

Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Louis Pasteur
Strasbourg I
N° Ordre :

Discipline : Sciences de l'Ingénieur
(Spécialité : Sciences et technologies industrielles)

Par Adrien GUENEBAUT

Modèle générique du processus créatif en conception des systèmes

Soutenue publiquement le lundi 28 janvier 2008.

Membres du jury

Directeur de thèse :	M. Roland DE GUIO, Professeur, Strasbourg FR
Rapporteur interne :	M. Yves REMOND, Professeur, Strasbourg FR
Rapporteur externe :	M. Patrick MARTIN, Professeur, Metz FR
Rapporteur externe :	M. Alexandre DOLGUI, Professeur, Saint-Étienne FR
Examineur :	M. Benoit MONTREUIL, Professeur, Québec Ca
Co-encadrement, examinateur :	M. Marc BARTH, HDR, Strasbourg FR

« L'homme est la mesure de toutes choses,
de celles qui sont en tant qu'elles sont,
et de celles qui ne sont pas en tant qu'elles ne sont pas »

Propos de Protagoras (V^e siècle av. J.-C.) d'après Diogène LAERCE.

En modélisation, il est bon de se rappeler que la réalité (ce qui est et n'est pas) existe parce qu'elle paraît à chacun de nous et pour chacun de nous.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire sont issus d'une thèse CIFRE, par le biais de la collaboration entre l'entreprise CODICA AUTOMOTIVE SA et l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. Jean-Luc SCHNELZAUER et à M. Thierry SCHWEITZER, respectivement directeur et directeur technique l'entreprise CODICA AUTOMOTIVE S.A. pour m'avoir permis d'effectuer mes travaux de recherche depuis la réalité industrielle. Je les remercie de m'avoir accueilli comme l'un des leurs et de m'avoir confié des projets importants. Je tiens également à saluer l'ouverture d'esprit, et le courage qu'ils ont témoigné en acceptant des idées originales et innovantes.

Je remercie l'ensemble du personnel de CODICA AUTOMOTIVE S.A. pour l'accueil sympathique qu'ils m'ont témoigné malgré des temps difficiles.

Je remercie M. Roland de GUIO, Directeur du Laboratoire de GÉNIE de la CONception (LGECO), pour avoir bien voulu m'accueillir dans son laboratoire de recherche et de m'avoir fait l'honneur de diriger ma thèse. Je le remercie aussi pour les remarques pénétrantes qu'il a su me prodiguer.

Je remercie M. Marc BARTH pour avoir encadré ma thèse. Sa disponibilité et ses conseils ont été pour moi des aides précieuses. Je le remercie également pour nos discussions passionnées qui ont été pour moi une source d'enrichissement permanente.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres du LGECO et particulièrement au groupe COIA pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux et le support qu'ils m'ont apportés.

Enfin, je remercie Elissa, mon épouse pour sa compréhension, et ses encouragements au quotidien.

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
TABLE DES MATIERES	4
TABLE DES ILLUSTRATIONS	9
TABLE DES TABLEAUX	13
PREAMBULE	15
Remarques Structure des chapitres de thèse	15
Annexes	15
I. CONSTATS.....	16
I.1 Du besoin de conception assistée des systèmes	18
Contraintes sur les entreprises manufacturières	18
Besoins de conception des systèmes.....	19
Systèmes experts	20
I.2 Du mode de conception.....	21
Définitions de la conception.....	21
Paradigme simonien.....	22
I.3 De la conception créative.....	24
Conception créative	24

Démarches en conception créative.....	25
I.4 Du processus créatif.....	27
Étapes de la conception créative	27
Processus créatif.....	30
II. BESOINS	35
II.1 Dimension humaine.....	37
Pratique réflexive	37
Interactions entre le concepteur et le modèle	38
En résumé pour la dimension humaine.....	39
II.2 Dimension procédurale.....	40
Modèles du processus de conception.....	40
Niveaux d'expertises.....	41
Approche synthétique	42
En résumé pour la dimension procédurale.	42
II.3 Dimension situationnelle.....	44
Typologie de connaissances	44
Point de vue sur les connaissances.....	45
Formalisation des connaissances	47
En résumé pour la dimension situationnelle.....	49
II.4 De l'existant	50

Théorie C–K.....	50
En résumé pour la théorie C–K.....	52
Modèles d’architectures d’entreprises	52
En résumé pour les modèles d’architectures d’entreprises	54
III. MODELE ADAPTATIF.....	58
III.1 De la démarche scientifique.....	60
Modes de détermination	60
Méthode.....	62
Matériel.....	65
Matière.....	68
III.2 De la construction de l’ontologie	71
<i>Première phase.</i> Conceptualisation	72
<i>Deuxième phase.</i> Ontologisation	77
<i>Troisième phase.</i> Opérationnalisation	85
III.3 De la construction du modèle holonique	90
Les 3 dimensions de la conception	90
Précisions sur le modèle holonique	93
III.4 Du modèle holonique au modèle adaptatif.....	95
Modèle adaptatif	95

Analyse boîte noire	96
IV. APPLICATION	99
IV.1 Des à-propos de l'étude de cas	101
Méthode de résolution	101
Mode de restitution	102
IV.2 De l'exploitation du modèle holonique	106
Étape 1/6. Définir l'objet à améliorer	106
Étape 2/6. Identifier le paramètre de cet objet à améliorer	107
Étape 3/6. Proposer une méthode d'amélioration de ce paramètre	107
Étape 4/6. Analyser les obstacles liés à l'utilisation de cette méthode	108
Étape 5/6. Poser la contradiction liée à ces obstacles	109
Étape 6/6. Utiliser la matrice des principes inventifs	113
IV.3 De l'interprétation de l'étude de cas	117
Explication des limites rencontrées	117
Éléments du processus créatif	121
IV.4 De la construction du modèle adaptatif	123
1. Généralisation des individus holoniques	124
2. Identification de typologies des holons	128
3. Analyse des transitions entre typologies de holons	132

4. Extrapolation d'une heuristique	135
V. CONCLUSIONS.....	143
V.1 De la démarche et des discussions	144
1 ^{er} Chapitre (Constats)	144
2e Chapitre (Besoins)	144
3e Chapitre (Mise en oeuvre).....	145
4e Chapitre (Application).....	146
5e Chapitre (Applications)	147
V.2 Des perspectives	149
Ouvertures	149
Perspectives.....	149
BIBLIOGRAPHIE	151

Table des illustrations

Figure 1 – <i>Précision sur la conception abordée</i>	17
Figure 2 – <i>Composition du problème</i>	22
Figure 3 – <i>3 classes des processus de conception</i>	25
Figure 4 – <i>Voies directe & indirecte</i>	26
Figure 5 – <i>Cumul des coûts et facteur d'impact en développement de produit (d'après originale de Vajna [120])</i>	28
Figure 6 – <i>Espaces problèmes conceptuels et de configuration</i>	30
Figure 7 – <i>Composition d'une solution cible</i>	31
Figure 8 – <i>Recherche de principes de solutions</i>	32
Figure 9 – <i>Cheminement du processus créatif</i>	33
Figure 10 – <i>Résumé du processus créatif</i>	34
Figure 11 – <i>Les trois dimensions de la conception</i>	36
Figure 12 – <i>Phases de construction des représentations</i>	38
Figure 13 – <i>Interactions internes</i>	39
Figure 14 – <i>Modèles procéduraux en fonction de l'expertise du concepteur</i>	41
Figure 15 – <i>Définitions cycliques</i>	42
Figure 16 – <i>Modèle adaptatif primitif</i>	43
Figure 17 – <i>Conversions des connaissances (depuis origine de Nonaka [84])</i>	45

Figure 18 – <i>Trois types de connaissances</i>	46
Figure 19 – <i>Cheminement du processus créatif</i>	47
Figure 20 – <i>Taxonomie des contributions à la formalisation des connaissances</i>	48
Figure 21 – <i>Cheminement du raisonnement en conception créative (depuis originale de Hatchuel et Weil [53])</i>	51
Figure 22 – <i>Classifications des modèles (depuis un original de Vernadat et Jorysz [58])</i>	53
Figure 23 – <i>Modèle adaptatif primitif</i>	55
Figure 24 – <i>Cheminement lors du processus créatif</i>	56
Figure 25 – <i>Suites d'évolutions de parties du système</i>	57
Figure 26 – <i>Méthodologies de recherche</i>	60
Figure 27 – <i>Phases de construction de l'ontologie</i>	64
Figure 28 – <i>Types de propriétés</i>	66
Figure 29 – <i>Propriété inverse</i>	66
Figure 30 – <i>Propriété transitive</i>	67
Figure 31 – <i>Propriété fonctionnelle</i>	67
Figure 32 – <i>Propriété inverse fonctionnelle</i>	67
Figure 33 – <i>3 phases de construction d'une ontologie</i>	71
Figure 34 – <i>Concepts définissant le système</i>	72
Figure 35 – <i>Concepts définissant le système (suite 1)</i>	73

Figure 36 – <i>Concepts définissant le système (suite 2)</i>	74
Figure 37 – <i>Concepts définissant le système (suite 3)</i>	75
Figure 38 – <i>Concepts définissant le système (suite 4 et fin)</i>	76
Figure 39 – <i>Représentation IDEF5 du système</i>	78
Figure 40 – <i>Processus créatif et connaissances</i>	80
Figure 41 – <i>Représentation IDEF5 de description</i>	82
Figure 42 – <i>Représentation IDEF5 de description : Illustration</i>	84
Figure 43 – <i>Protégé-OWL 3.1.1 (capture d’écran)</i>	85
Figure 44 – <i>Différents types de connaissances stratégiques (depuis originale de von der Weth [123])</i>	95
Figure 45 – <i>Analyse « boîte noire »</i>	96
Figure 46 – <i>Méthode de construction du modèle adaptatif</i>	97
Figure 47 – <i>Exemple de connaissances utilisées durant l’étude de cas</i>	101
Figure 48 – <i>Ateliers en ligne</i>	106
Figure 49 – <i>Insertion du S av entre les postes P1 et P2</i>	108
Figure 50 – <i>Contradiction</i>	109
Figure 51 – <i>Contradiction avec les paramètres de la matrice TRIZ</i>	112
Figure 52 – <i>Graphique d’avancement du cas d’étude</i>	118
Figure 53 – <i>Graphique d’avancement des extrants</i>	130

Figure 54 – <i>Inclusion des solutions cibles</i>	131
Figure 55 – <i>Parcours référent</i>	132
Figure 56 – <i>Changement de points de vue durant le processus créatif</i>	133
Figure 57 – <i>Modes de transitions</i>	134

Table des tableaux

Tableau 1 – <i>Analytique versus systémique</i>	69
Tableau 2 – <i>Cas d'étude, tableau type</i>	103
Tableau 3 – <i>Objet à améliorer</i>	107
Tableau 4 – <i>Paramètre à améliorer</i>	107
Tableau 5 – <i>Méthode d'amélioration</i>	108
Tableau 6 – <i>Difficultés liées à cette méthode</i>	109
Tableau 7 – <i>Contradiction</i>	110
Tableau 8 – <i>Contradiction (reformulation)</i>	111
Tableau 9 – <i>Contradiction (matrice TRIZ)</i>	112
Tableau 10 – <i>Extrait de la matrice des contradictions</i>	113
Tableau 11 – <i>Principes inventifs</i>	114
Tableau 12 – <i>Ébauches de solutions</i>	115
Tableau 13 – <i>Solutions proposées</i>	116
Tableau 14 – <i>Solutions tacites intermédiaires</i>	119
Tableau 15 – <i>Cas d'étude et éléments du processus créatif</i>	122
Tableau 16 – <i>Extrants besoin cible</i>	124
Tableau 17 – <i>Extrants difficulté cible</i>	125

Tableau 18 – <i>Extrants difficulté source</i>	126
Tableau 19 – <i>Extrants solutions sources</i>	127
Tableau 20 – <i>Extrants solutions cibles</i>	127
Tableau 21 – <i>Typologies des holons</i>	128
Tableau 22 – <i>Syntaxe</i>	136
Tableau 23 – <i>Prédicats par type de descriptions</i>	137
Tableau 24 – <i>Heuristique</i>	137

Préambule

Remarques Structure des chapitres de thèse

Cette thèse part d'un constat (§I), la nécessité de proposer une méthode de formalisation des phases initiales et conceptuelles en conception des systèmes. Il apparaît alors important de préciser les phases initiales et conceptuelles en conception des systèmes (suite du §I) avant de préciser la nature de la méthode de formalisation (§II). À partir de là, il est possible de présenter méthode, moyens et résultats (§III). Les résultats sont illustrés par un cas d'étude (§IV). Discussions et perspectives concluent cette thèse (§V).

Dans le texte les remarques contiennent des informations complémentaires qui n'entrent pas directement dans le discours, mais éclairent et définissent certains points. Les remarques sont notées dans un cadre grisé comme suit :

Texte de la remarque...

Annexes

En annexe se trouvent le code OWL DL (section A4) de l'ontologie présentée, et les recommandations pour l'usage de la matrice TRIZ (section A5) accompagnées de la matrice et des principes inventifs de la TRIZ. Enfin, y figurent (sections A1, A2, et A3) également 3 articles présentés à des conférences durant la thèse.

I. Constats

Ce chapitre introduit la contribution attendue.

Construction du chapitre

Dans ce chapitre, nous aborderons en section I.1 le besoin industriel. Celui-ci consiste à la formalisation des phases initiales et conceptuelles de la conception des systèmes.

Puis dans les trois sections suivantes I.2, I.3, et I.4 nous précisons la notion de conception ainsi qu'aux étapes de la conception auxquelles nous nous intéresserons. L'avancée dans cette précision de la notion de conception est symbolisée par la Figure 1 dévoilée au fur et à mesure des sections I.2, I.3, et I.4.

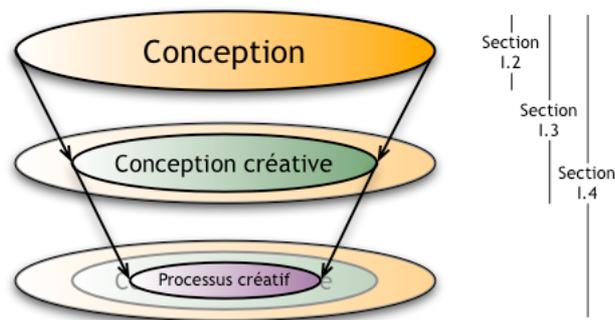


Figure 1 – *Précision sur la conception abordée*

1.1 Du besoin de conception assistée des systèmes

Contraintes sur les entreprises manufacturières

Ubiquité de l'information, accélération du rythme des changements technologiques, globalisation des marchés, responsabilisation environnementale, augmentation des attentes clients, réduction des cycles de vie des produits ne sont que quelques exemples des forces [62], [6] qui contraignent les entreprises manufacturières d'aujourd'hui. Ces contraintes affectent particulièrement ce qui est au cœur de l'activité des entreprises manufacturières, la conception d'artefact. Elles sont autant de déclencheurs de l'activité de conception économiques, esthétiques, fonctionnels et généralement non techniques. La conception d'artefact ou de système est un acte intrinsèquement humain qui dans l'imaginaire populaire est souvent considéré comme un art de la création. Une conception requiert donc une part significative, d'expérience, d'intuition, de capacité analytique et de créativité.

Notons que par artefact nous entendons tous systèmes tangibles ou non réalisés par l'homme.

On peut donc voir un paradoxe entre l'aide à la conception soit une approche technique et l'activité de conception qui peut être considéré comme un art, quelque chose qui n'est pas technique. En fait de même que l'apprentissage des techniques de peinture et de dessin permet au peintre d'exprimer pleinement son talent artistique, la maîtrise des techniques et méthodes de conception soutient la conception pour offrir une réponse efficace et efficiente aux contraintes précédentes sur les entreprises manufacturières,

Besoins de conception des systèmes

La phase initiale en conception est généralement d'identifier les besoins des clients de l'artefact. À partir de ces besoins, une liste de spécification de l'artefact peut être développée. La phase conceptuelle suivante est de fournir un ou plusieurs concepts de solution qui correspondent aux spécifications du système à construire. C'est un point critique dont ils souvent dit [20] qu'il induit 60 à 80 % des dépenses engagées.

Il existe de nombreuses méthodes et stratégies pour cette étape, King et Sivalogathan [64] en proposent deux catégories. D'une part les méthodes dites de génération de concepts, d'autre part les méthodes dites de sélections de concepts. Parmi les méthodes de génération de concepts, nous citerons notamment le Brainstorming et assimilées, le mind-mapping, et la TRIZ. Parmi les méthodes de sélection de concept, nous citerons notamment, la QFD, et les méthodes d'évaluations de Pugh ou de Pahl & Beitz.

Toutesfois en situation de conception complexe, tout comme le dessin industriel bénéficie de l'aide des systèmes informatisés, ces méthodes de générations ou de sélections de concept doivent pouvoir bénéficier des systèmes informatisés tels que ceux pratiqués en intelligence artificielle.

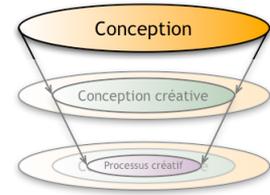
Systèmes experts

Les systèmes experts fournissent un moyen efficace et flexible d'obtenir des concepts de solutions pour une variété de situations qui seraient souvent difficile ou long de résoudre uniquement avec les moyens traditionnels. Ils fournissent une aide à la décision critique dans de nombreux secteurs tels que l'électronique, la maintenance ou la médecine.

Les systèmes experts sont une branche développée depuis les années soixante de l'intelligence artificielle appliquée à l'aide à la résolution de problèmes. Le principe est simple, il s'agit de transférer une partie de l'expertise à un ordinateur puis de lui faire traiter cette expertise. L'avantage étant de diminuer l'impacte de facteur humain dans la résolution notamment de problème complexe ayant de nombreuses variables ou implications.

Lia [74] propose 11 catégories de systèmes experts : rule-based systems, Knowledge-based systems, neural networks, fuzzy systems, Object-oriented methodology, case-based reasoning, system architecture development, intelligent agent systems, modelling, ontology, et database. In fine, les systèmes experts rencontrent généralement les mêmes limitations, tous d'abord leur grande dépendance à un domaine de résolution, à une méthodologie de raison, ou aux deux, ensuite leur inadéquation à proposer des concepts innovants de solution. C'est à ces limites que cette thèse tente de contribuer par **une méthode de formalisation des phases initiales et conceptuelles en conception des systèmes qui fournisse une robustesse vis-à-vis du domaine de conception du système et des méthodes de conception employées et qui puisse être utilisée en conception créative.**

1.2 Du mode de conception



De la section précédente (I.1), nous retiendrons le besoin de proposer une méthode de formalisation des phases initiales et conceptuelles de la conception des systèmes (restant à préciser). Dans cette section (I.2), nous définirons ce que nous entendons par conception des systèmes.

Définitions de la conception

D'après Love [77], la multiplicité des concepts utilisés en conception et des définitions idoines [60], [131] doit nous conduire à expliciter la définition de la conception retenue. La polysémie du terme de conception se rencontre d'autant plus que la conception des systèmes fait intervenir des acteurs dans des domaines et des contextes variés. Un mécanicien, un automaticien et un responsable de produit ont par exemple, des visions très dissemblables de la conception, aussi bien sur sa nature que sur les limites du terme de conception.

Au sens commun, la conception se définit comme l'action de concevoir une idée, de former un concept dans son esprit ou comme le résultat de cette action [32]. L'AFNOR [3] réduit le terme de conception à l'activité de conception comme suit :

« Activité créatrice qui, partant des besoins exprimés et des connaissances existantes, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable ».

Pour Motta et Zdrahal [83], l'activité de conception consiste plus généralement à construire un artefact. Suh [115], [114], [113] délimite la conception à un processus ou une série d'itérations entre ce qui est à réaliser et les moyens de le réaliser, c'est-à-dire la transformation d'exigences fonctionnelles en paramètre de conception. Deneux [27] signale que formaliser l'activité de conception implique nécessairement de formaliser le processus de conception. C'est pourquoi nous assimilerons la conception à son processus.

Paradigme simonien

Afin de décomposer le processus de conception, le paradigme simonien constituera pour nous le référent théorique commun, quel que soit le modèle du processus de conception employé :

« Lorsque l'on étudie le processus de conception, on découvre que la conception est de la résolution de problème. Si l'on a une théorie basique de résolution de problème alors, on est sur le chemin qui mène à une théorie de la conception », H. Simon [108].

H. Simon [72], [108] définit la conception comme une résolution de problème composée d'un ensemble de relations entre besoins, problèmes, solutions, et évaluations. De nombreuses définitions du problème existent, le dictionnaire WordNet 2.0 [130] suggère de définir le problème comme un état de difficulté devant être résolu. Ainsi, nous proposerons la définition suivante : « un problème est un état de difficulté qui apparaît quand le concepteur ne peut pas répondre instantanément à un besoin en opérant un prélèvement dans son environnement [82]. » Ainsi au sein du problème, la description du besoin évolue (voir Figure 2) en difficulté. Ici parmi les définitions possibles du besoin, nous retiendrons celle du dictionnaire WordNet 2.0 [130] donnant le besoin comme une condition devant être rempli. En cohérence avec cette définition du besoin, la solution se définit comme l'accomplissement de cette condition c'est-à-dire ce qui répond au besoin.

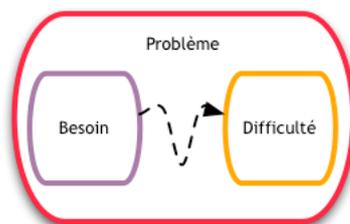
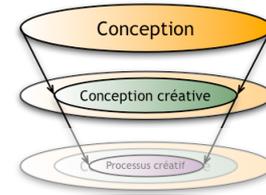


Figure 2 – *Composition du problème*

En pratique pour un système [61], le mécanisme de conception consiste généralement, dans un premier temps, à élaborer une solution particulière à partir de l'expression d'un besoin d'évolution ou depuis un cahier des charges fonctionnel. Dans un second temps, le concepteur évalue les solutions particulières trouvées. Une solution particulière correspond à la définition d'un artefact (c'est-à-dire un objet artificiel) réalisable qui satisfasse aux besoins exprimés dans un contexte particulier. L'artefact peut être tangible, comme un moyen de maintenance ou abstrait, comme une typologie d'implantation. Un

concepteur est un individu, un groupe ou une entité organisationnelle, interne ou externe à l'entreprise, acteur du processus d'élaboration de la solution.

1.3 De la conception créative



Après avoir défini la conception des systèmes dans la section précédente (I.2), nous déterminerons dans cette section (I.3) à quel type de conception nous nous intéressons.

Conception créative

Dans la théorie de Newell et Simon (Problem-space Search) [109], l'ensemble du parcours depuis le besoin jusqu'à la solution s'effectue dans un espace « problème ». Le problème de conception définit un espace problème qui doit être étudié pour chercher la solution. D'après Newell et Simon, cela implique que la structure de l'espace problème détermine le champ des parcours de résolution possibles, il s'agit alors d'un processus rationnel de résolution. L'approche rationnelle s'applique spécialement à une certaine typologie de problème où tous les éléments sont déterminés. En pratique, les éléments des problèmes peuvent avoir trois niveaux de détermination :

1. *Déterminé*. Les éléments sont connus et spécifiés ;
2. *En cours de détermination*. Les éléments sont connus et en-cours de spécification ;
3. *Indéterminé*. Les éléments sont méconnus et flous.

Pour tenir compte de la détermination progressive des éléments entreprise par le concepteur lors de la résolution de problème, Simon précise que les problèmes sont en réalité mal structurés (« ill-structured»). Cela signifie que toutes les solutions possibles et tous les parcours possibles ne peuvent être énumérés. En conséquence, le concepteur définit a priori un espace problème immédiat. C'est une fraction de l'espace problème des possibles qui évolue durant toute la résolution. Le raisonnement et les connaissances s'y représentent de façon abstraite sous forme de variables plus ou moins déterminées.

D'après Gero [45], cette approche conduit à trois classes des processus de conception en fonction de la détermination des variables :

1. Si les variables de conception et leur plage de valeurs possibles restent fixes durant la conception, on parlera de conception routinière ;

2. Si les variables de conception restent fixes, mais leur plage de valeurs possibles varie durant la conception, on parlera de conception inventive ;
3. Si les variables de conception et leur plage de valeurs possibles varient durant la conception, on parlera de conception créative.

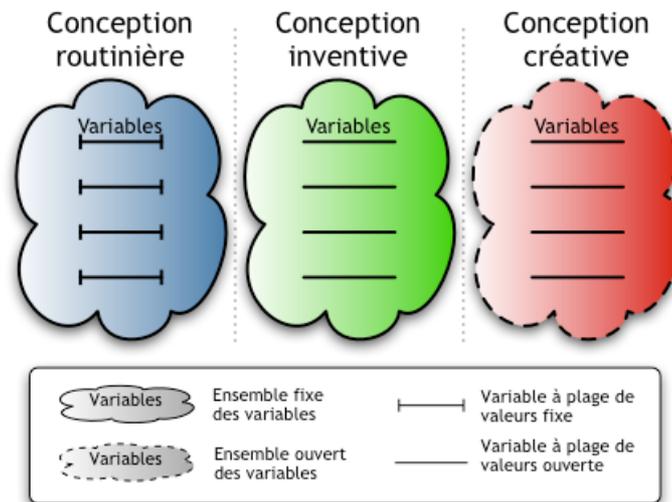


Figure 3 – 3 classes des processus de conception

Nos efforts de recherche porteront sur la troisième classe de conception, la **conception créative**. Gero [45] précise que la conception créative est un processus de construction d'un artefact cible où les éléments d'artefact cible ne peuvent pas être choisis depuis une liste. Elle diffère de la conception de configuration (configuration design) ou de l'optimisation qui suppose qu'un artefact est construit depuis un ensemble d'éléments prédéfinis. La conception créative constitue un effort délibéré du concepteur pour naviguer dans un espace problème variable entre une description plus ou moins explicite des manifestations du problème et une description plus ou moins complète d'une solution permettant la construction d'un artefact cible.

Démarches en conception créative

De la sorte, la conception créative se décrit en partie par la navigation entreprise par le concepteur entre le besoin et la solution au sein d'un espace problème variable qui matérialise le domaine de représentation de l'ensemble des connaissances utiles à la conception créative [109]. Ainsi, partant du besoin deux cas s'offrent au concepteur :

1. Soit, celui-ci trouve directement et intuitivement un concept de solution depuis un besoin (voie directe sur Figure 4) ;
2. Soit, celui-ci trouve indirectement une solution en entreprenant une démarche de résolution de problème délibérée pour lever une difficulté de conception [37] (voie indirecte sur Figure 4).

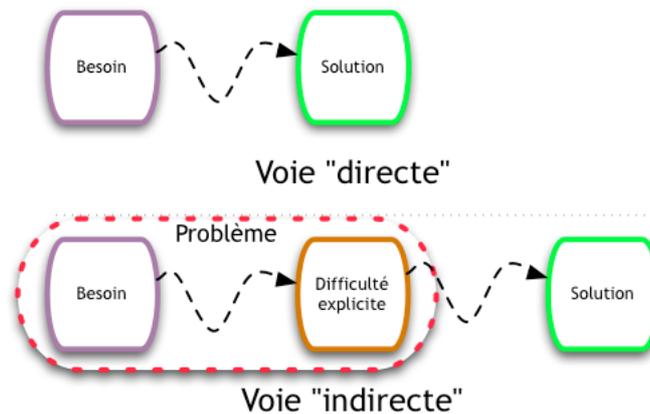
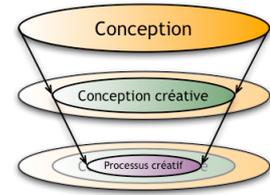


Figure 4 – *Voies directe & indirecte*

Dans cette thèse, nous nous intéresserons à la voie indirecte où le concepteur met en oeuvre une activité de résolution de problème. Pour cette voie, Pahl et Beitz [90] caractérisent ce cheminement par le type de démarche induite :

- *Démarche intuitive.* Par une démarche non formelle plus ou moins guidée, le concepteur découvre intuitivement une solution par exemple le remue-méninges (Brainstorming) et les méthodes dérivées où le concepteur réagit à des propositions et la Synectics où il utilise un porte-folio d'analogie [47] ;
- *Démarche discursive.* Le concepteur développe une solution par la mise en oeuvre de processus déductif comme les démarches courantes de recherche dans la littérature, l'analyse des systèmes existants, les méthodes d'essais-erreurs, et les démarches systématiques (Systematic Search with Classification, Systematic Study of Physical Process).

1.4 Du processus créatif



Dans la section précédente (I.3), nous avons déterminé le type de conception sur lequel nous portons notre intérêt dans cette thèse, c'est-à-dire la conception créative. Dans cette section (I.4), nous allons préciser le cheminement de résolution en conception créative.

Étapes de la conception créative

Les démarches intuitives ou discursives entreprises pour effectuer le cheminement de conception créative nous rappellent que le concepteur est amené à suivre certaines étapes plus ou moins définies. En conception créative, ces étapes varient beaucoup en fonction des auteurs. Toutefois d'après Roozenburg et Eekels [101], pour les principaux contributeurs que sont Cross [25], French [41], Hubka & Eder [57], [58], Pahl & Beitz [90], Pugh [94], et Ullman [122], il existe trois grandes étapes communes :

- étape 1. Une étape d'identification et d'analyse du besoin antérieur à l'étape de recherche de principes de solutions. On parle généralement de définition du besoin ;
- étape 2. Une étape de recherche de principes de solutions [93], il s'agit de créer une nouvelle idée répondant au besoin. On parle, entre autres, de conception préliminaire ou conceptuelle, et de processus créatif ;
- étape 3. Une étape de conversion de l'idée en système ou une description détaillée du système. On parle de conception structurale, détaillée et intégrée, d'optimisation, de prototypage, etc.

Nous proposons de nous intéresser plus particulièrement à une de ces étapes en la choisissant grâce à deux critères industriels :

- critère 1. Le coût de mise en œuvre de l'étape (c'est-à-dire le pourcentage de cette étape sur le coût global de l'artefact) ;
- critère 2. Le facteur d'impact sur le coût de développement de l'artefact (c'est-à-dire en cas d'erreur, le rapport en pour cent du coût de l'erreur sur le coût global).

Pour le critère 1 (le coût de l'étape), plus une étape est économe, plus l'industriel aura de facilité d'investissement. Le coût dépend du nombre de ressources (immatérielles et matérielles) consommées. Plus une étape consomme de ressources, plus elle devient chère. Pour Vajna [123], les étapes en amont dans le processus de conception nécessitent moins de ressources (voir la courbe sur la Figure 5). Par exemple, une étape de définition du besoin nécessitant quelques réunions consommera moins de ressources qu'une conception détaillée intégrant une conception sur CAO, de nombreux calculs et un prototypage. Vis-à-vis du premier critère, les étapes 1 et 2 apparaissent pertinentes.

Pour le critère 2 (le facteur d'impact), plus une erreur induira des coûts importants sur le coût de développement, plus le facteur d'impact sera important. À iso ressources, un industriel aura intérêt à concentrer ses efforts sur les étapes avec un facteur d'impact important. En raison du report induit sur le cumul des coûts, plus une étape est en amont dans le processus de conception, plus son facteur d'impact sera important (voir l'histogramme sur la Figure 5). Par exemple, un «mauvais» principe de solution nécessitera beaucoup d'ingénierie en aval pour aboutir à une évolution satisfaisante du système. Par rapport à ce critère, les étapes 1 et 2 apparaissent intéressantes.

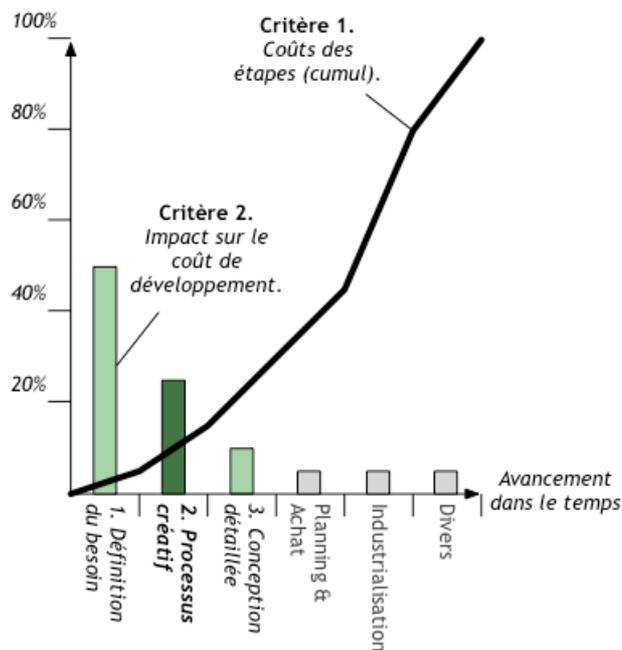


Figure 5 – Cumul des coûts et facteur d'impact en développement de produit (d'après originale de Vajna [123])

Pour Kroll, Condor et Janson [69], la littérature propose pour les étapes 1 et 3 une revue et une formalisation satisfaisante. Nos efforts de formalisation porteront donc la seconde étape, le **processus créatif**.

Processus créatif

Pour le processus créatif Kroll, Condoor et col. [69] considèrent qu'il existe deux espaces problèmes, l'un conceptuel et l'autre de configuration. La navigation entre ces deux espaces problèmes, passe par l'alternance de phases de réalisations et d'abstractions (voir Figure 6).

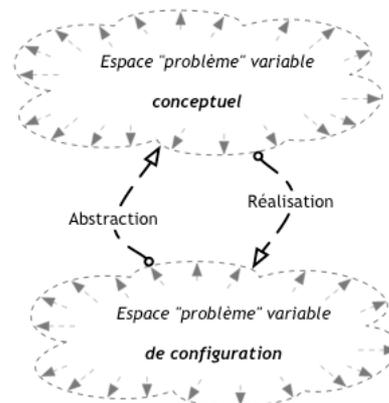


Figure 6 – *Espaces problèmes conceptuels et de configuration*

Du point de vue cognitif, pour les phases de réalisation et d'abstraction, Kolodner [68], et Kokotovich et Purcell [67] considèrent que le concepteur effectue un aller-retour vers des concepts de solutions dits solutions "sources" dans l'espace problème variable conceptuel. Autrement dit, durant la phase d'abstraction, le concepteur se réfère à des solutions sources [96], [97]. Un livre, une liste, de principes de solutions mémorisées par le concepteur ou l'étude des systèmes existants constitue des solutions sources formelles ou non. Puis durant la phase de réalisation, le concepteur en extrait des qualités intéressantes pour construire une autre forme de solution appelée solution "cible" [11], [12], [13], [14]. Ipso facto, une solution cible constitue une évolution proposée du système se composant de traits de la solution source (voir Figure 7).

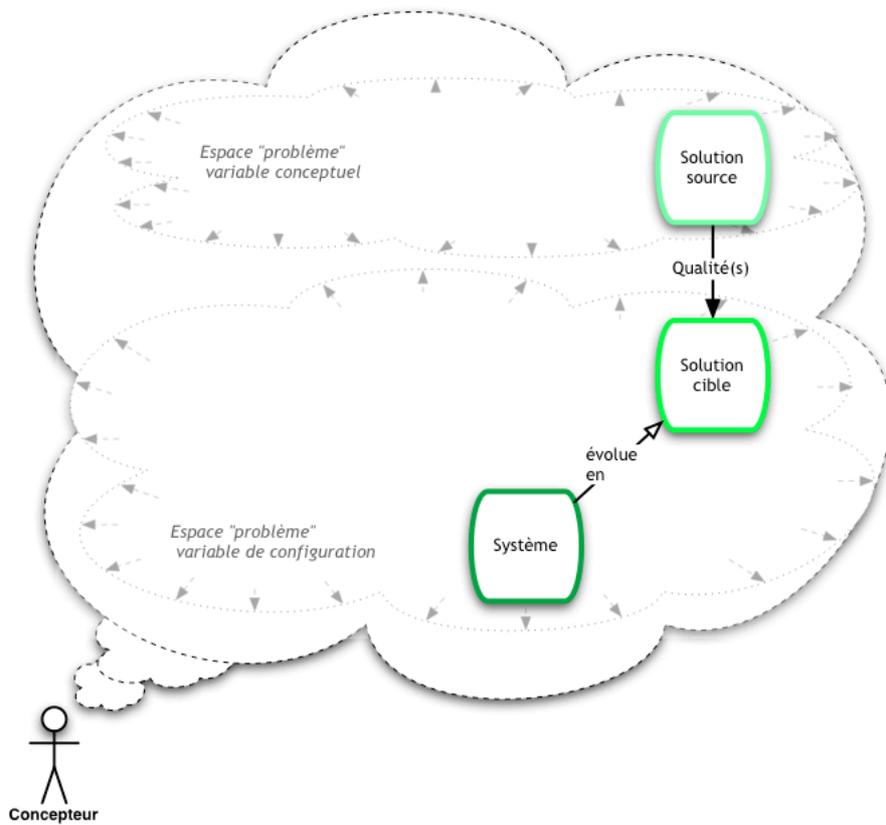


Figure 7 – Composition d'une solution cible

La recherche de concepts de solutions consiste alors depuis un problème cible (celui que l'on veut résoudre) à identifier un problème source pour lequel on connaît une solution source afin de déterminer une solution cible qui résout a priori le problème cible (Figure 8). Dorst et Royakkers [30] parlent également de processus cognitif analogique, c'est-à-dire d'idéation par analogie. En se référant à un élément source, le concepteur fait une analogie de même en passant d'un élément ressource à un élément cible.

