
- [Mul 02] Taufiq MULYANTO. "Utilisation des techniques de programmation par contraintes pour la conception d'avions", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, décembre 2002.
- [Nad 02] Jean-Pierre NADEAU. "De l'analyse fonctionnelle à la créativité technique et à l'innovation", cours ENSAM, 2002.
- [Off 04] Office québécois de la langue française. "Grand dictionnaire terminologique", <http://www.granddictionnaire.com>, consulté en janvier 2004.
- [Oos 01] Bas OOSTERMAN. "Improving Product Development Projects by Matching Product Architecture and Organization", Ph.D Thesis, Groningen University, 2001.
- [Orl 03] Michael A. ORLOFF. "Inventive thinking though TRIZ, a practical guide", Springer, Berlin, 2003.
- [Pah 96] G. PAHL, W. BEITZ. "Engineering design – A systematic approach", 2nd edition, Springer-Verlag, Londres, 1996.
- [Pit 97] Jean-Pascal PITTON. "RELIASEP: Une méthode et un outil pour construire la sûreté de fonctionnement", Congrès international Franco-Québécois de Génie Industriel, Albi, 1997.

- [Pop 99] Michiel G. R. POPMA. "Development of a Generic Object Builder, with focus on support of What-If Synthesis", MSc Thesis, University of Twente, Enschede, 1999.
- [Pre 94] Michel PREVOST, Charles WAROQUIER. "L'analyse du soutien logistique et son enregistrement", Techniques et Documentation Lavoisier, Paris, 1994.
- [Pru 03] Guy PRUDHOMME, Peggy ZWOLINSKI, Daniel BRISSAUD. "Integrating into the design process the needs of those involved in the product life-cycle", Journal of Engineering Design, vol.14, n°3, september 2003.
- [Pug 91] Stuart PUGH. "Total design - Integrated methods for successful product engineering", Pearson Education Limited, Addison-Wesley Publishers Ltd., 1991.
- [Qua 94] Danielle QUARANTE. "Eléments de design industriel", 2^{ème} édition, Editions Polytechnica, Paris, 1994.
- [Rey 01] Isabelle M.M.J. REYMEN. "Improving design processes through structured reflexion – A domain-independent approach", Ph.D Thesis, Eindhoven, The Netherlands, 2001.
- [Roo 95] N.F.M. ROOZENBURG, J. EEKELS. "Product Design: Fundamentals and methods", John Wiley & Sons, Chichester UK, 1995.
- [Rou 00] P. ROUSSEAU, T. APOSTOL. "Valeur environnementale de l'énergie", Collection des sciences appliquées de l'INSA Lyon, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2000.
- [Sar 97] Shawn D. SARBACKER, Kosuke ISHII. "A framework for evaluating risk in innovative product development", Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Sacramento, september 1997.
- [Sau 96] K. SAUR. "Life cycle assessment as an engineering tool in the automotive industry", International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 1, 1996.
- [Sav 00] Semyon D. SAVRANSKY. "Engineering of creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving", CRC Press, 2000.
- [Saw 01a] Hiroyuki SAWADA. "Constraint-based computer support for insightful multidisciplinary engineering design", Ph.D Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, march 2001.
- [Saw 01b] Hiroyuki SAWADA, Xiu-Tian YAN. "Applying generic constraint solving techniques in providing insights into engineering design", Proceedings of International Conference on Engineering Design, Glasgow, august 2001.
- [Saw 02] Hiroyuki SAWADA. "Computer support for insightful engineering design based on generic and rigorous principles of symbolic algebra", Proceedings of Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont-Ferrand, mai 2002.
- [Sca 04a] D. SCARAVETTI, J. PAILHES, J.P. NADEAU, P. SEBASTIAN. "Aided decision-making for an embodiment design problem", in Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, edited by Alan Bramley, Daniel Brissaud, Daniel Coutellier and Chris McMahon, Kluwer Academic Press, Accepté en juin 2004.
- [Sca 04b] D. SCARAVETTI, J.P. NADEAU, J. PAILHÈS, P. SEBASTIAN. "Structuring of embodiment design problem based on the product lifecycle", International Journal of Product Development, Special Issue on Product Lifecycle Management, Accepté en juillet 2004.

- [Sco 96] Michael J. SCOTT, Erik K. ANTONSSON. "Formalisms for negotiation in engineering design", 8th International Conference on Design Theory and Methodology ASME, Irvine USA, august 1996.
- [Seb 03] Patrick SEBASTIAN. "Approximation et intégration de modèles pour l'aide à la décision en génie des procédés", Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Bordeaux 1, juin 2003.
- [SET 93] SETAC. "Guidelines for Life-cycle Assessment: A code of practice", 1993.
- [Sod 04] Raj SODHI, Manuela SONNENBERG, Sanchoy DAS. "Evaluating the unfastening effort in design for disassembly and serviceability", Journal of Engineering Design, Vol. 15 n°1, february 2004.
- [Sri 89] Duvuru SRIRAM, George STEPHANOPOULOS, Robert LOGCHER, David GOSSARD, Nicolas GROLEAU, David SERRANO, Dundee NAVINCHANDRA. "Knowledge-Based System applications in engineering design: Research at MIT", AI Magazine, vol.10 n°3, 1989.
- [Suh 90] Nam Pyo SUH. "The principles of design", Oxford University Press, New York, 1990.
- [Tag 03] Genichi and Shin TAGUCHI. "Key concepts for robust engineering using Taguchi methods", American Supplier Institute, Séminaire sur les méthodes Taguchi, ENSAM Paris, avril 2003.
- [Tas 03] Robert TASSINARI. "Pratique de l'analyse fonctionnelle", 3ème édition, Dunod Editeur, 2003.
- [Tat 96] Derrick TATE, Mats NORDLUND. "A design process roadmap as a general tool for structuring and supporting design activities", Proceedings of the 2nd world conference on integrated design and process technology, Austin, 1996.
- [The 03] Gabriel THEODOSIOU, Nickolas S. SAPIDIS. "Information models of layout constraints for product life-cycle management: a solid-modelling approach", Computer-Aided Design, Available online 2 September 2003.
- [Tho 93a] Anna C. THORNTON. "Constraint specification and satisfaction in embodiment design", Ph.D Thesis Cambridge University, 1993.
- [Tho 93b] Anna C. THORNTON, Aylmer JOHNSON. "Constraint specification and satisfaction in embodiment design", Proceedings of 9th International Conference on Engineering Design, The Hague, august 1993.
- [Tho 94] Anna C. THORNTON. "A support tool for constraint processes in embodiment design", ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, september 1994.
- [Tho 96a] Anna C. THORNTON. "The use of constraint-based design knowledge to improve the search of feasible designs", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 9, n°4, 1996.
- [Tho 96b] Anna C. THORNTON, Aylmer JOHNSON. "CADET a software support tool for constraint processes in embodiment design", Research in Engineering Design, vol. 8, 1996.
- [Tom 02] Frédéric TOMALA. "Proposition de modèles et méthodes pour l'aide à l'innovation des performances d'une innovation dès sa conception", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, 2002.