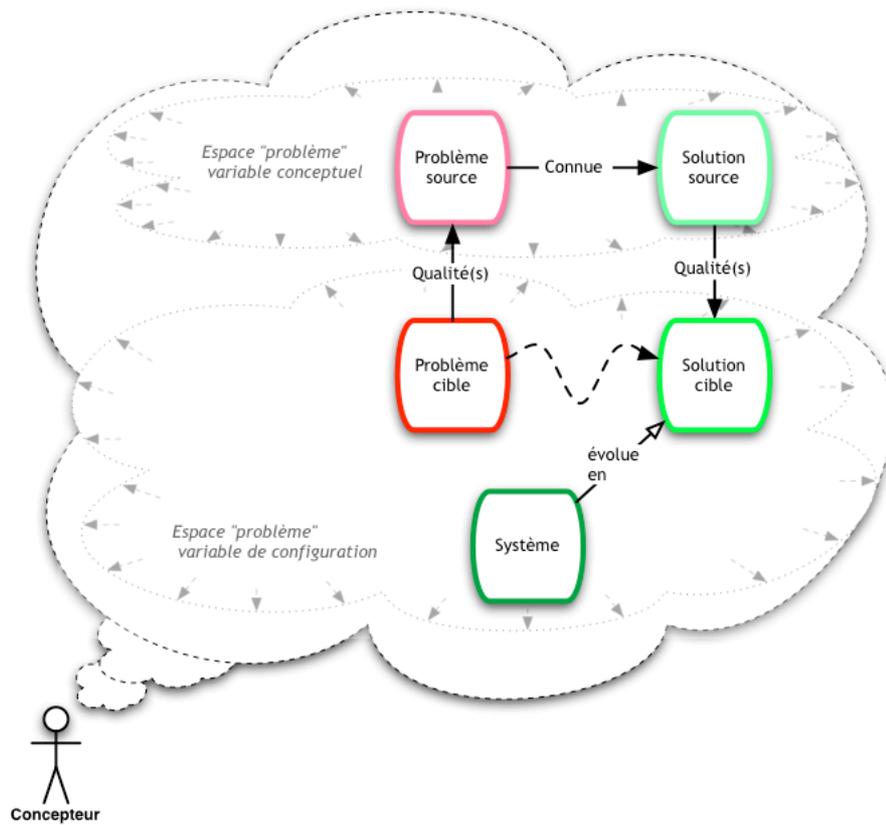


Figure 8 – Recherche de principes de solutions

Rappelons que la définition du problème proposé précédemment inclut un besoin et une difficulté (voir section I.2). En l’occurrence, il s’agit ici d’un besoin cible et de deux difficultés, l’une cible et l’autre source (voir Figure 9). Pris dans son intégralité le cheminement se résume comme suit :

- Dans un espace problème variable de configuration, le concepteur exprime un besoin cible d’évolution du système qu’il ne peut pas satisfaire en prélevant directement dans l’environnement du système ;
- Le besoin évolue en une difficulté cible qui traduit l’incapacité du concepteur à percevoir directement un moyen d’évolution ;
- Depuis les traits essentiels de la difficulté cible, le concepteur se réfère à une difficulté source dans un espace problème variable conceptuel ;
- Pour certaines difficultés sources formulées, le concepteur connaît quelques principes de solution appelés solution source ;

- Depuis ces solutions sources, le concepteur extrait vers l'espace problème variable de configuration précédent certaines qualités qui lui permettent de proposer des évolutions du système susceptible de résoudre la difficulté cible et de répondre ainsi au besoin cible.

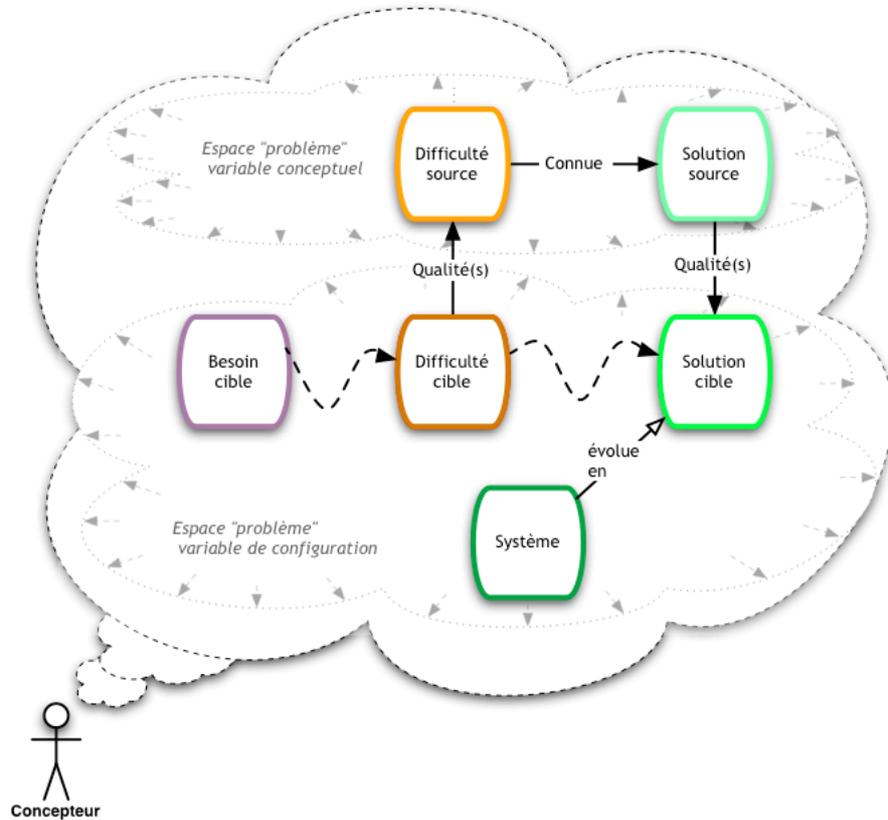


Figure 9 – Cheminement du processus créatif

En suivant ce cheminement, nous pouvons repositionner les différentes étapes d'une méthode telle que le Brainstorming (en dehors des aspects liés à l'animation de groupe). Ainsi, la phase de préparation, documentation et maturation du Brainstorming correspond à la définition du problème cible (besoin et difficulté cible) et du système initiale. Puis, la phase de réunions de créativité correspond à l'expression intuitive (via une difficulté source intuitive) de multiples solutions sources (appelées idées de solutions en Brainstorming). Enfin, la phase d'exploitation des idées recueillies correspond à la synthèse de solutions cibles (appelées solutions en Brainstorming) depuis le système et une multitude de solutions sources (idées) [88]. Cependant, ce modèle de cheminement ne permet pas une compréhension plus fine des mécanismes du processus créatif.

Résumé du chapitre

Pour être compétitives, les entreprises manufacturières doivent être capables de concevoir leur système de façon efficace et efficiente. Pour atteindre cet objectif, les systèmes experts peuvent soutenir les concepteurs. Contribuer à ce développement passe en partie par la formalisation des phases initiales et conceptuelles en conception des systèmes (voir section I.1).

Avant même d'entreprendre, cette formalisation il convient d'expliquer ce qui est entendu par « phases initiales et conceptuelles en conception des systèmes ». Ainsi dans cette thèse, la conception se résume à un processus de résolution de problème (voir section I.2) dont nous limitons la portée à un cas particulier où les variables et leurs plages varient appelé conception créative. Pour préciser les phases initiales et conceptuelles, nous proposons d'en établir la description du cheminement (voir section I.3). Celui-ci repose sur trois étapes : la définition du besoin, le processus créatif, et la conception détaillée. Dans cette thèse, nous formaliserons le processus créatif (voir la section I.4) défini comme la génération et l'implémentation d'un concept de solution caractérisant la future évolution du système. Dans cette étape, les phases initiales et conceptuelles sont décrites par le cheminement illustré dans la Figure 10.

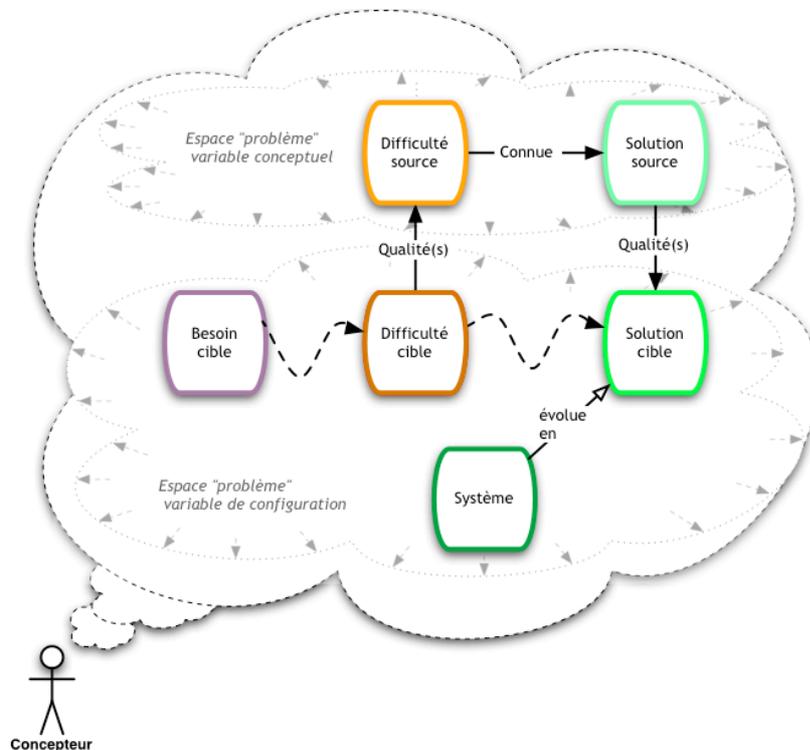


Figure 10 – Résumé du processus créatif

II. Besoins

Ce chapitre précise la nature de la contribution proposée.

Construction du chapitre

Dans ce chapitre, avant d'entreprendre plus en avant la formalisation du processus créatif, nous proposons d'investiguer la nature de la formalisation attendue. Pour Dorst [29], tout modèle de conception est une composition des trois dimensions de modèles suivants :

1. la dimension humaine (par exemple, le modèle du concepteur),
2. la dimension procédurale (par exemple le modèle de la dynamique de conception),
3. la dimension situationnelle (par exemple, le modèle de la tâche de conception).

Ainsi dans les sections II.1, II.2, et II.3 nous aborderons chacune de ces dimensions pour en extraire des spécifications pour le modèle du processus créatif attendu. Pour positionner l'avancement nous utiliserons la Figure 11 sur laquelle nous placerons l'avancement des sections II.1, II.2, et II.3.

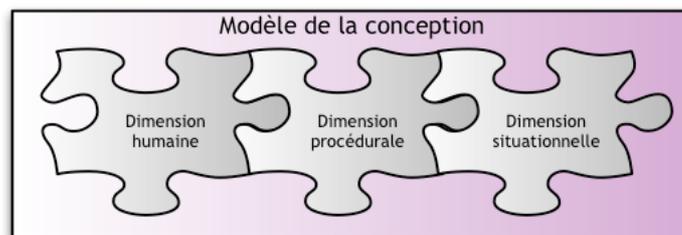
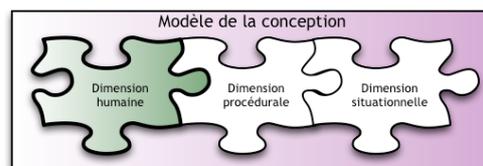


Figure 11 – *Les trois dimensions de la conception*

Dans la section II.4, nous regarderons à travers deux exemples comment les travaux dans la littérature répondent aux spécifications proposées dans les 3 sections précédentes.

II.1 Dimension humaine.



Pratique réflexive

Dans cette section, nous allons aborder la dimension humaine du modèle de la conception. Pour Bylander et Chandrasekaran [19], la représentation des connaissances en résolution de problème influence la nature du problème et la stratégie appropriée à la résolution du dit problème. Ainsi, la représentation de la réalité du processus de résolution dans un modèle altère la réalité du processus de conception créative et compromet l'exactitude de la modélisation.

Plus encore que la nature réflexive de la modélisation, Schön [105], [106] précise que la conception est elle-même réflexive et considère que c'est une approche réflexive. Pour Schön l'approche rationnelle comme celle décrite par Simon sous-estime l'aspect humain de la conception. L'approche rationnelle est basée sur le positivisme alors que l'approche réflexive est basée sur la phénoménologie. Pour Coyne [127], positivisme et phénoménologie sont diamétralement opposés dans le spectre épistémologique, car ils ont chacune des façons très distinctes de considérer les relations entre la conception et le concepteur. Le positivisme considère que le monde peut être connu objectivement à travers les sens du concepteur. Alors que la phénoménologie considère que le concepteur est constamment influencé par le monde qu'il ne peut pas appréhender objectivement. Il y a ici une dualité épistémologique positivisme — phénoménologie dans la nature et la modélisation de la conception.

Doctrines épistémologiques [32]:

- *Objectivisme : Doctrine qui consiste à écarter toute donnée subjective, à ne s'en tenir qu'aux faits, indépendamment de son point de vue.*
- *Positivisme : Doctrine objectiviste selon laquelle l'unique fondement de la connaissance consiste en l'observation des faits et l'expérience.*
- *Phénoménologie : Discipline basée sur l'étude des phénomènes, c'est-à-dire l'apparence des choses ou les choses telles qu'elles nous apparaissent et qu'un tiers en fait l'expérience.*

Interactions entre le concepteur et le modèle

Pour appréhender cette dualité épistémologique, la compréhension du mécanisme de construction des représentations de la réalité (de modélisation) est essentielle. Lors de modélisation, le concepteur procède en quatre phases :

1. *Perception*. Le concepteur forme une représentation implicite de la conception de systèmes. C'est la transition du réel à une image de la réalité (voir Perception sur Figure 12) ;
2. *Représentation*. Le concepteur forme une représentation explicite de la conception. C'est la transition d'une image de la réalité à une image réflexive (par une analyse consciente) (voir Représentation sur Figure 12) ;
3. *Interprétation*. Le concepteur forme une représentation construite de la conception. C'est la transition d'image réflexive à une image perçue (voir Interprétation sur Figure 12) ;
4. *Itération*. L'image perçue déclenche alors un nouveau cycle de perception, représentation, et interprétation.

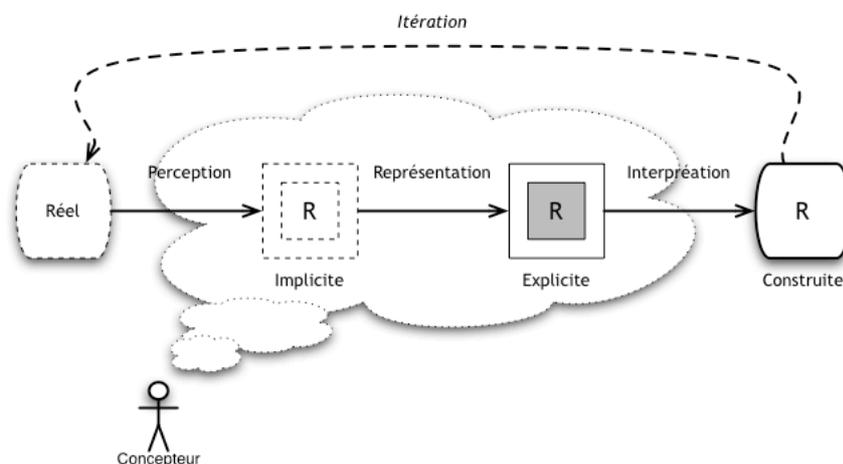


Figure 12 – Phases de construction des représentations

Dans la quatrième phase, l'itération fonctionne par les retours provoqués par la perception du modèle ou plutôt des propositions de conception transcrites dans un modèle. Ce type d'interactions se qualifie d'externe, car elles proviennent de représentations qui ont quitté le concepteur pour être portées par le média du modèle.

Chacune des trois autres phases donne également lieu à des interactions entre le concepteur et la représentation (cf. i sur Figure 13) susceptibles de modifier le processus créatif [89]. Ainsi, la perception change la représentation implicite, l'activité de représentation change la représentation explicite et l'interprétation change la représentation construite.

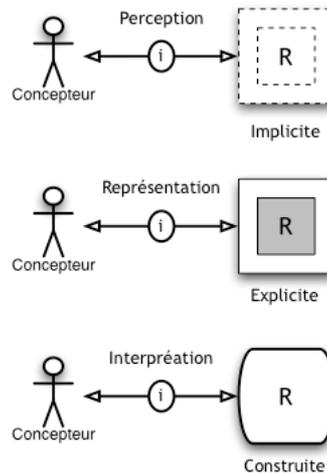


Figure 13 – *Interactions internes*

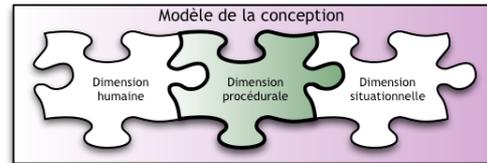
Ce mode d'interaction dit interne a deux origines majeures :

1. Toute action de représentation entraîne une modification du schéma cognitif de celui qui l'entreprend. Il s'agit alors d'une raison indépendante du type de modèle employé ;
2. Via son média le modèle contraint le concepteur à s'adapter son mode de représentation. Pour l'interprétation où le concepteur crée une représentation construite sur la base du modèle du processus créatif employé, ce phénomène est particulièrement vrai.

En résumé pour la dimension humaine

Ainsi de la même façon que le passage d'un support « papier » à un système de CAO modifie l'interaction entre le concepteur et la conception, l'usage d'un modèle interfère via son média sur le processus de conception. En créant une représentation de la réalité du processus créatif, le modèle interfère sur la réalité du processus de conception principalement par l'adaptation du concepteur au modèle (**interaction interne**) et par le retour d'informations qu'il procure au concepteur (**interaction externe**).

II.2 Dimension procédurale



Modèles du processus de conception

Dans cette section, nous allons aborder la dimension procédurale du modèle de la conception. Plusieurs auteurs, dont Tate et Nordlund [116], et Evbuomwan et coll. [34] proposent une double catégorisation des travaux de recherche en conception en fonction de la nature du processus de résolution :

1. *Prescriptif*. Le modèle définit a priori comment le processus de conception doit être. On y définit un algorithme (une série finie d'étapes) de traitement des problèmes qui dirige le concepteur. Par le cadre structurant qu'ils offrent, les modèles prescriptifs sont notamment efficaces dans le management et la gestion du travail collectif. Pour le travail individuel, il guide efficacement les concepteurs débutants. Les principales limites des modèles prescriptifs résident dans la disponibilité d'informations pertinentes au moment des étapes et dans l'adéquation entre le processus cognitif du concepteur et les phases du processus de conception ;
2. *Descriptif*. Le modèle définit a priori comment on fait pour concevoir. On y définit une heuristique (formulation générale d'états et de conditions) qui guide l'investigation de conception. Par rapport au modèle prescriptif, il ne s'agit pas de définir a priori des étapes ordonnées de traitement du problème, mais d'établir des actions de traitement déclenchées par les données du problème (s'il existe telle donnée alors, cela induit telles actions). L'aspect adaptatif des modèles descriptifs facilite au niveau individuel, les relations entre le modèle, le concepteur, et la situation ainsi que la captation des connaissances. La faible structuration des modèles descriptifs limite leur usage dans le cadre de travaux collectifs.

Evbuomwan et coll. [34] proposent une troisième catégorie de modèles du processus de conception, le modèle « informatique ». Cette catégorie se base sur les deux précédentes et particularise les modèles à vocations informatiques.

Niveaux d'expertises

Dans leur mise en œuvre, les processus de conception sont continuellement une composition de modèles prescriptifs et descriptifs dont l'alchimie dépend de l'expérience du concepteur. Dreyfus [31] distingue cinq niveaux d'expertise des concepteurs correspondants à cinq façons de percevoir, structurer, et résoudre les problèmes :

1. *Novice*. Le novice considère les caractéristiques objectives de la situation de conception et suit scrupuleusement les procédures de résolution.
2. *Débutant*. Pour le débutant les différents aspects de la situation sont importants et il est sensible à quelques exceptions et contournements dans les procédures.
3. *Compétent*. Le compétent choisit seulement certains aspects de la situation et il recherche systématiquement les opportunités de réduire les procédures.
4. *Habile*. L'habile ne retient que les aspects forts de la situation et il n'utilise que quelques procédures synthétiques.
5. *Expert*. L'expert répond immédiatement et intuitivement depuis la situation de conception.

Ainsi plus un concepteur devient expert, plus le modèle qu'il utilise (consciemment ou non) devient descriptif (voir Figure 14). Le concepteur suivra avec plus ou moins de liberté les modèles procéduraux originaux en fonction de son expertise grandissante. Vouloir formaliser le modèle procédural employé par un concepteur implique en réalité de formaliser des modèles toujours uniques puisque l'expérience du concepteur est une variable dynamique (par définition l'expérience n'est pas figée). Notre approche doit être capable de s'adapter à toutes sortes de modèles procéduraux employés par le concepteur en conception créative. Le modèle procédural ainsi obtenu se dénomme le **modèle adaptatif**.

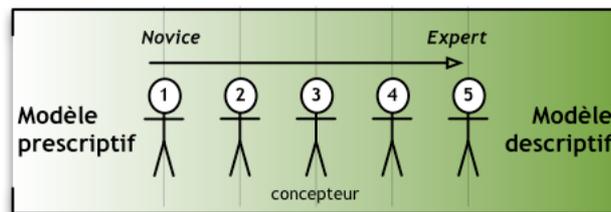


Figure 14 – Modèles procéduraux en fonction de l'expertise du concepteur

Approche synthétique

Toutefois, créer de nouveaux modèles adaptatifs peut se heurter à un scepticisme grandissant chez les cadres industriels face à la multiplicité de ces modèles procéduraux. Certains de ces cadres utilisent même un acronyme pour souligner cette multiplicité : « JAM, Just Another Method » [116]. C'est pourquoi quelques auteurs en conception tels que Heavy et Browne [56] ou Lipson et Suh [75] mettent en avant la nécessité d'unifier les formalismes de modélisation. La mise en oeuvre d'une approche synthétique [99] demeure une façon simple de rechercher l'unification des formalismes.

L'approche synthétique passe par la recherche de facteurs communs constituant une base de formalisation. Or les concepts communément admis en conception de systèmes comme le besoin, le problème, la solution ont des définitions parfois inconsistantes dans la mesure où celles-ci sont souvent dépendantes de la méthode de résolution employée ou cycliques, par exemple le concept de problème réfère à celui de solution qui réfère à celui de besoin, qui réfère de nouveau à celui de problème.

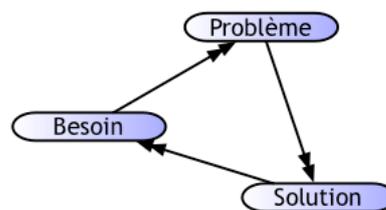


Figure 15 – Définitions cycliques

Afin d'être robuste, nous pouvons rechercher des concepts plus élémentaires. C'est-à-dire des concepts primitifs appelés **primitives** à partir desquels se construisent les autres concepts explicités à travers les diverses connaissances mises en oeuvre lors du processus créatif.

En résumé pour la dimension procédurale.

Pour être en phase avec la pratique des concepteurs, nous proposons de créer des modèles adaptatifs modélisant le processus créatif réellement entrepris par le concepteur lors du processus créatif. Ces modèles adaptatifs doivent être basés sur une approche synthétique consistant à associer des primitives pour former des ensembles cohérents complexes formalisant les modèles procéduraux (prescriptifs et descriptifs) existants. Le modèle adaptatif proposé apparaît (voir Figure 16) alors comme une couche sous-jacente

aux modèles procéduraux et permettant la formalisation de la pratique du concepteur sur la base de ceux-ci.

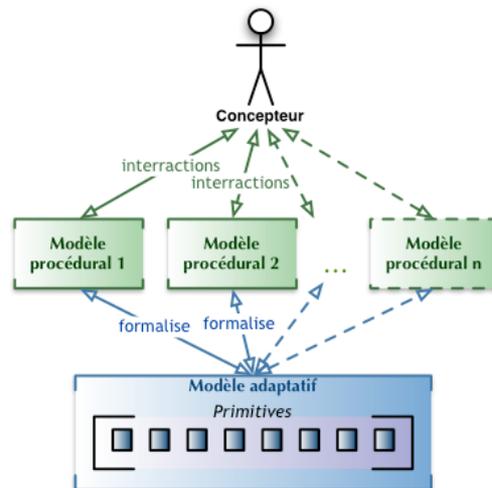
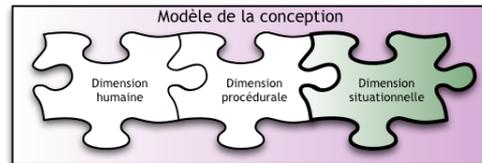


Figure 16 – *Modèle adaptatif primitif*

II.3 Dimension situationnelle



Typologie de connaissances

Après avoir abordé la dimension humaine puis procédurale, nous allons aborder dans cette section la dimension situationnelle du modèle de la conception. Nous l'avons vu dans la section traitant de la dimension humaine que la situation de conception existe à travers les constructions de la réalité faites par le concepteur. Ces constructions de la réalité traitent des connaissances manipulées durant le processus créatif [2].

Dans leur théorie de la création des connaissances, Nonaka et Takeuchi [86] définissent la connaissance comme un groupe d'informations ayant du sens et constituant une opinion justifiée par le concepteur ou une compétence acquise physiquement par le concepteur. Deux types complémentaires de connaissances existent :

1. Les connaissances explicites s'expriment par des mots, des chiffres, ou des symboles et se partagent facilement ;
2. Les connaissances tacites hautement personnelles se verbalisent et se communiquent difficilement. Les descriptions contiennent chacun de ces deux types de connaissances explicites et tacites verbalisées.

Le processus créatif apparaît alors comme une interaction et un échange entre les connaissances explicites et tacites soit individuellement ou par groupe [87]. Cette conversion des connaissances se catégorise en quatre modes sociaux (voir Figure 17) :

- *La socialisation*, de connaissances tacites individuelles à des groupes de connaissances tacites ;
- *L'externalisation*, de connaissances tacites à des connaissances explicites ;
- *La combinaison*, de connaissances explicites individuelles séparées à des connaissances explicites systémiques ;
- *L'internalisation*, de connaissances explicites à des connaissances tacites.

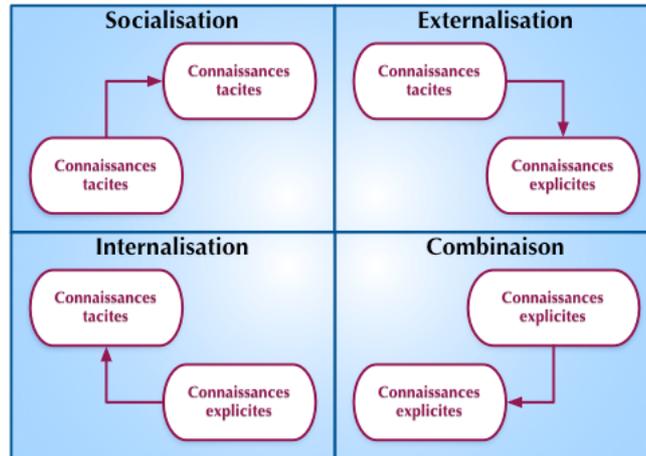


Figure 17 – *Conversions des connaissances (depuis origine de Nonaka [87])*

Point de vue sur les connaissances.

Pour les formaliser, toutes les connaissances doivent être exprimées. Ainsi, même si le distinguo entre connaissances tacites et explicites permet de décrire le processus de conversion des connaissances, en pratique pour la formalisation ce distinguo tacite-explicite est difficile à établir, car in fine pour être considérées toutes les connaissances doivent être aux moins partiellement explicitées.

Pour la modélisation de la résolution de problème, Mayer [80] considère quatre sous-groupes de connaissances :

1. *Factuelles*. Les éléments de base que l'on doit connaître pour être familiarisé à une discipline ou résoudre des problèmes dans la discipline ;
2. *Conceptuelles*. Les interrelations entre les éléments de base et une structure plus large qui leur permet de fonctionner ;
3. *Procédurales*. Savoir-faire, les méthodes de recherche d'informations, critères d'utilisation des compétences, algorithmes, heuristiques, etc ;
4. *Métacognitives*. Connaissances cognitives générales ;

La distinction entre ces quatre sous-groupes, dépend du point de vue du concepteur sur les connaissances. Van Aken [124] propose (Figure 18) de résumer ces quatre sous-groupes à trois points de vue considérés par le concepteur :

1. *Les connaissances sur l'objet.* Soit les connaissances liées au système étudié (cf. disque SYSTEME sur la Figure 18) ;
2. *Les connaissances sur la réalisation.* Soit les connaissances liées aux métiers ou aux domaines du systèmes (cf. disque DOMAINE SYSTEME sur la Figure 18) ;
3. *Les connaissances sur le processus de conception.* Soit les connaissances liées à la conception et l'ingénierie de conception en général (cf. disque CONCEPTION SYSTEME sur la Figure 18).

Ainsi, les éléments cibles et sources décrivant le cheminement lors du processus créatif comportent des connaissances se décrivant sur ces trois points de vue proposés par Van Aken (voir Figure 18).

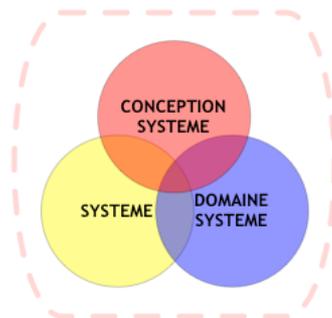


Figure 18 – *Trois types de connaissances*

Rapelons (Figure 19 idem Figure 9 page 33) que le cheminement lors du processus créatif débute par un besoin cible pour aboutir à une évolution du système satisfaisant le besoin cible appelée solution cible.

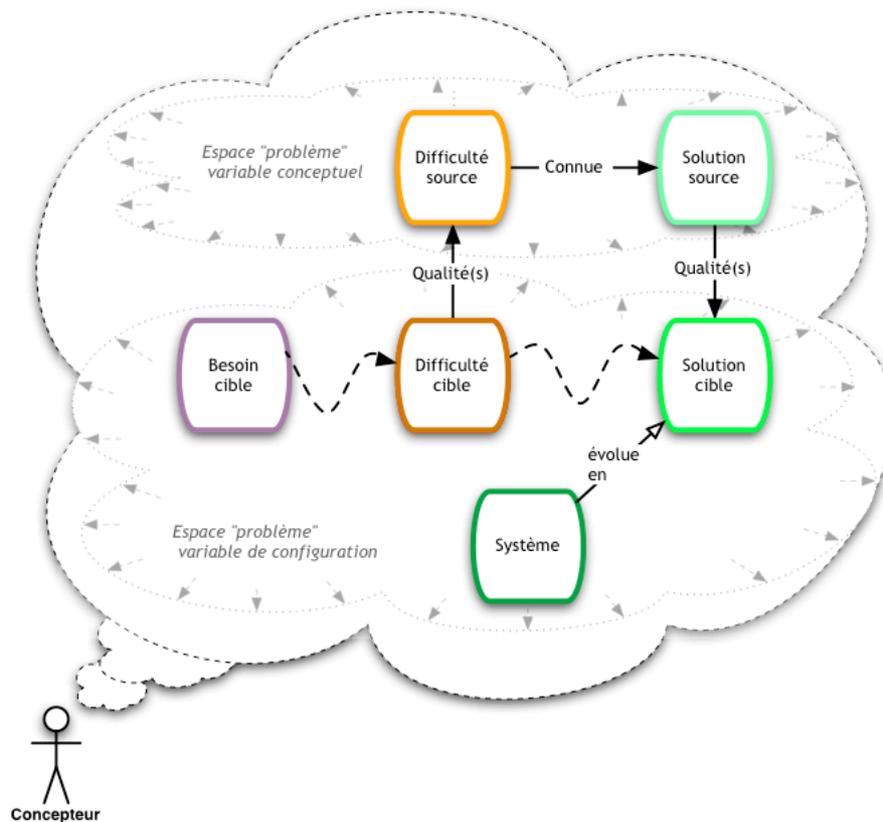


Figure 19 – Cheminement du processus créatif

Formalisation des connaissances

L'étendue des connaissances par rapport à chacun de ces points de vue est propre à chaque concepteur. Typiquement en système, un concepteur issu de la production aura des connaissances prédominantes sur l'objet (caractéristiques des machines, gammes des produits, typologies de flux, ...) alors qu'un autre concepteur issu de l'industrialisation aura peut-être des connaissances prédominantes sur la réalisation (SMED, Lean Manufacturing, 5S, ...) et sur le processus de conception (AV, TRIZ, aptitudes développées par l'expérience...).

Tous comme pour les concepteurs, les travaux de recherches proposent une répartition des connaissances formalisées inégale entre les points de vue. De la sorte, beaucoup de travaux de recherche apportent des éléments de formalisation pointus dans l'un de ces points de vue sur les connaissances (Mono sur Figure 20). Or le concepteur navigue entre les différents points de vue sur les connaissances et doit manipuler autant de formalismes

différents. Cette multiplicité de formalismes constitue autant d'éléments spécialisés efficaces à leur niveau, mais constitue également un frein et une source de frustration sur l'ensemble du parcours en conception des systèmes. D'autres travaux formalisent plusieurs points de vue à la fois (Bi ou Tri sur Figure 20). Ils contribuent ainsi à fluidifier le processus créatif comme les travaux du laboratoire PSD du MIT [22] [21] qui dans sa matrice formalise des solutions et besoins du Lean Manufacturing (connaissances au niveau DOMAINE SYSTÈME) en utilisant l'Axiomatic Design (connaissances au niveau C).

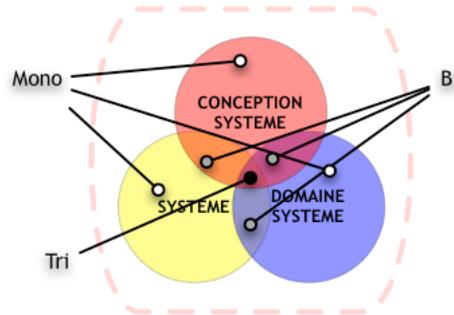


Figure 20 – *Taxonomie des contributions à la formalisation des connaissances*

En résumé pour la dimension situationnelle

Pour fluidifier l'usage du modèle à établir, la formalisation de la situation de conception proposée doit être commune aux trois points de vues sur les connaissances composant les éléments du processus créatif. C'est-à-dire que les primitives constituant le modèle adaptatif doivent être robustes aux différents points de vues sur les connaissances (sur l'objet : le système , sur le domaine du système et sur la conception des systèmes).

II.4 De l'existant

La section précédente nous permet de résumer les attentes sur le modèle en trois points :

1. Le modèle du processus créatif doit s'adapter au processus créatif réellement mis en œuvre par le concepteur peut-être par une approche synthétique sous-jacente aux modèles procéduraux consistant à associer des primitives.
2. Le modèle doit aussi limiter l'adaptation du concepteur au modèle (**interaction interne**) et maîtriser le retour d'informations qu'il procure au concepteur (**interaction externe**).
3. Le modèle doit être robuste aux différents points de vues sur les connaissances (sur l'objet : le système , sur la réalisation : la conception des systèmes et sur la conception)

À partir ce besoin, la littérature traitant de la modélisation du cheminement entrepris par le concepteur lors du processus créatif permet d'affiner l'image du modèle de conception à construire.

Théorie C–K

En conception créative, Hatchuel offre un formalisme du raisonnement de la conception créative en tant que cas particulier d'un modèle unifié de raisonnement indépendant du domaine de conception [53] (ingénieurs, architectes, artistes). La théorie C–K proposée et développée par Hatchuel et Weil [54] pose la trame d'un modèle descriptif centré sur la navigation du concepteur retracée à travers les propositions énoncées par le concepteur. D'après ses auteurs (Weil et Hatchuel) [55], la théorie C–K vise notamment à :

- donner une définition rigoureuse du raisonnement de conception, comparable à celles pratiquées en théorie de la décision dans l'étude des mécanismes de prises de décisions [52] ;
- offrir une meilleure compréhension de l'organisation et de la gestion de la conception dans les projets innovants ;
- d'unifier les modèles de conception ;
- et plus généralement expliquer le processus de conception créative.

La théorie C–K définit le cheminement de conception comme une continuité de propositions faites par le concepteur traduisant son raisonnement de conception. Les propositions sont des verbalisations du raisonnement du concepteur. Les propositions forment des espaces expansifs de concepts (CONCEPTION SYSTÈME) et de connaissances (K). Les concepts (CONCEPTION SYSTÈME) sont des propositions sans statuts logiques (ni vrai ni faux) par exemple l'énoncé du besoin : « je veux une voiture qui vole » constitue une proposition qui n'a pas de statut logique. Les connaissances (K) sont des propositions avec statuts logiques (vérifiables ou infirmables) par exemple : « les voitures ne volent pas » constitue une proposition dont le statut logique est « vrai » (en général !). Un espace expansif est ensemble d'éléments (connaissances ou concepts) non prédéterminés, qui s'enrichit au fur et à mesure de la conception (voir Figure 21).

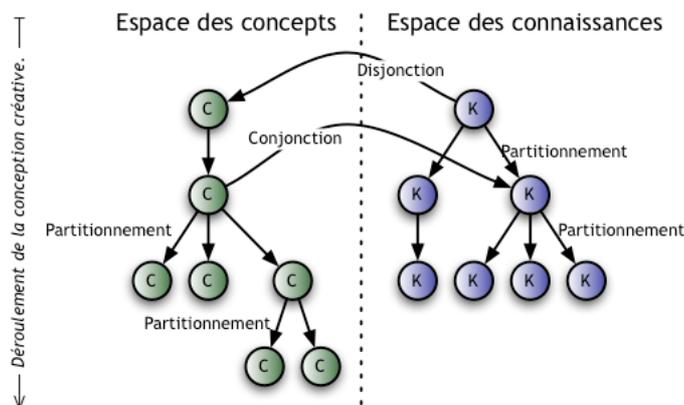


Figure 21 – Cheminement du raisonnement en conception créative (depuis originale de Hatchuel et Weil [54])

L'enrichissement des arborescences des espaces C et K se fait par une disjonction de K vers C (formation d'une autre possibilité), par conjonction de C vers K (finalisation), ou par partitionnement de K ou C (éclatement en sous éléments) (voir Figure 21).

Dans la théorie C–K, le principe créatif (soit de contrôler la créativité pour éviter les pièges cognitifs classiques), consiste à provoquer volontairement le partitionnement des C en considérant les sous-propositions de C et leurs inverses (également porteuses de K). Les K ne servent pas vraiment en tant que telles, mais elles expliquent en partie la proposition C. La conception doit donc se focaliser sur les Cs, car ceux-ci constituent le cœur de réflexion. Enfin, les K sont souvent chères à obtenir (expérimentation, recherche, etc.).