- [Tom 03] Frédéric TOMALA. "Aide à l'évaluation en conception innovante, dès la phase de créativité", International Industrial Engineering Conference, Quebec Canada, octobre 2003.
- [Tre 03] Laboratoire inter-établissements TREFLE. "MAL'IN®, Méthodes d'Aide à L'INnovation", <http://www.trefle.u-bordeaux1.fr/malin/> – TREFLE-ENSAM, Bordeaux, 2003.
- [Ull 03] David G. ULLMAN. "The mechanical design process", 3rd edition, McGraw-Hill Higher Education, New York, 2003.
- [Vad 96] Philippe VARCARD. "Aide à la programmation des outils en conception de produit", Thèse de doctorat, ENSAM, novembre 1996.
- [Var 95] Catalina VARGAS, Antoine SAUCIER, Pierre-Alain YVARS. "Un environnement pour la réalisation d'un système d'aide à la conception d'organes mécaniques", Revue de CFAO et d'informatique graphique, vol.10, n°1-2, 1995.
- [VDI 87] VDI-Verlag (Verein Deutscher Ingenieure). "Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products", VDI Guidelines 2221, Germany, 1987.
- [Ven 97] J.P. VENTERE. "Conception écologique des produits", Techniques de l'ingénieur, G6000 Vol G1, 1997.
- [Ver 00] Hendrik A. VERFAILLIE, Robin BIDWELL. "Measuring eco-efficiency - A guide to reporting company performance", World Business Council for Sustainable Development, june 2000.
- [Ver 04] Yoann VERNAT. "Formalisation et qualification de modèles par contraintes en conception préliminaire ", Thèse de doctorat, ENSAM, 2004.
- [Vil 94] D. VILLE. "L'assemblage de fonctions techniques, une nouvelle méthode de conception", SISQUAL, Qualité en conception, septembre 1994, Paris.
- [Wal 00] Ken M. WALLACE, Lucienne T.M. BLESSING. "Observations on some german contributions to engineering design – In memory of Professor W. Beitz", Research in Engineering Design, n°12, 2000.
- [Wel 99] E.G. WELP, P. BRAUN. "Knowledge processing as a solution and decision-making aid in early phases of embodiment design", Proceedings of International Conference on Engineering Design, Munich, august 1999.
- [Wil 80] D. WILSON. "An exploratory study of complexity in axiomatic design", Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1980.
- [Woo 01] Kristin L. WOOD, James L. GREER. "Function-based synthesis methods in engineering design", in "Formal engineering design synthesis", Erik K. ANTONSSON and Jonathan CAGAN Editors, Cambridge University Press, 2001.
- [Yan 00a] K. YANG, H. ZHANG. "A comparison of TRIZ and Axiomatic Design", TRIZ Journal, août 2000.
- [Yan 00b] K. YANG, H. ZHANG. "Compatibility analysis and case studies of Axiomatic Design and TRIZ", TRIZ Journal, septembre 2000.
- [Yan 01] Bernard YANNOU. "Préconception de produits", Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, INPG , juin 2001.

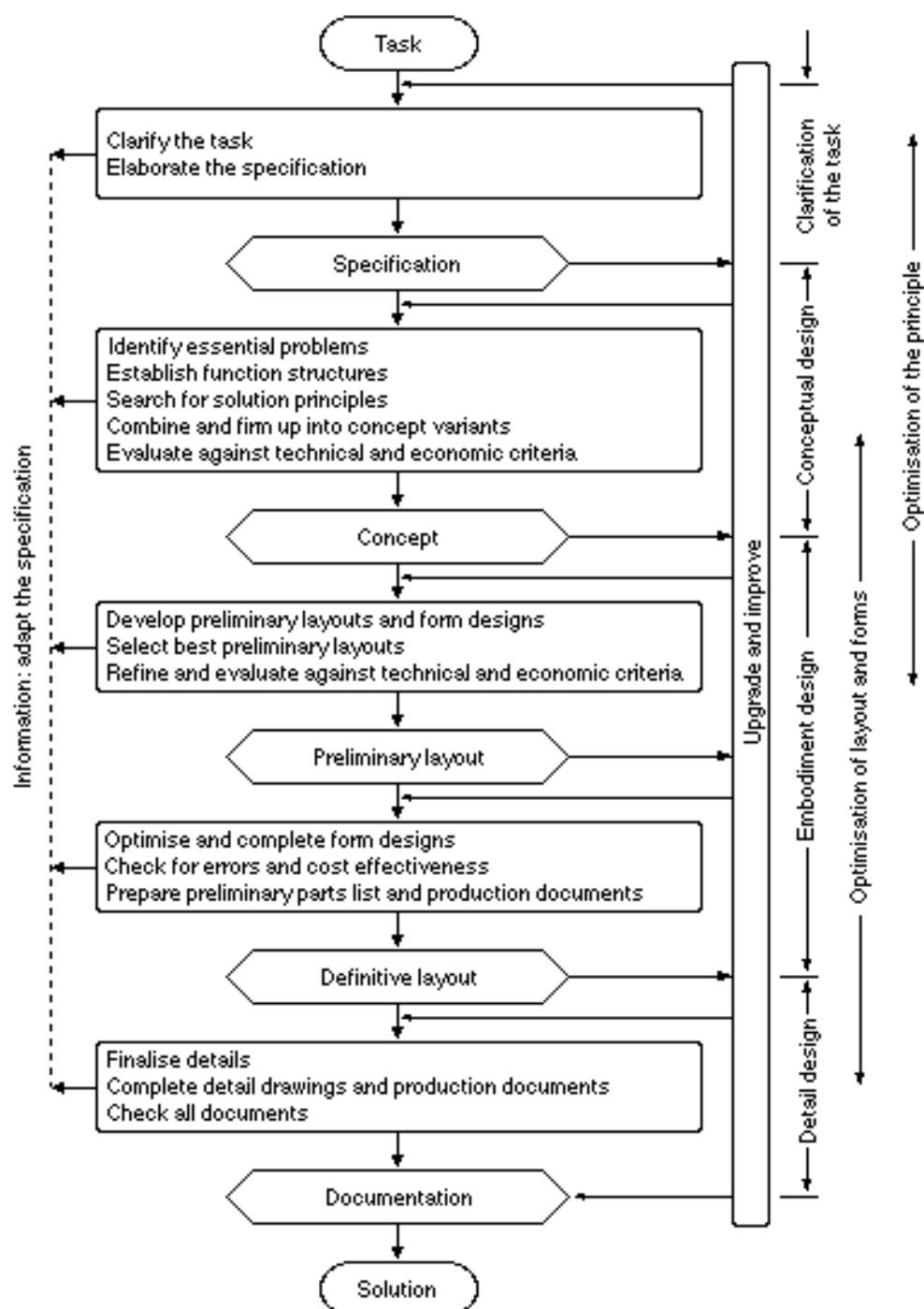
- [Zim 01a] L.ZIMMER, P.ZABLIT. "Global aircraft predesign based on constraint propagation and interval analysis", Proceedings of CEAS Conference on multidisciplinary Aircraft design and Optimisation, Köln, Germany, june 2001.
- [Zim 01b] L.ZIMMER. "CO2 Project", Actes du séminaire S3P, Bayonne, novembre 2001.

Annexes

- I - Phases du processus de conception proposé par Pahl et Beitz.
- II - Règles de Polovinkin, première traduction.
- III - Aide à la construction du Graphe des associations Substances-Champs et à l'identification des flux physiques (méthodes et outils MAL'IN[®]).
- IV - Trois premières lois d'évolutions de la théorie TRIZ.
- V - Modèle "Constraint Explorer" du problème de conception architecturale du mécanisme de remontée de poids d'horloge.

Annexe I

Phases du processus de conception proposé par Pahl et Beitz



Annexe II

Règles de Polovinkin :

Ressources pour transformer les systèmes (première traduction)

1. Transformation de forme

- 1.1. Utiliser des formes circulaires, spiralées, arborescente, sphérique ou compactes
- 1.2. Intégrer des ouvertures ou des cavités (ou actions inverses).
- 1.3. Aller des formes ou structures symétriques vers des formes ou structures asymétriques (ou actions inverses).
- 1.4. Passer d'éléments rectilignes, des surfaces plates, cubiques, formes multilatérales (spécialement aux interfaces) à des courbes, des sphères ou des formes aérodynamiques (ou actions inverses).
- 1.5. Donner des formes convexes ou plus convexes à des systèmes travaillant sous charge.
- 1.6. Compenser une forme non voulue par l'agrégation d'une forme aux contours opposés
- 1.7. Réaliser une forme inspirée d'un système remplissant une fonction analogue, du corps humain, d'un animal, d'une plante et d'autres éléments.
- 1.8. Adapter le système en s'inspirant de parties du corps humain.
- 1.9. Utiliser des principes issus de la nature lors de fonctionnements analogues.
- 1.10. Séparer les matériaux bruts (en plaques ou volumiques) rationnellement (ou optionnellement); Changer les détails des formes pour utiliser des matériaux bruts.
- 1.11. Remplacer des détails de formes fermées par des formes détournées ou découpées
- 1.12. Rechercher la forme globale optimale du système
- 1.13. Rechercher la forme intégrant au mieux l'ensemble du système
- 1.14. Utiliser différents types de symétrie, asymétries, propriétés statiques ou dynamiques de formes, rythme, nuances ou contrastes.
- 1.15. Réaliser une coordination harmonieuse des formes des différents systèmes et (sous)systèmes.
- 1.16. Améliorer l'esthétique des formes.

2. Transformation de structures

- 2.1. Enlever l'élément ou le système le plus critique
- 2.2. Enlever des (sous)systèmes en conservant les (sous)systèmes générateurs des fonctions du système. Si un élément à plusieurs fonctions, l'utilité d'autres disparaît.
- 2.3. Associer un nouvel élément au système par une liaison rigide ou souple placé dans la zone opérative ou en contact avec la zone de travail ou son environnement.
- 2.4. Associer un bloc fonctionnel au système de base.
- 2.5. Modifier les communications entre les (sous)systèmes ou les systèmes. Remplacer des liaisons rigides par des éléments flexibles (ou actions inverses).
- 2.6. Remplacer la source d'énergie, le type de conduite, une couleur,...

- 2.7. Remplacer un circuit mécanique par des circuits électriques, thermiques, optiques ou électroniques.
- 2.8. Changer la configuration du système; Enlever les dispositions coûteuses.
- 2.9. Grouper les contrôles.
- 2.10. Compacter le système dans un boîtier uniforme ou construire un système intégré.
- 2.11. Imposer une conduite uniforme, un système de contrôle ou une alimentation en puissance
- 2.12. Connecter des (sous)systèmes homogènes pour des opérations connexes
- 2.13. Associer des (sous)systèmes à fonctions indépendantes dans un système qui garde toutes ses fonctions
- 2.14. Agréger. Créer un concept de base dans lequel on peut placer différents (sous)systèmes ou combinaisons de (sous)systèmes.
- 2.15. Combiner des (sous)systèmes normalement incompatibles pour éliminer les contradictions
- 2.16. Choisir des matériaux bruts et effectuer le minimum d'opérations pour fabriquer ou réaliser les (sous)systèmes.
- 2.17. Utiliser des (sous)systèmes assurant une grande réduction du système technique durant le passage des conditions de travail aux conditions de repos (pliage, modularité, éléments gonflables ou autres)
- 2.18. Rechercher une structure globalement optimale

3. Transformation dans l'espace

- 3.1. Changer l'orientation du système, horizontal, vertical, incliné; mettre sur le côté; retourner.
- 3.2. Utiliser le vide entre les (sous)systèmes ou les cavités des (sous)systèmes
- 3.3. Rentrer les (sous)systèmes les uns dans les autres (poupées gigognes)
- 3.4. Transformer des contacts linéaires sur plusieurs contacts linéaires ou plan (ou actions inverses).
- 3.5. Passer d'un plan à plusieurs plans ou en 3D, passer d'une couche à plusieurs couches (ou actions inverses)
- 3.6. Changer la direction d'un action mécanique
- 3.7. Passer d'un contact ponctuel à un contact linéique puis à un contact surfacique plan et ensuite à un contact surfacique 3D (ou actions inverses).
- 3.8. Réaliser une interface par plusieurs surfaces
- 3.9. Manipuler les composants de fermeture dans la zone opératoire sans déplacer d'autres (sous)systèmes ou le système total
- 3.10. Placer les (sous)systèmes à la meilleure place pour diminuer les pertes de temps et d'énergie
- 3.11. Passer d'une connexion séquentielle entre (sous)systèmes à des (sous)systèmes en parallèle ou mélangés (ou actions inverses)
- 3.12. Diviser les (sous)systèmes en classes et les déplacer dans la zone opératoire
- 3.13. Diviser le (sous)système en 2 parties (volumique et non volumique); la première partie définit le volume
- 3.14. Déplacer le (sous)système affecté par les effets néfastes loin de la zone de production de ces effets
- 3.15. Transférer le système ou les (sous)systèmes dans un environnement où il n'y a pas d'effets néfastes