En résumé pour la théorie C–K

La théorie C–K offre une réponse descriptive adéquate à notre besoin de modélisation du processus créatif. Ainsi de la théorie C–K, nous tirerons trois conclusions adaptées à la modélisation du processus créatif [120]:

- la possibilité de formaliser le cheminement en conception créative via les **propositions** énoncées par le concepteur ;
- l'étude de la **structuration** (arborescences) **de ces propositions** permet d'analyser les raisonnements de conception ;
- il n'est pas nécessaire de positionner le cheminement de conception par rapport au notion de besoin, problème et solution pour en modéliser le mécanisme. Cette conclusion confirme la proposition faite d'utiliser des primitives comme base de modélisation (soit des concepts plus primitifs que ceux de problème, besoin, ou de solution).

Pour une modélisation approfondie des mécanismes de transitions proposées par la théorie C-K tel que la conjonction, la disjonction ou le partitionnement, nous devons proposer une caractérisation des propositions allant au-delà des concepts (CONCEPTION SYSTÈME) et des données (K).

Modèles d'architectures d'entreprises

En conception de processus industrielle, beaucoup de modèles se focalisent sur l'objet de la conception, à savoir ici le système [40]. Vernadat et Josysz proposent une catégorisation des modèles des systèmes suivant trois axes d'intégration [59] qui fait référence :

- Vues en fonction des domaines (Domaine Views sur Figure 22). Le modèle est construit suivant un domaine d'ingénierie ou de conception.
- Niveaux d'abstraction (Levels of Abstraction sur Figure 22). Le modèle comporte un certain niveau de détail.
- Phases du cycle de vie (Life Cycle Phases sur Figure 22). Le modèle correspond à une certaine étape de développement du système.

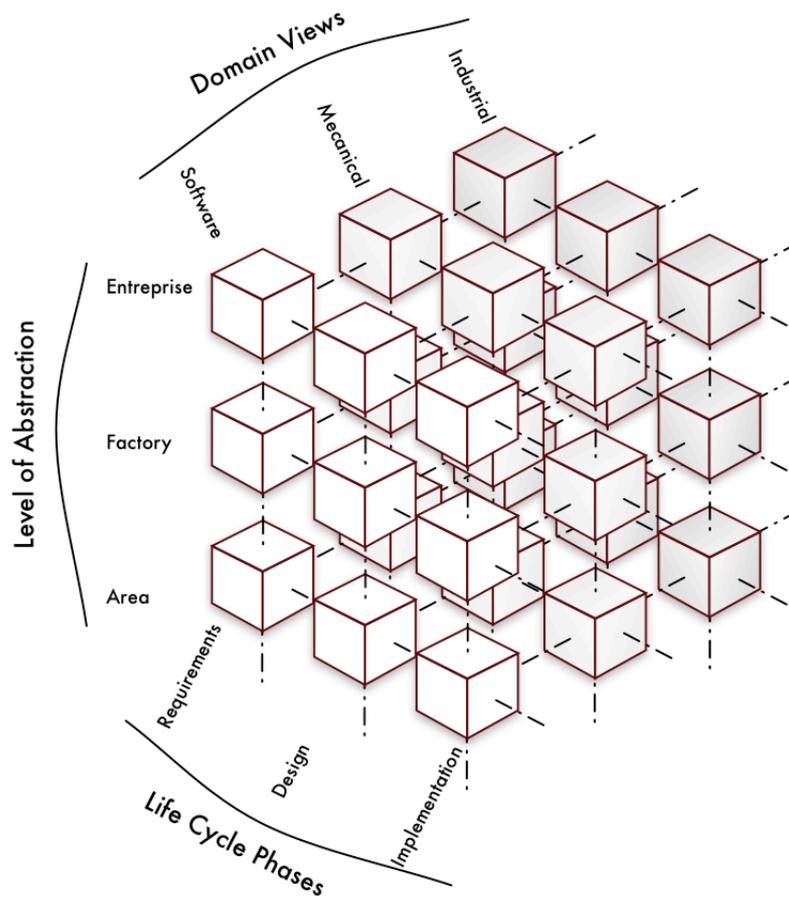


Figure 22 – *Classifications des modèles (depuis un original de Vernadat et Jorysz [59])*

Ces modèles rentrant dans la classification de Vernadat et Josysz s'appellent des modèles d'architectures d'entreprises (Enterprise Architecture). D'après Saenz et Chen, quatre modèles sont reconnus internationalement [103] :

1. CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open Systems Architecture) pour la construction de systèmes d'information ;
2. PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture and Methodology) pour l'aspect décisionnel sans détail ;
3. GIM (Generalized Integrated Methodology) pour une attention particulière au cycle de vie ;
4. GERAM (Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology) pour une utilisation sans optique particulière.

De nombreux autres modèles sont utilisés pour les systèmes , parmi lesquels figurent le standard « Integration Definition for Function Modeling » (IDEF0) et le Graphe de Résultats et Activités interreliées (GRAI).

D'après Tate et Nordlund [116], ces modèles d'architectures d'entreprises ont une perspective fonctionnelle et n'ont pas vocation à fournir des éléments de modélisation expliquant les mécanismes de résolution de problème. Ainsi pour formaliser la résolution de problème telle que le processus créatif, il est important d'aborder également les dimensions ontologiques et génétiques [73]. En effet, les trois perspectives suivantes peuvent être considérées pour formaliser un système :

- La perspective ontologique qui décrit la structure du système ;
- La perspective fonctionnelle qui décrit les activités du système ;
- La perspective génétique qui décrit l'évolution du système dans le temps sur la base des deux précédents.

En résumé pour les modèles d'architectures d'entreprises

Les modèles d'architectures d'entreprises positionnent les systèmes (comme les systèmes) au centre de la modélisation. C'est une vision intéressante que nous admettrons sur la base du postulat suivant :

- Puisqu'une solution cible est in fine une évolution du système , les propositions établies lors du processus créatif (du besoin cible jusqu'à la solution cible) portent sur le système.

Des modèles d'architectures d'entreprises nous retenons donc que les propositions traitent du **système** dont toutes les perspectives (fonctionnelle, ontologique, et génétique) doivent être abordées.

Résumé du chapitre

Puisqu'il y a une adaptation permanente du modèle procédural par le concepteur à la situation de conception en fonction de son expérience, nous proposons d'établir des **modèles adaptatifs du processus créatif**. Ces modèles adaptatifs doivent tenir compte des interactions internes et externes (voir section II.1). Par souci d'unification, le modèle doit être composé de **primitives** capables de constituer un langage transversal aux modèles (voir section II.2 et Figure 23).

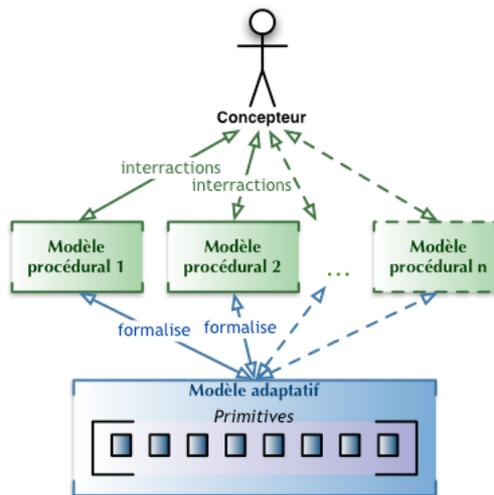


Figure 23 – *Modèle adaptatif primitif*

Pour fluidifier la navigation entreprise par le concepteur durant le processus créatif, les primitives doivent être **robustes vis-à-vis des différents points de vues** sur les connaissances énoncées (voir section II.3). Les trois points de vue sur l'objet (SYSTEME), sur la réalisation (DOMAINE SYSTÈME) et sur le processus de conception (CONCEPTION SYSTÈME) permettent de formaliser les éléments du cheminement du processus créatif qu'ils soient cibles ou sources (voir Figure 24).

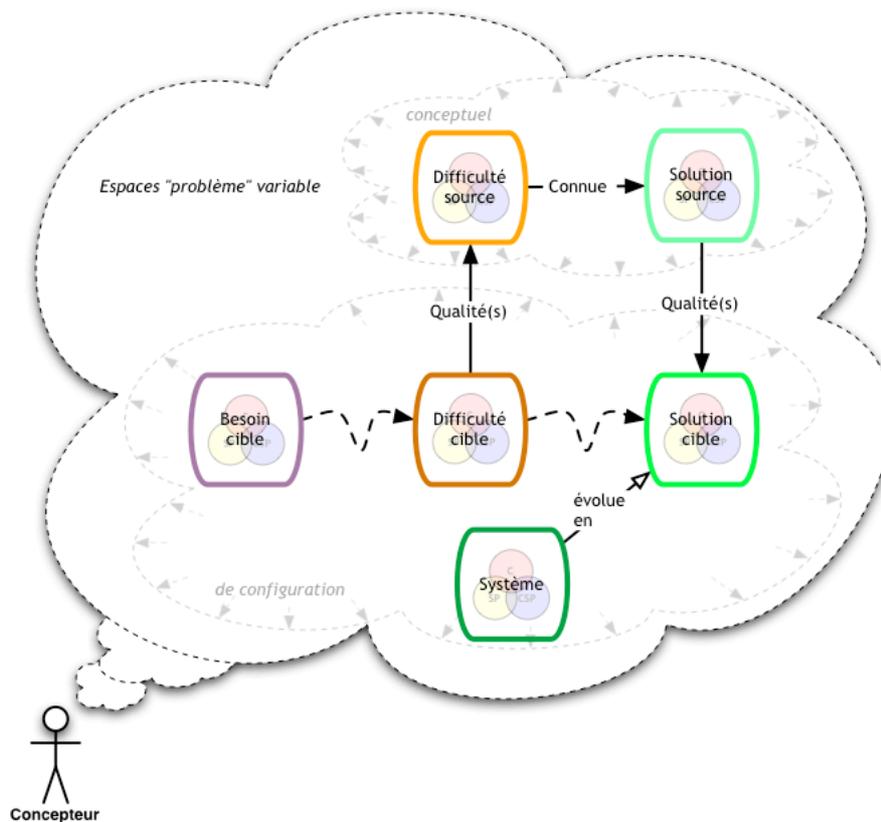


Figure 24 – Cheminement lors du processus créatif

Sur cette base, quelques éléments offerts par la théorie C–K semblent pertinents pour décrire le fonctionnement du modèle du processus créatif adaptatif recherché :

- la possibilité de formaliser le cheminement en conception créative via les **propositions** énoncées par le concepteur ;
- l'étude de la structuration (arborescences) de ces propositions permet d'analyser les raisonnements de conception ;
- il n'est pas nécessaire de positionner le cheminement de conception par rapport au notion de besoin, problème et solution pour le modéliser.

Toutefois, le modèle prescrit par la théorie C–K sur la base de concepts (CONCEPTION SYSTÈME) et de données (K) n'est pas suffisant pour poser les primitives recherchées. Sur ce point, les modèles d'architectures d'entreprises apportent une réponse intéressante nous permettant de proposer des primitives centrées sur la description du système.

Ainsi, nous proposons de modéliser le processus créatif par une suite de propositions représentant diverses évolutions du système au fil de la conception (Figure 25). Précisons qu'il s'agit d'évolution partielle du système qui modélise des états de portions du système pour la conception et non pour illustrer son fonctionnement.

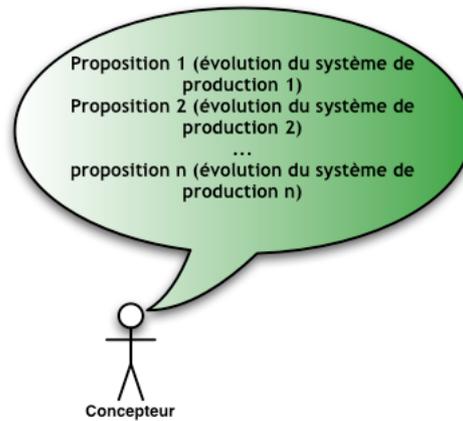


Figure 25 – *Suites d'évolutions de parties du système*

III. Modèle adaptatif

Ce chapitre traite de la construction de la contribution.

Construction du chapitre

Lors de l'utilisation de différents modèles procéduraux, le concepteur énonce des propositions qui traduisent son cheminement lors du processus créatif. Nous souhaitons formaliser cette suite de propositions représentant diverses évolutions du système au fil de la conception pour constituer un modèle adaptatif basé sur des primitives (constituants élémentaires).

Ce chapitre traite de deux contributions :

- D'une part, nous présentons la construction en trois temps du modèle des primitives :
 - Dans la section III.1, nous présentons la démarche scientifique d'obtention des primitives, dite démarche holonique.
 - Dans la section III.2, nous exposons les primitives obtenues appelées holons.
 - Dans la section III.3, nous compléterons les holons (primitives) par des aspects procéduraux liés à leur utilisation pour créer le modèle des primitives.
- D'autre part dans la section III.3, nous présentons comment construire un modèle adaptatif depuis le modèle holonique (modèle des primitives).

III.1 De la démarche scientifique

Modes de détermination

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que nous souhaitons déterminer des primitives permettant de formaliser les propositions faites lors du processus créatif. Deux modes de détermination des primitives existent depuis une base de cas correspondant à la fois à des situations variées de conception, à l'utilisation de modèles procéduraux différents et à des concepteurs différents :

- L'un consiste à raffiner une large base de cas par factorisations successives des propositions de primitives issue des cas (voir Factorisation sur Figure 26) ;
- L'autre consiste à faire l'hypothèse de primitives, puis à vérifier s'ils permettent effectivement de formaliser les propositions faites lors du processus créatif issues d'un nombre de cas d'étude de plus en plus étendue (voir Hypothéticodéductif sur Figure 26).

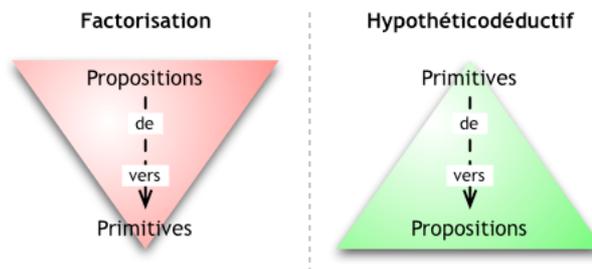


Figure 26 – Méthodologies de recherche.

Ne disposant pas de base de cas établie a priori et vue l'étendue des situations de conception des systèmes possible, nous avons subséquemment considéré que la factorisation nécessiterait plus de temps que la détermination hypothéticodéductive pour aboutir à des primitives robustes. Par robuste, nous entendons ici que le traitement consécutif de nouveaux cas n'entraînait pas de changement significatif dans le modèle des primitives.

Ayant choisi la détermination hypothéticodéductive, nous ferons les trois hypothèses suivantes pour déterminer les primitives a priori :

1. Un système est une classe particulière de système [43] ;

2. Les problèmes et solutions qu'ils soient cibles ou sources sont des descriptions singulières du système à différents stades d'évolution du processus créatif. Toutefois, leurs usages restent nécessaires pour la communication entre concepteurs et à l'organisation des projets de conception ;
3. Pour simplifier le modèle, les propositions sont vraies au moment où le concepteur les énonce.

Méthode

Démarche holonique

Les contraintes d'adaptativité et de robustesse des primitives recherchées nous invitent à proposer une démarche holonique similaire à celle utilisée par Koestler [66] pour décrire ses observations des systèmes complexes tels que les organismes vivants, ou les organisations sociales. Le terme holon (ou holonique) est un néologisme de Koestler née de la composition du grec ολος (holo) : entier et du suffixe « on » : partie (comme dans le mot électron). Le paradigme du terme holon traduit la nature hybride du tout et des parties. Tout système est ouvert à la fois sur ses « bords » hiérarchiques supérieurs et inférieurs :

« Le tout peut toujours faire partie d'un tout plus grand, et une partie peut toujours se décomposer en plus petites parties. » Dixit Vertorazzi et Telles [125].

Dans la démarche holonique proposée, les **holons** tiennent lieu de primitives, soit des concepts élémentaires capables de former des ensembles structurés appelés holarchies. L'avantage d'une telle démarche est d'offrir un formalisme robuste (les holons sont des classes invariantes), et adaptable (les holarchies sont évolutives).

Nous appellerons l'ensemble des holons obtenus et leur utilisation, le **modèle holonique**. Le modèle holonique constitue notre première contribution. Notre seconde contribution consiste à montrer comment constituer un **modèle adaptatif** depuis le modèle holonique.

Nous ferons ici abstraction de l'aspect comportemental de l'approche de Koestler. Le « Holonic Manufacturing System » (HMS) en tant que partie du « Intelligent Manufacturing System » (IMS) diffère ainsi de notre démarche sur les aspects suivants :

- « Un HMS se compose de holons qui sont des blocs de construction du système , chacun autonome et collaboratif. Un holon manufacturier peut transformer, déplacer, contrôler, ou stocker des objets physiques ou des informations.
- Le HMS s'organise en holarchie qui définit les règles basiques de coopération et délimite ainsi leur autonomie.
- Le HMS n'a donc pas d'organisation figée mais une auto-organisation qui pour atteindre ses objectifs se forme dynamiquement en fonction de l'environnement. » Dixit Tönshoff et col. [119]

Ontologie

Pour Reynaud [100] l'ingénierie des connaissances constitue une activité de modélisation qui s'attache à formaliser des ensembles structurés de concepts comme les holarchies. Cette activité s'appelle l'étude des ontologies. En philosophie, l'ontologie (du grec onto, $\omega\nu$ = être et logos, $\lambda\acute{o}\gamma\omicron\varsigma$ = mot/parole) est la branche la plus fondamentale de la métaphysique. Il étudie l'Être en tant qu'Être, indépendamment de ses déterminations particulières. L'ontologie a des implications fortes pour les conceptions de la réalité [26], [35]. En représentation des connaissances, les ontologies fournissent un domaine de discours, « c'est une spécification explicite d'une conceptualisation » [65], [121]. Les ontologies modélisent les entités et leur relation pour un domaine d'intérêt particulier comme la théorie des systèmes.

Dans un domaine du discours, c'est une description formelle et explicite des concepts, des propriétés et des individus qui constituent un modèle du domaine [84].

- Concepts : abstraction et catégorisation de notion (aussi appelés classes) ;
- Propriétés : caractéristiques et relations de chaque concept (aussi appelées rôles ou attributs) ;
- Individus : instances des concepts.

Une ontologie définit un vocabulaire commun pour les chercheurs ou utilisateurs qui ont besoin de partager l'information dans un domaine. Une étude ontologique sert notre besoin en permettant de :

- partager une structure de l'information commune,
- permettre la réutilisation du savoir sur un domaine,
- expliciter ce qui est considéré comme implicite sur un domaine,
- distinguer le savoir sur un domaine du savoir opérationnel,
- informatiser le modèle du domaine.

Méthodes de construction de l'ontologie

Il existe un grand nombre de méthodologies proposant chacune son algorithmique de construction d'ontologies de domaine parmi les plus connues TOVE (Toronto Virtual Enterprise) [39] et ODE (Ontology Design Environment) [76]. Kassel [63] définit le

processus de représentations des connaissances en trois phases itératives. L'ontologie est ainsi « raffinée » plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'un consensus entre les experts* concepteurs et celui qui entreprend la modélisation :

1. *La conceptualisation.* Première phase d'identification des connaissances contenues dans un corpus représentatif du domaine (voir 1re Phase sur Figure 27) ;
2. *L'ontologisation.* Deuxième phase de formalisation du corpus obtenu à l'étape précédente domaine sous forme de modèle conceptuel (voir 2e Phase sur Figure 27) ;
3. *L'opérationnalisation.* Troisième phase de transcription de l'ontologie dans un langage formel et opérationnel de représentation de connaissances domaine (voir 3e Phase sur Figure 27).

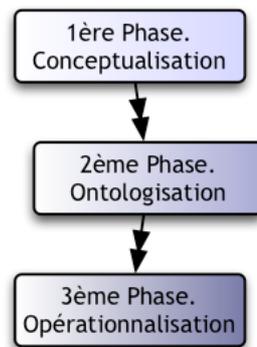


Figure 27 – Phases de construction de l'ontologie

*Sont intervenus comme experts de l'entreprise CODICA AUTOMOTIVE S.A. :

- Thierry SCHWEITZER (directeur technique),
- Alain WIMMER (responsable),
- Adrien GUENEBAUT (responsable méthodes industrialisations).

Pour l'INSA de Strasbourg :

- Marc BARTH (Maître de conférence HDR).

Pour ma part (Adrien GUENEBAUT), je suis également intervenu en tant que modélisateur.

Matériel

Langage OWL

Pour l'opérationnalisation, différents langages de représentation des ontologies fournissent différents avantages. Les langages basés sur des modèles logiques permettent en plus de définir et décrire les concepts de façon logique et rigoureuse. Un des développements les plus récents dans des langues logiques standards d'ontologie est OWL [8] du consortium de World Wide Web [23]. OWL peut être classé en trois sous-catégories :

- OWL Lite. Langage logique simple le moins expressif.
- OWL Full. Langage logique compliqué le plus expressif.
- OWL DL se situe entre celles de l'OWL -Lite et OWL -Full et offre un bon compromis entre simplicité et adaptabilité.

Éditeur Protégé-OWL

Protégé [111] est une interface modulaire d'édition permettant la construction d'ontologies dans plusieurs langages, dont OWL DL (on parle alors de Protégé-OWL). Cet outil informatique multi plateforme fournit un moyen simple et ergonomique de décrire les classes, les propriétés et leurs individus [44]. Protégé-OWL définit les propriétés par rapport à un domaine (point de départ de la relation) et une portée (point d'arrivée de la relation). En fonction de la nature de la portée, Protégé-OWL distingue trois types de propriétés :

1. Propriété « Donnée » (PDon) : la portée est une donnée (texte, liste de valeur, entier, indéterminé, etc.) (Figure 28) ;
2. Propriété « Objet » (PObj) : la portée est une classe qui peut être la même classe que celle du domaine (Figure 28) ;
3. Propriété « Annotation » : la portée est un commentaire, nous l'utiliserons pour stocker une définition verbale (en plein texte) des classes (Figure 28).

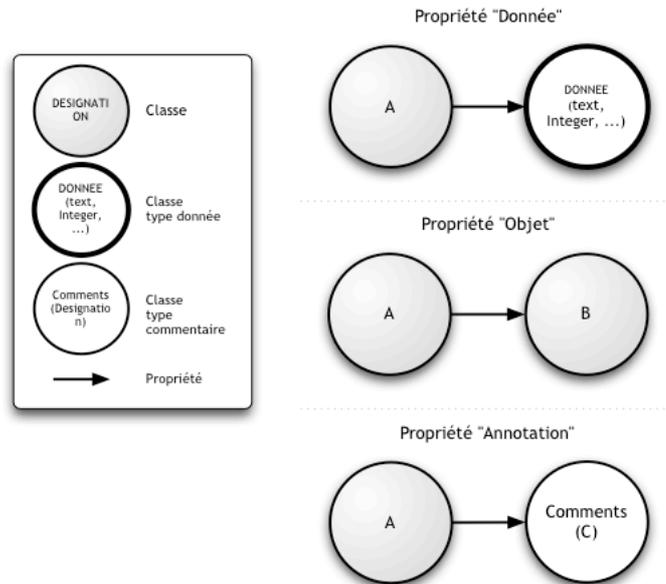


Figure 28 – Types de propriétés

Une propriété objet peut aussi être la réciproque d’une autre propriété objet. Dans ce cas, elles sont l’inverse l’une de l’autre.

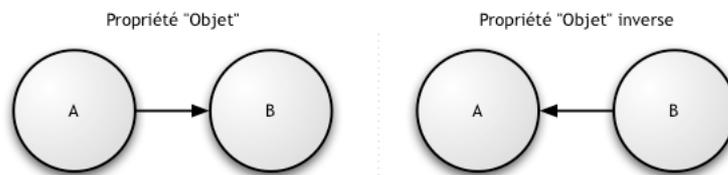


Figure 29 – Propriété inverse

Les propriétés objet peuvent également avoir trois caractéristiques :

- *Propriété transitive*. Les propriétés passent de propriétés en propriété. Par exemple (Figure 30), si une propriété transitive existe entre a1 et a2 et entre a2 et a3, alors on peut en déduire une propriété équivalente entre a1 et a3 ;

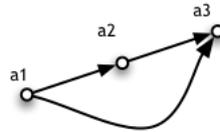


Figure 30 – *Propriété transitive*

- *Propriété fonctionnelle*. La propriété a au plus un seul individu dans la portée donc s'il y existe plusieurs individus, ceux-ci sont équivalents. Par exemple (Figure 31), si la propriété qui lie a à b1 et b2 est fonctionnelle alors b1 et b2 sont équivalents ;

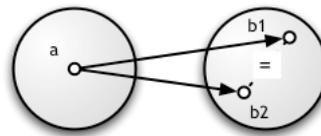


Figure 31 – *Propriété fonctionnelle*

- *Et la propriété inverse fonctionnelle*. La propriété a au plus un seul individu dans le domaine donc s'il y existe plusieurs individus, ceux-ci sont équivalents. Par exemple (Figure 32), si la propriété qui lie a1 et a2 à b est une propriété inverse fonctionnelle alors a1 et b2 sont équivalents.

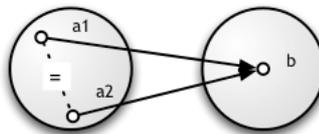


Figure 32 – *Propriété inverse fonctionnelle*

L'utilisation d'un éditeur comme Protégé-OWL oblige à faire preuve d'une grande rigueur dans la définition des concepts. Protégé-OWL basé sur le langage logique OWL DL permet aussi d'entreprendre des raisonnements logiques sur ces descriptions à l'aide d'un raisonneur logique.

Raisonneur RacerPro

L'utilisation d'un raisonneur logique comme RacerPro [98] permet de vérifier si tous les rapports et les définitions dans l'ontologie sont mutuellement conformés [51]. Il peut ainsi identifier quels concepts s'adaptent sous quelles définitions. Le raisonneur peut donc aider à maintenir une taxonomie de classes cohérente. Comparer la taxonomie calculée par

RacerPro avec celle exprimée par l'expert est un moyen particulièrement efficace de vérifier la logique des définitions des concepts et propriétés. Un autre service offert par RacerPro est la vérification de l'uniformité. En se basant sur les propriétés et d'éventuelles conditions logiques, le raisonneur peut vérifier si une classe est contradictoire. Une classe est considérée comme contradictoire si elle ne peut pas avoir d'instances.

Matière

De par l'approche hypothéticodéductive choisie, avant de pouvoir entreprendre une étude ontologique et d'utiliser ces outils (OWL DL , Protégé-OWL, RacerPro), nous devons déterminer un domaine du discours qui serve de base théorique pour déterminer les holons. Une fois, les holons établis ceux-ci doivent être progressivement validés empiriquement.

Théorie des systèmes

La base théorique de détermination des holons doit tenir compte des critères d'acceptation des experts pour tous les trois points de vue des connaissances (conception, conception des systèmes , système (Figure 18 page 17). Parmi ceux-ci, on trouve :

- offrir un apprentissage court et aisé,
- et s'adapter à la diversité des contextes, des solutions, et des méthodes.

Pour respecter ces critères, les holons doivent reposer sur une base partagée, acceptée et existante. De plus la volonté d'entreprendre une démarche holonique et le fait que les systèmes soient des systèmes, nous ont conduits à choisir la théorie des systèmes comme fondement théorique à la détermination des holons.

La théorie des systèmes fut proposée et développée essentiellement entre les années 1940 et 1960 par Wiener [129], Ashby [7], von Bertalanffy [10], Boulding [15], von Foerster [38], et McCulloch [81]. Von Bertalanffy insista sur le fait que les vrais systèmes sont ouverts. Ils interagissent avec leur environnement et peuvent ainsi acquérir de nouvelle propriété par une émergence qui résulte d'une évolution continue. L'interaction mutuelle des parties agit en quelque sorte comme une colle qui permette de créer un tout, le système. Parce que les parties interagissent, quelque chose est ajouté qui permet au système d'être plus que la somme de ses parties. Ce qui caractérise les parties du système,

c'est qu'elles sont elles-mêmes des systèmes en fonction de la perception qu'en fait le concepteur.

Plutôt que de réduire un système aux caractéristiques de ces parties comme dans l'approche analytique (voir Tableau 1), la théorie des systèmes se concentre sur l'arrangement et les relations entre les parties qui forment des tous (holisme). Cette organisation des parties détermine un système indépendamment des substances concrètes des parties. Le même principe d'organisation existe alors dans différentes disciplines (physique, biologie, technologie, sociologie, etc.) et constitue alors une base unificatrice. La théorie des systèmes [73] est un champ interdisciplinaire qui étudie les principes communs aux entités complexes (appelées systèmes) et leurs modélisations.

Tableau 1 – *Analytique versus systémique*

Approche analytique	Approche systémique
Isoler, puis se concentrer sur les parties du système.	Unifier, puis se concentrer sur les interactions entre les parties.
Étudier la nature des interactions.	Étudier les effets des interactions.
Insister sur la précision des détails.	Insister sur la perception globale et nouvelle.

L'étude de différents concepts définissant le système issus de la théorie du système nous permet d'établir les holons de notre modèle.

Étude industrielle

L'objectif de l'étude industrielle est double. D'une part, nous pouvons progressivement valider l'utilisation du modèle proposé en situation de conception. D'autre part, nous pouvons tirer au fur et à mesure des conclusions nous permettant d'améliorer le modèle proposé.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE entre l'entreprise CODICA AUTOMOTIVE S.A. et le Laboratoire de Génie de la Conception (LGECO) de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg. L'entreprise CODICA AUTOMOTIVE S.A., un sous-traitant de deuxième rang de l'industrie automobile fabrique des transmissions d'effort par câble métallique comme des freins de stationnement pour voiture.

Au sein de cette entreprise, nous avons réalisé une conception complète de l'atelier afin d'être plus en phase avec les nouvelles orientations stratégiques. Cette étude incluait de

nombreux sous-problèmes notamment d'implantation, d'ergonomie, et d'alimentation des postes en matière. Toutefois, pour des raisons de confidentialité seule une version condensée d'un problème d'implantation est présentée dans cette thèse.

III.2 De la construction de l'ontologie

Dans cette section où il s'agit de déterminer les holons (et les primitives associées), la restitution des résultats suit les trois phases de construction d'une ontologie décrites par Kassel [63] dans la section précédente III.1 :

Premier phase. Conceptualisation ;

Deuxième phase. Ontologisation ;

Troisième phase. Opérationnalisation.

La Figure 33 progressivement dévoilée symbolise l'avancement dans les trois phases de construction d'une ontologie.

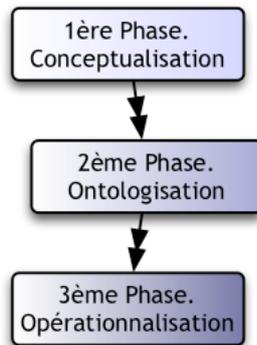
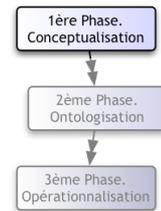


Figure 33 – 3 phases de construction d'une ontologie

Première phase. Conceptualisation

Type d'analyse textuelle



L'objectif de cette étape est d'établir un corpus de concepts définissant le système. Une analyse textuelle de différentes définitions du système en théories des systèmes nous permet d'atteindre cet objectif. L'analyse textuelle proposée part du constat de Adam [1], « tout texte possède, d'une part, des éléments référentiels récurrents présumés connus, et, d'autre part, des éléments posés comme nouveaux » et propose d'extraire les éléments nouveaux porteurs de la progression et de l'expansion informative. D'après Brugidou, et col. [18] cette recherche peut s'effectuer à trois niveaux d'analyse :

1. *Niveau lexicosémantique.* Inventaire lexical et terminologique du corpus traité ; élaboration d'un réseau de notions ;
2. *Niveau de construction syntaxique et textuelle.* Étude des connecteurs et des marques de progression thématique, des marqueurs énonciatifs ;
3. *Niveau extra linguistique.* Prise en compte du sémantisme propre à la structuration « physique » du texte.

Compte tenu de nos objectifs d'établissement d'un corpus de concepts définissant le système, nous avons naturellement retenu une analyse textuelle au niveau lexicosémantique. Celle-ci s'effectue alors simplement en se focalisant sur les éléments lexicaux et en rassemblant les équivalents.

Définition du système.

Le mot système provient du grec σύστημα (sustêma) qui signifie ensemble. En conséquence, le premier concept définissant le système est l'ensemble (schématisé par l'arborescence sur la Figure 34).

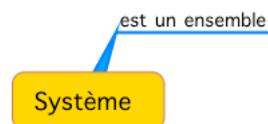


Figure 34 – Concepts définissant le système

Nous avons retenu ici plusieurs définitions complémentaires de divers auteurs :

- Maturana et Varela [79] : « Tout ensemble défini de composants. » ;
- Gibbs [46] : « Toute portion de l'univers que nous choisissons de séparer par la pensée dans le but de considérer les différents changements qui arrivent en son sein dans diverses conditions. » ;
- Saussure [104] : « Une totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité. » ;
- Von Bertalanffy [10] : « Ensemble d'unités en interrelations mutuelles. » ;
- De Rosnay [102] : « Ensemble d'éléments organisé en fonction d'un but en interaction dynamique. » ;
- Ladrière [71] : « Objet complexe, formé de composants distincts reliés entre eux par un certain nombre de relations. ».

De ces définitions au niveau lexicosémantique, nous retenons que le système est un ensemble variable et complexe ouvert de composants ou d'éléments (voir le texte surligné sur la Figure 35) :

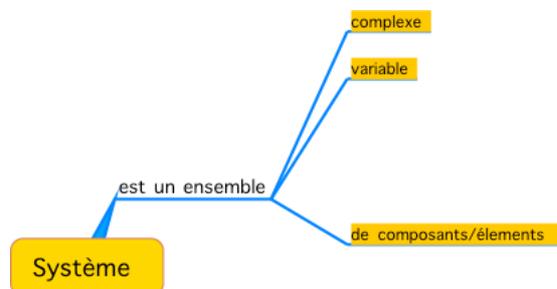


Figure 35 – *Concepts définissant le système (suite 1)*

De plus, ces composants sont (voir le texte surligné sur la Figure 36) :

- solidaires,
- distincts,
- organisés,
- et en relation mutuelle, dynamique et contrainte.

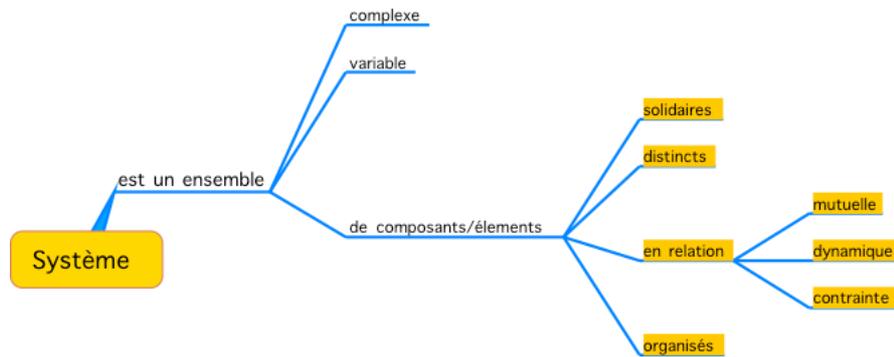


Figure 36 – Concepts définissant le système (suite 2)

L'ensemble des définitions précédentes traite des systèmes dits ouverts. La particularité des systèmes ouverts est qu'ils interagissent avec l'extérieur d'eux-mêmes. En conséquence, l'interaction a deux composants :

- *L'entrant*. Ce qui provient de l'environnement et entre dans le système ;
- *L'extrant*. Ce qui sort du système et va dans l'environnement.

Mais pour parler d'entrant ou d'extrant, nous devons être capable de distinguer le système de son environnement donc de poser les frontières du système. L'appréhension de cette frontière se fait grâce à la définition du but du système. La définition du système inclut donc les nouveaux concepts suivants (voir le texte surligné sur la Figure 37) :

- la frontière du système et environnement,
- l'entrant,
- l'extrant.

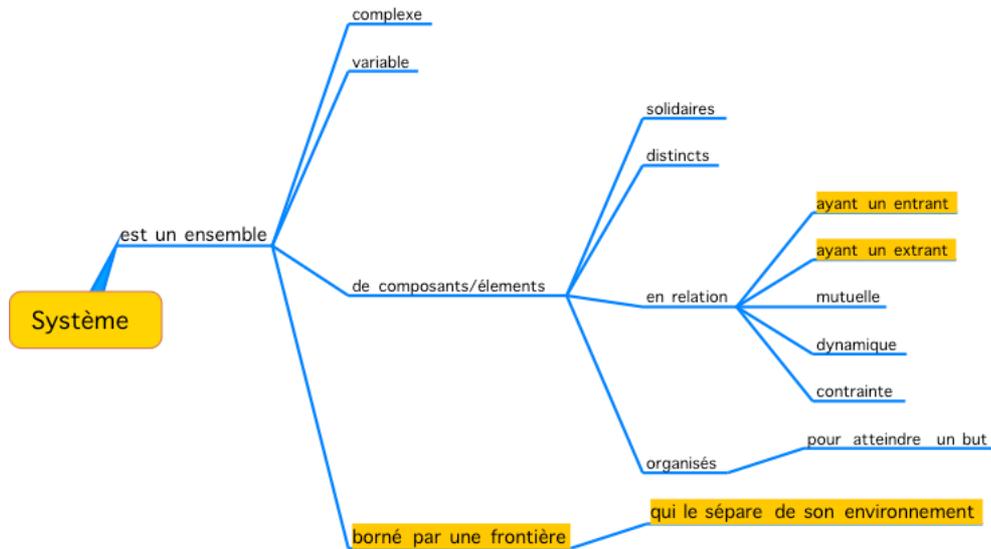


Figure 37 – Concepts définissant le système (suite 3)

Par son existence la théorie des systèmes a permis de créer de nombreuses disciplines ou approches, telles que la systémique* et la cybernétique. Wiener [129] définit la cybernétique comme la science de la communication et du contrôle dans l’animal et dans la machine. La cybernétique modélise l’évolution du système dans un réseau de variables couplées et pose une autre définition du système :

- comme les variables peuvent représenter les éléments du système et les contraintes sont les compléments logiques des relations, alors un système peut se définir par un ensemble de variables sélectionnées par un observateur avec les contraintes sur ses variables qu’il découvre, qu’il préfère, ou dont il fait l’hypothèse [92].

Ainsi en cybernétique le système est la construction d’un observateur modalisateur :

« Un système n’existe pas indépendamment d’un observateur ni n’a de but »
Krippendorff [92].

*La systémique est une discipline qui regroupe les démarches théoriques, pratiques et méthodologiques, relatives à l’étude des systèmes complexes [28].

Nous devons alors compléter la définition du système avec les concepts d’observateur et de variable (voir le texte surligné sur la Figure 38).

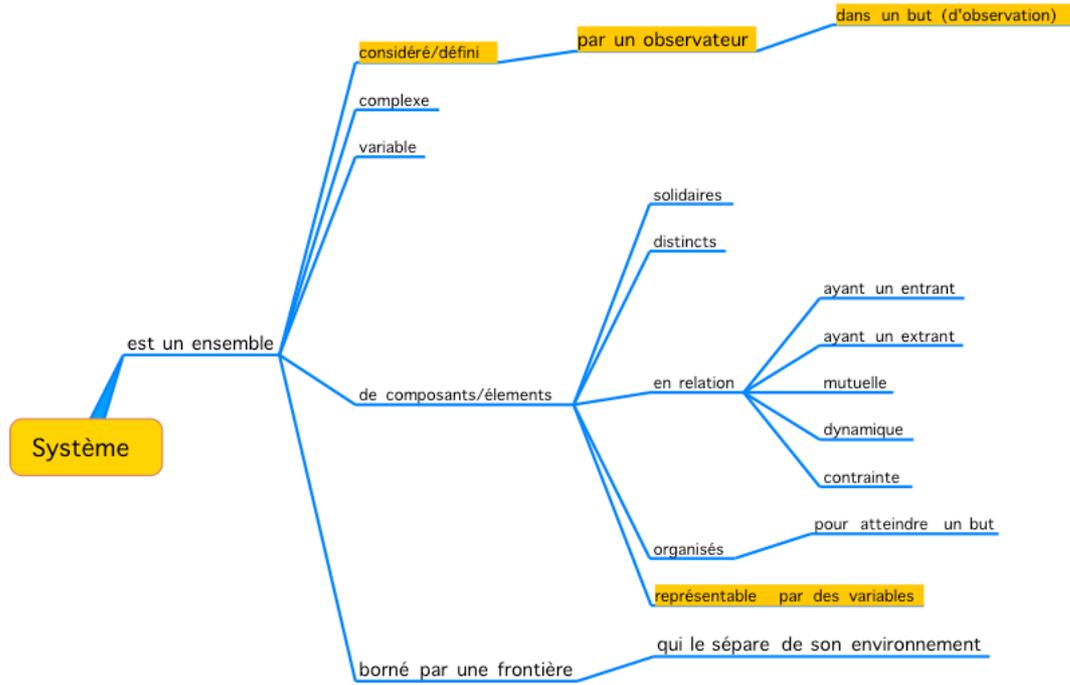
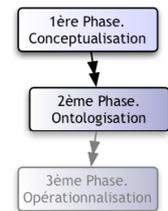


Figure 38 – Concepts définissant le système (suite 4 et fin)

Deuxième phase. Ontologisation



Concepts définissant le système

L'ontologisation consiste ici à contextualiser le corpus de concepts précédents (schématisé par la Figure 38) à la conception des systèmes pour en extraire les concepts essentiels au processus créatif. C'est pourquoi nous utiliserons un vocable plus conforme à la pratique industrielle pour les concepts que nous définissons.

N.B. : Par convention, les classes sont notées en LETTRES CAPITALES.

Le corpus de concepts se synthétise comme suit :

- **CONCEPTEUR** : Organisation humaine entreprenant la conception.
- **SYSTEME** : Ensemble borné, mais variable d'éléments en interrelation sur lequel le concepteur porte son intérêt.
- **RESSOURCE** : Sous-ensemble d'éléments composant le système dont le concepteur perçoit .
- **PARAMETRE** : Caractéristique variable et distinctive de ressource.
- **VALEUR** : Détermination (quantitative ou qualitative) d'un paramètre.
- **VALEUR OBJECTIVEE** : Valeur prise ou pouvant être prise par la ressource.
- **VALEUR DESIREE** : Valeur souhaitée ou contrainte donnée par le concepteur.

Pour mieux fonder ces définitions, nous définissons l'organisation humaine comme un groupement de personnes qui se proposent des besoins déterminés, l'élément comme un constituant effectif d'un ensemble, et la caractéristique comme un trait distinctif.

La Figure 39 représente ces concepts. Elle repose sur le langage schématique ontologique de l'IDEF5 « Ontology Description Capture Method » [9] développé par le « Information Integration for Concurrent Engineering » (IICE). Dans l'IDEF5 les concepts se

schématisent sous forme de classes (rond) et leurs propriétés sous forme de relations (flèche). IDEF5 distingue particulièrement deux types de propriétés :

- La relation de composition (en Figure 39) signifie qu'une classe a comme partie une autre classe. Réciproquement ces deux classes ne sont pas de même nature. Ainsi, le **CONCEPTEUR** et le **SYSTEME** qu'il considère ne sont pas de même nature ;
- La relation de classification (en Figure 39) détermine l'appartenance à une sous-classe ou une hiérarchie, par exemple la **RESSOURCE** est un sous **SYSTEME** (a sous-ensemble).

Sur la Figure 39, des classes s'intitulent « **DONNEE** ». Celles-ci correspondent aux propriétés dont la portée est une donnée. Ici les classes de donnée se composent de chaînes de caractères (**String**).

L'utilisation de classe «DONNEE (String)» comme notation des Propriétés « Donnée » (PDon) est une notation que nous suggérons.

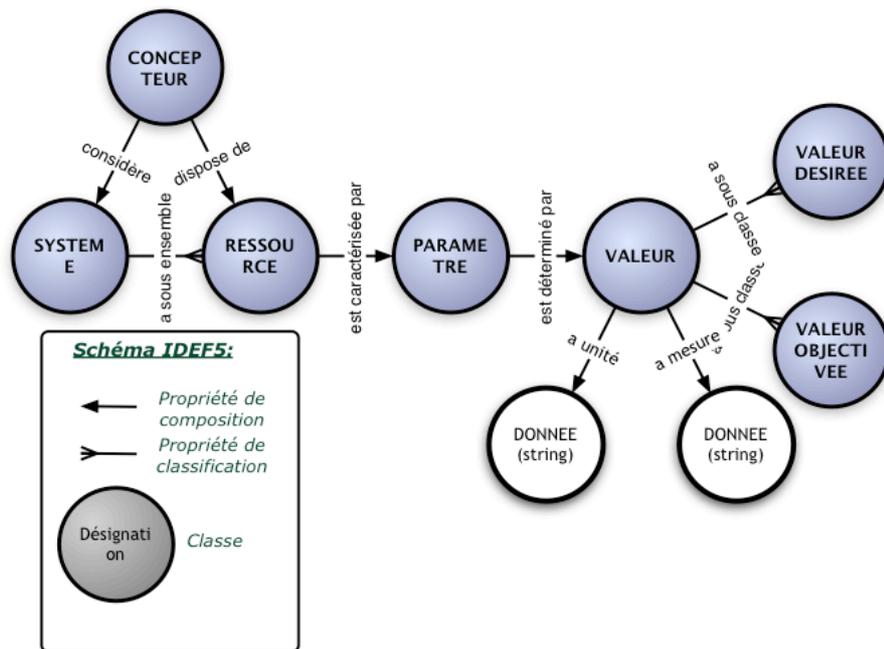


Figure 39 – Représentation IDEF5 du système

Le schéma en Figure 39 se lit de la sorte :

- le **CONCEPTEUR** considère un **SYSTEME** et dispose de **RESSOURCES**,

- le **SYSTEME** a des sous-systèmes appelé **RESSOURCES**,
- les **RESSOURCES** se caractérisent par leurs **PARAMETRES**,
- les **PARAMETRES** sont déterminés par leur **VALEUR**,
- les **VALEURS** ont des **MESURES** et des **UNITES** qui sont des **DONNEES** sous forme de chaîne de caractère,
- les **VALEURS** se divisent en deux sous-groupes les **VALEURS OBJECTIVEES** et les **VALEURS DESIREES**.

Puisque les valeurs désirées et valeurs objectivées sont des sous-classes de la valeur, elles héritent de ses propriétés. Valeur désirée et valeur objectivée ont donc les propriétés objet à mesure et à unité.

Description

L'ontologie définissant le système doit nous permettre de modéliser les propositions. Le concepteur énonce des propositions qui évoluent au fur et à mesure du processus créatif. Ces propositions se composent de diverses descriptions du système en relation. Chacune de ces descriptions peut être vue comme une brique élémentaire, c'est-à-dire un holon. Ces holons sont par nature uniques (ont des instances propres à chaque description), mais de forme commune (partagent les mêmes classes et propriétés). Une proposition est donc une holarchie (structure holonique) qui peut être vue comme un agrégat de briques de descriptions (holons). Ces holarchies permettent de construire des représentations complexes modélisant les propositions.

Conséquemment, nous posons un nouveau concept qui est le holon du modèle : la **description**. Ce concept est à mettre en relation avec le contexte du processus créatif qu'il doit modéliser. Celui-ci résumé par la Figure 40 (précédemment présentée en section II.4) comprend deux niveaux :

1. Le moment du processus créatif dont les éléments du cheminement constituent les grandes étapes, à savoir le besoin, la difficulté, et la solution qu'ils soient cibles ou sources (symbolisés par les carrés arrondis sur la Figure 40) ;
2. Et le point de vue sur les connaissances décrivant ces éléments (symbolisés par les trois cercles concentriques dans les éléments sur la Figure 40), la conception (C), la conception des systèmes (DOMAINE SYSTEME), le système (SYSTEME).

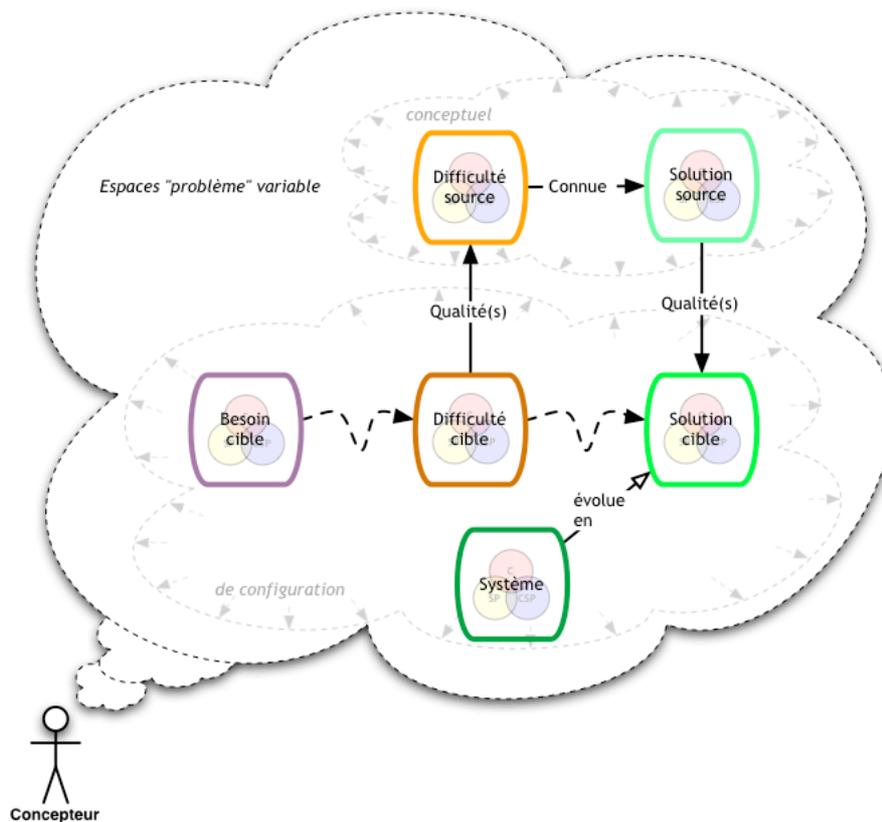


Figure 40 – *Processus créatif et connaissances*

Par conséquent, le concept de description devra inclure ces deux niveaux, le point de vue et l'élément du processus créatif qui traduisent un moment du processus créatif. Le concept de description se définit conséquemment comme suit :

- **DESCRIPTION** : Représentation d'une énonciation explicite et valide de la ressource avec un certain point de vue à un moment donné lors du processus créatif.

La Figure 41 complète la Figure 39 et décrit les **DESCRIPTIONS** et leurs **RELATIONS**. Ainsi (voir Figure 41) le **CONCEPTEUR** énonce des **DESCRIPTIONS**. Une **DESCRIPTION** se compose des classes décrivant la **RESSOURCE** (**SYSTEME**, **RESSOURCE**, **PARAMETRE**, **VALEUR OBJECTIVEE**, **VALEUR DESIREE**) à un moment donné (a moment du processus créatif) par des connaissances à différents points de vue (a point de vue). Le moment énonce quand la **DESCRIPTION** est énoncée, soit de façon absolue (temporel) ou relative (séquentiel ou élément du cheminement du processus créatif). Le point de vue peut être de la conception en générale, du système , ou du système étudié.

De plus, durant le processus créatif, les descriptions s'enrichissent et évoluent [48], [49], [50]. Elles tissent ainsi un réseau variable de relations qui nous conduit à considérer le concept de **relation** défini comme suit :

- **RELATION** : Lien logique de nature variable entre deux ensembles de descriptions.

Les **DESCRIPTIONS** entrent (**entre dans**) ou sortent (**sort de**) de **RELATIONS**. Le concept de **RELATION** (voir Figure 41) permet de lier les **DESCRIPTIONS** entre elles. Les **RELATIONS** sont de différents types (**est du type**). Le type de relation précise le cas échéant la nature de la relation (implication, équivalence...) et si c'est pertinent le ou les éléments inducteurs ou induits.

- *Codica* : individu de la classe **CONCEPTEUR** ;
 - o *énonce la Description 1* : individu de la classe **DESCRIPTION** ;
 - o *considère l'Atelier* : individu de la classe **SYSTEME** ;
 - o *dispose de Produit A*: individu de la classe **RESSOURCE** ;
-
- *Description 1* : individu de la classe **DESCRIPTION**.
 - o *se compose de Produit A*: individu de la classe **RESSOURCE** ;
 - o *se caractérisant par une Distance de manutention* : individu de la classe **PARAMETRE** ;
 - o *qui est déterminé par la valeur Actuelle* : individu de la classe **DONNEE** lié à la classe **VALEUR DESIREE** ;
 - o *ayant pour unité le Mètre* : individu de la classe **DONNEE** ;
 - o *ayant pour mesure Importante*: individu de la classe **DONNEE** ;
 - o *qui est déterminé par la valeur Souhaitée* : individu de la classe **VALEUR OBJECTIVEE** ;
 - o *ayant pour unité le Mètre* : individu de la classe **DONNEE** ;
 - o *ayant pour mesure Faible* : individu de la classe **DONNEE** ;
 - o *à point de vue SYSTÈME (point de vue sur l'objet (système))* : individu de la classe **DONNEE** ;
 - o *à moment du processus créatif Besoin cible* : individu de la classe **DONNEE** ;

Précisons dans cet exemple que cette **description** fait partie d'un ensemble de **descriptions**. Elle découle d'une **description** que nous dénommerons « *Description 0* » via une relation intitulée « *Relation 0-1* » et induit une **description** que nous dénommerons « *Description 2* » via une relation intitulée « *Relation 1-2* » :

- *Description 0* : individu de la classe **DESCRIPTION** ;
- *entre dans Relation 1-2* : individu de classe **RELATION** ;
- *Description 2* : individu de la classe **DESCRIPTION** ;
- *sort de Relation 0-1* : individu de classe **RELATION**.

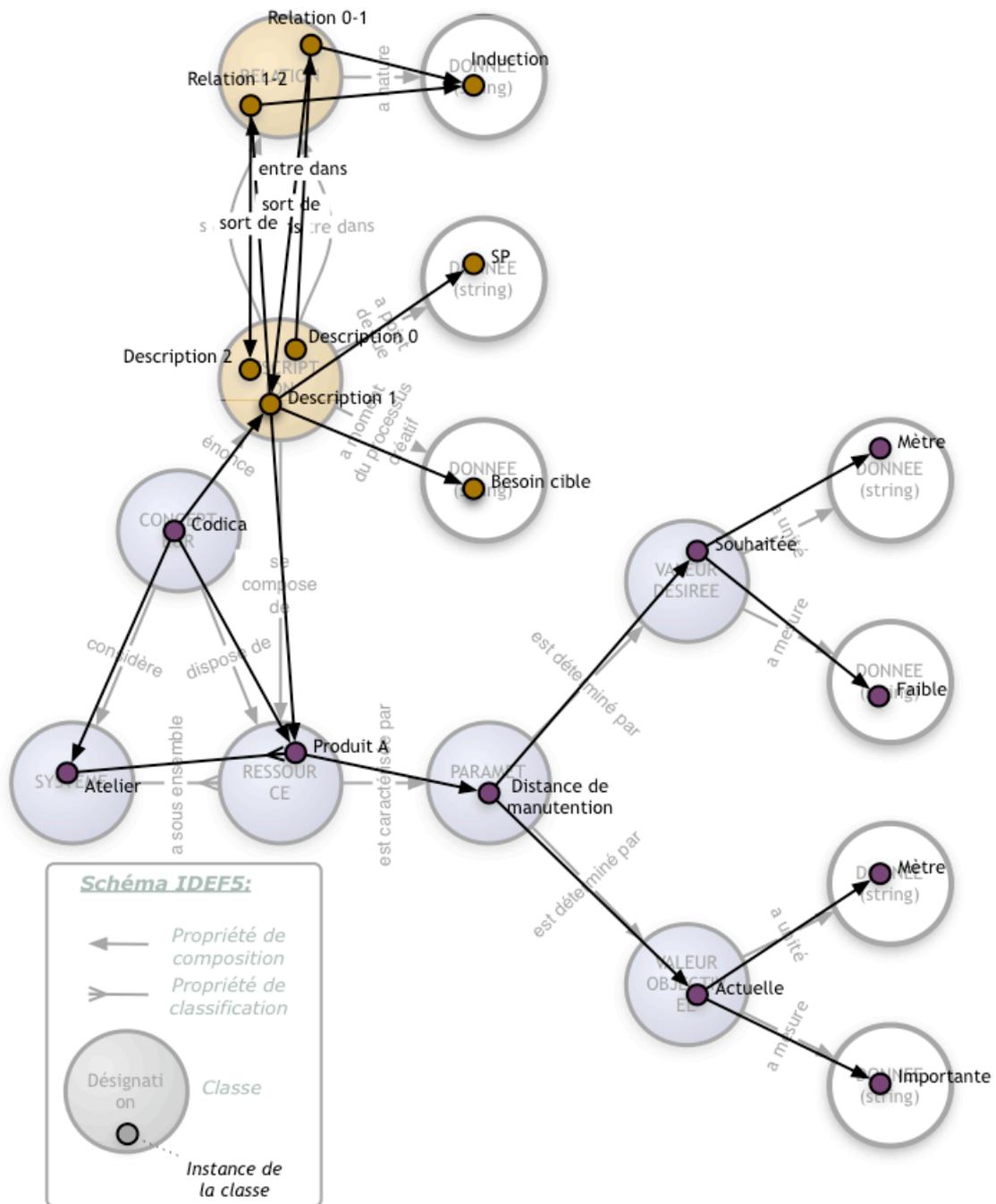
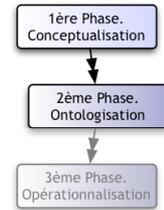


Figure 42 – Représentation IDEF5 de description : Illustration

Troisième phase. Opérationnalisation



Code OWL

Les définitions « verbales » des concepts et les schémas IDEF5 des classes et propriétés permettent d'entreprendre l'opérationnalisation de l'ontologie. Protégé-OWL offre une interface graphique permettant de créer les différentes classes (cadre Classe sur la capture d'écran en Figure 43) et propriétés induites par la phase précédente d'ontologisation (cadre Propriété sur la capture en Figure 43).

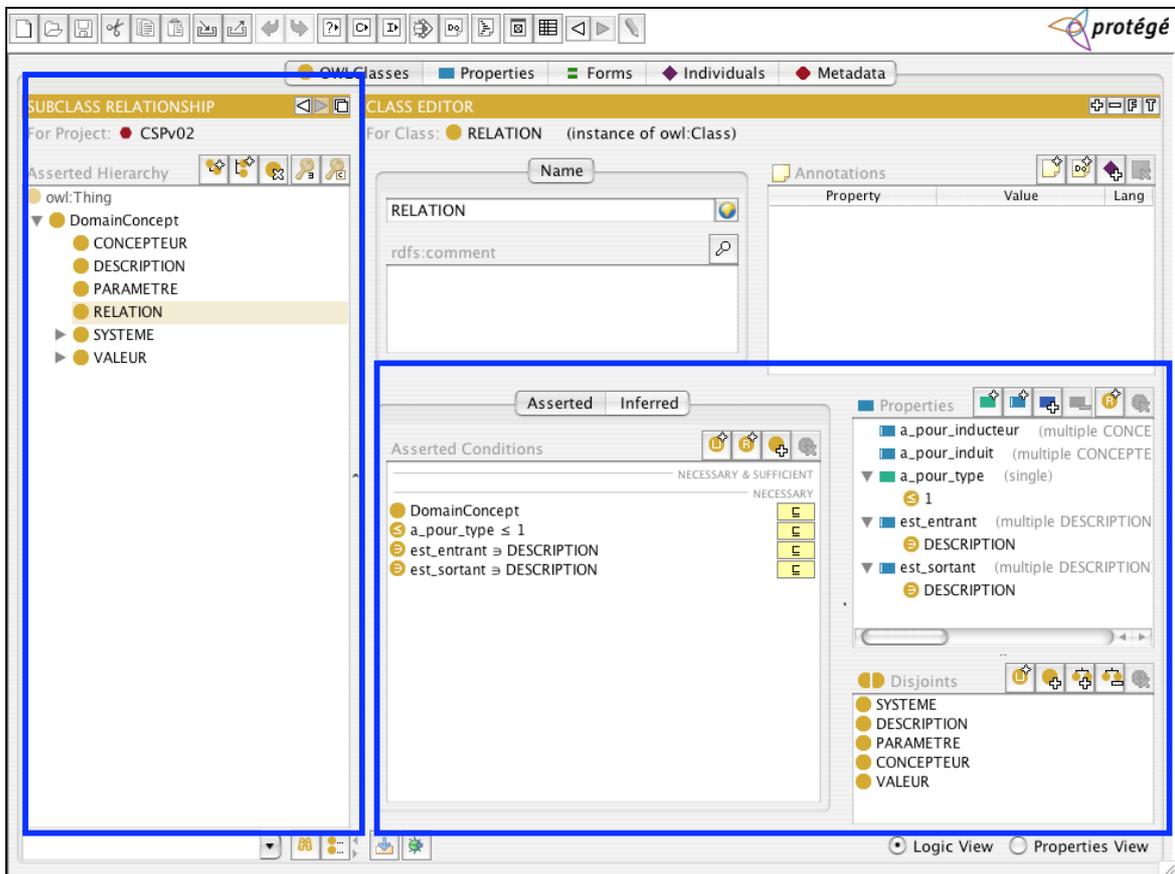


Figure 43 – Protégé-OWL 3.1.1 (capture d'écran)

À partir de ceux-ci, Protégé-OWL prend automatiquement en charge la génération d'un code OWL DL [110] dont la cohérence est vérifiée avec le raisonneur RacerPro. Le code ainsi généré s'articule en 4 parties :

1. « [Namespaces](#) » définit les composantes et la version du langage utilisé par la suite ;
2. « [Ontology](#) » donne les à-propos de l'ontologie (ici le plugiciel utilisé par Protégé pour générer le code OWL DL) ;
3. « [Classes](#) » définit les classes ;
4. « [Properties](#) » définit les propriétés des classes.

À l'intérieur de ces 4 parties, la notation OWL repose sur l'utilisation d'en-têtes pour organiser les informations :

- `<langage:élément syntaxique>` : L'en-tête ouvrant marque le début d'un sous-groupe d'en-têtes ;
- `</langage:élément syntaxique>` : L'en-tête fermant marque la fin d'un sous-groupe d'en-têtes ;
- `<langage:élément syntaxique/>` : L'en-tête simple inclut un jeu complet d'information.

OWL repose en partie sur deux autres langages, RDF [17] et XML [16]. Dans les en-têtes précédents, le `langage` peut donc être `<owl: >` pour le OWL, `<rdf: >` ou `<rdfs: >` pour le RDF, `<xmlns: >` ou `<xmlns: >` pour le XML. Par exemple, un en-tête simple OWL s'écrit comme suit : `< owl:élément syntaxique/>`.

Les en-têtes OWL comprennent de nombreux `éléments syntaxiques` provenant des différents langages (OWL, XML, RDF) tels que les différents types de propriété (donnée, objet, transitive, inverse, etc. cf. section 0). L'extrait du code obtenu contient quelque un des éléments syntaxiques suivants :

- Pour `owl:`
 - `Class` (élément syntaxique parlant d'une classe),
 - `Restriction` (élément syntaxique parlant d'une restriction),
 - `ObjectProperty` (élément syntaxique parlant d'une propriété « objet »),
 - `TransitiveProperty` (élément syntaxique parlant d'une propriété transitive),
 - `onProperty` (élément syntaxique à propos de propriété),
 - `hasValue` (élément syntaxique signifiant « a pour valeur... »),
 - `disjointWith` (élément syntaxique signifiant « est disjoint avec... »),

`inverseOf` (élément syntaxique signifiant « est la propriété inverse de... »).

- Pour `rdfs`:

`subClassOf` (élément syntaxique servant à décrire la taxonomie d'une classe),

`domain` (élément syntaxique signifiant qu'une propriété « a pour domaine ... »),

`range` (élément syntaxique signifiant qu'une propriété « a pour portée... »).

- Et pour `rdf`:

`about = " "` (élément syntaxique signifiant « a pour désignation... » (lorsque cette classe ou propriété est citée pour la première fois alors, on la crée avec « `ID` » puis on s'y réfère avec « `about` »)),

`resource = " "` (élément syntaxique signifiant « un élément du domaine étudié a pour désignation... »).

Extrait du code OWL DL : « `Classes` »

L'extrait de code suivant formalise la définition de la classe `SYSTEME`. L'intégralité du code généré se trouve en annexe (Section A4 en Annexe). Pour faciliter la compréhension, la signification de chaque entête OWL DL est formulée sous chacun d'eux.

```
<owl:Class rdf:about="#SYSTEME">
```

concernant la classe appelée « `système` » :

```
<rdfs:subClassOf rdf:resource="#DomainConcept"/>
```

est une sous-classe du domaine étudié appelé « `DomainConcept` » ;

```
<owl:disjointWith rdf:resource="#VALEUR"/>
```

```
<owl:disjointWith rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
```

```
<owl:disjointWith rdf:resource="#RELATION"/>
```

```
<owl:disjointWith rdf:resource="#PARAMETRE"/>
```

```
<owl:disjointWith rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
```

est disjointe avec les classes « VALEUR », « DESCRIPTION », « RELATION », « PARAMETRE » et « CONCEPTEUR » (aucune instance ne peut appartenir à plus d'une de ces classes) ;

```
<rdfs:subClassOf>
```

concernant la taxonomie de la classe (« SYSTEME ») :

```
<owl:Restriction>
```

concernant les restrictions (sur la taxonomie de la classe « SYSTEME ») :

```
<owl:hasValue rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
```

doit avoir une instance dans la classe « CONCEPTEUR » ;

```
<owl:onProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID="est_considere"/>
```

```
</owl:onProperty>
```

doit avoir une instance dans la propriété « est considéré ».

```
</owl:Restriction>
```

fin de la partie concernant les restrictions.

```
</rdfs:subClassOf>
```

fin de concernant la taxonomie.

```
</owl:Class>
```

fin de concernant la classe.

Extrait du code OWL DL : « Properties »

L'extrait de code suivant formalise la propriété « est considere ».

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#est_considere">
```

concernant la propriété objet appelée « est considere » :

```
<rdfs:range rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
```

a pour portée la classe « CONCEPTEUR » ;