3.16. Passer outre les restrictions spatiales ou les encombrements imposés

4. Transformation dans le temps

- 4.1. Exécuter l'action à un autre moment. Réaliser l'action requise avant le début ou après la fin de la tâche exécutée par le (sous)système
- 4.2. Passer d'une énergie continue (substance) ou une action continue (procédé) à une action ou une fourniture d'énergie périodique ou pulsée (ou actions inverses).
- 4.3. Passer d'un régime permanent à un régime non stationnaire ou dynamique.
- 4.4. Mettre à profit les intervalles de temps non utilisés; Utiliser les pauses lors des actions périodique ou pulsées pour exécuter d'autres actions
- 4.5. Modifier une action utile continue pour qu'elle assure une fonction permanente sans temps d'arrêt. Tout (sous)système doit travailler à charge maximale
- 4.6. Changer les séquences d'exécution des opérations ou des fonctions
- 4.7. Exécuter des actions séquentielles en parallèle (simultanément) (ou actions inverses).
- 4.8. Combiner des procédés ou des opérations technologiques. Lier des opérations (ou actions inverses).

5. Transformation des mouvements et des actions mécaniques

- 5.1. Changer l'axe de rotation
- 5.2. Substituer un mouvement rectiligne par une rotation (ou actions inverses).
- 5.3. Changer ou réduire les mouvements de retour ou intermédiaires
- 5.4. Changer essentiellement la direction du mouvement, même jusqu'à la direction opposée
- 5.5. Remplacer une trajectoire complexe par une trajectoire linéaire ou circulaire (ou actions inverses).
- 5.6. Remplacer une flexion par une traction ou une compression. Remplacer une compression par une flexion
- 5.7. Diviser le système en 2 parties lourde et légère et déplacer seulement la partie légère
- 5.8. Changer les conditions de travail afin de ne pas lutter contre la pesanteur
- 5.9. Remplacer le frottement (glissement) par du roulement (ou actions inverses).
- 5.10. Passer d'un champ physique constant à un champ variable (ou actions inverses).
- 5.11. Diviser le (sous)système en parties capable de déplacer chaque autre
- 5.12. Changer les conditions de travail afin que les mouvement dangereux ou néfaste se fassent à grande vitesse (ou actions inverses).
- 5.13. Utiliser des forces magnétiques
- 5.14. Compenser les effets de la pesanteur sur un (sous)système par l'adjonction d'un système possédant une force de levage
- 5.15. Immobiliser une (sous)système auparavant en mouvement (ou actions inverses).

6. Transformation des matériaux

- 6.1. Réaliser le (sous)système et les (sous)systèmes associés par le même matériau ou par des matériaux aux propriétés similaires
- 6.2. Réaliser le (sous)système et ses surfaces par un matériau poreux. Remplir les trous par une substance
- 6.3. Diviser le (sous)système en partie afin chaque partie soit réalisée dans le matériau approprié
- 6.4. Changer un matériau trop performant (sauf s'il réalise une fonction importante)
- 6.5. Changer les propriétés de surface du (sous)système; consolider la surface; neutraliser les propriétés des matériaux à la surface
- 6.6. Changer une partie rigide par une substance déformable; Remplacer une structure 3D rigide par une enveloppe flexible ou des films (ou actions inverses).
- 6.7. Changer les propriétés physiques des matériaux (ex : changement d'état)
- 6.8. Remplacer certains environnements du système par des systèmes ayant des propriétés différentes
- 6.9. Utiliser d'autres matériaux (bon marché, récent,...)
- 6.10. Utiliser les particularités des matériaux et leur rigidification en fin d'action
- 6.11. Séparer les propriétés nuisibles ou indésirables des substances
- 6.12. Remplacer l'environnement traditionnel. Aller vers un environnement fortement raréfié, inerte, liquide ou autre.
- 6.13. Remplacer le (sous)système par un copie optique (image); changer l'échelle de cette image; Passer d'une image visible à une image infrarouge, ultraviolet ou autre
- 6.14. Remplacer un (sous)système cher ou surdimensionné par un (sous)système bon marché ou juste nécessaire
- 6.15. Standardiser les divers matériaux et formes du (sous)système
- 6.16. Réaliser le (sous)système par des matériaux dont les propriétés différentielles permettent de réaliser l'action (ex : matériaux à coefficients de dilatation différents)
- 6.17. Remplacer les partie solides par en utilisant des liquides ou des gaz (gonflables, coussin d'air ou coussin d'eau, hydrostatique,...) (ou actions inverses).
- 6.18. Choisir des matériaux et des procédés réduisant les déchets lors de la fabrication
- 6.19. Utiliser des technologies économiques
- 6.20. Consolider les matériaux par l'emploi de champs mécaniques, thermiques, électrophysiques, électrochimiques, laser ou autres.
- 6.21. Utiliser des matériaux hautes performances (résistance à la corrosion, électriques,...)
- 6.22. Utiliser des matériaux renforcés, composites, poreux ou autres
- 6.23. Utiliser des matériaux à caractéristiques changeant avec le temps (résistance, transparence,...)