```
<rdfs:domain rdf:resource="#SYSTEME"/>
```

a pour domaine la classe « SYSTEME » ;

<owl:inverseOf>

<owl:ObjectProperty rdf:ID="considere"/>

</owl:inverseOf>

est la propriété inverse de « considère ».

</owl:ObjectProperty>

fin de concernant la propriété.

III.3 De la construction du modèle holonique

Les 3 dimensions de la conception

L'ontologie définit les holons (descriptions) du processus créatif en conception des systèmes. Cependant pour aboutir à un modèle holonique nous devons y intégrer des aspects procéduraux liés aux trois dimensions de la modélisation en conception des systèmes (dimension humaine, procédurale, et situationnelle voir section II).

Dimension procédurale

Le but de l'ontologie est de transcrire les propositions faites par le concepteur lors du processus créatif. L'usage en est simple :

1. Le concepteur énonce des propositions qu'il décompose en descriptions ;
2. Les descriptions sont transcrites par le concepteur dans l'ontologie (via l'éditeur Protégé-OWL).

Pour faciliter la décomposition de proposition en descriptions, l'ontologie s'adresse directement au concepteur sans l'intermédiaire d'un modélisateur. Néanmoins, le concepteur consiste généralement en un groupe d'individus entreprenant la conception, le modélisateur bien que concepteur n'est donc pas forcément la personne énonçant la proposition.

La décomposition et la transcription s'apparentent à de l'analyse textuelle où le concepteur chercherait à extraire les éléments porteurs d'informations qui entrent dans les carcans de l'ontologie que sont par exemple le système ou la valeur désirée.

Dimension humaine

L'aspect humain nous conduit à prescrire le mode d'interaction entre le concepteur et l'ontologie. Les interactions internes (adaptation à l'ontologie) et externes (retours dus à l'ontologie) entre le concepteur et l'ontologie (via son média Protégé-OWL) nous conduisent à exprimer les axiomes suivants pour :

- *De suffisance de l'ontologie.* Pour ne pas dégrader la représentation, on ne doit pas définir d'ordre de saisie. Par exemple, il n'est pas nécessaire de contraindre le concepteur à un ordre de saisie des éléments composant la DESCRIPTION ou ceux-ci au fur et à mesure de l'expression de la DESCRIPTION. Sur ce point, l'ontologie se suffit à elle-même ;
- *De continuité du processus créatif.* Il n'est pas nécessaire qu'une DESCRIPTION appartienne à une RELATION pour exister. Néanmoins afin de « tisser » le cheminement du processus créatif, peu de descriptions doivent être isolées. Une DESCRIPTION est isolée si elle est sans RELATION. Les DESCRIPTIONS isolées constituent autant de discontinuités dans la modélisation du processus créatif.

Dimension situationnelle

En fonction de la situation, nous devons envisager deux possibilités. La première possibilité étant que le concepteur énonce une proposition donnant des descriptions sans liens apparents avec les descriptions précédentes. Compte tenu de l'axiome « De continuité du processus créatif », toutes les descriptions doivent avoir des relations entre elles. Dans ce cas, nous formerons l'hypothèse que si le concepteur ne peut pas établir de relations entre les descriptions c'est que certaines descriptions lui sont masquées et doivent donc être explicitées. Le but de l'ontologie étant de formaliser le cheminement du processus créatif et non de le soutenir, l'explicitation des descriptions masquées peut être faite a posteriori ce qui est parfois plus facile.

La seconde possibilité étant que le concepteur énonce une proposition qui ne correspond pas directement au modèle, par exemple « la fonction d'un tire-palettes est de déplacer les palettes ». Dans ce cas, il faut avoir une démarche de recherche de changement d'état de variables. Chaque changement se traduit alors par deux descriptions l'une portant les valeurs avant l'action et l'autre portant les valeurs résultantes de l'action. Pour cela, une méthode consiste à se positionner alternativement à la place de la ressource agissante puis la place de la ressource subissant l'action. Nous aboutissons à quatre descriptions qui par paire sont en relation et décrivent les changements d'état des ressources agissantes et subissantes. Par exemple, si la fonction d'un tire-palette est de déplacer des palettes alors les palettes subissent un déplacement, c'est-à-dire un changement de la variable coordonnée. De même, le tire-palettes change de coordonnées durant le déplacement des palettes. Pour cet exemple, nous aboutissons aux quatre descriptions suivantes :

DESCRIPTION : 1 - a moment : 1 - a point de vue : système ;

se compose de RESSOURE : Tire-palettes - PARAMETRE : Coordonée – VALEUR OBJECTIVEE : x ;

entre dans RELATION : 1 - sort de RELATION : \emptyset ;

DESCRIPTION : 2 - a moment : 1 - a point de vue : système ;

se compose de RESSOURE : Palette - PARAMETRE : Coordonée – VALEUR OBJECTIVEE : x ;

entre dans RELATION : 2 - sort de RELATION : 1 ;

DESCRIPTION : 1 - a moment : 1 - a point de vue : système ;

se compose de RESSOURE : Tire-palettes - PARAMETRE : Coordonée – VALEUR OBJECTIVEE : x+n ;

entre dans RELATION : 3 - sort de RELATION : 2 ;

DESCRIPTION : 1 - a moment : 1 - a point de vue : système ;

se compose de RESSOURE : Palette - PARAMETRE : Coordonée – VALEUR OBJECTIVEE : x+n ;

entre dans RELATION : \emptyset - sort de RELATION : 3.

Précisions sur le modèle holonique

Quid de la perspective fonctionnelle et de la perspective génétique ?

Il est important de noter que bien que les holons sont établis grâce à une étude ontologique, cela ne signifie pas que les perspectives fonctionnelles et génétiques soient négligées :

- Le modèle holonique n'intègre pas les notions d'activité et de fonction en tant que concept (ou classe), mais à travers l'évolution des différents états du système qu'elle induit. Autrement dit, une activité peut être caractérisée par la modification de ressources qu'elle induit ;
- Le modèle holonique ne représente pas l'évolution du système en tant que tel, mais à travers l'enchaînement des descriptions dans un réseau de relations entre descriptions. C'est-à-dire que l'évolution du modèle proposé traduit l'évolution de conception.

Quid des concepts (CONCEPTION SYSTÈME) et des données (K) ?

Par définition, les valeurs désirées n'ont pas de statut logique de même les valeurs objectivées ont systématiquement un statut logique (dont on supposera qu'il est toujours vrai). Les notions de concepts (CONCEPTION SYSTÈME) et des données (K) issues de la théorie C -K se retrouvent donc respectivement dans les descriptions ayant des valeurs désirées et les descriptions ayant des valeurs objectivées. Il se pose alors la question d'éventuelles descriptions ayant à la fois des valeurs objectivées et désirées.

Limites de la constitution du modèle holonique

Le modèle holonique du processus créatif en conception des systèmes proposé rencontre deux types de limites [24], d'une part celles liées à la constitution du modèle, d'autre part celles liées à l'utilisation d'une ontologie.

Concernant les limites liées à la constitution du modèle, nous noterons :

- *Sur le nombre de situations.* Nos expérimentations (dont une partie est reprise dans la section suivante) dérivent toutes d'une grande étude industrielle visant à la

refonte complète des ateliers. Les situations de tests offrent donc peu de variations quant au nombre de systèmes modélisés ;

- *Sur notre expertise en conception et en conception des systèmes.* Certains choix de modélisation reposent sur un travail réflexif des modes de conception. Bien qu'ayant été faits avec un souci d'objectivité permanent, ils dépendent de notre sensibilité et plus encore de notre expertise en conception et en conception des systèmes.

Concernant les limites liées à l'utilisation d'une ontologie pour construire le modèle nous noterons :

- *Sur la nature des ontologies.* L'ontologie ne contribue pas directement au processus créatif, mais indirectement en permettant de le représenter et le partager. De plus, les ontologies n'expliquent pas les résultats de modélisation. Par exemple, l'ontologie n'explique pas l'existence de typologies de descriptions différentes telles que des descriptions sans valeur objectivée ;
- *Sur l'utilisation des ontologies.* Les ontologies fonctionnent par l'interprétation en suivant les carcans de classes et propriétés prédéfinies, des propositions énoncées dans un domaine. Par nature, cette interprétation est sujette à la subjectivité du modélisateur. En pratique les variations induites par différents modalisateurs se résument souvent à l'utilisation d'homonyme et d'équivalent. Ce qui peut être problématique pas tant pour la fidélité de la modélisation que pour retrouver des instances dans une masse importante d'instances déjà modélisées.

III.4 Du modèle holonique au modèle adaptatif

Modèle adaptatif

En conception créative, Von der Weth [126] nous rappelle (voir Figure 44) que, bien que le concepteur parte généralement d'un modèle procédural établi, il opère une transition dépendante de son expérience. Le concepteur passe ainsi de plans d'action prescriptifs à des stratégies puis à des stratagèmes descriptifs.

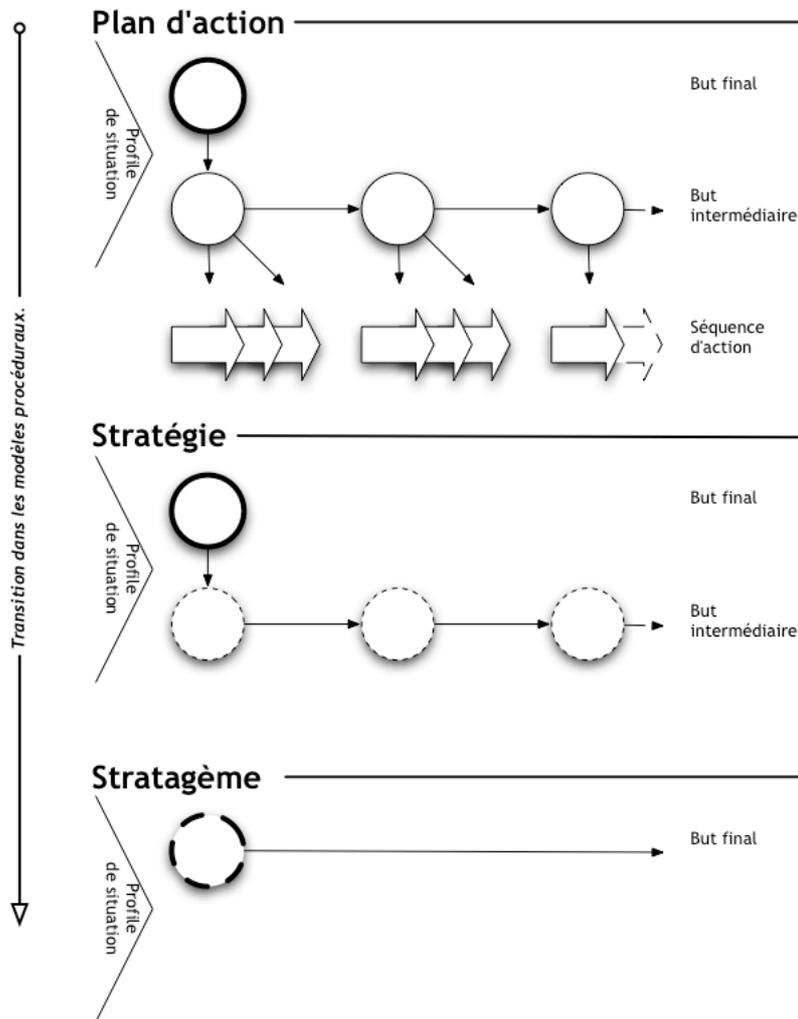


Figure 44 – Différents types de connaissances stratégiques (depuis originale de von der Weth [126])

Cette transition montre que les modèles procéduraux sont dépendants de l'expérience des individus constituant le groupe de conception (résumé par le terme « concepteur »). Aini le

modèle procédural employé par le concepteur devient de plus en plus fonction du profil de la situation (et non de séquence d'actions prédéterminées) au fur et à mesure de son expérience grandissante.

Analyse boîte noire

La formalisation du modèle adaptatif est une forme d'analyse dite « boîte noire ». D'une part, nous connaissons le modèle procédural d'entrée (voir ✓ sur la Figure 45) qui est celui que le concepteur décide d'utiliser comme base de son processus de conception. D'autre part, nous connaissons les extrants que sont les propositions formalisées avec le modèle holonique proposé (voir ✓ sur la Figure 45). Mais nous ne connaissons pas le modèle adaptatif, c'est-à-dire le processus créatif réellement entrepris par le concepteur (voir ? sur la Figure 45).



Figure 45 – Analyse « boîte noire »

L'analyse boîte noire consiste ici à généraliser des traits de comportements de conception à travers l'analyse du cheminement du processus créatif. De la sorte, depuis un cas d'étude où les propositions du processus créatif ont été formalisées grâce au modèle holonique, le concepteur recherche les typologies de descriptions et des relations qu'il a mises en œuvre. Plus précisément, cela consiste (voir Figure 46) :

1. Pour chaque élément du cheminement du processus créatif à généraliser les instances issues du modèle holonique ;
2. à identifier des typologies de holons ;
3. à analyser les transitions entre typologies de holons ;
4. à extrapoler des comportements par rapport au modèle procédural original (entrant) qui peuvent donner naissance, par exemple, à une heuristique de résolutions modélisant le processus créatif et facilitant la transition du concepteur des plans d'action aux stratagèmes.

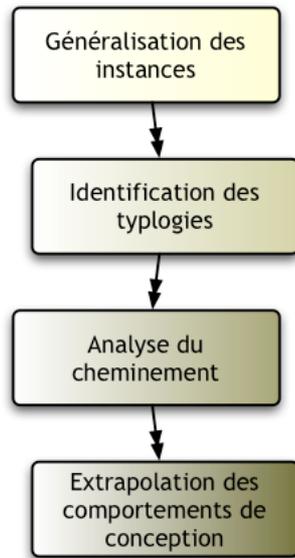


Figure 46 – *Méthode de construction du modèle adaptatif*

Résumé du chapitre III

Pour offrir robustesse et flexibilité, nous avons choisi d'entreprendre une démarche holonique. Ainsi, nous établissons un parallèle entre la recherche des primitives et la détermination de holon.

Pour déterminer les holons, nous avons entrepris une étude ontologique pour modéliser un domaine du discours, c'est-à-dire les propositions énoncées durant le processus créatif, plus précisément depuis la théorie du système puis par confrontation successive à des cas d'études (démarche hypothéticodéductive).

L'ontologie OWL définit les descriptions et leurs relations composant les propositions.

Les propositions sont les extrants du modèle procédural réellement employé par le concepteur appelé modèle adaptatif traduisant des notions plus larges comme celle de problème et solution cible ou source.

IV. Application

Ce chapitre traite de l'utilisation de la contribution.

Construction du chapitre IV

Dans ce chapitre, nous décrirons les à-propos de l'étude de cas (section IV.1) avant de présenter l'exploitation du modèle holonique proposé (section IV.2). Puis nous interpréterons les résultats (section IV.3) avant de montrer comment le modèle adaptatif pouvait être construit depuis le modèle holonique (section IV.4).

IV.1 Des à-propos de l'étude de cas

Méthode de résolution

L'étude de cas présenté ici est extraite de l'étude industrielle menée dans l'entreprise CODICA AUTOMOTIVE S.A.. L'étude de cas porte sur la résolution d'un problème d'implantation d'atelier, résolu grâce à la matrice des contradictions techniques de la TRIZ [5], [112], [78] des connaissances du métier en implantation d'atelier (type Facility Layout [118]) ainsi que des connaissances sur fonctionnement de cet atelier (voir Figure 47).

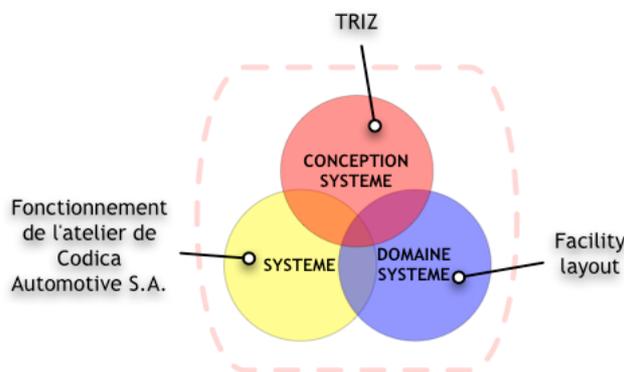


Figure 47 – Exemple de connaissances utilisées durant l'étude de cas

Dans cette étude de cas, la matrice de la TRIZ a été choisie par le groupe de conception de l'entreprise (le concepteur) pour sa simplicité de mise en oeuvre de la TRIZ avec lequel le groupe de conception souhaitait se familiariser. Il s'agit donc d'un choix circonstancié et non d'une condition d'utilisation du modèle holonique. En règle générale pour l'utilisation de la matrice de la TRIZ, il est préconisé [70] (voir Section A5 en Annexe) de suivre le modèle procédural en six étapes :

- étape 1. Définir l'objet à améliorer (si le problème consiste en plusieurs parties, alors se concentrer sur l'une d'elles ou diviser le problème).
- étape 2. Identifier le paramètre de cet objet à améliorer.
- étape 3. Proposer une méthode d'amélioration de ce paramètre.
- étape 4. Analyser les obstacles liés à l'utilisation de cette méthode
- étape 5. Poser la contradiction liée à ces obstacles.

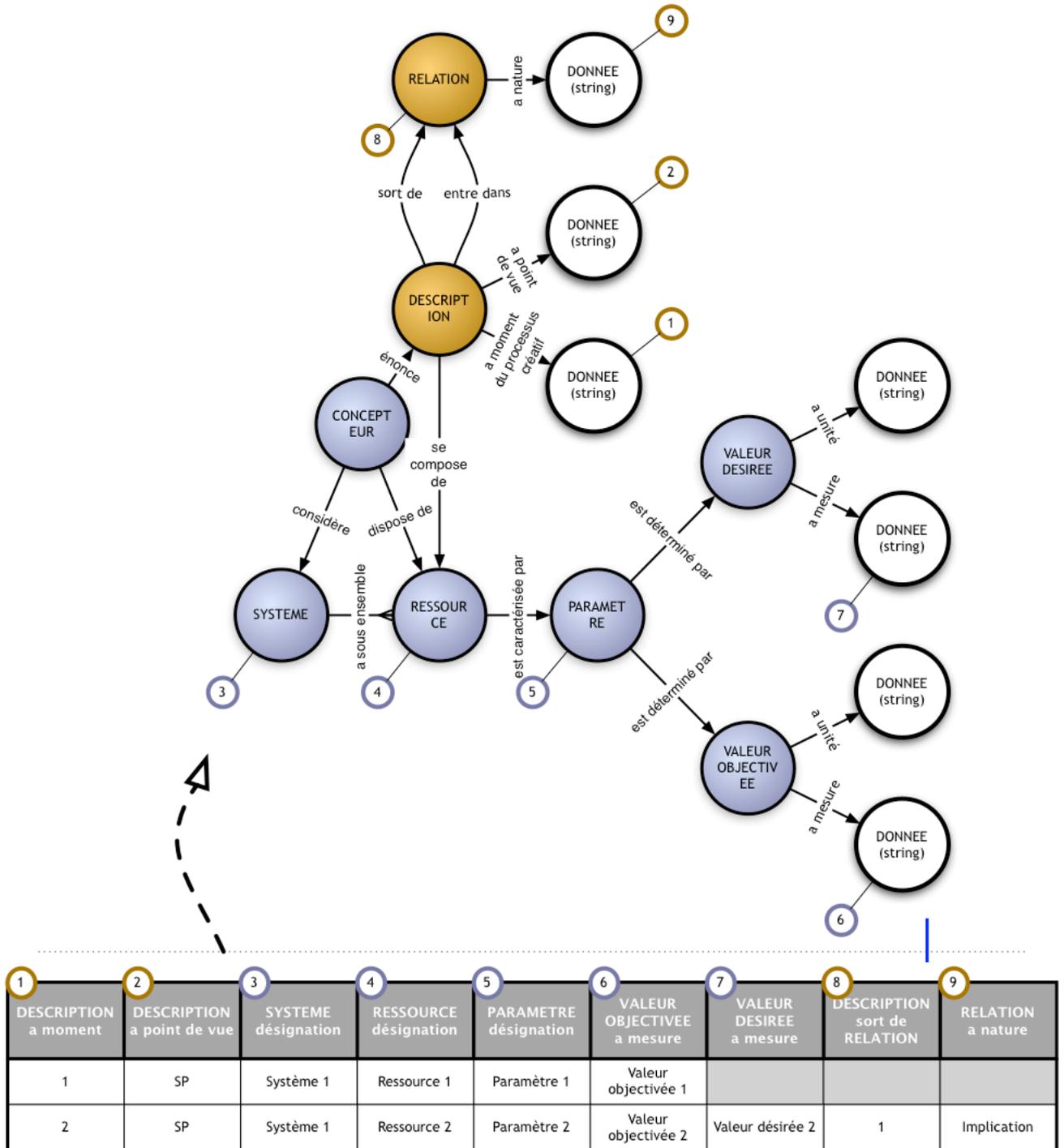
étape 6. Utiliser la matrice des principes inventifs (si les principes ne permettent pas de formuler de solutions, alors il faut refaire l'étape 5 ou si l'étape 5 a été refaite plusieurs fois, alors il faut utiliser un autre outil de la TRIZ, l'algorithme de résolution de la TRIZ (ARIZ^{*})).

** Aujourd'hui la TRIZ ne préconise plus l'utilisation de la matrice, mais directement l'usage de l'ARIZ. Toutefois dans le cadre d'une initiation, la matrice reste pertinente par sa simplicité de mise en oeuvre.*

Mode de restitution

Pendant l'étude de cas, le concepteur (le groupe de conception de l'entreprise) énonce des propositions formant des ensembles de descriptions. Ces descriptions sont ensuite transposées une à une dans le logiciel Protégé-OWL grâce au modèle holonique présenté dans le chapitre précédent. Cette transposition se fait en respectant les axiomes de suffisance de l'ontologie et de continuité du processus créatif. Cependant pour des raisons de clarté de présentation, l'informatisation effectuée avec Protégé est abandonnée au profit de tableaux. Ainsi, à chaque ligne des tableaux, correspond une description transposée dans le modèle. Les tableaux semblables au Tableau 2 donnent une version concise du modèle holonique.

Tableau 2 – Cas d'étude, tableau type



Des commentaires sur la transposition des propositions sont adjoints sous le tableau.

Les cellules du Tableau 2 correspondant aux instances des propriétés notées en colonnes :

- *DESCRIPTION à moment*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « à moment du processus créatif » de la classe **DONNEE** (voir ① sur la figure liée au Tableau 2.). Il s'agit dans cette étude d'un numéro de séquence incrémenté au fur et à mesure de l'avancement du processus créatif qui fera office de désignation pour la **DESCRIPTION** ;
- *DESCRIPTION a point de vue*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « à point de vue » de la classe **DONNEE** (voir ② sur la figure liée au Tableau 2.). Nous noterons : S pour système , DOMAINE SYSTÈME pour conception des systèmes , et C pour conception ;
- *SYSTEME désignation*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « a sous-ensemble » de la classe **SYSTEME** (voir ③ sur la figure liée au Tableau 2.) ;
- *RESSOURCE désignation*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « se compose de » de la classe **RESSOURCE** (voir ④ sur la figure liée au Tableau 2.) ;
- *PARAMETRE désignation*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « est caractérisée par » de la classe **PARAMETRE** (voir ⑤ sur la figure liée au Tableau 2.) ;
- *VALEUR OBJECTIVEE à mesure*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « à mesure » de la classe **DONNEE** (voir ⑥ sur la figure liée au Tableau 2.). Dans cette étude, nous utiliserons des mesures relatives sans unités. Ici, la valeur des mesures fera office de désignation de la **VALEUR OBJECTIVEE** ;
- *VALEUR DESIREE a mesure*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « à mesure » de la classe **DONNEE** (voir ⑦ sur la figure liée au Tableau 2.). Dans cette étude, nous utiliserons des mesures relatives sans unités. Ici, la valeur des mesures fera office de désignation de la **VALEUR DESIREE** ;
- *DESCRIPTION sort de RELATION*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « sort de » de la classe **RELATION** (voir ⑧ sur la figure liée au Tableau 2.). Dans cette étude, nous supposons que la propriété « entre dans » peut être déduite en considérant l'inverse de la propriété « sort de ». Par exemple, la description 2 (**DESCRIPTION à moment** : 2) provient d'une relation dont l'entrant est la description 1 (**DESCRIPTION a moment** : 1) ;

- *RELATION à nature*. Dans cette colonne sont repris les individus de la propriété « à nature » de la classe *DONNEE* (voir  sur la figure liée au Tableau 2.). Dans cette étude, les relations sont de deux natures : l'implication et l'équivalence.

Dans le Tableau 2, les derniers ajouts sont marqués par un trait vertical au bord droit du tableau, par exemple il s'agit ici de la description 2 (*DESCRIPTION a moment* : 2).

IV.2 De l'exploitation du modèle holonique

Le but de cette section est de vérifier que le modèle permet bien de modéliser le processus créatif tel qu'il est pratiqué par le concepteur. Ici, le concepteur est un groupe de conception de l'entreprise CODICA AUTOMOTIVE S.A. qui a choisi l'utilisation de la matrice TRIZ comme moyen de résolution. Nous suivrons donc les étapes de l'utilisation de cette matrice TRIZ dans notre restitution. Ainsi, le tableau de synthèse des instances du modèle (tableau présenté dans la section précédente) est complété au fur et à mesure de l'avancement de ces étapes.

Étape 1/6. Définir l'objet à améliorer

L'atelier se compose de trois postes de travail P1, P2, P3, de deux postes de stockage S am (amont) et S av (aval) implantés en ligne droite. La production concerne deux articles A et B dont les gammes respectives sont S am, P1, P2, P3, S av et S am, P1, S av comme le montre les flèches sur la Figure 48. Le concepteur souhaite améliorer la manutention des articles effectuée de poste-à-poste (symbolisée par les flèches sur la Figure 48).

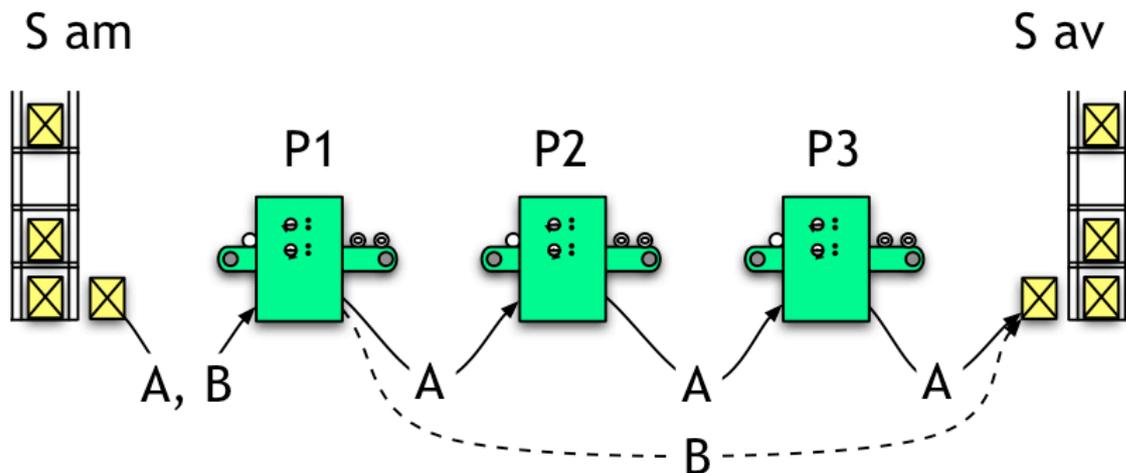


Figure 48 – Ateliers en ligne.

Tableau 3 – Objet à améliorer

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication

La situation actuelle (S av en fin de ligne) décrite par la description 1 implique une insatisfaction de la manutention des produits A et B décrite par la description 2 (voir flèche sur Tableau 3).

Étape 2/6. Identifier le paramètre de cet objet à améliorer

Le concepteur n'est pas satisfait par le déplacement important effectué par le produit B entre le poste de travail P1 et S av (flèche pointillée sur la Figure 48), car le produit B est maintenant fabriqué dans des quantités largement supérieures à celle de A. Le paramètre à améliorer est donc la distance de manutention.

Tableau 4 – Paramètre à améliorer.

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Etape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence

La description 2 équivaut à la description 2' (voir flèche sur Tableau 4).

Étape 3/6. Proposer une méthode d'amélioration de ce paramètre

Une voie de résolution consiste à insérer S av entre les postes de travail P1 et P2 (voir Figure 49).

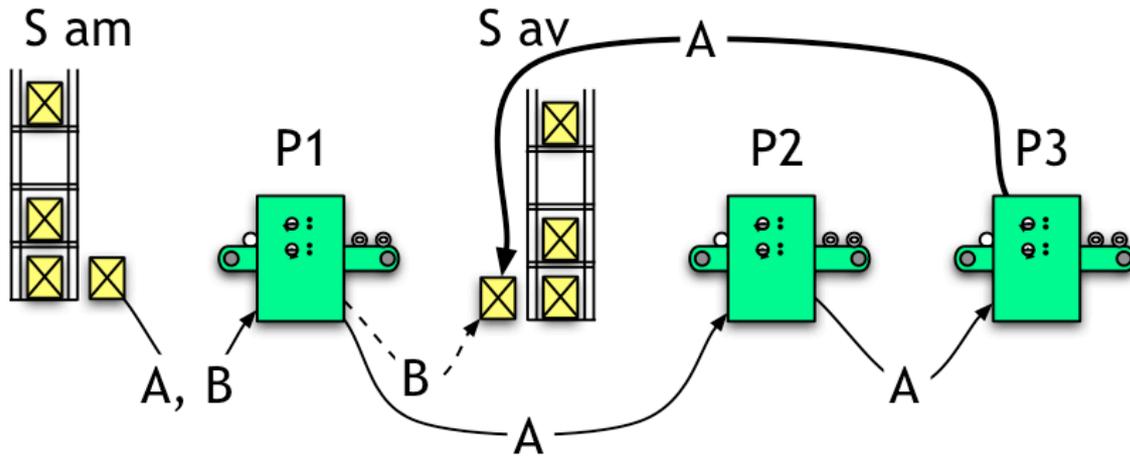


Figure 49 – Insertion du S av entre les postes P1 et P2

Tableau 5 – Méthode d’amélioration

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Étape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Étape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
Étape 3	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication

La distance importante de manutention du produit B implique de positionner le S av entre p1 et p2.

Étape 4/6. Analyser les obstacles liés à l’utilisation de cette méthode

Cette solution réduit la distance de manutention totale, mais génère un retour en arrière dans le flux du produit A (flèche pointillée sur la Figure 49). Autrement dit, le stock doit être entre P1 et P2 pour réduire la distance de manutention, mais ne doit pas y être pour éviter les retours en arrière.

Tableau 6 – Difficultés liées à cette méthode

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Etape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
Etape 3	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication
Etape 4	4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication
	5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication

Le S av entre p1 et p2 (description 3) implique (description 4) une faible distance de manutention pour le produit B (ce que le concepteur veut), mais induit également un retour arrière pour le produit A (ce que le concepteur ne souhaite pas).

Étape 5/6. Poser la contradiction liée à ces obstacles

Il y a une contradiction (ellipse sur la Figure 50), car le concepteur souhaite avoir à la fois une distance de manutention faible (IP1 sur Figure 50) et ne pas avoir de retour en arrière (IP2 sur Figure 50), soit deux états distincts de la position du stock aval (S Av).

Valeurs d'IPs souhaitées		IP1 (Distance de manutention)	
		IP1 (Distance de manutention)	IP2 (retour en arrière)
Position du stock aval dans la ligne de production	En fin de ligne	importante	nul
	Entre P1 et P2	faible	important

Figure 50 – Contradiction

Tableau 7 – Contradiction

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Etape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
Etape 3	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication
Etape 4	4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication
	5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication
	6, 1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne		5	Implication
	7	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Nul	Nul	6,1	Implication
	8, 2	CSP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	6,1	Implication

Le retour en arrière effectué par le produit A (description 5) implique de placer le S av en fin de ligne (description 6) ce qui est équivalent à la description en séquence 1 (voir pointillés sur le Tableau 7). La description 6 (ou 1) implique alors un nombre de retours en arrière nul (description 7) (ce que le concepteur souhaite), mais aussi (description 8) une distance de manutention importante (ce que le concepteur ne souhaite pas). Cette description est donc identique à celle en séquence 2' (voir pointillés sur le Tableau 7).

Le concepteur constate intuitivement que les IP1 (distance de manutention) et IP2 (nombre de retours en arrière) sont relatifs à une notion particulière du système que constitue le parcours de manutention. En effet, IP1 et IP2 sont relatifs au cheminement des produits (A et B) entre les postes de travail (P1, P2, et P3) ou les stocks (amont et aval) ce qu'il assimile au parcours de manutention. Dès lors, celui-ci définit l'objet d'étude de la conception. Ainsi, la distance de manutention entre le poste P1 et le stock en aval (IP1) devient la longueur du parcours de manutention, et le nombre de retours en arrière (IP2) devient la forme du flux du parcours de manutention (les retours en arrière peuvent s'assimiler à des « déformations » du flux).

Tableau 8 – Contradiction (reformulation)

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Etape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
Etape 3	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication
Etape 4	4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication
	5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication
Etape 5	6, 1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne		5	Implication
	7	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Nul	Nul	6,1	Implication
	8, 2	CSP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	6,1	Implication
	9	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Importante	Faible	8,2	Equivalence
	10	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Simple	Simple	7	Equivalence
	12	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Complexe	Simple	5	Equivalence

La distance de manutention des descriptions 4 et 8,2 devient la longueur du parcours de manutention dans les descriptions équivalentes respectives 11 et 9. Le nombre de retours en arrière des descriptions 5 et 7 devient la forme du flux du parcours de manutention dans les descriptions équivalentes respectives 12 et 10.

Le concepteur identifie ensuite les indicateurs de performance génériques de la TRIZ correspondant à IP1 et IP2. Pour IP1, il s'agit de la longueur de l'objet immobile (IP#4) et pour IP2, il s'agit de la forme de l'objet immobile (IP#12), l'objet immobile étant le parcours de manutention.

Les numéros (#) 4 et 12 correspondent aux numéros dans la matrice TRIZ.

La contradiction s'exprime donc comme suit :

- Si le stock en aval est positionné en fin de ligne alors la longueur de l'objet immobile (IP#4) est mauvaise (cf. ☹ Figure 51) et la forme de l'objet (IP#12) est bonne (cf. ☺ (Figure 51), et réciproquement si S av est inséré entre les postes de travail P1 et P2 alors IP#4 s'améliore (cf. ☺ Figure 51), et IP#12 se dégrade (cf. ☹ Figure 51).

		IP#4 (Longueur de l'objet immobile)	IP#12 (Forme de l'objet)
Position du stock aval dans la ligne de production	En fin de ligne	☹	☺
	Entre P1 et P2	☺	☹

Figure 51 – Contradiction avec les paramètres de la matrice TRIZ

Tableau 9 – Contradiction (matrice TRIZ)

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Etape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
Etape 3	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication
Etape 4	4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication
	5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication
Etape 5	6, 1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne		5	Implication
	7	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Nul	Nul	6,1	Implication
	8, 2	CSP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	6,1	Implication
	9	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Importante	Faible	8,2	Equivalence
	10	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Simple	Simple	7	Equivalence
	11	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Faible	Faible	4	Equivalence
	12	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Complexe	Simple	5	Equivalence
	13	C	X	Objet immobile	Longueur	:- (:-)	9	Equivalence
	14	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	10	Equivalence
	15	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	11	Equivalence
16	C	X	Objet immobile	Forme	:- (:-)	12	Equivalence	

« La longueur importante du parcours de manutention (description 9) » peut être reformulé (description 13) grâce à la matrice TRIZ en « la longueur de l'objet immobile est « mauvaise » ☹ ».

La même démarche s'applique aux descriptions de 14 à 16.

Etape 6/6. Utiliser la matrice des principes inventifs

Le Tableau 10 donne un extrait de la matrice de résolution de contradictions de la TRIZ [22]. Les lignes correspondent aux IPs génériques qui sont à améliorer et les colonnes aux IPs génériques qui se dégradent.

Tableau 10 – Extrait de la matrice des contradictions.

		# IP générique à améliorer	
		4 (longueur)	12 (forme)
# IP générique qui se dégrade	4 (longueur)	/	13, 14, 15,7
	12 (forme)	13, 14, 10,7	/

Les numéros dans les cellules correspondent à des principes de résolution inventifs de la TRIZ. Un principe de résolution inventif supprime la contradiction en améliorant un IP générique (colonne) sans dégrader l'autre IP générique (ligne). La matrice des contradictions donne les principes inventifs suivants :

- Principe #7 : placer les objets les uns dans les autres ou les faire passer les uns dans les autres ;
- Principe #10 : anticiper l'action pour se placer dans des conditions où les effets négatifs n'interviennent pas ;
- Principe #13 : faire l'action inverse comme rendre ce qui est vertical, horizontal ;
- Principe #14 : utiliser la sphéricité, soit transformer les droites en courbes et les mouvements linéaires en rotations ;
- Principe #15 : rendre les objets dynamiques soit rendre ce qui est immobile, mobile ou articulé, flexible.

Tableau 11 – Principes inventifs

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Etape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
Etape 3	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication
Etape 4	4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication
	5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication
Etape 5	6, 1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne		5	Implication
	7	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Nul	Nul	6,1	Implication
	8, 2	CSP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	6,1	Implication
	9	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Importante	Faible	8,2	Equivalence
	10	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Simple	Simple	7	Equivalence
	11	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Faible	Faible	4	Equivalence
	12	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Complexe	Simple	5	Equivalence
	13	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	9	Equivalence
	14	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	10	Equivalence
	15	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	11	Equivalence
	16	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	12	Equivalence
17	C	X	Objet	Position		Dans les autres objects	13 & 14	Implication	
18	C	X	Objet	Moment de l'action		Avant séquence	15 & 16	Implication	
19	C	X	Objet	Nature de l'action X		Inverse de X	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication	
20	C	X	Objet	* de rectitude		Faible	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication	
21	C	X	Objet	* de dynamisme		Fort	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication	

La longueur de l'objet immobile ⊗ (description 13) et la forme ⊙ (description 14) induisent dans la matrice TRIZ un principe inventif spécifiant (description 17) que la position de l'objet devrait être dans les autres objets. La même démarche s'applique aux descriptions de 18 à 21.

Sur la base du système étudié, le concepteur interprète les principes inventifs et en déduit pas sa propre expertise des solutions qui sont reprises dans le tableau suivant (Tableau 12):

Tableau 12 – *Ébauches de solutions*

<i>Principes inventifs</i>		<i>Solution cible particulière proposée</i>
Principe #7	devient	Stock aval entourant P1, P2, P3.
Principe #10	devient	P1 faite séparément avant le stockage dans S am.
Principe #13	devient	Postes de travail P1, P2, et P3 ou les stocks sur bande roulante.
Principe #14	devient	Implantation en « U » de telle sorte que les stocks touchent P1.
Principe #15	devient	S av sur palette entre P1 et P2 pour B puis après P3 pour A.

Tableau 13 – Solutions proposées

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Etape 1	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
Etape 2	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
Etape 3	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication
Etape 4	4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication
	5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication
Etape 5	6, 1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne		5	Implication
	7	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Nul	Nul	6,1	Implication
	8, 2	CSP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	6,1	Implication
	9	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Importante	Faible	8,2	Equivalence
	10	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Simple	Simple	7	Equivalence
	11	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Faible	Faible	4	Equivalence
	12	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Complexe	Simple	5	Equivalence
	13	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	9	Equivalence
	14	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	10	Equivalence
	15	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	11	Equivalence
16	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	12	Equivalence	
Etape 6	17	C	X	Objet	Position		Dans les autres objets	13 & 14	Implication
	18	C	X	Objet	Moment de l'action		Avant séquence	15 & 16	Implication
	19	C	X	Objet	Nature de l'action X		Inverse de X	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
	20	C	X	Objet	* de rectitude		Faible	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
	21	C	X	Objet	* de dynamisme		Fort	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
	22	SP	Atelier	P1	Position	Dans S av		17	Implication
	23	SP	Atelier	P1	Moment de fabrication	Avant stockage dans S AV		18	Implication
	24	SP	Atelier	S Av	Position	Au dessus de P2		19	Implication
	25	SP	Atelier	P3	Position	A côté de P2		20	Implication
	26	SP	Atelier	S Av	Position	A côté de P1		20	Implication
	27	SP	Atelier	S Av	Emplacement	En fonction de A & B		21	Implication

Désirer une position de l'objet dans les autres objets (VALEUR DESIREE de la description 17) implique de proposer la réalisation d'une position de P1 dans le S av (VALEUR OBJECTIVEE de la description 22). La même démarche s'applique aux descriptions de 23 à 27.

IV.3 De l'interprétation de l'étude de cas

Pour vérifier que le modèle holonique permettait de formaliser les traits essentiels du processus créatif, nous avons voulu savoir :

- si nous pouvions retrouver les éléments du processus créatif (besoin cible, difficulté cible, difficulté source, solution source, et solution cible) dans les descriptions capitalisées dans l'étude de cas,
- si nous pouvions expliquer quelques limites rencontrées lors de l'utilisation de la matrice TRIZ durant cette étude de cas.

Explication des limites rencontrées

Transition C-DOMAINE SYSTÈME-SYSTÈME

Lors de l'étape, « Étape 5/6. Poser la contradiction liée à ces obstacles» (page 109) le concepteur a spontanément ressenti la nécessité de reformuler la contradiction initiale pour pouvoir la « connecter » plus facilement à celle de la matrice TRIZ. En effet, il a implicitement formulé une contradiction intermédiaire d'un point de vue de la conception des systèmes (DOMAINE SYSTÈME). La Figure 52 illustre le cheminement du concepteur lors de la résolution du cas d'études, les numéros (à l'intérieur de chaque carré la Figure 52) correspondent aux moments des descriptions du cas d'études (première colonne du tableau 13). Les descriptions, 9, 10, 11 et 12 représentent cette adjonction (contradiction intermédiaire) faite par le concepteur. Le concepteur effectue (voir branches 4-11-15, 5-12-16, 8-9-13 et 7-10-14 de la Figure 52) une transition entre les points de vue sur les connaissances depuis le système (SYSTÈME) jusqu'à la conception (CONCEPTION SYSTÈME) par l'intermédiaire de la conception des systèmes (DOMAINE SYSTÈME).

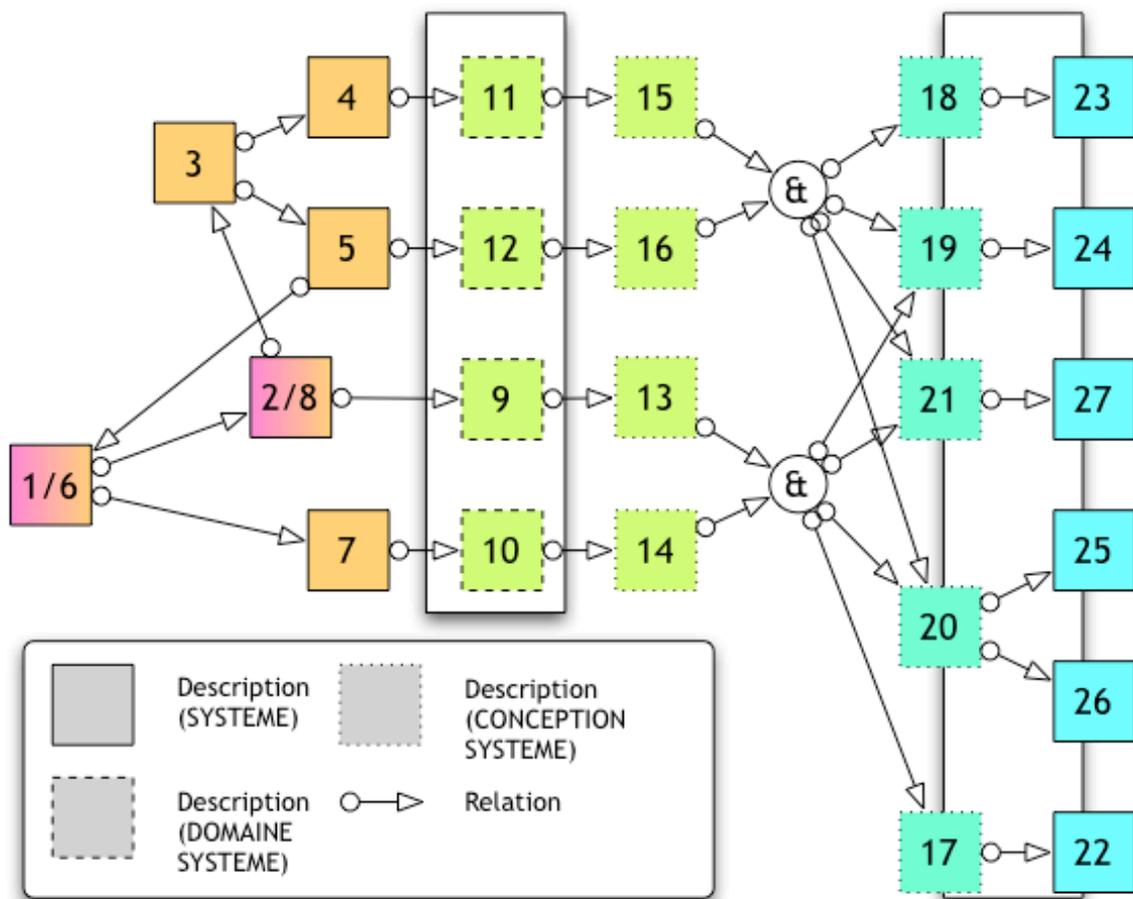


Figure 52 – Graphique d'avancement du cas d'étude

De même, lors de l'étape « Utiliser la matrice des principes inventifs » le concepteur est gêné pour passer des principes inventifs (Figure 52 propositions 17 à 21) à des propositions de solutions. Par exemple, le passage « d'anticiper l'action pour se placer dans des conditions où les effets négatifs n'interviennent pas » à « P1 faite séparément avant le stockage dans S am » ne va pas forcément de soi. En réalité, avant de passer à son système (connaissances du point de vue SYSTÈME) le concepteur se questionne machinalement et tacitement sur comment ce principe inventif peut s'interpréter pour les systèmes (connaissances du point de vue DOMAINE SYSTÈME). Il effectue (voir séquence 22 à 26 dans le Tableau 14 marquées par le trait à gauche) une transition entre les connaissances du point de vue de la conception (CONCEPTION SYSTÈME) et du système (SYSTÈME) via des connaissances du point de vue de la conception des systèmes (DOMAINE SYSTÈME) sans toutefois expliciter celles-ci.

Tableau 14 – Solutions tacites intermédiaires

DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne			
2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication
2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence
3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication
4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication
5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication
6, 1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne		5	Implication
7	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Nul	Nul	6,1	Implication
8, 2	CSP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	6,1	Implication
9	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Importante	Faible	8,2	Equivalence
10	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Simple	Simple	7	Equivalence
11	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Faible	Faible	4	Equivalence
12	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Complexe	Simple	5	Equivalence
13	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	9	Equivalence
14	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	10	Equivalence
15	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	11	Equivalence
16	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	12	Equivalence
17	C	X	Objet	Position		Dans les autres objets	13 & 14	Implication
18	C	X	Objet	Moment de l'action		Avant séquence	15 & 16	Implication
19	C	X	Objet	Nature de l'action X		Inverse de X	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
20	C	X	Objet	° de rectitude		Faible	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
21	C	X	Objet	° de dynamisme		Fort	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
22	SP	Atelier	Poste de production	Position		Dans les stocks	17	Equivalence
23	SP	Atelier	Poste de production	Moment de fabrication		Avant la ligne de production	18	Equivalence
24	SP	Atelier	Stock	Position		A un autre niveau que les postes	19	Equivalence
25	SP	Atelier	Poste de production	Position		En "U"	20	Equivalence
26	SP	Atelier	Stock	Position		Important	20	Equivalence
27	SP	Atelier	S Av	Emplacement	En fonction de A & B		22	Implication
28	SP	Atelier	P1	Moment de fabrication	Avant stockage dans S AV		23	Implication
29	SP	Atelier	S Av	Position	Au dessus de P2		24	Implication
30	SP	Atelier	P3	Position	A côté de P2		25	Implication
31	SP	Atelier	S Av	Position	A côté de P1		25	Implication
32	SP	Atelier	S Av	Emplacement	En fonction de A & B		26	Implication

Le passage direct entre les propositions dont les connaissances sont des points de vue SYSTÈME et C (aussi bien de C vers SYSTÈME (1^{re} limite) que de SYSTÈME vers C (2nd limite)) constitue une limite pour le concepteur qui procède spontanément par un intermédiaire (tacite ou explicite). L'explicitation de ces descriptions intermédiaires est nécessaire à une pleine opérationnalisation d'un modèle des connaissances permettant de formalisation des phases initiales et conceptuelles en conception des systèmes. L'explicitation de toutes les descriptions offre également d'autres avantages en permettant notamment la capitalisation de solutions en report avec leurs problèmes [48].

Autres limites

Toutefois, une question subsiste : pourquoi le concepteur a-t-il explicité les descriptions correspondant à la contradiction intermédiaire (9, 10, 11, et 12 dans le Tableau 14) et pas celles correspondant aux solutions intermédiaires (22, 23, 24, 25, et 26 dans le Tableau 14) ?

Pour la contradiction intermédiaire en plus du changement de point de vue, le concepteur doit reformuler la contradiction par rapport à une seule ressource. Cette opération implique de manipuler beaucoup de variables. À ce titre, elle requiert plus d'expertise que la transition des principes de solution aux solutions. En effet, la capacité du concepteur à sélectionner et manipuler un grand nombre de variables important dépend fortement de son expertise en conception des systèmes.

Résumé de l'explication des limites rencontrées

Le modèle proposé par sa nature descriptive permet d'explicitier certains aspects implicites de la démarche employée par le concepteur. La formalisation de ces éléments plus ou moins conscients du processus créatif contribue par exemple à :

- une compréhension réflexive sur sa pratique par le concepteur ;
- faciliter la transmission par le concepteur de son savoir sur son modèle de conception créative.

Éléments du processus créatif

Les descriptions transcrites dans le modèle proposé traitent des constituants du processus créatif sans toutes fois les identifier. Nous avons procédé à l'identification a posteriori d'ensembles de descriptions correspondants aux constituants du processus créatif (besoin cible, difficulté cible, difficulté source, solution source, et solution cible). Les éléments sont mentionnés à gauche des descriptions du Tableau 15 (basé sur le Tableau 14).

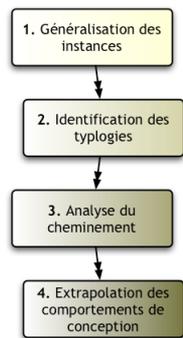
Tableau 15 – Cas d'étude et éléments du processus créatif

DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature		
Besoin cible	1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne				
	2	SP	Atelier	Produit A & B	Distance de manutention	Insatisfaisante	satisfaisante	1	Implication	
	2'	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	2	Equivalence	
Difficulté cible	3	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	Entre P1 & P2		2'	Implication	
	4	SP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Faible	Faible	3	Implication	
	5	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Non nul	Nul	3	Implication	
	6, 1	SP	Atelier	S Av	Position dans la ligne de production	En fin de ligne		5	Implication	
	7	SP	Atelier	Produit A	Nombre de retours en arrière	Nul	Nul	6,1	Implication	