7. Ressources différentielles

- 7.1. Diviser le flux (substance, énergie, information) en 2 ou plus
- 7.2. Diviser le (sous)système friable, liquide ou gazeux
- 7.3. Couper le (sous)système en élément facilement séparable
- 7.4. Distinguer l'énergie motrice et les autres sources d'énergie; les déplacer vers les opérateurs ou vers la zone opératoire

- 7.5. Rendre chaque (sous)système indépendant en contrôle, fonctionnement et conduite
- 7.6. Fractionner le système en systèmes homogènes réalisant des fonctions similaires (ou actions inverses).
- 7.7. Diviser le (sous)système en parties qui réalisent chacune une fonction et ensuite les assembler
- 7.8. Diviser le (sous)système en parties chaude et froide en les isolant l'une de l'autre
- 7.9. Passer d'un système compact à un système fait de (sous)systèmes séparés
- 7.10. Découper un (sous)système en blocs fonctionnels, chaque bloc possède une fonction indépendante
- 7.11. Allouer dans le système le (sous)système nécessaire (la propriété nécessaire) et le renforcer et améliorer les conditions de travail

8. Modifications quantitatives

- 8.1. Changer les paramètres du (sous)système ou de l'environnement
- 8.2. Multiplier ou réduire le nombre de (sous)systèmes semblables ou identiques dans le système. Changer le nombre de (sous)systèmes travaillant au en cours d'utilisation par le système.
- 8.3. Changer les dimensions hors tout, le volume ou la longueur du (sous)système pendant leur fonctionnement ou leur non fonctionnement
- 8.4. Multiplier ou réduire le degré de découpage d'un (sous)système
- 8.5. Réduire de manière infime l'effet requis
- 8.6. Utiliser un concept un peu plus performant que requis
- 8.7. Changer les facteurs nuisibles afin qu'ils cessent d'être néfastes
- 8.8. Réduire le nombre de fonctions du (sous)système afin de devenir plus spécifique, mieux approprié aux fonctions essentielles
- 8.9. Exagérer considérablement les tailles (ou autres paramètres) du (sous)système et trouver des applications (ou actions inverses)
- 8.10. Multiplier l'intensité des procédés technologiques pour placer la zone opératoire dans la forme ou le volume donné
- 8.11. Créer une qualité locale; concentrer localement l'action mécanique, la pression, le voltage,..
- 8.12. Trouver des paramètres globaux optimums du (sous)système technique pour différents critères de développement
- 8.13. Utiliser d'autres principes physiques faisant intervenir des niveaux d'énergies plus faible ou des énergies plus fiables ou plus efficaces
- 8.14. Après avoir amélioré un (sous)système définir comment un autre (sous)système peut évoluer pour augmenter l'efficacité du système

9. Transformations en accord avec les tendances d'évolution

- 9.1. Aller de substances ou de champs homogènes et désordonnés vers des substances ou de champs hétérogènes et ordonnés (dans l'espace et dans le temps)
- 9.2. Coordonner (ou inversement) l'action ou la substance réalisant la fonction avec la fréquence propre de la substance objet de cette fonction
- 9.3. Profiter d'une pause lors d'une réalisation d'action pour effectuer une autre action

- 9.4. Changer la structure rigide d'une substance par une structure dynamique permettant une concordance (solide,..., liquide, gaz, champ)
- 9.5. Changer le champ permettant d'exécuter directement l'action par un champ périodique ou un champ pulsé
- 9.6. Echanger des substances travaillant au macroniveau et des substances travaillant au macriniveau
- 9.7. Echanger des champs mécaniques par des champs acoustiques, électriques, chimiques ou magnétiques
- 9.8. Combiner (temporairement ou de manière permanente) dans le super système les (sous)systèmes à performances similaires et les (sous)systèmes à fonction différentes et les (sous)systèmes à fonctions opposées

Annexe III

Aide à la construction du Graphe des associations Substances-Champs et à l'identification des flux physiques (méthodes et outils MAL'IN[®])

▪ Préalable à la construction du graphe :

On a défini le niveau systémique.

Par l'analyse fonctionnelle, on connaît les fonctions de service et les fonctions contraintes associées au système global.

On connaît la fonction machine (fonction utile principale) réalisée par le bloc fonctionnel incriminé ou à réaliser.

▪ Construction du graphe fonctionnel :

La logique proposée part du bloc diagramme fonctionnel, s'il n'est pas réalisé, suivre la démarche suivante :

- Enumérer les composants du bloc fonctionnel
- Enumérer les milieux extérieurs
- Enumérer les flux fonctionnels : fonctions de service et fonctions contraintes
- Réaliser le graphe de contact entre les composants du bloc fonctionnel et les milieux extérieurs, c'est-à-dire entre les sous-systèmes du système :



- Placer les flux fonctionnels :



▪ Construction du graphe des associations substances-champs :

- Exprimer le flux de contact (action mécanique) ou le flux fonctionnel par un verbe qualifiant l'action d'un composant (substance) sur l'autre :

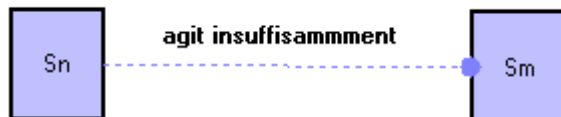


- Cet effet est il utile, insuffisant ou néfaste (nuisible) ?

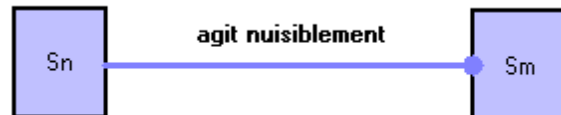
. Effet utile



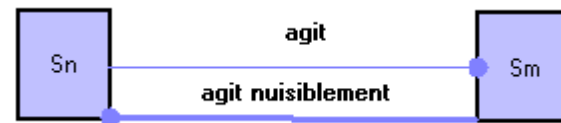
. Effet utile insuffisant



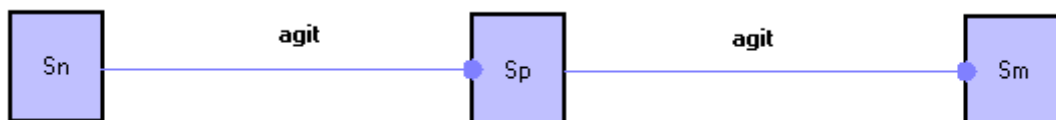
. Effet nuisible



. Des effets nuisibles sont-ils générés par les flux fonctionnels déjà identifiés ?



- Est-il intéressant d'ajouter des éléments transportés par les flux de matière (ex : fluides, poudre, poussière,...) ?



- Est-il intéressant de prendre en compte les différents composants de ces flux de matière (air humide = air sec + vapeur d'eau) ?