	8, 2	CSP	Atelier	Produit B	Distance de manutention	Importante	Faible	6,1	Implication	
	9	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Importante	Faible	8,2	Equivalence	
	10	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Simple	Simple	7	Equivalence	
Difficulté source	11	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Longueur	Faible	Faible	4	Equivalence	
	12	CSP	Atelier	Parcours de manutention	Forme	Complexe	Simple	5	Equivalence	
	13	C	X	Objet immobile	Longueur	:- (:-)	9	Equivalence	
	14	C	X	Objet immobile	Forme	:-)	:-)	10	Equivalence	
	15	C	X	Objet immobile	Longueur	:-)	:-)	11	Equivalence	
	16	C	X	Objet immobile	Forme	:- (:-)	12	Equivalence	
	17	C	X	Objet	Position		Dans les autres objets	13 & 14	Implication	
	18	C	X	Objet	Moment de l'action		Avant séquence	15 & 16	Implication	
Connue	19	C	X	Objet	Nature de l'action X		Inverse de X	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication	
	20	C	X	Objet	° de rectitude		Faible	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication	
	21	C	X	Objet	° de dynamisme		Fort	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication	
	22	SP	Atelier	Poste de production	Position		Dans les stocks	17	Equivalence	
	23	SP	Atelier	Poste de production	Moment de fabrication		Avant la ligne de production	18	Equivalence	
	24	SP	Atelier	Stock	Position		A un autre niveau que les postes	19	Equivalence	
	25	SP	Atelier	Poste de production	Position		En "U"	20	Equivalence	
	26	SP	Atelier	Stock	Position		Important	20	Equivalence	
	Solution source	27	SP	Atelier	S Av	Emplacement	En fonction de A & B		22	Implication
		28	SP	Atelier	P1	Moment de fabrication	Avant stockage dans S AV		23	Implication
29		SP	Atelier	S Av	Position	Au dessus de P2		24	Implication	
30		SP	Atelier	P3	Position	A côté de P2		25	Implication	
31		SP	Atelier	S Av	Position	A côté de P1		25	Implication	
32		SP	Atelier	S Av	Emplacement	En fonction de A & B		26	Implication	
Solution cible										

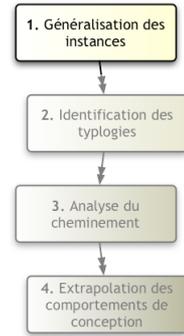
IV.4 De la construction du modèle adaptatif

Dans cette section, nous suivons la construction du modèle adaptatif en décrit dans la section III.4 :

1. généraliser des instances issues du modèle holonique,
2. identifier des typologies de holons,
3. analyser les transitions entre typologies de holons,
4. extrapoler des comportements de conception.



1. Généralisation des individus holoniques



Généralisation.

La nature des descriptions est étroitement liée à l'utilisation d'un modèle procédural qui dans le cas d'étude est celui de l'utilisation de la matrice de la TRIZ en six étapes. Les descriptions en sont les extrants, mais dépendent de l'utilisation du modèle procédural que le concepteur en fait.

En remplaçant les instances (ou individus) par des variables génériques (notées de 1 à n par propriété), il est possible de représenter synthétiquement ces extrants. Par cette approche, nous avons synthétisé les extrants génériques de chaque élément du processus créatif provenant du Tableau 15. Des tableaux similaires à ceux employés pour la restitution du cas d'étude dévoilent les résultats de cette synthèse.

Extrants du besoin cible.

Le Tableau 16 présente les extrants du besoin cible. Celui-ci comporte trois descriptions :

- Une description (1) sans valeur désirée, mais ayant une valeur objectivée (VO1) ;
- Une description (2) évaluée négativement, c'est-à-dire que la valeur objectivée n'appartient pas à la valeur désirée ($VO2 \notin VD1$), induite par la première description (1) ;
- Une description (2') équivalente de la description (2).

Tableau 16 – Extrants besoin cible

Élément du processus créatif	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIRÉE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
	1	SP	S1	R1	P1	VO1			
	2	SP	S1	R2	P2	$VO2 \notin VD1$	VD1	1	Implication
	2'	SP	S1	R3	P2	$VO3 \notin VD2$	VD2	2	Equivalence

Extrants de la difficulté cible

Le Tableau 17 présente les extrants pour la difficulté cible. Celle-ci inclut :

- Une description (3) sans valeur désirée, mais ayant une valeur objectivée (VO4), induite par la dernière description (2') ;
- Une description (4) évaluée positivement, c'est-à-dire que la valeur objectivée appartient à la valeur désirée ($VO5 \in VD2$), induite par la description (3) ;
- Une description (5) évaluée négativement, c'est-à-dire que la valeur objectivée n'appartient pas à la valeur désirée ($VO6 \notin VD3$), induite par la description (3) ;
- Une évolution (6, 1) de la description (1) provenant du besoin cible induit par la description (5) ;
- Une réévaluation positive (7) de la description (5) avec une nouvelle valeur objectivée (VO7) appartenant à la valeur désirée ($VO7 \in VD3$), induite par la description (6, 1) ;
- Une évolution (8, 2) de la description (2) provenant du besoin cible induit par la description (6, 1) ;

Tableau 17 – Extrants difficulté cible

Élément du processus créatif	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
	3	SP	S1	R1	P1	VO4		2'	Implication
	4	SP	S1	R3	P2	$VO5 \in VD2$	VD2	3	Implication
	5	SP	S1	R3	P3	$VO6 \notin VD3$	VD3	3	Implication
	6, 1	SP	S1	R1	P1	VO1		5	Implication
	7	SP	S1	R3	P3	$VO7 \in VD3$	VD3	6, 1	Implication
	8, 2	SP	S1	R3	P2	$VO3 \notin VD2$	VD2	6, 1	Implication

Puisque deux descriptions composant l'extrant de la difficulté cible proviennent directement du besoin cible (6, 1 & 8, 2), nous considérerons que les extrants de la difficulté cible incluent ceux du besoin cible.

Extrants de la difficulté source

Le Tableau 18 présente les extrants pour la difficulté source. Celle-ci inclut :

- Un groupe de descriptions (9, 10, 11, 12) équivalentes respectivement du point de vue de la conception des systèmes aux descriptions (8, 7, 4, 5) mais avec une ressource unique et commune (R4) ;
- Un groupe de descriptions (13, 14, 15, 16) équivalentes respectivement du point de vue de la conception aux descriptions (9, 10, 11, 12).

Tableau 18 – *Extrants difficulté source*

Élément du processus créatif	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DÉSCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
	9	CSP	S1	R4	P4	VO3 \notin VD2	VD2	8,2	Equivalence
	10	CSP	S1	R4	P5	VO8 \in VD2	VD4	7	Equivalence
	11	CSP	S1	R4	P4	VO5 \in VD2	VD2	4	Equivalence
	12	CSP	S1	R4	P5	VO9 \notin VD2	VD4	5	Equivalence
	13	C	S2	R5	P4	VO10 \notin VD5	VD5	9	Equivalence
	14	C	S2	R5	P5	VO11 \in VD5	VD5	10	Equivalence
	15	C	S2	R5	P4	VO11 \in VD5	VD5	11	Equivalence
	16	C	S2	R5	P5	VO10 \notin VD5	VD5	12	Equivalence

Puisque les descriptions composant l'extrant de la difficulté source sont équivalentes à celle de la difficulté cible, nous considérerons que les extrants de la difficulté source incluent ceux de la difficulté cible.

Extrants de la solution source

Le Tableau 19 présente les extrants pour la solution source. Celle-ci inclut :

- Un groupe de descriptions (17, 18, 19, 20, 21) sans valeurs objectivées, mais ayant des valeurs désirées (respectivement VD6, VD7, VD8, VD2, VD10), induites par des paires de descriptions provenant de la difficulté source ayant la même relation d'induction (3 ou 6,1) ;
- Un groupe de descriptions (22, 23, 24, 25, 26) équivalentes respectivement du point de vue des systèmes aux descriptions (17, 18, 19, 20, 21).

Tableau 19 – *Extrants solutions sources*

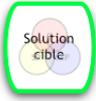
Elément du processus créatif	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
		17	C	S2	R6	P6		VD6	13 & 14
18		C	S2	R6	P7		VD7	15 & 16	Implication
19		C	S2	R6	P8		VD8	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
20		C	S2	R6	P9		VD2	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
21		C	S2	R6	P10		VD9	(13 & 14) ou (15 & 16)	Implication
22		SP	S1	R7	P6		VD10	17	Equivalence
23		SP	S1	R7	P11		VD11	18	Equivalence
24		SP	S1	R8	P6		VD12	19	Equivalence
25		SP	S1	R7	P6		VD13	20	Equivalence
26		SP	S1	R8	P6		VD14	20	Equivalence

Extrants de la solution cible

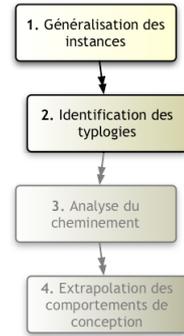
Le Tableau 20 présente les extrants pour la solution source. Celle-ci inclut :

- un groupe de descriptions (27, 28, 29, 30, 31, 32) sans valeurs désirées, mais ayant des valeurs objectivées (VO12, VO13, VO14, VO15, VO16, VO17).

Tableau 20 – *Extrants solutions cibles*

Elément du processus créatif	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
		27	SP	S1	R1	P12	VO12		22
28		SP	S1	R9	P11	VO13		23	Implication
29		SP	S1	R1	P6	VO14		24	Implication
30		SP	S1	R10	P6	VO15		25	Implication
31		SP	S1	R1	P6	VO16		25	Implication
32		SP	S1	R1	P12	VO17		26	Implication

2. Identification de typologies des holons



Typologie

Des extraits précédents nous remarquons trois typologies de descriptions (voir Tableau 21) :

Type 1. Description avec valeur objectivée et sans valeur désirée (cercle sur la 1re ligne du Tableau 21) ;

Type 2. Description avec valeur objectivée et valeur désirée ;

Sous-type - . Valeur objectivée n'appartient pas à la valeur désirée ($VO_n \notin VD_n$) (cercle sur la 2e ligne du Tableau 21) ;

Sous-type + . Valeur objectivée appartient à la valeur désirée ($VO_n \in VD_n$) (cercle sur la 3e ligne du Tableau 21).

Type 3. Description sans valeur objectivée (cercle sur la 4e ligne du Tableau 21) et avec valeur désirée.

Tableau 21 – Typologies des holons

	DESCRIPTION a moment du processus créatif	DESCRIPTION a point de vue	SYSTEME désignation	RESSOURCE désignation	PARAMETRE désignation	VALEUR OBJECTIVEE a mesure	VALEUR DESIREE a mesure	DESCRIPTION sort de RELATION	RELATION a nature
Type 1	x	x	Sn	Rn	Pn	VO _n		x	x
Type 2	-	x	Sn	Rn	Pn	VO _n ∉ VD _n	VD _n	x	x
						+	x		
Type 3	x	x	Sn	Rn	Pn		VD _n	x	x

Depuis le Tableau 21, nous pouvons déterminer des typologies composants les éléments du processus créatif :

- pour le besoin cible :

- Type 1,
- Type 2 – induite par une description de Type 1.
- pour la difficulté cible :
 - Type 1,
 - Type 2 + induite par une description de Type 1,
 - Type 2 – induite par une description de Type 1.
- pour la difficulté source :
 - Type 2 + équivalente à une description de Type 2 +,
 - Type 2 – équivalente à une description de Type 2 -.
- pour la solution source :
 - Type 3 induite par des descriptions de Type 2 – et Type 2 +.
- pour la solution cible :
 - Type 1 induite par une description de Type 3.

Typologies & relations

Pour formaliser et comprendre le processus créatif du cas d'étude, nous devons combiner les typologies des extrants avec leurs relations. La Figure 53 représente l'ensemble des relations entre les typologies de descriptions (holons) par extrants des éléments du processus créatif. Les descriptions décrivant le besoin cible s'enrichissent au fur et à mesure du processus créatif pour décrire la difficulté cible. La difficulté source inclut alors les extrants de la difficulté cible qui elle-même inclut les extrants du besoin cible. Des solutions sources sont proposées de la difficulté source pour former des solutions cibles. La flèche en pointillée sur la Figure 53 symbolise l'ensemble de ce parcours (du besoin cible à la solution cible).

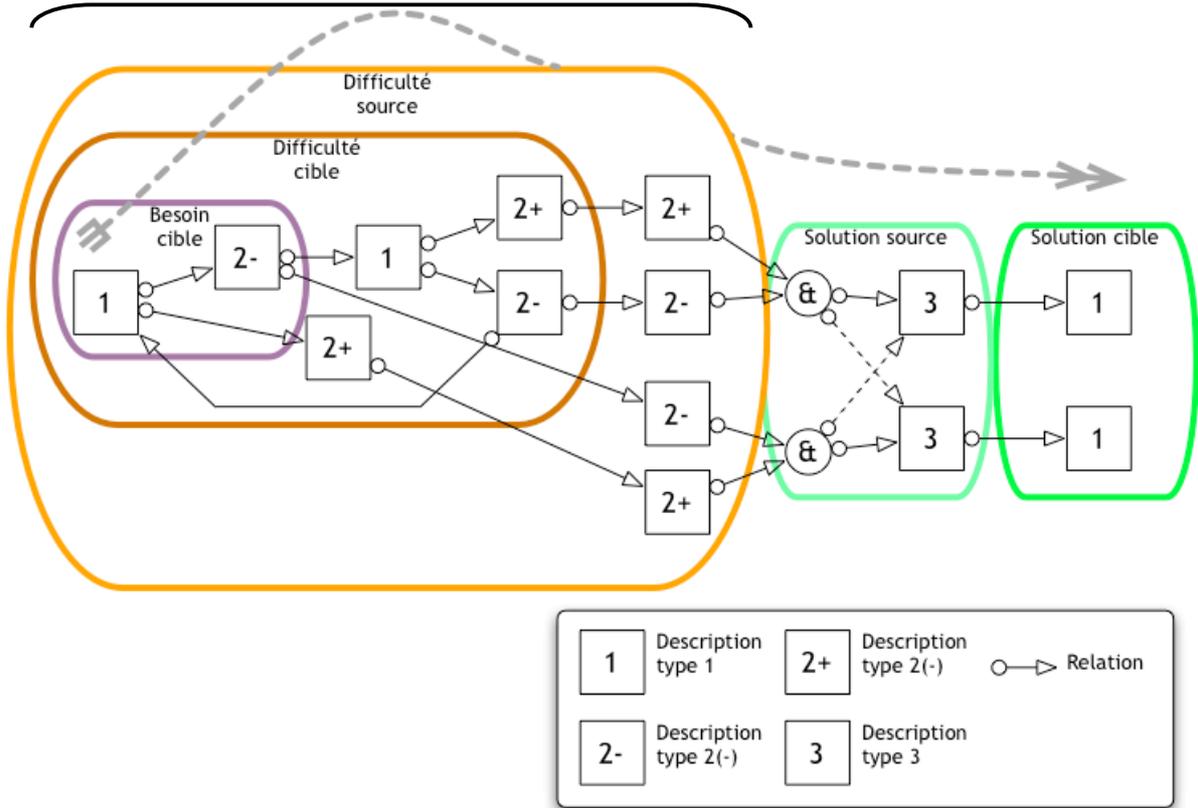


Figure 53 – Graphique d'avancement des extrants

Les rectangles arrondis inclus les uns dans les autres, sur la Figure 53 font ressortir l'évolution progressive de la description du problème qui a pour composante le besoin et les difficultés cible et source (voir accolade Problème sur la Figure 53).

Les solutions cibles ne contenant que des descriptions de type **1**, nous supposons que la présence de descriptions de type **1** induit la présence de solutions cibles. Cette hypothèse implique l'inclusion de la solution cible dans le besoin cible et la difficulté cible, puis indirectement dans la difficulté source (voir Solution cible sur la Figure 54).

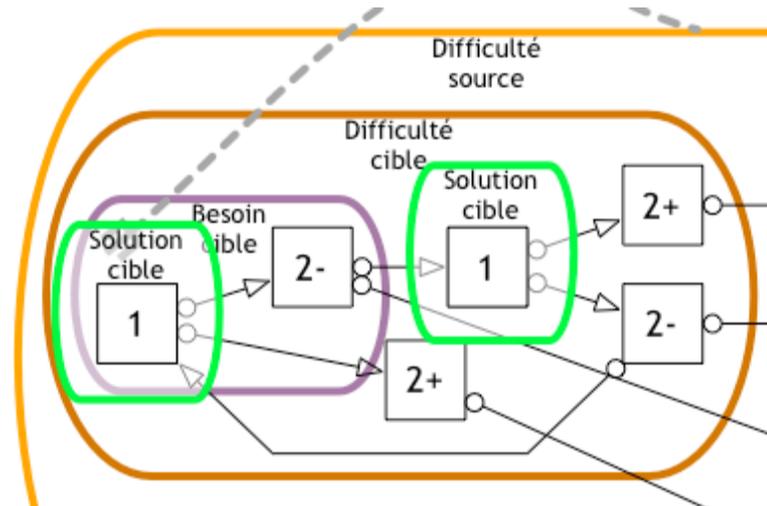


Figure 54 – *Inclusion des solutions cibles.*

Par voie de conséquence dans le contexte du processus créatif entrepris dans ce cas d'étude, cela implique une précision importante pour les définitions du besoin et du problème. La définition du besoin précédente comme « une condition devant être rempli » reste valide, mais notons que cette condition se caractérise ici par une solution cible (1 sur Figure 54) évaluée négativement (2- sur Figure 54) autrement dit une solution insatisfaisante, nous parlerons alors de besoins d'une solution. De même, la définition de la difficulté comme « un état de difficulté qui apparaît quand le concepteur ne peut pas répondre instantanément à un besoin en opérant un prélèvement dans son environnement » reste valide, mais notons la difficulté naît d'un bouclage entre solutions cibles. Ainsi pour le concept de difficulté cible, une solution cible (1 sur Figure 54) évaluée négativement (2- sur Figure 54) induit une autre cible (1 sur Figure 54) dont l'évaluation négative (2- sur Figure 54) induit la solution cible précédente; autrement dit, une difficulté apparaît quand la satisfaction d'un besoin suite à une solution renvoie vers une solution dont la satisfaction du besoin implique de revenir à la première solution.

3. Analyse des transitions entre typologies de holons

Parcours référent

Pour formaliser le processus créatif, nous proposons de faire abstraction de ses éléments décrivant le cheminement du processus créatif pour ne garder que les typologies de descriptions (**1**, **2 -**, **2 +**, **3**). De la sorte depuis la Figure 53, nous obtenons le parcours référent du cas d'étude (voir Figure 55).

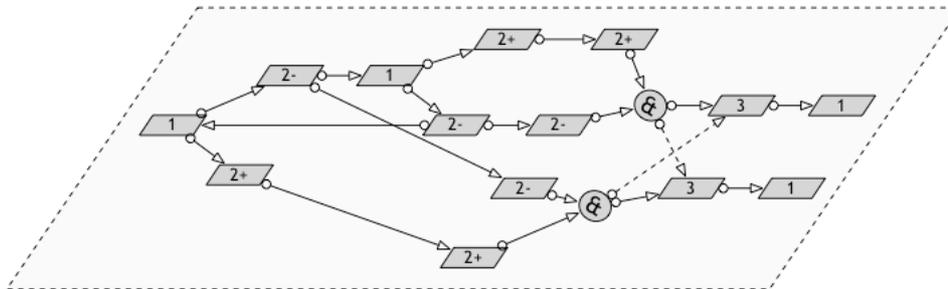
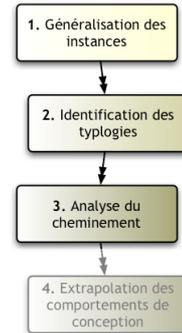


Figure 55 – *Parcours référent.*

Chacune de ces typologies se dérive de points de vue différents qui sont autant de calques du parcours référent (voir Figure 56). De cette façon, partant de SYSTÈME le parcours de conception évolue de calque en calque pour revenir au calque SYSTÈME. Sur la Figure 56, le cheminement du cas d'étude a été repris par les cases et les flèches en trait gras.



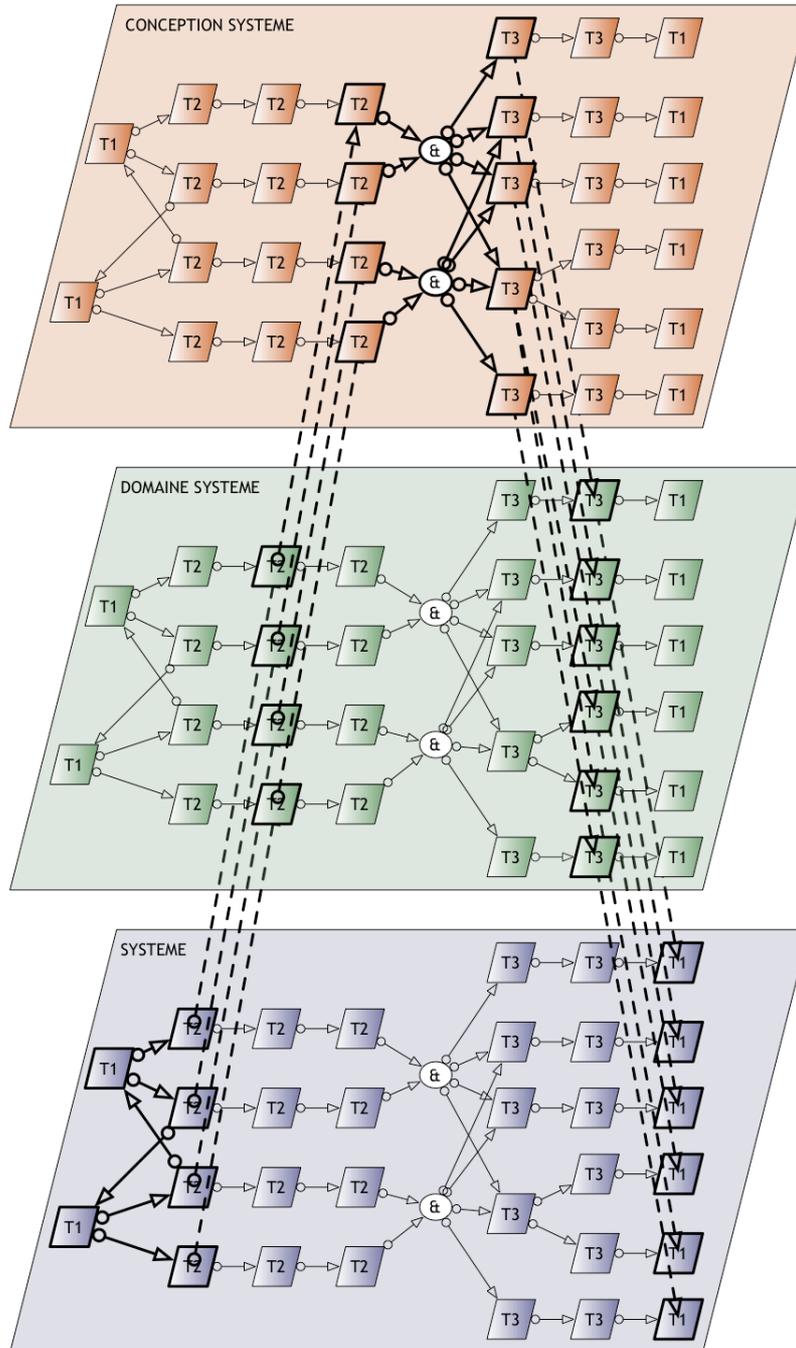


Figure 56 – *Changement de points de vue durant le processus créatif*

L'analyse du parcours référent permet d'identifier sept modes de transitions particuliers. Chacun de ces modes traduit le passage entre des typologies de transition (voir Figure 57) :

- *Mode A*. De descriptions de type 1 vers des descriptions de type 1 d'un point de vue différent.

- *Mode B*. De descriptions de type 1 vers des descriptions de type 2.
- *Mode C*. De descriptions de type 2 vers des descriptions de type 1.
- *Mode D*. De descriptions de type 2 vers des descriptions de type 2 d'un point de vue différent.
- *Mode E*. De descriptions de type 2 vers des descriptions de type 3.
- *Mode F*. De descriptions de type 3 vers des descriptions de type 1.
- *Mode G*. De descriptions de type 3 vers des descriptions de type 3 d'un point de vue différent.

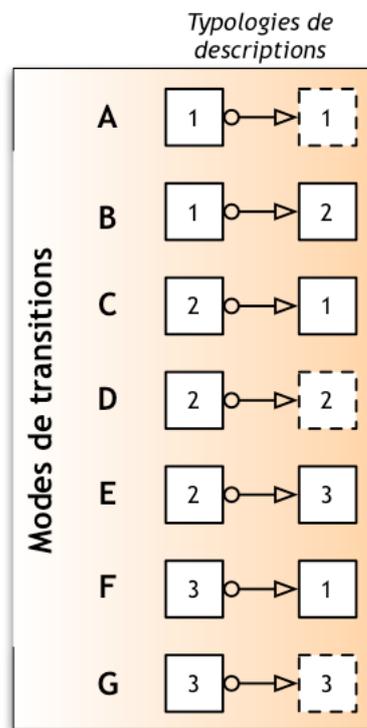
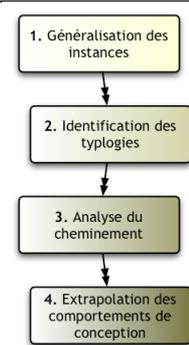


Figure 57 – *Modes de transitions*

4. Extrapolation d'une heuristique



Système conversationnel

La formalisation de la navigation faite par le concepteur lors du processus créatif permet d'envisager la création d'une heuristique conversationnelle. Les systèmes informatiques conversationnels tels que les Systèmes Experts (SE) reposent sur un programme qui contient une base de connaissances de faits et de règles qui à leur tour impliquent de nouveaux faits depuis des connaissances et des données entrantes :

- *Fait (ou prédicat)*. Variables et leurs relations.
- *Règle*. Raisonnement sur les faits permettant l'inférence de nouveaux faits (conditions qui renvoient vers d'autres règles ou formules).

Par abus de langage, nous considérerons que le moteur d'inférence fait partie du SE.

Le système expert dérive ses réponses en passant sa base de connaissance dans un moteur d'inférence, un programme qui interagit avec l'utilisateur et traite le système expert. Les systèmes conversationnels tirent leur nom de l'interaction avec leur utilisateur qui peut prendre la forme d'une conversation par des séries de questions-réponses.

Prédicats

Nous pouvons établir deux niveaux de prédicats. D'une part, le modèle holonique proposé du processus créatif en conception des systèmes (Voir Figure 39 et Figure 41) permet de déterminer directement les prédicats simples suivants :

- CONCEPTEUR(désignation CONCEPTEUR, désignation SYSTEME, désignation RESSOURCE, désignation DESCRIPTION)
- SYSTEME(désignation SYSTEME, n* désignation RESSOURCE)
- RESSOURCE(désignation RESSOURCE, n* désignation PARAMETRE)
- PARAMETRE(désignation PARAMETRE, n* désignation VALEUR)

- VALEUR DESIREE(désignation VALEUR DESIREE, mesure, unité)
- VALEUR OBJECTIVEE(désignation VALEUR OBJECTIVEE, mesure, unité)
- DESCRIPTION(désignation DESCRIPTION, moment du processus créatif, point de vue,
- désignation SYSTEME, désignation RESSOURCE, désignation PARAMETRE, désignation VALEUR OBJECTIVEE, désignation VALEUR DESIREE,
- désignation de la DESCRIPTION entrante)
- RELATION(désignation RELATION, nature)

On parle de prédicats simples lorsqu'ils ne font pas intervenir de relation entre les variables.

D'autre part, les prédicats simples précédents et la formalisation du processus créatif (voir la section précédente) permettent de déterminer des prédicats complexes. Pour construire les prédicats complexes et les règles d'inférence, nous utiliserons (voir Tableau 22) les quatre types de syntaxes suivantes :

Tableau 22 – Syntaxe

Type de notations	Notation	Explication en plein texte
Quantificateurs	\forall	pour tout
	\exists	il existe au moins un
	$\exists !$	il existe unique
Connecteurs logiques	\neg	non
	\wedge	et
	\vee	ou
	\rightarrow	implique
	\leftrightarrow	équivalent
Symboles ensemblistes	\in	appartient à
	\notin	n'appartient pas à
	\subset	inclut
	\subseteq	inclut mais différent
	$\not\subset$	n'inclut pas
	\emptyset	ensemble vide
Conversationnels	$?$	demander à utilisateur

Ainsi, pour chaque type de description (1, 2(-), 2(+), et 3), nous pouvons décrire les prédicats suivants :

Tableau 23 – Prédicats par type de descriptions

Type	Prédicats	Explication en plein texte
1	$\forall a1-9:$ $\exists \text{ DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, \emptyset, a9)$	Pour toutes les variables a de a1 à a9, il existe au moins une description sans valeur désirée (a8= \emptyset).
2(+)	$\forall a1-10 :$ $\exists \text{ DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9)$ $\wedge a7 \in a8$	Pour toutes les variables a de a1 à a9, il existe au moins une description dont la valeur objectivée (a7) est incluse dans la valeur désirée (a8).
2(-)	$\forall a1-10 :$ $\exists \text{ DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9)$ $\wedge a7 \notin a8$	Pour toutes les variables a de a1 à a9, il existe au moins une description dont la valeur objectivée (a7) est exclue de la valeur désirée (a8).
3	$\forall a1-10 :$ $\exists \text{ DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5, a6, \emptyset, a8, a9)$	Pour toutes les variables a de a1 à a9, il existe au moins une description sans valeur objectivée (a7= \emptyset).

Règles

Les modes des transitions (voir Figure 57) et les prédicats précédents permettent de déterminer des règles conversationnelles. Cependant pour Purcell et Gero [95], le concepteur se réfère systématiquement à des solutions sources même s'il ne les perçoit pas consciemment. La transition de mode **B** (des typologies **2** vers **1**) est donc la contraction des transitions **D** (de **2** vers **3**) et **E** (de **3** vers **1**).

Tableau 24 – Heuristique

Mode de Transition	Règle	Explication en plein texte
B : 1 \rightarrow 2	$\forall a1-9, b1-9:$ $\exists \text{ DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, \emptyset, a9)$ $\rightarrow a1:b9 \wedge a3:b3 \wedge a4:b4$	Pour toutes les variables a et b de 1 à 9, s'il existe une description de type 1, alors créer une description de type 2 induite par la description de type 1

	$\wedge ? : b1 \wedge ? : b2 \wedge b2 > a1 \wedge ? : b5 \wedge ? : b6$ $\wedge ? : b7 \wedge ? : b8$ $\wedge \exists ! \text{DESCRIPTION}(b1, b2, b3, b4,$ $b5, b6, b7, b8, b9)$	$(b9=a1)$ (implique le même point de vue $(a3)$, le même système $(a4)$, à un moment après $(b2 > a1)$ et de demander les autres valeurs de variables).
E :	$\forall a1-9, b1-9:$ $\exists \text{DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5,$ $a6, a7, a8, a9)$ $\wedge a7 \notin a8$ $\rightarrow a1 : b9 \wedge a3 : b3 \wedge a4 : b4$ $\wedge ? : b1 \wedge ? : b2 \wedge b2 > a1 \wedge ? : b5 \wedge ? : b6$ $\wedge ? : b8$ $\wedge \exists ! \text{DESCRIPTION}(b1, b2, b3, b4,$ $b5, b6, \emptyset, b8, b9)$	Pour toutes les variables a et b de 1 à 9, s'il existe une description de type 2(-), alors créer une description de type 3 induite par la description de type 2(-) $(b9=a1)$ (implique le même point de vue $(a3)$, le même système $(a4)$, à un moment après $(b2 > a1)$ et de demander les autres valeurs de variables).
F :	$\forall a1-9, b1-9:$ $\exists \text{DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5,$ $a6, \emptyset, a8, a9, a10)$ $\rightarrow a10 : b9 \wedge a3 : b3 \wedge a4 : b4$ $\wedge ? : b1 \wedge ? : b2 \wedge b2 > a1 \wedge ? : b5 \wedge ? : b6$ $\wedge ? : b7$ $\wedge \exists ! \text{DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4,$ $a5, a6, a7, \emptyset, a9)$	Pour toutes les variables a et b de 1 à 9, s'il existe une description de type 3, alors créer une description de type 1 induite par la description de type 3 $(b9=a1)$ (implique le même point de vue $(a3)$, le même système $(a4)$, à un moment après $(b2 > a1)$ et de demander les autres valeurs de variables).
A :	$\forall a1-9, b1-9:$ $\text{DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5,$ $a6, a7, \emptyset, a9)$ $\rightarrow a10 : b9 \wedge a4 : b4$ $\wedge ? : b1 \wedge ? : b2 \wedge b2 > a1 \wedge ? : b3 \wedge$ $b3 <> a3 \wedge ? : b5 \wedge ? : b6 \wedge ? : b7$ $\wedge \exists ! \text{DESCRIPTION}(b1, b2, b3, b4,$ $b5, b6, b7, \emptyset, b9)$	Pour toutes les variables a et b de 1 à 9, s'il existe une description de type 1, alors créer une autre description de type 1 induite par la première description de type 1 $(b9=a1)$ (implique un point de vue différent $(b3 <> a3)$, le même système $(a4)$, à un moment après $(b2 > a1)$ et de demander les autres valeurs de variables).
D+ :	$\forall a1-9, b1-9:$ $\text{DESCRIPTION}(a1, a2, a3, a4, a5,$ $a6, a7, a8, a9)$ $\wedge a7 \in a8$ $\rightarrow a10 : b9 \wedge a4 : b4$ $\wedge ? : b1 \wedge ? : b2 \wedge b2 > a1 \wedge ? : b3 \wedge$ $b3 <> a3 \wedge ? : b5 \wedge ? : b6 \wedge ? : b7 \wedge ? : b8$ $\wedge b7 \in b8$ $\wedge \exists ! \text{DESCRIPTION}(b1, b2, b3, b4,$ $b5, b6, b7, b8, b9)$	Pour toutes les variables a et b de 1 à 9, s'il existe une description de type 2, alors créer une autre description de type 2 induite par la première description de type 2 $(b9=a1)$ (implique un point de vue différent $(b3 <> a3)$, le même système $(a4)$, à un moment après $(b2 > a1)$, de garder l'inclusion (et de demander les autres valeurs de variables).

D - :	$\forall a1-9, b1-9:$	Pour toutes variables a et b de 1 à 9,
2 - \rightarrow 2 -	DESCRIPTION(a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9) $\wedge a7 \notin a8$ $\rightarrow a10:b9 \wedge a4:b4$ $\wedge ? :b1 \wedge ? :b2 \wedge b2 > a1 \wedge ? :b3 \wedge b3 < > a3 \wedge ? :b5 \wedge ? :b6 \wedge ? :b7 \wedge ? :b8$ $\wedge b7 \notin b8$ $\wedge \exists !$ DESCRIPTION(b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9)	s'il existe une description de type 2, alors créer une autre description de type 2 induite par la première description de type 2 ($b9=a1$) (<i>implique un point de vue différent ($b3 < > a3$), le même système (a4), à un moment après ($b2 > a1$), de garder l'exclusion (et de demander les autres valeurs de variables).</i>
G :	$\forall a1-9, b1-9:$	Pour toutes variables a et b de 1 à 9,
3 \rightarrow 3	DESCRIPTION(a1, a2, a3, a4, a5, a6, \emptyset , a8, a9) $\rightarrow a10:b9 \wedge a4:b4$ $\wedge ? :b1 \wedge ? :b2 \wedge b2 > a1 \wedge ? :b3 \wedge b3 < > a3 \wedge ? :b5 \wedge ? :b6 \wedge ? :b8$ $\wedge \exists !$ DESCRIPTION(b1, b2, b3, b4, b5, b6, \emptyset , b8, b9)	s'il existe une description de type 3, alors créer une autre description de type 3 induite par la première description de type 3 ($b9=a1$) (<i>implique un point de vue différent ($b3 < > a3$), le même système (a4), à un moment après ($b2 > a1$) et de demander les autres valeurs de variables).</i>

Heuristique

Ces quelques prédicats et règles définissent une heuristique formalisant le processus créatif et guidant le concepteur vers un processus créatif similaire à celui du cas d'étude. Par exemple, si le concepteur saisit dans un système expert opérationnel (SE) le fait : « DESCRIPTION(d1, 1, SYSTÈME, Atelier, S av, Position dans la ligne , en fin de ligne, \emptyset ,) » alors SE lui renverrait deux séries de questions, car ce fait vérifie les prédicats des descriptions de type 1 :

- *Suivant la règle 1 \rightarrow 2.* Soit de donner de nouvelles valeurs d'instances pour une description de type 2. C'est-à-dire d'évaluer la description de type 1.
- *Suivant la règle 1 \rightarrow 1.* Soit de donner de nouvelles valeurs d'instances pour une description de type 1. C'est-à-dire de donner un équivalent à la description de type 1 mais d'un autre point de vue.

Ici le concepteur choisit de proposer une évaluation. Le SE infère donc automatiquement [DESCRIPTION\(b1, b2, SYSTÈME, Atelier, b5, b6, b7, b8, d1\)](#) puis demande au concepteur :

- SE : « b1 (désignation de la description) ? »
 - o Réponse du concepteur : « d2 »
- SE : « b2 (a moment) ? » (mais pour être accepté b2 doit être >1)
 - o Réponse du concepteur : « 2 »
- SE : « b5 (ressource) ? »
 - o Réponse du concepteur : « Produit B »
- SE : « b6 (paramètre) ? »
 - o Réponse du concepteur : « Distance de manutention »
- SE : « b7 (valeur objectivée) ? »
 - o Réponse du concepteur : « importante »
- SE : « b8 (valeur désirée) ? »
 - o Réponse du concepteur : « faible »

Le nouveau fait [DESCRIPTION\(d2, 2, SYSTÈME, Atelier, Produit B, Distance de manutention, importante, faible, d1\)](#) est donc créé. Ce fait qui vérifie les prédicats des descriptions de type 2(-) et induit deux nouvelles séries de questions :

- *Suivant la règle 2(-) → 3.* Soit de donner de nouvelles valeurs d'instances pour une description de type 3. C'est-à-dire de proposer un principe de solution.
- *Suivant la règle 2(-) → 2(-).* Soit de donner de nouvelles valeurs d'instances pour une description de type 2(-). C'est-à-dire de donner un équivalent à un autre point de vue.

En répondant aux questions du SE, le concepteur induit de nouvelles questions dont les réponses induiront alors de nouvelles questions, ainsi de suite jusqu'à ce que le concepteur ait répondu à toutes les évaluations négatives (2-) ou qu'il décide d'arrêter le processus créatif. En effet, le choix d'arrêter la conception porte aussi sur des critères non pris en compte par ce SE tel que le temps imparti ou la volonté d'être incrémentale. En terme d'opérationnalisation, ce genre d'heuristique s'intègre dans l'ontologie proposée grâce à

des SEs tels que JESS [42] dont une interface existe dans Protégé-OWL. À partir de tels outils, il est possible de compléter l'heuristique avec par exemple des synthèses d'avancements ou des éléments de jonctions à des capitalisations pré-établis (comme les principes inventifs de la TRIZ).

Résumé du chapitre IV

L'étude de cas montre que le modèle holonique permet de formaliser les propositions faites lors du processus créatif en descriptions. En gardant les traits essentiels des propositions, le modèle holonique permet de capitaliser les descriptions et de mener des raisonnements permettant d'expliquer par exemple les limites rencontrées par le concepteur.

Les descriptions ainsi formalisées servent de point de départ à la formalisation du modèle adaptatif. En analysant l'organisation et la nature des extrants pour chaque étape du processus créatif, nous aboutissons à des typologies de description et de transitions.

V. Conclusions

Ce chapitre traite des discussions et des perspectives.

V.1 De la démarche et des discussions

1^{er} Chapitre (Constats)

Dans le premier chapitre (I Constats), nous sommes partis du besoin d'évolution des systèmes pour satisfaire les contraintes industrielles. La satisfaction du besoin d'évolution passe par une conception toujours plus efficace et efficiente. Pour cela, le groupe NGM met en avant la nécessité de mettre en place une conception virtuelle complète des systèmes. Cela implique de formaliser les phases initiales et conceptuelles de la conception.

Beaucoup de descriptions du processus de conception existent. Perrin [91], et Evbuomwan et col. [34] en fournissent de très bonnes revues. C'est pourquoi avant toute chose, nous avons recherché des définitions consensuelles de la conception et des modes de conception qui nous intéressent basées sur les définitions de Simon [108], [109].

Dans cette thèse, nous avons choisi de nous intéresser à la conception créative et plus particulièrement une de ses étapes appelée le processus créatif. Le processus créatif consiste à trouver un principe de solution (une solution non détaillée) en naviguant entre un besoin cible et une solution cible via une difficulté cible, source et une solution source.

2e Chapitre (Besoins)

Dans le second chapitre (II Besoins), nous nous intéressons d'abord aux différents modèles du processus de conception puis aux interactions existant entre le concepteur et le modèle. Pour la formalisation du processus créatif, cela nous a conduit à choisir un modèle informatique et descriptif. Afin de ne pas multiplier les formalismes manipulés par le concepteur, nous avons opté pour une approche synthétique. L'établissement du modèle informatique et descriptif apparaît alors comme la recherche de primitives permettant d'exprimer tout autre modèle.

La recherche de ces primitives nous conduit à considérer les connaissances utilisées. Celles-ci apparaissent alors comme des enchevêtrements complexes de connaissances qui peuvent être regardées sous trois points de vues, le système, la conception des systèmes, et la conception en général. Or le concepteur est amené à naviguer au fur et à mesure de

l'avancement du processus créatif entre ces trois points de vue. Cela nous incite à préciser que le modèle informatique descriptif basé sur des primitives doit être robuste vis-à-vis des changements de points de vue.

La bibliographie des modèles répondant à cette description en conception met en avant l'utilité de se focaliser sur l'évolution des descriptions exprimées par le concepteur et sur le système du point de vue de l'ontologie.

In fine, ce modèle s'il répond à ces objectifs induira par la formalisation des composants du processus créatif, une meilleure compréhension des mécanismes de conception. Ensemble cette compréhension et le modèle doivent pouvoir donner naissance à une méta méthode.

3e Chapitre (Mise en oeuvre)

Dans le troisième chapitre (III Modèle adaptatif), l'ensemble des spécifications précédentes, nous conduit à proposer une démarche holonique. Pour déterminer les holons, nous avons opté pour une démarche hypothéticodéductive consistant à faire l'hypothèse de holons (équivalent aux primitives).

Concrètement la démarche hypothéticodéductive consiste en une étude ontologique vérifiée empiriquement. Reynaud et Tort. [100] considèrent qu'en conception les ontologies en conception créative consistent en deux groupes :

1. la construction d'un modèle du domaine,
2. et la construction du modèle des tâches ou des comportements de résolution de problème appelé Problem-Solving Method ou PSM grâce à quelques méthodes telles que CommanKADS [107].

Pour Clercq et col. [26] les ontologies ainsi développées sont indépendantes du domaine de résolution ce qui les rend transférables à d'autres domaines. Mais elles sont aussi intimement liées aux procédures de résolution ce qui rend les primitives composant l'ontologie non transférables d'une procédure à une autre malgré les efforts de standardisation telle que le Unified Problem-Solving Method Development Language (UPML) [36]. Notre approche reconnaît donc l'importance des tâches (procédures ou comportement), mais propose de se focaliser sur le résultat de ces tâches à savoir

l'évolution de l'état du système qu'elles induisent. C'est pourquoi notre étude repose sur une algorithmique de création d'ontologie de domaine en trois étapes :

1. la conceptualisation du domaine,
2. l'ontologisation des concepts,
3. puis l'opérationnalisation de l'ontologie.

Pour opérationnaliser l'ontologie, nous avons choisi d'utiliser le langage logique OWL à travers un logiciel d'édition d'ontologie appelé Protégé-OWL. Le langage OWL formalise un domaine du discours en définissant des classes et des propriétés des classes. Pour satisfaire aux besoins d'acceptation (partages, acceptations, et préexistence) nous avons choisi la théorie des systèmes comme domaine de l'ontologie.

4e Chapitre (Application)

Dans le quatrième chapitre (IV Application), pour la phase de conceptualisation, une analyse textuelle nous a permis d'aboutir à un corpus de concepts entrants dans la définition du système.

En modélisant l'artefact comme un ensemble de paramètres et en caractérisant le processus créatif par l'assignation de valeurs au paramètre notre démarche s'assimile à la conception paramétrique (Parametric Design). Notre modèle est original par son ambition de modéliser la conception créative (et plus particulièrement le processus créatif) alors que la conception paramétrique est généralement employée en conception avec des ensembles prédéfinis de variables. Nous gardons de la conception paramétrique la description de l'artefact qui d'après Motta et Zdrahal [83] se compose de :

- paramètre ;
- valeurs (ou de plage de valeurs) ;
- contraintes ;
- préférences ;
- but ;
- prérequis.

Toutefois, d'après Wielinga [128] [4] la différence entre contraintes, préférences, but, et prérequis dépend des connotations plus ou moins positives que le concepteur leur porte. C'est pourquoi durant la phase d'ontologisation notre modèle ne retient qu'une seule catégorie, la valeur désirée. Ainsi, le corpus de concepts a été contextualisé grâce aux descriptions faites lors de l'étude de cas et la représentation de processus créatif précédemment décrite pour aboutir aux concepts primitifs suivants :

- Le concepteur,
- Le système,
- La ressource,
- Le paramètre,
- La valeur objectivée,
- La valeur désirée,
- La description,
- Et la relation,

Ces concepts ont été ensuite décrits par des schémas IDEF5 pour constituer une première ébauche de l'ontologie. Durant la phase d'opérationnalisation, cette première ontologie est précisée et saisie dans Protégé-OWL puis validée avec le raisonneur RacerPro.

Par nature les ontologies ne contiennent pas de connaissances procédurales. Afin d'en faire un modèle holonique du processus créatif en conception des systèmes , nous avons donc dû en préciser l'usage et les limites.

5e Chapitre (Applications)

Dans le cinquième chapitre (IV Application), nous montrons l'application du modèle à un cas d'étude. Par commodité de restitution, nous avons abrégé le modèle qui n'inclut pas toutes les classes et propriétés de l'ontologie. De même, le cas d'étude a été volontairement édulcoré pour :

- ne pas trahir d'informations sensibles sur l'entreprise,
- faciliter son appréhension,
- et augmenter sa typicité.

Par rapport à la version originale de l'étude, la version présentée ici se distingue principalement par l'absence de cul-de-sac ou fausses routes. En effet, les enchaînements de descriptions qui n'entrent pas directement dans le cheminement aboutissant à une solution ont été ignorés. Le processus créatif présenté ici perd donc son aspect tentaculaire. Cependant, l'étude des fausses routes reste une source d'informations intéressante pour étudier les stratégies de conception gagnantes.

Néanmoins, le cas d'étude n'en demeure pas moins suffisant pour contribuer à la formalisation du processus créatif en constituant une base de formalisation descriptive à l'approche TRIZ mise en œuvre (usage de la matrice TRIZ). Ainsi, nous avons été capables d'expliquer du moins en partie quelques gênes rencontrées par le concepteur dans la mise en œuvre de la matrice TRIZ sur ce cas d'étude. Par exemple, le passage à des descriptions de typologie différentes à des points de vue différents constitue un frein pour les concepteurs novices.

La formalisation du processus créatif met en avant l'existence de quatre typologies de descriptions différentes (1, 2-, 2+, 3) et permet d'une part de se concentrer sur la nature des transitions entreprises par le concepteur et d'autre part de réduire l'inertie psychologique véhiculée par les concepts de solution ou problème.

Il s'agit d'une ébauche, car pour être complet cette heuristique devrait comprendre des éléments de stratagème permettant de guider le concepteur vers une démarche inventive comme ceux rencontrés dans la TRIZ [5], les principes de Mayall [117], ou les principes de la conception conceptuelle innovante de Krol et col. [69].

V.2 Des perspectives

Ouvertures

Deux modes d'ouvertures possibles sont à considérer pour cette thèse :

1. Horizontalement à d'autres domaines que la conception des systèmes.
2. Verticalement à d'autres modes de conception que la conception créative.

Horizontalement, notre modèle holonique repose sur des bases qui sont celles des systèmes et pas seulement des systèmes. Il n'y a donc pas de raisons fondamentales s'opposant à son fonctionnement pour formaliser le processus créatif de tout autre artefact. Nous avons d'ailleurs pu vérifier son fonctionnement sur un cas d'école visant à améliorer la conception d'un presse-papier. Toutefois, cela demande de plus amples vérifications.

Verticalement, notre modèle a été réalisé dans le seul but de formaliser la conception créative. Cependant, la conception créative repose sur un espace problème où les variables et leurs plages de valeurs évoluent. Nous pourrions faire l'hypothèse que la conception routinière et la conception inventive sont des cas particuliers de la conception créative où l'espace d'évolution serait contraint. Sur la base de cette hypothèse, nous pouvons alors supposer que notre modèle fonctionne également pour la conception routinière et inventive.

Perspectives

Deux perspectives sont envisageables. Pour nous la première perspective consisterait à une mise à l'épreuve approfondie du modèle. Cette mise à l'épreuve aurait notamment pour but de vérifier de façon avancée la robustesse du modèle à des changements de plusieurs ordres portant sur le concepteur, le modélisateur, l'approche méthodologique et la nature du problème de conception. Nous pouvons ainsi anticiper un protocole expérimental où des paramètres tels que l'expérience en conception du concepteur, la connaissance de la situation de conception par le modélisateur et la complexité du problème varieraient graduellement. De plus, la modélisation de cas traités par d'autres approches méthodologiques comme l'Axiomatic Design ou la Quality Function Deployment paraît être essentielle.

Une seconde perspective serait le développement d'un système expert (SE) comme celui déjà ébauché par l'heuristique présentée dans l'étude de cas (en section IV.3) ou celui proposé par Dubois [33] depuis la caractérisation des connaissances liées au concept de contradiction dans la TRIZ. Cette seconde perspective envisageable en parallèle de la première pose le problème du passage de l'observation a posteriori à l'action a priori. Pour cela, une définition claire des objectifs doit être posée en corrélation avec les objectifs de recherche du laboratoire. S'agit-il par exemple d'aider les concepteurs à développer un à un leur compétence de conception ou de proposer un outil assistant à la conception pour l'ensemble des concepteurs ? Évidemment, la nature de ces objectifs affectera considérablement le futur protocole expérimental.

Bibliographie

- [1] J.-M. Adam. *Les textes : Types et prototypes. Récit, description, argumentation, explication et dialogue*. Série Linguistique. Nathan Université, Paris, 1992.
- [2] B. Adelson. Cognitive research: Uncovering how designers design; cognitive modeling: Explaining and predicting how designers design. *Research in Engineering Design*, 1(1):35–42, 1989.
- [3] AFNOR. Outils de management : Maîtrise du processus de conception et développement. Norme française FD X 50-127, Association Française de NORmalisation (AFNOR), 2002.
- [4] H. Akkermans, B. J. Wielinga, and G. Schreiber. Steps in constructing problem solving methods. In *Proceedings of the 7th European Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems*, pages 45–65, London, UK, 1993. Springer-Verlag.
- [5] G. Altshuller. *Creativity as an exact science: The theory of the solution of inventive problems*. Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1984.
- [6] C. Anderson and P. Bunce. Next generation manufacturing systems (ngms). White paper, CAM-I Next Generation Manufacturing Systems Program, 2000.
- [7] W. R. Ashby. *Introduction to cybernetics*. John Wiley, NewYork, 1964.
- [8] S. Bechhofer, F. Van Harmelen, J. Hendler, I. Horrocks, D. L. McGuinness, P. F. Patel-Schneider, and L. A. Stein. Owl web ontology language reference. W3c recommendation, W3C, 2004.
- [9] P. C. Benjamin, C. P. Menzel, R. J. Mayer, F. Fillion, M. T. Futrell, P. S. deWitte, and M. Lingineni. Idef5 ontology description capture method. Method Report F33615-C-90-0012, Information Integration for Concurrent Engineering (IICE), 1994.
- [10] L. v. Bertalanffy. *General system theory: Foundations, development, applications*. Braziller, revised edition (from 1968) edition, 1976. Trad. franç., Théorie générale des systèmes. Paris, Dunod, 1973.
- [11] N. Bonnardel. Towards understanding and supporting creativity in design: Analogies in a constrained cognitive environment. *Knowledge-Based Systems*, 13(7-8):505–513, 2000.
- [12] N. Bonnardel and E. Marmèche. Evocation processes by novice and expert designers: Towards stimulating analogical thinking. *Creativity and Innovation*

- Management*, 13(3):176–186, 2004.
- [13] N. Bonnardel and E. Marmeche. Towards supporting evocation processes in creative design: A cognitive approach. *International Journal of Human-Computer Studies*, 63(4-5):422–435, 2005.
- [14] N. Bonnardel and T. Sumner. Supporting evaluation in design. *Acta Psychologica*, 91(3):221–244, 1996.
- [15] K. E. Boulding. *Ecodynamics: A new theory of societal evolution*. Sage Publications, 1978.
- [16] T. Bray, J. Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, E. Maler, and F. Yergeau. Extensible markup language (xml) 1.0. W3C Recommendation Fourth Edition, W3C, 2006.