▪ Aide à l'identification de flux

- Flux générés par des gradients de paramètres

. Les gradients des paramètres d'état ou pertinents des composants (substances) peuvent-ils générer des flux :

Paramètres	Effet produit	Caractérisation	Nom de la loi
Température	Flux de chaleur conductif	Solides en contact	Fourier
	Flux de chaleur convectif	Interface solide/fluide	Newton
	Flux de chaleur rayonnant	Solides en regard, milieu intermédiaire transparent	Stéphan-Boltzmann
	Flux d'électrons	Soudure/Solides conducteur	Seebeck
Pression	Débit de fluide	Dans un fluide	
	Migration de fluide dans le solide : Fluide continu Capillarité	Dans un solide dit capillaro-poreux	Darcy
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Dans un mélange de fluides	Fick
Potentiel électrique	Flux d'électrons	Dans les fluides ou solides conducteurs	Ohm
	Champ magnétique	Dans les fluides ou solides	Biot Savart
Champ magnétique	Flux d'électrons	Dans les fluide ou solides conducteurs	Faraday
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Entre solides, milieu conducteur	

Ces effets générés par les gradients de paramètres sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

. Les effets générés par les gradients de paramètres induisent d'autres effets :

Paramètres	Effet produit	Effet induit
Température	Flux de chaleur	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Fluage
	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Pression	Débit de fluide	Fuites
	Migration de fluide dans le solide	Dilatation/Rétraction/Jeu/Bridage Pollution, Encrassement
Pression partielle ou Concentration	Diffusion d'un composant dans l'autre (et inversement)	Pollution, Dépôt, Encrassement Givrage, Prise en glace
Potentiel Electrique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
	Champ magnétique	Polarisation
Champ magnétique	Flux d'électrons	Charge/Décharge électrique
Potentiel chimique	Flux de matière (électrolyse)	Corrosion

Ces effets induits sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Effets mécaniques générés par des flux de contact

Les contacts réels sont générateurs d'effets locaux :

Surfaces en contact	Effet produit	Caractérisation	Nom de la loi
Zone de contact localisée	Champ de pression	Vitesse relative nulle : adhérence Vitesse relative non nulle : frottement	Hertz (action normale) Coulomb
	Flux d'énergie thermique	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie sonore	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie de déformation	Déformation du solide	Energie de déformation
Zone de contact surfacique étendue	Champ de pression	Vitesse relative nulle : adhérence Vitesse relative non nulle : frottement	Matage (action normale) Coulomb
	Flux d'énergie thermique	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie sonore	Vitesse relative non nulle : frottement	
	Flux d'énergie de déformation	Déformation du solide	Energie de déformation

Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Effets mécaniques générés par des mouvements de solides

Le système comporte t-il des entités en mouvement qui génèrent des effets d'inertie (forces centrifuge, masses inertielles) ? Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Effets dus à des champs ou à des substances distantes

Des champs immatériels sont-ils présents ? Ces effets sont-ils utiles ou nuisibles ? Voulez-vous en tenir compte ?

- Attractions (pesanteur, aimants)
- Sons, Ultrasons
- Optique
- Electriques
- Rayonnements
- Magnétiques, etc.

Annexe IV

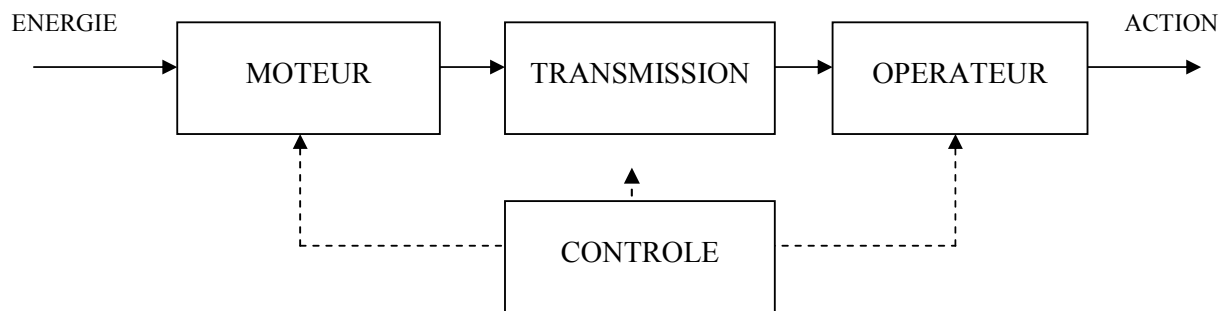
Trois premières lois d'évolutions de la théorie TRIZ

▪ Loi 1 : Intégralité des parties

Pour réaliser l'action incriminée, une énergie doit être utilisée, transformée et transmise. Chacune des 4 entités suivantes doit être présente dans le système et avoir une utilité minimale lors la réalisation de l'action :

- Une entité motrice;
- Une entité de transmission;
- Une entité opératrice;
- Une entité de contrôle.

Au moins une des entités doit être contrôlable.



Cotation :

- | | |
|---|-------------------------------|
| 0 | pas de contrôle |
| 1 | contrôle insuffisant |
| 2 | bon contrôle mais améliorable |
| 3 | asservissement |

▪ Loi 2 : Conductivité énergétique

Le système doit permettre le libre passage de l'énergie entre toutes ses entités lors la réalisation de l'action (elle peut être transmise par contact ou sans contact). La transmission d'énergie doit être la plus efficace possible.

Evolutions envisageables pour l'amélioration de la conductivité énergétique :

- Raccourcissement du trajet énergétique;
- Réduction des transformations successives;
- Transformation, amélioration des paramètres de transfert;
- Accroissement de la contrôlabilité des champs énergétiques.

Cotation :

- | | |
|---|---|
| 0 | dysfonctionnements par transmission défectueuse |
| 1 | pertes importantes |
| 2 | faibles pertes |
| 3 | pas de pertes |

▪ Loi 3 : Coordination des rythmes

Les fréquences, vibrations, périodicités doivent être cohérentes dans toutes les entités du système lors la réalisation de l'action.

Evolutions envisageables pour l'amélioration de la coordination des rythmes :

- Couplages pour améliorer des performances en phase, en opposition de phase, en résonance accordée et en compensation;
- Découplages pour éliminer des effets indésirables : indépendance.

Cotation :

- | | |
|---|------------------------|
| 0 | rythmes non coordonnés |
| 1 | début de coordination |
| 2 | 2 entités coordonnées |
| 3 | cohérence des rythmes |

Annexe V

Modèle "Constraint Explorer" (V3.2) du problème de conception architecturale du mécanisme de remontée de poids d'horloge

```
(* ----- Détermination transmission horloge monumentale de Dému ----- *)
(*                               Choix de concept de solution                               *)

(* ----- Domaines de variation des variables communes ----- *)
WS:int; WS=[1,2];
mot:int; mot=[1,20];
cour:int; cour=[1,18];
verin:int; verin=[1,3];

N_moteur=[37,66];
couple_moteur=[6,41];
long_courroie:int; long_courroie=[750,1700];
course_verin:int; course_verin=[50,150];
force_verin=[0,750]; (*effort maxi admissible par le vérin*)

diam_tambour:int; diam_tambour=[40,200];
diam_moteur:int; diam_moteur=[40,220];
diam_galet:int; diam_galet=[40,80];
hauteur_plateau:int; hauteur_plateau=[590,650];
decalage_moteur:int; decalage_moteur=[0,50];
N_tambour=[1,70];
masse:int; masse=[0,30];
cout=[430,1000];
tendu=[0,1000];
mou=[0,1000];
couple_mini=[1,70];
coef_frott=[0.2,1];
dd:int; dd=[20,180];

l_verin:int;
l_poulie:int;

(* ----- CONCEPT 1 ----- *)
WS=1 -> l_verin=[40,100];
WS=1 -> l_poulie=[60,300];
WS=1 -> fleche=[0,200];

(*alpha=[0,@pi/2]*)
WS=1 -> (atan((fleche+(dd/2)))/(((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)/2))>=0;
WS=1 -> (atan((fleche+(dd/2)))/(((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)/2))<=@pi/2;

(*axe du renvoi à proximité du plateau, car galet à entraxe/2*)
WS=1 -> l_poulie<((((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)/2)-100);
WS=1 -> l_poulie>((((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)/2)-115);

WS=1 -> force_verin*l_verin=((tendu+mou)* sin((@pi(2*(atan((fleche+(dd/2)))/
((((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)/2))))/2))*l_poulie;

(*--géométrie--*)
(*alpha=atan((fleche+(dd/2)))/((((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)/2)); entraxe/2 ~> galet au milieu*)
WS=1 -> l_poulie>(l_verin+20);
```



```

(*longueur courroie - allongement 2% *)
WS=1 -> long_courroie*1.02=(@pi*(diam_moteur+diam_tambour)/2)+
((((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)^2+(dd/2)^2)^0.5)+
((((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)^2/4)+fleche^2)^0.5)+
((((hauteur_plateau-150)^2+decalage_moteur^2)^0.5)^2/4)+
(fleche+(dd/2))^2)^0.5);

WS=1 -> course_verin*l_poulie=(fleche+(dd/2))*l_verin;
WS=1 -> fleche<diam_tambour;

(* ----- CONCEPT 2 ----- *)

WS=2 -> l_verin=[180,230];
WS=2 -> l_poulie=90;
WS=2 -> fleche=0;

WS=2 -> (atan(course_verin/l_verin))>=0;
WS=2 -> (atan(course_verin/l_verin))<=(@pi/2);
WS=2 -> (atan(90/l_poulie))>=0;
WS=2 -> (atan(90/l_poulie))<=(@pi/2);

masse_moteur=[6.3,10.3];
mot>=1 and mot<=5 ~> masse_moteur=6.3;
mot>=6 and mot<=10 ~> masse_moteur=7.3;
mot>=11 and mot<=15 ~> masse_moteur=8.3;
mot>=16 and mot<=20 ~> masse_moteur=10.3;

WS=2 -> force_verin*l_verin=(tendu+mou+((masse_moteur+masse)*@g))*
(((8100+l_poulie^2)^0.5)*cos(atan(course_verin/l_verin)));

(*longueur courroie - allongement 2% *)
WS=2 -> long_courroie*1.02=(@pi*(diam_moteur+diam_tambour)/2)+
(((hauteur_plateau-240+(((8100+l_poulie^2)^0.5)*sin(atan(90/l_poulie)+
atan(course_verin/l_verin))))^2+(decalage_moteur-(dd/2))^2)^0.5)*2);

(* ----- Fonction objectif ----- *)

cout=0.02*long_courroie+(150+160*(0.1*course_verin/50))+(16.5*masse_moteur+149)+
(@pi*((diam_moteur/2000+0.01)^2)*478+6)+(@pi*((diam_tambour/2000+0.01)^2)*478+6)
+((WS-1)*50*l_verin/1000+15);

(* ----- Contraintes communes ----- *)

N_moteur=(diam_tambour/diam_moteur)*N_tambour;
(*vitesse=(diam_moteur/2000)*(N_moteur*@pi/30); *)

(*--forces--*)
couple_mini=((masse*@g)*0.048)/(diam_tambour/diam_moteur); (*en N.m - rayon
tambour=48mm *)
couple_moteur>couple_mini;

(*effort radial maxi admissible par les motoreducteurs*)
(tendu+mou)<(((7)*couple_mini)+2003);

(*tensions*)
tendu>mou;
(* angle enroulement=pi *)
(tendu/mou)=@e^(coef_frott*@pi);

(*couple transmis sur poulie moteur*)
couple_mini=(tendu-mou)*(diam_moteur/2000);

(*puissance à transmettre < puissance transmissible par la courroie*)
((tendu-mou)*((diam_moteur/2000)*(N_moteur*@pi/30)))<
(0.000775*N_moteur*diam_moteur^20);

(*différence rayons poulies pour tambour libre*)
dd=diam_moteur-diam_tambour;

(*condition brin vertical: pour tambour cloche UNIQUEMENT *)
masse=28 ~> (diam_moteur/2)-decalage_moteur<=(diam_tambour/2);