- [17] D. Brickley and R. Guha. Rdf vocabulary description language 1.0 : Rdf schema. W3c recommendation, W3C, 2004.
- [18] M. Brugidou, C. Escoffier, H. Folch, S. Lahlou, D. Le Roux, P. Morin-Andreani, and G. Piat. Les facteurs de choix et d'utilisation de logiciels d'analyse de données textuelles. In *5èmes Journées Internationales d'Analyse Statistique des Données Textuelles (JADT 2000)*, 2000.
- [19] T. Bylander and B. Chandrasekaran. Generic tasks for knowledge-based reasoning: The 'right' level of abstraction for knowledge acquisition. *International Journal of Man-Machine Studies*, 26(2):231–243, 1987.
- [20] G. Coates, A. H. B. Duffy, I. Whitfield, and W. Hills. Engineering management: Operational design coordination. *Journal of Engineering Design*, 15(5):433–446, 2004.
- [21] D. S. Cochran. The application of axiomatic design to the design of the product development organization. International Conference on Axiomatic Design: ICAD, 2000.
- [22] D. S. Cochran, W. Eversheim, G. Kubin, and M. L. Sesterhenn. The application of axiomatic design and lean management principles in the scope of production system segmentation. *International Journal of Production Research*, 38(6):1377–1396, 2000.
- [23] consortium World Wide Web. W3.org, june 2007.
- [24] F. S. Correa da Silva, W. W. Vasconcelos, D. S. Robertson, V. Brilhante, A. C. V. de Melo, M. Finger, and J. Agusti. On the insufficiency of ontologies: Problems in knowledge sharing and alternative solutions. *Knowledge-Based Systems*, 15(3):147–167, 2002.

- [25] N. Cross. *Engineering design methods: Strategies for product design*. Wiley, 1994.
- [26] P. A. de Clercq, A. Hasman, J. A. Blom, and H. H. M. Korsten. The application of ontologies and problem-solving methods for the development of shareable guidelines. *Artificial Intelligence in Medicine*, 22(1):1–22, 2001.
- [27] D. Deneux. *Rapport de HDR : Méthodes et modèles pour la conception concourante*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2002.
- [28] G. Donnadiou, D. Durand, D. Neel, E. Nunez, and L. Saint-Paul. L’approche systémique : De quoi s’agit-il ? Synthèse des travaux du groupe afscet, Association Française de Science des Systèmes, 2003.
- [29] K. Dorst. The problem of design problems – problem solving and design expertise. *Journal of design research*, 4(2), 2004.
- [30] K. Dorst and L. Royakkers. The design analogy: A model for moral problem solving. *Design Studies*, 27(6):633–656, 2006.
- [31] H. L. Dreyfus. *What Computers Still Can’t Do: A Critique of Artificial Reason*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1992.
- [32] Druide. *Dictionnaire Druide*. Druide Infomatique Inc., 2006.
- [33] S. Dubois. *Thèse : Contribution à la formulation des problèmes en conception de systèmes techniques. Etude basée sur la TRIZ*. PhD thesis, INSA de Strasbourg - Université Louis Pasteur, 2004.
- [34] N. F. O. Evbuomwan, S. Sivalogathan, and A. Jebb. A survey of design philosophies, models, methods and systems. In R.-U. . Mechanical Engineering Publications, London, editor, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, volume 210, pages 301–320, 1996.
- [35] D. Fensel, E. Motta, S. Decker, and Z. Zdrahal. Using ontologies for defining tasks, problem-solving methods and their mappings. *Lecture Notes in Computer Science*, 1319:113–128, 1997.
- [36] D. Fensel, E. Motta, F. van Harmelen, V. R. Benjamins, M. Crubezy, S. Decker, M. Gaspari, , R. Groenboom, W. Grosso, M. Musen, E. Plaza, G. Schreiber, R. Studer, and B. Wielinga. The unified problem-solving method development language (upml). *Knowledge and Information Systems*, 5(1):83–131, 2003.
- [37] D. Fensel and R. Straatman. The essence of problem-solving methods: Making assumptions to gain efficiency. *International Journal of Human-Computer Studies*, 48(2):181–215, 1998.

- [38] J. W. Forrester. *Industrial dynamics*. M.I.T. Press, 1961.
- [39] M. S. Fox. The tove project towards a common-sense model of the enterprise. In *IEA/AIE '92: Proceedings of the 5th international conference on Industrial and engineering applications of artificial intelligence and expert systems*, pages 25–34, London, UK, 1992. Springer-Verlag.
- [40] M. S. Fox and M. Gruninger. Enterprise modeling. *AI Magazine*, 19(3):109–121, 1998.
- [41] M. J. French. *Conceptual design for engineers*. Design Council, London, 1985.
- [42] E. Friedman-Hill. *JESS in action: Java rule-based systems*. Manning Publications Co., 2003.
- [43] F. Geiskopf. *Formalisation et exploitation des contraintes produit/process pour la conception de systèmes de production : Application à l'usinage grande vitesse*. Thèses de doctorat, Université Louis Pasteur, <http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/191/>, 2004.
- [44] J. H. Gennari, M. A. Musen, R. W. Ferguson, W. E. Grosso, M. Crubézy, H. Eriksson, N. F. Noy, and S. W. Tu. The evolution of protégé: An environment for knowledge-based systems development. *International Journal of Human Computer Studies*, 58(1):89–123, 2003.
- [45] J. S. Gero. Design prototypes. a knowledge representation schema for design. *AI Magazine*, 11(4):26–36, 1990.
- [46] J. P. Gibbs. *Control: Sociology's Central Notion*. Urbana: University of Illinois Press., 1986.
- [47] W. Gordon. *Synetics, the development of creativity capacity*. New York., 1961.
- [48] A. Guenebaut, M. Barth, and R. De Guio. Towards a reference model for problem-solving in manufacturing system design. In E. Ltd, editor, *Information Control Problems in Manufacturing*, volume 2, page 455. Oxford, UK, 2006.
- [49] A. Guenebaut, M. Barth, and R. De Guio. A generic model of the creative process in production systems design. In *19th International Conference on Production Research*, volume Re-engineering & Innovative approaches to Design; New Technologies and Manufacturing Processes. IFPR, 2007.
- [50] A. Guenebaut, M. Barth, and R. De Guio. Modèle générique du processus créatif appliqué à la conception des systèmes de production. In *18ème Congrès Français de Mécanique*, volume Systèmes de production, conception. AFM, 2007.
- [51] V. Haarslev and R. Moller. Racer: An owl reasoning agent for the semantic web. In *IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence*, volume

- International Workshop on Applications, Products and Services of Web-based Support Systems, pages 91–95, Halifax, Canada, 2003.
- [52] S. O. Hansson. Decision theory : A brief introduction. Technical report, Uppsala University, 1994.
- [53] A. Hatchuel, P. L. Masson, and B. Weil. C-k theory in practice c-k theory in practice: Lessons from industrial application. In ENSMP, editor, *Proceedings of Design 2004*. The international design conference, 2004.
- [54] A. Hatchuel and B. Weil. C-k theory: Notions and applications of a unified design theory. In *The Sciences of Design: The Scientific Challenge for the 21st Century*. The Herbert Simon International Conference on Design Sciences, 2002.
- [55] A. Hatchuel and B. Weil. A new approach of innovative design: An introduction to c-k theory. In *ICED 03*. International Conference on Engineering Design, 2003.
- [56] C. Heavey and J. Browne. A model management systems approach to manufacturing systems design. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 8(2):103–130, 1996.
- [57] V. Hubka and W. E. Eder. *Theory of technical systems: A total concept theory for engineering design*. Springer-Verlag, New-York, 1988.
- [58] V. Hubka and W. E. Eder. *Design science: Introduction to needs, scope and organization of engineering design knowledge*. Springer, 1996.
- [59] H. R. Jorysz and F. B. Vernadat. Cimosia part 1: Total enterprise modelling and function view. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 3:144–156, 1990.
- [60] S. Joseph. Design systems and paradigms. *Design Studies*, 17(3):227–239, 1996.
- [61] R. P. Judd, R. S. VanderBok, M. E. Brown, and J. A. Sauter. Manufacturing system design methodology: Execute the specification. pages 97–115, 1990.
- [62] R. Jugulum and M. Sefik. Building a robust manufacturing strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 35(1-2):225–228, 1998.
- [63] G. Kassel, M. Abel, C. Barry, P. Boulitreau, C. Irastorza, and S. Perpette. Construction et exploitation d’une ontologie pour la gestion des connaissances d’une équipe de recherche. In *IC2000 :Actes des journées francophones d’ingénierie des connaissance*. IC, 2000.
- [64] A. M. King and S. Sivaloganathan. Development of a methodology for concept selection in flexible design strategies. *Journal of Engineering Design*, 10(4):329–349, 1999.

- [65] Y. Kitamura, M. Kashiwase, M. Fuse, and R. Mizoguchi. Deployment of an ontological framework of functional design knowledge. *Advanced Engineering Informatics*, 18(2):115–127, 2004.
- [66] A. Koestler. *The ghost in the machine*. Arcane Book, London, UK, 1967.
- [67] V. Kokotovich and T. Purcell. Mental synthesis and creativity in design: An experimental examination. *Design Studies*, 21(5):437–449, 2000.
- [68] J. Kolodner. Understanding creativity: A case-based approach. *Topics in Case-Based Reasoning, Lectures Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag*, 837:3–20, 1993.
- [69] E. Kroll, S. S. Condoor, and D. G. Jansson. *Innovative conceptual design: Theory and application of parameter analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [70] D. Kucharavy. Recommendation of using inventive principles and altshuller’s matrix. Mastère spécialisé en conception innovante, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, 2002.
- [71] J. Ladriere. *Les limitations internes des formalismes. Etude sur la signification du theoreme de godel ...* Gauthier Villars, Paris, 1957.
- [72] J. H. Larkin, J. McDermott, D. P. Simon, and H. A. Simon. Models of competence in solving physics problems. *Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal*, 4(4):317–345, 1980.
- [73] J. Lemoigne. *La théorie du système général: Théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris, 1994.
- [74] S. H. Liao. Expert system methodologies and applications-a decade review from 1995 to 2004. *Expert Systems with Applications*, 28(1):93–103, 2005.
- [75] H. Lipson and N. P. Suh. Towards an universal knowledge database for design automation. International Conference on Axiomatic Design: ICAD, 2000.
- [76] M. F. López, A. Gómez-Pérez, J. P. Sierra, and A. P. Sierra. Building a chemical ontology using methontology and the ontology design environment. *IEEE Intelligent Systems and Their Applications*, 14(1):37–46, 1999.
- [77] T. Love. Philosophy of design: A meta-theoretical structure for design theory. *Design Studies*, 21(3):293–313, 2000.
- [78] D. L. Mann. Better technology forecasting using systematic innovation methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 70(8):779–795, 2003.
- [79] H. Maturana and F. Varela. *L’arbre de la connaissance*. Addison-Wesley France, Paris, 1994.

- [80] R. E. Mayer. A taxonomy for computer-based assessment of problem solving. *Computers in Human Behavior*, 18(6):623–632, 2002.
- [81] W. S. McCulloch. *Embodiments of mind*. M.I.T. Press, 1965.
- [82] J.-P. Micaëlli and J. Forest. *Artificialisme : Introduction à une théorie de la conception*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003.
- [83] E. Motta and Z. Zdrahal. Parametric design problem solving. In *The 10th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-Based System Workshop*, 1996.
- [84] E. Motta and Z. Zdrahal. A library of problem-solving components based on the integration of the search paradigm with task and method ontologies. *International Journal of Human-Computer Studies*, 49(4):437–470, 1998.
- [85] NGM-Project-Office. Next-generation manufacturing (ngm): A framework for action. Executive overview, Agility Forum, Leaders for Manufacturing, and Technologies Enabling Agile Manufacturing, USA, 1997.
- [86] I. Nonaka, P. Reinmoeller, and D. Senoo. The 'art' of knowledge: Systems to capitalize on market knowledge. *European Management Journal*, 16(6):673–684, 1998.
- [87] I. Nonaka, K. Umemoto, and D. Senoo. From information processing to knowledge creation: A paradigm shift in business management. *Technology in Society*, 18(2):203–218, 1996.
- [88] A. F. Osborn. *Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Problem Solving*. Charles Scribener's Sons, New York, 1953.
- [89] R. Oxman. Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3):229–265, 2006.
- [90] G. Pahl and W. Beitz. *Engineering design: A systematic approach*. Springer Verlag, London, 2nd edition, 1996.
- [91] J. Perrin. *Concevoir l'innovation industrielle, méthodologie de conception de l'innovation*. CNRS éditions, Paris, 2001.
- [92] Principia-Cybernetica. Web dictionary of cybernetics and systems.
- [93] S. Pugh. Design activity models: Worldwide emergence and convergence. *Design Studies*, 7(3):167–173, 1986.
- [94] S. Pugh. Knowledge-based systems in the design activity. *Design Studies*, 10(4):219–227, 1989.
- [95] A. T. Purcell and J. S. Gero. Effects of examples on the results of a design activity. *Knowledge-Based Systems*, 5(1):82–91, 1992.

- [96] A. T. Purcell and J. S. Gero. Design and other types of fixation. *Design Studies*, 17(4):363–383, 1996.
- [97] A. T. Purcell and J. S. Gero. Drawings and the design process: A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology. *Design Studies*, 19(4):389–430, 1998.
- [98] Racer-Systems. Racerpro, june 2007.
- [99] I. M. M. J. Reymen, D. K. Hammer, P. A. Kroes, J. E. van Aken, C. H. Dorst, M. F. T. Bax, and T. Basten. A domain-independent descriptive design model and its application to structured reflection on design processes. *Research in Engineering Design*, 16(4):147–173, 2006.
- [100] C. Reynaud and F. Tort. Using explicit ontologies to create problem solving methods. *International Journal of Human Computer Studies*, 46(2-3):339–364, 1997.
- [101] N. F. M. Roozenburg and J. Eekels. *Product design: Fundamentals and methods*. Wiley, New York, 1995.
- [102] J. d. Rosnay. *Le Macroscopie : vers une vision globale*. éditions du Seuil, Paris, 1995.
- [103] O. A. Saenz and C.-S. Chen. A framework for enterprise systems engineering. In *LACCEI'2004 : Challenges and Opportunities for Engineering Education, Research and Development*. Second LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 2004.
- [104] F. d. Saussure, C. Bally, A. Sechehayé, A. Riedlinger, and T. De Mauro. *Cours de linguistique générale*. Payot, Paris, 1995.
- [105] D. A. Schön. *Educating the reflective practitioner : toward a new design for teaching and learning in the professions*. Jossey-Bass, San Francisco, 1984.
- [106] D. A. Schon. Designing as reflective conversation with the materials of a design situation. *Research in Engineering Design*, 3(3):131–147, 1992.
- [107] G. Schreiber, B. Wielinga, R. de Hoog, H. Akkermans, and W. Van de Velde. Commonkads: A comprehensive methodology for kbs development. *Expert, IEEE*, 9(6):28–37, 1994.
- [108] H. A. Simon. *The sciences of the artificial*. MIT Press, 1981.
- [109] H. A. Simon and A. Newell. *Human problem solving*. Prentice-Hall, 1972.
- [110] M. K. Smith, C. Welty, and D. L. McGuinness. Owl web ontology language guide. W3c recommendation, W3C, 2004.

- [111] Stanford.edu. Protégé, june 2007.
- [112] R. Stratton and D. Mann. Systematic innovation and the underlying principles behind triz and toc. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3):120–126, 2003.
- [113] N. P. Suh. *The principles of design*, volume 6 of *Oxford Series on Advanced Manufacturing*. Oxford University Press, New York, 1990.
- [114] N. P. Suh. Axiomatic design theory for systems. *Research in Engineering Design*, 10(4):189–209, 1998.
- [115] N. P. Suh. A theory of complexity, periodicity and the design axioms. *Research in Engineering Design*, 11(2):116–132, 1999.
- [116] D. Tate and M. Nordlund. Synergies between american and european approaches to design, integrated design and process technology. In *IDPT Austin, TX*, volume 1, pages 103– 111. Integrated Design and Process Technology (IDPT), Society for Design and Process Science, 1995.
- [117] P. Taylor. Interpreting mayall’s ‘principles in design’. In *ASWEC ’01: Proceedings of the 13th Australian Conference on Software Engineering*, page 297, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [118] J. A. Tompkins, J. A. White, Y. A. Bozer, and J. M. A. Tanchoco. *Facilities planning*. Wiley, 3rd edition edition, 2002.
- [119] H. K. Tonshoff, M. Winkler, and J. C. Aurich. Product modelling for holonic manufacturing systems. pages 121–127, 1994.
- [120] A. Tsoukias. Extending the c-k design theory: A theoretical background for personal design assistants. *Journal of Engineering Design*, 16:411, 2005.
- [121] S. W. Tu, H. Eriksson, J. H. Gennari, Y. Shahar, and M. A. Musen. Ontology-based configuration of problem-solving methods and generation of knowledge-acquisition tools: Application of protégé to protocol-based decision support. *Artificial Intelligence in Medicine*, 7(3):257–289, 1995.
- [122] D. G. Ullman. The status of design theory research in the united states. *Design Studies*, 12(4):204–208, 1991.
- [123] S. Vajna. Approaches of knowledge-based design. volume 2 A, pages 375–382, Info. Technol. in Mech. Engineering, Otto-von-Guericke University, Post Box 4120, D-39016 Magdeburg, Germany, 2003.
- [124] J. E. van Aken. Valid knowledge for the professional design of large and complex design processes. *Design Studies*, 26(4):379–404, 2005.
- [125] J. Vettorazzi, C. N. and G. N. Telles. The holonic system paradigm (for

- manufacturing). *Management of Engineering and Technology*, 2001. *PICMET '01. Portland International Conference on*, 1:88, 2001.
- [126] R. Von Der Weth. Design instinct? - the development of individual strategies. *Design Studies*, 20(5):453–463, 1999.
- [127] B. Wieland. Designing information technology in the postmodern age: From method to metaphor : R. coyne, the mit press, cambridge, ma, 1995, pp. xiii + 399. *Information Economics and Policy*, 9(2):177–181, 1997.
- [128] B. Wielinga, H. Akkermans, and G. Schreiber. A formal analysis of parametric design. volume Proceedings of the 9th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop, Alberta, Canada, 1995. University of Calgary, SRDG Publications.
- [129] N. Wiener. *Cybernetics or control and communication in the animal and machine*. M.I.T. Press, 1961.
- [130] WordNet. Web dictionary wordnet 3.0, 2006.
- [131] B. Wu. *Manufacturing systems design and analysis*. Springer-Verlag, 1994.
- [132] J. Yen, S. H. Teh, and W. M. Lively. Principled modeling and automatic classification for enhancing the reusability of problem solving methods of expert systems. *Applied Intelligence*, 8(2):139–155, 1998.

Annexe.

A1. Article pour INCOM 2006, Saint-Étienne.

A. Guenebaut, M. Barth, and R. De Guio. Towards a reference model for problem-solving in manufacturing system design. In E. Ltd, editor, Information Control Problems in Manufacturing, volume 2, page 455. Oxford, UK, 2006.

Towards a reference model for problem-solving in manufacturing system design

Adrien GUENEBAUT, Marc BARTH, Roland DE GUIO

in INCOM'2006 : May, 17-19 2006, Saint-Etienne, France : preprints. Volume 3,
Operational research / 12th IFAC Symposium on information control in
manufacturing / Alexandre Dolgui, Gérard Morel, Carlos E. Pereira ; [S.I.] : IFAC,
2006, page 455-...

Annexe A1 (6 pages) :

La publication présentée ici dans la thèse est soumise à des droits détenus par un éditeur commercial.

Lien vers le site de l'éditeur :

<http://www.emse.fr/incom06/>

La version imprimée de cette thèse peut être consultée à la bibliothèque ou dans un autre établissement via une demande de prêt entre bibliothèques (PEB) auprès de nos services :

<http://www-sicd.u-strasbg.fr/services/peb/>

A2. Article pour ICPR 2007, Valparaiso Chili.

A. Guenebaut, M. Barth, and R. De Guio. A generic model of the creative process in production systems design. In 19th International Conference on Production Research, volume Re-engineering & Innovative approaches to Design; New Technologies and Manufacturing Processes. IFPR, 2007.

A generic model of the creative process in production systems design

Adrien Guenebaut, Cecilia Zanni, Marc Barth, Roland de Guio

**In 19th International Conference on Production Research, volume Re-engineering
& Innovative approaches to Design; New Technologies and Manufacturing
Processes ; [S.I.] : IFPR, 2007**

La publication présentée ici dans la thèse est diffusée en ligne gratuitement sur le site
suivant :

<http://www.icpr19.cl/mswl/msw/T1.html>

A GENERIC MODEL OF THE CREATIVE PROCESS IN PRODUCTION SYSTEMS DESIGN

Adrien Guénebaut, Cecilia Zanni, Marc Barth, Roland de Guio

LGECO, INSA de Strasbourg, 24 Bd de la Victoire, 67084 Strasbourg, France

Abstract

The creative process is a key activity in production systems design that requires a certain level of expertise. The capitalization of expert knowledge is a means of reducing the time of design and of widening the field of particular solutions under consideration by the novice designer as well as the experienced one.

Our contribution is a formal and generic model to support and capitalize the whole creative process in production systems design. This model is built using an ontology, based on the primitive concepts of systems theory, which makes it independent and adaptable to the various design methods.

Using this model, we present an industrial application concerning a problem of a workshop layout.

Keywords:

Manufacturing system, holonic model, design.

1 INTRODUCTION

To satisfy the ever more demanding expectations of customers, manufacturing companies are engaged in improvement strategies for their manufacturing systems. Manufacturing systems design must therefore always be more effective (less required means, faster results) and more efficient (more pertinent solutions, less risks) in a variety of contexts. As with product design, these demands of effectiveness and efficiency compel companies to use information technologies to design their manufacturing systems.

"Next-Generation Manufacturing" [1] makes it obvious that virtual manufacturing systems design must go beyond its current use towards the integration of the whole design process. From a technical point of view, this fact implies having easily computerized, therefore formalized, design data and tasks. Our research work intends to contribute to the formalisation of these useful elements in order to implement virtual design of manufacturing systems.

H. Simon [2] defined design as problem solving, composed of a set of relations between requirement, problem, solution and evaluation. The design process of a manufacturing system initially consists in developing a particular solution to either a stated need for evolution or to functional requirements. The designer subsequently evaluates the particular found solution. A particular solution is the definition of a manufacturable artefact (as a made object), which satisfies the needs expressed in a particular context. The artefact can be tangible, such as a means of handling, or abstract, such as a layout plan. The designer is an individual, a group or an entity, internal or external to the company, who carries out the elaboration of the solution.

In the Newell and Simon theory [3] (problem-space search), the designer solves problems by searching in the problem space. This is defined by the designer's reasoning and knowledge in an abstract way in the form of operators. According to Gero [4], this theory induces classification of design processes, in terms of a problem space as a function of research variables:

1. If neither the design variables nor their ranges of possible values change during design, we will talk about routine design.
2. If the design variables do not change but their ranges of possible values do change during design, we will talk about inventive design.

3. If the design variables and their ranges of possible values change during design, we will talk about creative design.

The main contributors in creative design such as Cross [5], French [6], Hubka & Eder [7], Pahl & Beitz [8], Pugh [9], Ullman [10], differentiate several stages or design activities. Nevertheless, Roozenburg and Eekels [11] state that many of these processes incorporate common parts, mainly the search for solution principles [12], also known as preliminary design or creative process. The creative process is, thus, a deliberate effort on the designer's behalf to travel between an explicit or implicit description of the problem manifestation and a solution description, which may be more or less detailed within a variable problem space.

Independently of the implemented approach during a creative process, the designer refers to source solutions [13]. A book, a list, solutions memorized by the designer or obtained by studying existing systems, constitute formal or abstract source solutions. The designer extracts pertinent features from them to build a target solution [14]. A target solution is a proposed solution composed of the studied system and features of source solutions.

Those target or source problems and solutions do not exist by themselves but through the knowledge they contain. In the field of design, Van Aken [15] proposes three knowledge categories according to the considered point of view: knowledge of the object, of the realization of the object, and of the design process. Each of these three points of view contain tacit or explicit knowledge.

Various research works provide some formalisation elements on only one knowledge category like the design process or the problem.

Among others, Jonassen [20] provides a taxonomy of the problem that could help to formalise problem-solving knowledge. Based on the complexity and the structure of the problem, he proposes 11 kinds of problems:

1. Logical
2. Algorithmic
3. Story
4. Rule-using
5. Decision making
6. Troubleshooting
7. Diagnosis-Solution
8. Strategic performance

9. Case analysis
10. Design
11. Dilemma

But even within this taxonomy, there exists an infinity of ways to represent a problem. Smith [21] proposes 2 types of variations in problem representations:

1. The designer is influenced by the nature of the problem, for example, by the amount of information involved.
2. The designer is also influenced by himself, for example, by his level of expertise or his character.

Concerning the design process, the designer has to cover different knowledge categories, and therefore, to manage different formalisms. This multiplicity constitutes a drawback in the design of manufacturing systems.

Other works formalise and unify different knowledge categories [16]. Their universality contribute to increasing the fluidity of the creative process flow. But according to Bylander and Chandrasekaran [17], knowledge representation for problem solving is highly affected by the nature of the problem and the applied resolution strategy, such as with the matrix of the PSD laboratory (at MIT) [18]. The PSD matrix formalises knowledge on the realisation of the object, lean manufacturing, with the help of some knowledge on the design process, Axiomatic Design [19].

Several research works propose different approaches to liberate themselves from the complexity of robust knowledge formalisation (robust in relation to the nature of the problem and the applied resolution strategy).

In design, some research suggests a global approach, which is independent of any viewpoint and centred on propositions [22]. Propositions are verbalisations of the descriptions made by the designer during the creative process. Another approach consists in focussing on the topic of the proposition, the production system.

We propose to combine those focussing approaches in a "holonic" approach, similar to the one used by Koestler [23], for the description of complex systems, such as the observation of social organisations.

The word "holon" or "holonic" is a neologism from Koestler composed of the Greek word $\text{o}\lambda\omicron\varsigma$ (holo) that means "the whole" and the suffix "on" that means "being a part of" as in an electron. The paradigm of the composition of the word holon shows the hybrid nature of the whole and the parts. By forming a hierarchic structure (called "holarchy") the holons allow the description of complex situations, such as designer propositions. The core advantages of using holons to formalise knowledge are robustness (holons are fixed knowledge classes) and adaptability (holarchies evolve as new propositions are stated).

In summary, we want to formalize the creative process through the knowledge that is expressed in the different propositions made by the designer, during the design process, using a holonic model focused on the manufacturing system.

2 SCIENTIFIC APPROACH AND RESULTS

Holons are determined by an ontological study. Ontologies are defined as both [24]:

- The conceptualization of a domain, i.e. a choice on the way to describe a domain.
- The specification of this conceptualization, i.e. its formal description.

We use IDEF5 [25] to capture our ontology (Ontology Description Capture Method developed by the Information Integration for Concurrent Engineering, IIICE). It offers a standard and easily interpretable description of the classes (concepts) and properties (links between the concepts) that form the ontology.

Before using IDEF5, we need to establish a framework for determining the holons. This framework has to take into account the experts' acceptance criteria, mainly simplicity and learning speed. Therefore the holons have to rely upon an existing and shared base to respect these criteria. These facts have led us to Von Bertalanffy [26] and William Ross Ashby [27] Systems Theory as the theoretical foundation for the following holons:

- DESIGNER: Human organization that undertakes the design.
- SYSTEM: Bounded but variable set of interrelated elements, on which the designer turns his attention to.
- RESOURCE: Subset of elements that compose the system at the designer's disposal.
- PARAMETER: Distinctive and variable characteristic of a resource.
- VALUE: Quantitative or qualitative determination of a parameter.
 - OBJECTIVISED VALUE: Value taken or to be taken by the system.
 - WANTED VALUE: Value of a parameter that is wanted by the designer or constrained by the context.

A PROPOSITION is composed by the previous holons at a given time.

A RELATION of a certain kind (i.e. equivalence or implication) has two sets of PROPOSITIONS, an input one and an output one.

Figure 1 shows the IDEF5 diagram of all the classes we have considered for our creative process model.

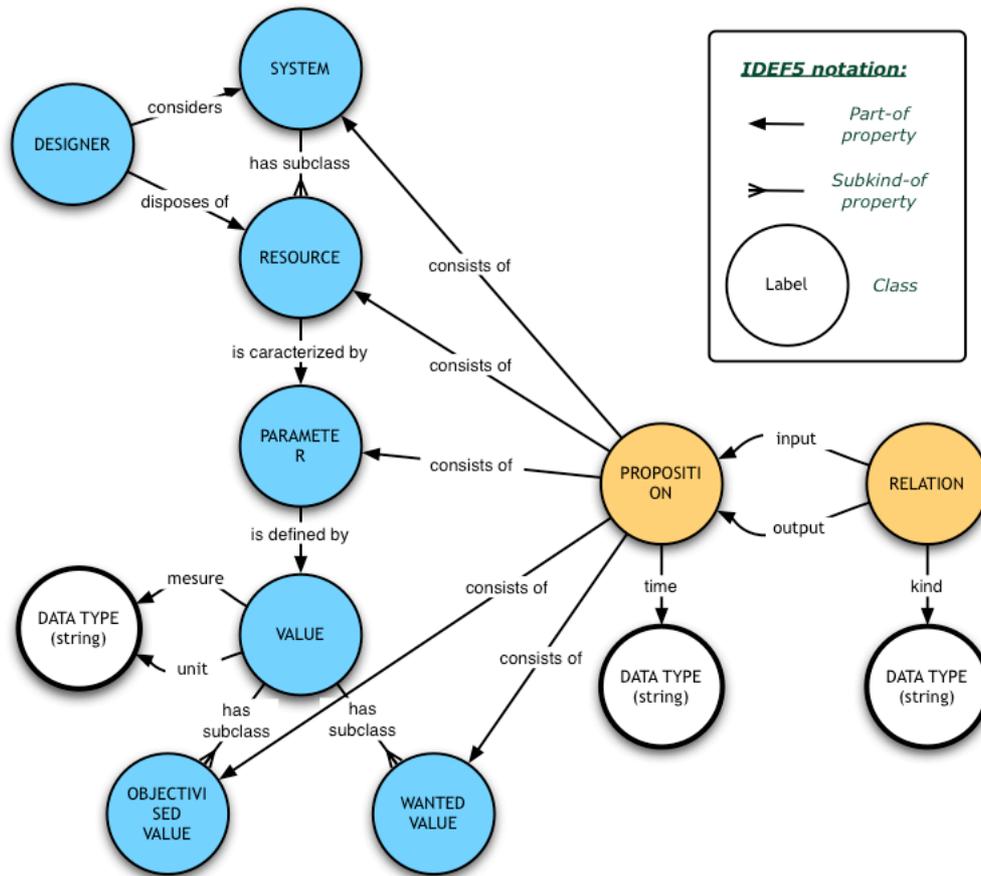


Figure 1: IDEF5 classes diagram.

3 EXPERIMENTAL VALIDATION

Our model has to allow the formalisation of the designer propositions during the creative process in manufacturing design. A validation has been carried out during an industrial case study.

The industrial case study is concerned with a workshop layout issue, which was solved using TRIZ [28], domain knowledge on workshop implantation (Facility Layout [29]) and also knowledge of the functioning of this workshop.

We will consider a simplification of the real industrial problem. The production workshop is composed of three workstations W1, W2, W3, an upstream stock (Up S) and a downstream stock (Down S) established in a straight line. The production relates to two articles A and B whose respective routings are Up S, W1, W2, W3, Down S (for product A) and Up S, W1, Down S (for product B) as shown by the arrows in Figure 2.

The designer wishes to reduce the total handling distance between the workstations and the upstream and downstream stocks. The considerable movement carried out by product B between W1 and Down S (dotted arrow in Figure 2) is not satisfactory because product B is manufactured in larger quantities than product A.

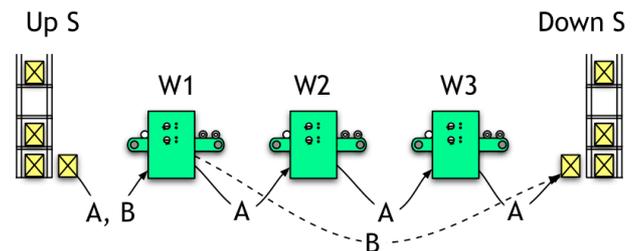


Figure 2: Production workshop in a line.

The designer suggests placing the upstream stock Up S between workstations W1 and W2. This solution allows the reduction of the handling distance (bold lines in Figure 3) but induces a backward movement of product A between W3 and Down S (dotted lines in Figure 3).

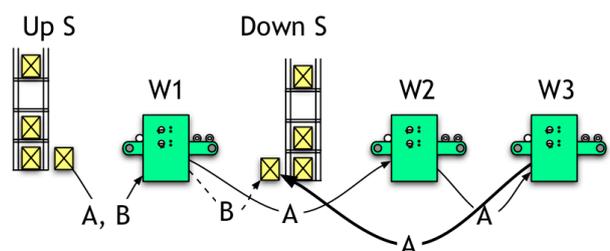


Figure 3: Upstream stock between W1 and W2.

Table 1 illustrates the utilisation of our holonic model for modelling the creative process.

Every row corresponds to a proposition of the case study and its time (that is, the relative order in which the different propositions were made).

Arrows indicate the relations (such as the implication) between two different propositions or within one proposition. The tip of the arrow represents the output proposition and the rounded end the input one.

For example, the proposition at time 8 implies the proposition at time 12:

(8, Codica, Workshop, Handling path, Deformations, Zero, Zero)
 ⇒ (12, T.R.I.Z., X, Motionless object, Shape, ☹, ☺)

Table 1: Industrial case interpretation with the holons

Time	Designer	System	Resource	Parameter	Objectivised value	Wanted value
1	Codica	Workshop	Upstream stock (Up S)	Position in the manufacturing line	At the end of production line	Between workstations W1 and W2
2	Codica	Workshop	Product B	Handling distance	Important	Weak
7	Codica	Workshop	Handling path	Length	Important	Weak
11	T.R.I.Z.	X	Motionless object	Length	☹	☺
3	Codica	Workshop	Product A	Number of backward movements	Zero	Zero
8	Codica	Workshop	Handling path	Deformations	Zero	Zero
12	T.R.I.Z.	X	Motionless object	Shape	☺	☺
4	Codica	Workshop	Up S	Position in the manufacturing line	Between W1 and W2	Between W1 and W2
5	Codica	Workshop	Product B	Handling distance	Weak	Weak
9	Codica	Workshop	Handling path	Length	Weak	Weak
13	T.R.I.Z.	X	Motionless object	Length	☺	☺
6	Codica	Workshop	Product A	Number of backward movements	Not-Zero	Zero
10	Codica	Workshop	Handling path	Deformations	Complex	Simple
14	T.R.I.Z.	X	Motionless object	Shape	☹	☺
15	T.R.I.Z.	X	Motionless object	Straightness	High	Low
16	Codica	Workshop	Handling path	Straightness	High	Low
17	Codica	Workshop	Down S	Position across the line	Next to W1	
18	Codica	Workshop	W3	Position across the line	Next to W2	

For the sake of simplicity, we will not consider all the ontology elements.

Times 1, 2 and 3 (grey coloured rows) correspond to the situation represented in Figure 2 and times 4, 5 and 6 (grey coloured rows) correspond to the situation in Figure 3.

When using TRIZ the problem situation has to be expressed in the form of a contradiction. Times 7 to 14 correspond to the evolution of the contradiction formulation

with the TRIZ matrix. During times 7, 8, 9 and 10, the designer identifies the studied object as the handling path. The TRIZ matrix provides a means to link the contradiction to different solution principles (called inventive principles) at a generic level. The designer considers that the handling path is a motionless object in the TRIZ matrix, whose parameters are its length and its shape (a backward movement is then considered a deformation). Therefore, having the upstream stock at the end of the line degrades

(⊗) the length of the motionless object (time 11), but satisfies (⊙) the shape of the motionless object (time 12). Reciprocally, having the upstream stock in the middle of the line improves the length (time 13) but degrades the motionless object shape (time 14).

Using the TRIZ matrix to solve this contradiction, one may find a solution principle called “the use of sphericity” implying that the straightness of the motionless object should be low (time 15). This principle leads the designer to consider curving the handling path (time 16). Finally, times 17 and 18 correspond to the position changes for the workstation (W3) and the upstream stock (Up S), induced by the curving of the handling path.

The proposed solution has been illustrated in Figure 4. Please note that this is only one among a set of solutions that the designer could find by using the TRIZ matrix.

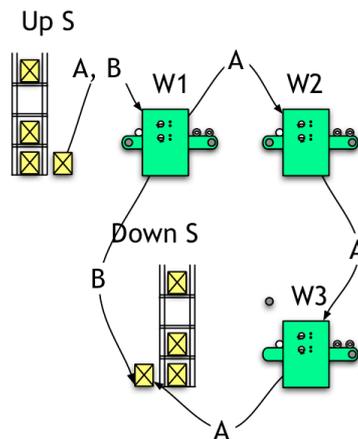


Figure 4: Layout solution.

4 CONCLUSIONS

To go towards a full virtual manufacturing design, the creative process must be formalized.

To face the difficulty due to the formalisation of the infinity of possible pieces of knowledge, the literature suggests focussing on the propositions on the manufacturing system made by the designer. Therefore, we have proposed to formalise these propositions with a holonic approach.

The holonic model, developed and tested on an industrial case, allows to state a first evaluation of the announced contribution:

- It is possible to extract robust holons by the means of a given method (TRIZ) for a given application field (Manufacturing System Design) and on a particular production system (CODICA AUTOMOTIVE SA).
- These holons are robust, they allow to express the core set of concepts that are manipulated by the designer.
- The holons are generic enough to be adapted to the more or less fuzzy descriptions of solutions.

For further validation of this experimentation, we will test this holonic model with other design methods and on other application fields, with the goal of developing descriptive design methods based on knowledge-based systems.

5 ACKNOWLEDGMENTS

This research has been carried out in collaboration with the company CODICA AUTOMOTIVE SA. This company, a subcontractor in the automobile industry, produces effort transmissions by metallic cables which are used, for example, in car hand brakes.

6 REFERENCES

- [1] NGM. 1997. Next-generation manufacturing: A framework for action. Executive overview, Agility Forum, Leaders for Manufacturing, and Technologies Enabling Agile Manufacturing, USA.
- [2] Simon, H.A. (1995b). *Design and systems: General applications of methodology*, Vol. 3, pp. 245-257, Transaction Publisher, New Brunswick.
- [3] Simon H. A. and Newell A. 1972. Human problem solving. Prentice-Hall.
- [4] Gero J. S. 1990. Design prototypes. a knowledge representation schema for design. *AI Magazine*, 11 (4) : 26–36.
- [5] N. Cross. *Engineering design methods : strategies for product design*. Wiley, 1994.
- [6] M. J. French. *Conceptual design for engineers*. Design Council, London, 1985.
- [7] V. Hubka and W.E. Eder. *Theory of technical systems : a total concept theory for engineering design*. Springer-Verlag, New-York, 1988.
- [8] G. Pahl and W. Beitz. *Engineering Design: a systematic approach*. Springer Verlag, London, 2nd edition, 1996.
- [9] S. Pugh. Knowledge-based systems in the design activity. *Design Studies*, 10(4):219–227, 1989.
- [10] D. G. Ullman. The status of design theory research in the united states. *Design Studies*, 12(4):204–208, 1991.
- [11] Roozenburg N. F. M. and Eekels J. 1995. *Product design : fundamentals and methods*. Wiley, New York.
- [12] Pugh S. 1986. Design activity models: worldwide emergence and convergence. *Design Studies*, 7 (3) : 167–173.
- [13] Purcell A. T. and Gero 1998J. S.. Drawings and the design process: A review of protocol studies in design and other disciplines and related research in cognitive psychology. *Design Studies*, 19 (4) : 389–430.
- [14] Bonnardel N. and Marmeche 2005. Towards supporting evocation processes in creative design: A cognitive approach. *International Journal of Human-Computer Studies*, 63(4-5) : 422–435, 2005.
- [15] Van Aken J. E. 2005. Valid knowledge for the professional design of large and complex design processes. *Design Studies*, 26 (4) : 379–404.
- [16] Reyment I. M. M. J., Hammer D. K., Kroes P. A., van Aken J. E., Dorst C. H., Bax M. F. T., and Basten T.. A domain-independent descriptive design model and its application to structured reflection on design processes. *Research in Engineering Design*, V16 (4) : 147–173, 2006.
- [17] Bylander T. and Chandrasekaran B. 1987. Generic tasks for knowledge-based reasoning: The ‘right’ level of abstraction for knowledge acquisition. *International Journal of Man-Machine Studies*, 26 (2) : 231–243, 1987.
- [18] Cochran D. S., Eversheim W., Kubin G., and Sesterhenn M. L. 2000. The application of axiomatic design and lean management principles in the scope of production system segmentation. *International Journal of Production Research*, 38 (6) : 1377 – 1396.
- [19] N. P. Suh. *The Principles of Design*, volume 6 of *Oxford Series on Advanced Manufacturing*. Oxford University Press, New York, 1990.
- [20] D H Jonassen, Towards a design theory of problem solving, *ETR&D*, 2000

- [21] M U Smith, towards a unified theory of problem solving, 1991
- [22] Hatchuel A., Masson P. L., and Weil B. 2004. C-k theory in practice c-k theory in practice: lessons from industrial application. In ENSMP, editor, Proceedings of Design 2004. the International design conference.
- [23] Koestler A.. The Ghost in the Machine. 1967Arcane Book, London, UK.
- [24] Gruber Thomas R. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. In *Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation*. Kluwer Academic Publishers, 1993
- [25] P. C. Benjamin. The IDEF5 ontology description capture method overview. *Technical Report*, 1994.
- [26] L. V. Bertalanffy. General System Theory: Foundations, Development, Applications. Braziller, revised edition (from 1968) edition, 1976. Trad. franç., Théorie générale des systèmes. Paris, Dunod, 1973.
- [27] W. R. Ashby. Introduction to cybernetics. John Wiley, NewYork, 1964.
- [28] Altshuller G. 1984. Creativity as an Exact Science : The Theory of the Solution of Inventive Problems. Gordon and Breach Science Publishers, USA.
- [29] Tompkins J. A., White J. A., Bozer Y. A., and Tanchoco J. M. A. 2002. Facilities Planning. Wiley, 3rd edition edition.

A3. Article pour CFM'07 , Grenoble.

A. Guenebaut, M. Barth, and R. De Guio. Modèle générique du processus créatif appliqué à la conception des systèmes de production. In 18ème Congrès Français de Mécanique, volume Systèmes de production, conception. AFM, 2007.

Modèle générique du processus créatif appliqué à la conception des systèmes de production

Adrien Guenebaut, Marc Barth, Roland de Guio

In 18ème Congrès Français de Mécanique, volume Systèmes de production, conception ; [S.I.] :. AFM, 2007.

Annexe A3 (6 pages) :

La publication présentée ici dans la thèse est soumise à des droits détenus par un éditeur commercial.

La version imprimée de cette thèse peut être consultée à la bibliothèque ou dans un autre établissement via une demande de prêt entre bibliothèques (PEB) auprès de nos services :

<http://www-sicd.u-strasbg.fr/services/peb/>

A4. Code OWL.

Depuis Protégé-OWL version 3.1.1.

1. Namespaces