```

```
(* ----- vitesse admissible courroie ----- *)
((diam_moteur/2000)*(N_moteur*@pi/30))<=20 ~> diam_moteur>=40 and
diam_tambour>=40 and diam_galet=40;
((diam_moteur/2000)*(N_moteur*@pi/30))>20 and
((diam_moteur/2000)*(N_moteur*@pi/30))<=30 ~> diam_moteur>=63 and
diam_tambour>=63 and diam_galet=63;
((diam_moteur/2000)*(N_moteur*@pi/30))>30 ~> diam_moteur>=80 and
diam_tambour>=80 and diam_galet=80;
```

```
(* ----- Catalogue motoréducteurs ----- *)
(* Motoréducteurs Leroy Somer de puissance différentes,
   N variant de 37 à 65 tr/min,
   réducteurs de type Cb 1502 ou 1503 *)
```

```
(* 0.06 kw *)
mot=1 ~> N_moteur=37.4 and couple_moteur=11.2;
mot=2 ~> N_moteur=43.8 and couple_moteur=9.8;
mot=3 ~> N_moteur=48.9 and couple_moteur=8.8;
mot=4 ~> N_moteur=56.3 and couple_moteur=7.6;
mot=5 ~> N_moteur=63.9 and couple_moteur=6.7;
(* 0.09 kw *)
mot=6 ~> N_moteur=37.9 and couple_moteur=18.4;
mot=7 ~> N_moteur=44.4 and couple_moteur=15.9;
mot=8 ~> N_moteur=49.6 and couple_moteur=14.2;
mot=9 ~> N_moteur=57.1 and couple_moteur=12.4;
mot=10 ~> N_moteur=64.8 and couple_moteur=10.9;
(* 0.12 kw *)
mot=11 ~> N_moteur=38.2 and couple_moteur=25.3;
mot=12 ~> N_moteur=44.8 and couple_moteur=22;
mot=13 ~> N_moteur=50 and couple_moteur=19.8;
mot=14 ~> N_moteur=57.6 and couple_moteur=17.2;
mot=15 ~> N_moteur=65.3 and couple_moteur=15.1;
(* 0.18kw *)
mot=16 ~> N_moteur=37.7 and couple_moteur=40.3;
mot=17 ~> N_moteur=44.1 and couple_moteur=35.2;
mot=18 ~> N_moteur=49.3 and couple_moteur=31.5;
mot=19 ~> N_moteur=56.7 and couple_moteur=27.4;
mot=20 ~> N_moteur=64.4 and couple_moteur=24.1;
```

```
(* ----- Catalogue courroies ----- *)
cour=1 ~> long_courroie=750;
cour=2 ~> long_courroie=800;
cour=3 ~> long_courroie=850;
cour=4 ~> long_courroie=900;
cour=5 ~> long_courroie=950;
cour=6 ~> long_courroie=1000;
cour=7 ~> long_courroie=1060;
cour=8 ~> long_courroie=1120;
cour=9 ~> long_courroie=1180;
cour=10 ~> long_courroie=1250;
cour=11 ~> long_courroie=1320;
cour=12 ~> long_courroie=1400;
cour=13 ~> long_courroie=1450;
cour=14 ~> long_courroie=1500;
cour=15 ~> long_courroie=1550;
cour=16 ~> long_courroie=1600;
cour=17 ~> long_courroie=1650;
cour=18 ~> long_courroie=1700;
```

```
(* ----- Catalogue vérins ----- *)
verin=1 ~> course_verin=50;
verin=2 ~> course_verin=100;
verin=3 ~> course_verin=150;
```


Formulation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire

Résumé :

La conception architecturale est souvent réalisée grâce aux habitudes professionnelles et à l'expérience des concepteurs, qui leur permettent d'identifier les paramètres de conception pertinents à prendre en compte pour commencer l'étude et de faire les choix qu'impliquent une démarche séquentielle de détermination d'architecture. Ces décisions sont difficiles à prendre car les concepteurs ne disposent pas forcément d'éléments suffisants pour comparer les différentes alternatives. Ainsi, ils procèdent souvent par essai-erreur, jusqu'à l'obtention d'une configuration opérationnelle, mais qui n'est pas nécessairement optimale. Ces itérations sont, de plus, coûteuses en temps.

Nous proposons un système d'aide à la décision en conception préliminaire, permettant de partir de plusieurs concepts de solution pertinents, pour arriver à une architecture validée et prédimensionnée en objectivant les choix de conception.

Les grandes étapes sont : (i) l'écriture du problème de conception préliminaire sous forme de Problème par Satisfaction de Contraintes (PSC), (ii) la recherche exhaustive des architectures solutions, (iii) l'exploitation et la réduction de l'espace des solutions pour aider à la décision. C'est seulement ensuite qu'un choix est à faire parmi ces solutions, qui n'ont pas été arbitrairement restreintes par des choix initiaux.

Les étapes (i) et (iii) nécessitent une analyse préalable du problème de conception. Il faut, d'une part, le limiter aux seules caractéristiques nécessaires et suffisantes pour la conception architecturale, que nous nommons caractéristiques structurantes. D'autre part, il faut exprimer les objectifs de conception et les critères de qualification de la conception, qui permettent de hiérarchiser les architectures-solutions obtenues et ainsi aider au choix final parmi elles.

Nous proposons pour cela une démarche systématique d'analyse et structuration du problème de conception, basée sur quatre étapes, depuis l'analyse du besoin jusqu'à une approche physique, en passant par des approches fonctionnelle et organique du produit à concevoir. Des tableaux systématiques sont proposés.

Notre approche est confrontée avec la démarche 'classique' d'un groupe de concepteurs, pour une même conception architecturale. L'utilisation du système d'aide à la décision permet une amélioration de la satisfaction des objectifs de conception, le choix du concept de solution le plus performant, l'obtention d'architectures-solutions valides et respectant toutes les contraintes énoncées. On dispose ainsi d'éléments dimensionnels pour poursuivre en conception détaillée sans subir les itérations engendrées par le processus essai-erreur.

Mots clés :

Conception Préliminaire, Conception Architecturale, Caractéristiques Structurantes, Aide à la Décision, Problème par Satisfaction de Contraintes (PSC), Analyse et structuration.

Abstract :

In the early phases of a traditional design process, many decisions are often made by designers. For that purpose, they take advantage of their experience and company knowledge. These decisions are necessary in a sequential design process but may hide many embodiment solutions. Moreover, designers often use a time consuming trial-and-error mode to find a working combination of standard elements.

To overcome these difficulties, a decision support system based on constraint programming is proposed. The object of the design process set out in this work is to facilitate the embodiment design phase by avoiding a-priori decision making and searching for feasible architectures in which all the points of view of the various participants in the project are taken into account. The main stages are: i) the writing of the design problem into a Constraints Solving Problem (CSP) form, ii) the exhaustive search for the feasible architectures, iii) the exploitation and the reduction of the solutions space to help in the decision making.

A preliminary analysis of the design problem is necessary for the stages (i) and (iii). On one hand, it is essential to restrict the design problem to the only necessary and sufficient characteristics for the embodiment design phase, which we name structuring characteristics. On the other hand, it is necessary to express the design objectives and the qualification criteria of the design, in order to sort the embodiment solutions being obtained.

An systematic four step method is detailed in this thesis

Our approach is confronted with the 'classic' method of a designers group, for the same embodiment design.

This methodology is applied to the embodiment design of an automatic weight-winding system of a monumental clock. To determine the most interesting solutions, objectives and performance indicators are entered. Finally, the benefits of our approach are discussed.

Keywords :

Embodiment Design, Structuring Characteristics, Decision Support, Constraint Satisfaction Problem (CSP), Structuring and Analysis.