```
<rdf:RDF
  xmlns:protege="http://protege.stanford.edu/plugins/owl/protege#"
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#">
```

2. Ontology

```
<owl:Ontology rdf:about="">
  <owl:imports rdf:resource="http://protege.stanford.edu/plugins/owl/protege"/>
</owl:Ontology>
```

3. Classes

```
<owl:Class rdf:ID="DESCRIPTION">
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:hasValue>
        <owl:Class rdf:ID="SYSTEME"/>
      </owl:hasValue>
    <owl:onProperty>
      <owl:FunctionalProperty rdf:ID="est_composant_de_la_DESCRIPTION"/>
    </owl:onProperty>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
```

```
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty>
      <owl:FunctionalProperty rdf:about="#est_composant_de_la_DESCRIPTION"/>
    </owl:onProperty>
    <owl:hasValue>
      <owl:Class rdf:ID="CONCEPTEUR"/>
    </owl:hasValue>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty>
      <owl:FunctionalProperty rdf:about="#est_composant_de_la_DESCRIPTION"/>
    </owl:onProperty>
    <owl:hasValue>
      <owl:Class rdf:ID="PARAMETRE"/>
    </owl:hasValue>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:ID="VALEUR"/>
</owl:disjointWith>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Class rdf:ID="DomainConcept"/>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty>
      <owl:FunctionalProperty rdf:about="#est_composant_de_la_DESCRIPTION"/>
    </owl:onProperty>
    <owl:hasValue>
      <owl:Class rdf:ID="VALUER_DESIREE"/>
    </owl:hasValue>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
```

```
<owl:onProperty>
  <owl:FunctionalProperty rdf:ID="a_moment_séquentiel"/>
</owl:onProperty>
<owl:cardinality rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int"
  >1</owl:cardinality>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:ID="RELATION"/>
</owl:disjointWith>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
</owl:disjointWith>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
</owl:disjointWith>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:ID="VALEUR_OBJECTIVEE"/>
</owl:hasValue>
<owl:onProperty>
  <owl:FunctionalProperty rdf:about="#est_composant_de_la_DESCRIPTION"/>
</owl:onProperty>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR"/>
</owl:disjointWith>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:ID="RESSOURCE"/>
</owl:hasValue>
</owl:Restriction>
```

```
</rdfs:subClassOf>
</owl:Class>
```

```
<owl:Class rdf:about="#VALEUR_OBJECTIVEE">
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
  </rdfs:subClassOf>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE"/>
  </owl:disjointWith>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty>
        <owl:ObjectProperty rdf:ID="est_sous_classe"/>
      </owl:onProperty>
      <owl:hasValue>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
      </owl:hasValue>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>
```

```
<owl:Class rdf:about="#RESSOURCE">
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:hasValue>
        <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
      </owl:hasValue>
      <owl:onProperty>
        <owl:TransitiveProperty rdf:ID="est_composante_du_SYSTEME"/>
      </owl:onProperty>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
```

```
<owl:hasValue>
  <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
</owl:hasValue>
<owl:onProperty>
  <owl:TransitiveProperty rdf:ID="est_sous_ensemble"/>
</owl:onProperty>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
</owl:Class>
```

```
<owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR">
  <owl:disjointWith rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
  </owl:disjointWith>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#RELATION"/>
  </owl:disjointWith>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
  </owl:disjointWith>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#DomainConcept"/>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
  </owl:disjointWith>
</owl:Class>
```

```
<owl:Class rdf:about="#PARAMETRE">
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
  </owl:disjointWith>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#RELATION"/>
  </owl:disjointWith>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:hasValue rdf:resource="#RESSOURCE"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
  <owl:onProperty>
```

```

    <owl:ObjectProperty rdf:ID="carracterise"/>
  </owl:onProperty>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
<owl:disjointWith rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
<rdfs:subClassOf rdf:resource="#DomainConcept"/>
<owl:disjointWith>
  <owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
</owl:disjointWith>
</owl:Class>

<owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE">
  <owl:disjointWith rdf:resource="#VALEUR_OBJECTIVEE"/>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:hasValue>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
      </owl:hasValue>
    <owl:onProperty>
      <owl:ObjectProperty rdf:about="#est_sous_classe"/>
    </owl:onProperty>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
</rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

<owl:Class rdf:about="#VALEUR">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#DomainConcept"/>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
  </owl:disjointWith>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#RELATION"/>
  </owl:disjointWith>

```

```

<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:hasValue rdf:resource="#PARAMETRE"/>
    <owl:onProperty>
      <owl:FunctionalProperty rdf:ID="determine"/>
    </owl:onProperty>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:maxCardinality rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int"
      >1</owl:maxCardinality>
    <owl:onProperty>
      <owl:FunctionalProperty rdf:ID="a_unite"/>
    </owl:onProperty>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith rdf:resource="#PARAMETRE"/>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty>
      <owl:FunctionalProperty rdf:ID="a_mesure"/>
    </owl:onProperty>
    <owl:cardinality rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int"
      >1</owl:cardinality>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
</owl:Class>

<owl:Class rdf:about="#RELATION">
  <owl:disjointWith rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <owl:disjointWith>
    <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
  </owl:disjointWith>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#PARAMETRE"/>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>

```

```

<owl:onProperty>
  <owl:DatatypeProperty rdf:ID="a_pour_type"/>
</owl:onProperty>
<owl:maxCardinality rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int"
  >1</owl:maxCardinality>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
<rdfs:subClassOf rdf:resource="#DomainConcept"/>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty>
      <owl:ObjectProperty rdf:ID="est_sortant"/>
    </owl:onProperty>
    <owl:hasValue rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
<owl:disjointWith rdf:resource="#VALEUR"/>
<rdfs:subClassOf>
  <owl:Restriction>
    <owl:onProperty>
      <owl:ObjectProperty rdf:ID="est_entrant"/>
    </owl:onProperty>
    <owl:hasValue rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  </owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

```

```

<owl:Class rdf:about="#SYSTEME">
  <owl:disjointWith rdf:resource="#VALEUR"/>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#DomainConcept"/>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#RELATION"/>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#PARAMETRE"/>
  <owl:disjointWith rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:hasValue rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

```

```
<owl:onProperty>
  <owl:ObjectProperty rdf:ID="est_considere"/>
</owl:onProperty>
</owl:Restriction>
</rdfs:subClassOf>
</owl:Class>
```

4. Properties

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#est_sortant">
  <rdfs:range rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#RELATION"/>
  <owl:inverseOf>
    <owl:ObjectProperty rdf:ID="a_pour_sortant"/>
  </owl:inverseOf>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID="est_induit">
  <rdfs:range rdf:resource="#RELATION"/>
  <owl:inverseOf>
    <owl:ObjectProperty rdf:ID="a_pour_induit"/>
  </owl:inverseOf>
  <rdfs:domain>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR"/>
        <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
        <owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:domain>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#a_pour_induit">
  <rdfs:range>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:range>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
<owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
<owl:Class rdf:about="#VALEUR"/>
</owl:unionOf>
</owl:Class>
</rdfs:range>
<rdfs:domain rdf:resource="#RELATION"/>
<owl:inverseOf rdf:resource="#est_induit"/>
</owl:ObjectProperty>

<owl:ObjectProperty rdf:about="#est_entrant">
<owl:inverseOf>
  <owl:ObjectProperty rdf:ID="a_pour_entrant"/>
</owl:inverseOf>
<rdfs:domain rdf:resource="#RELATION"/>
<rdfs:range rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
</owl:ObjectProperty>

<owl:ObjectProperty rdf:about="#est_considere">
<rdfs:range rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
<owl:inverseOf>
  <owl:ObjectProperty rdf:ID="considere"/>
</owl:inverseOf>
<rdfs:domain rdf:resource="#SYSTEME"/>
</owl:ObjectProperty>

<owl:ObjectProperty rdf:about="#a_pour_entrant">
<rdfs:domain rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
<rdfs:range rdf:resource="#RELATION"/>
<owl:inverseOf rdf:resource="#est_entrant"/>
</owl:ObjectProperty>

<owl:ObjectProperty rdf:about="#a_pour_sortant">
<rdfs:domain rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
<owl:inverseOf rdf:resource="#est_sortant"/>
<rdfs:range rdf:resource="#RELATION"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#carracterise">
  <rdfs:range rdf:resource="#RESSOURCE"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#PARAMETRE"/>
  <owl:inverseOf>
    <owl:ObjectProperty rdf:ID="se_carracterise_par"/>
  </owl:inverseOf>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID="diposse_de">
  <owl:inverseOf>
    <owl:ObjectProperty rdf:ID="est_a_diposition_de"/>
  </owl:inverseOf>
  <rdfs:range rdf:resource="#RESSOURCE"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID="est_inducteur">
  <rdfs:comment rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
  >est_inducteur_de_la_RELATION</rdfs:comment>
  <rdfs:domain>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR"/>
        <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
        <owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR_OBJECTIVEE"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:domain>
  <rdfs:range rdf:resource="#RELATION"/>
  <owl:inverseOf>
    <owl:ObjectProperty rdf:ID="a_pour_inducteur"/>
  </owl:inverseOf>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#est_a_diposition_de">
  <owl:inverseOf rdf:resource="#diposse_de"/>
```

```
<rdfs:domain rdf:resource="#RESSOURCE"/>
<rdfs:range rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID="a_sous_classe">
  <rdfs:range>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR_OBJECTIVEE"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:range>
  <rdfs:domain rdf:resource="#VALEUR"/>
  <owl:inverseOf>
    <owl:ObjectProperty rdf:about="#est_sous_classe"/>
  </owl:inverseOf>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#est_sous_classe">
  <rdfs:range rdf:resource="#VALEUR"/>
  <rdfs:domain>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR_OBJECTIVEE"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:domain>
  <owl:inverseOf rdf:resource="#a_sous_classe"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#considere">
  <rdfs:range rdf:resource="#SYSTEME"/>
  <owl:inverseOf rdf:resource="#est_considere"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#CONCEPTEUR"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#se_carracterise_par">
  <rdfs:range rdf:resource="#PARAMETRE"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#RESSOURCE"/>
  <owl:inverseOf rdf:resource="#carracterise"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#a_pour_inducteur">
  <owl:inverseOf rdf:resource="#est_inducteur"/>
  <rdfs:range>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR"/>
        <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
        <owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR_OBJECTIVEE"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:range>
  <rdfs:domain rdf:resource="#RELATION"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID="est_determine_par">
  <owl:inverseOf>
    <owl:FunctionalProperty rdf:about="#determine"/>
  </owl:inverseOf>
  <rdfs:domain rdf:resource="#PARAMETRE"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#VALEUR"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#InverseFunctionalProperty"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#a_pour_type">
  <rdfs:domain rdf:resource="#RELATION"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#FunctionalProperty"/>
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:ID="a_context">
  <rdfs:domain rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
```

```
<rdfs:range>
  <owl:DataRange>
    <owl:oneOf rdf:parseType="Resource">
      <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
      >Besoin_Cible</rdf:first>
      <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
        <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
          <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
            <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
            >Besoin_Source</rdf:first>
            <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
              <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
                <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
                >Solution_Source</rdf:first>
                <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
                  <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
                  >SP</rdf:first>
                  <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
                    <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
                    >C</rdf:first>
                    <rdf:rest rdf:parseType="Resource">
                      <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
                      >CSP</rdf:first>
                      <rdf:rest rdf:resource="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#nil"/>
                    </rdf:rest>
                  </rdf:rest>
                </rdf:rest>
              </rdf:rest>
            </rdf:rest>
          </rdf:rest>
        </rdf:rest>
      </rdf:rest>
      <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
      >Difficulté_Source</rdf:first>
    </rdf:rest>
  </rdf:rest>
  <rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
  >Solution_Cible</rdf:first>
</rdf:rest>
<rdf:first rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"
>Difficulté_Cible</rdf:first>
</rdf:rest>
```

```
</owl:oneOf>
</owl:DataRange>
</rdfs:range>
</owl:DatatypeProperty>

<owl:TransitiveProperty rdf:about="#est_sous_ensemble">
  <owl:inverseOf>
    <owl:TransitiveProperty rdf:about="#est_composante_du_SYSTEME"/>
  </owl:inverseOf>
  <rdfs:domain rdf:resource="#RESSOURCE"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#SYSTEME"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
</owl:TransitiveProperty>

<owl:TransitiveProperty rdf:about="#est_composante_du_SYSTEME">
  <rdfs:domain rdf:resource="#SYSTEME"/>
  <owl:inverseOf rdf:resource="#est_sous_ensemble"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#RESSOURCE"/>
</owl:TransitiveProperty>

<owl:FunctionalProperty rdf:about="#a_mesure">
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#VALEUR"/>
</owl:FunctionalProperty>

<owl:FunctionalProperty rdf:ID="a_moment_temporel">
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
</owl:FunctionalProperty>

<owl:FunctionalProperty rdf:about="#a_moment_séquentiel">
  <rdfs:domain rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
</owl:FunctionalProperty>
```

```
<owl:FunctionalProperty rdf:about="#a_unite">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#VALEUR"/>
  <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
</owl:FunctionalProperty>
```

```
<owl:FunctionalProperty rdf:about="#determine">
  <owl:inverseOf rdf:resource="#est_determine_par"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#PARAMETRE"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#VALEUR"/>
</owl:FunctionalProperty>
```

```
<owl:FunctionalProperty rdf:about="#est_composant_de_la_DESCRIPTION">
  <owl:inverseOf>
    <owl:InverseFunctionalProperty rdf:ID="compose_la_DESCRIPTION"/>
  </owl:inverseOf>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:range>
    <owl:Class>
      <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
        <owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR"/>
        <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
        <owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALEUR_OBJECTIVEE"/>
        <owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE"/>
      </owl:unionOf>
    </owl:Class>
  </rdfs:range>
  <rdfs:domain rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
</owl:FunctionalProperty>
```

```
<owl:InverseFunctionalProperty rdf:about="#compose_la_DESCRIPTION">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <owl:inverseOf rdf:resource="#est_composant_de_la_DESCRIPTION"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#DESCRIPTION"/>
  <rdfs:domain>
```

```
<owl:Class>
  <owl:unionOf rdf:parseType="Collection">
    <owl:Class rdf:about="#CONCEPTEUR"/>
    <owl:Class rdf:about="#SYSTEME"/>
    <owl:Class rdf:about="#PARAMETRE"/>
    <owl:Class rdf:about="#VALEUR_OBJECTIVEE"/>
    <owl:Class rdf:about="#VALUER_DESIREE"/>
  </owl:unionOf>
</owl:Class>
</rdfs:domain>
</owl:InverseFunctionalProperty>

<owl:AllDifferent/>
```

A5. Matrice TRIZ.

Matrice, recommandations et principes inventifs.

40 PRINCIPLES FOR TECHNICAL CONTRADICTION ELIMINATION

INVENTIVE PRINCIPLES

© G.S.Altshuller, 1960-1973

Annexe A5 (12 pages) :

La publication présentée ici dans la thèse est soumise à des droits détenus par un éditeur commercial.

La version imprimée de cette thèse peut être consultée à la bibliothèque ou dans un autre établissement via une demande de prêt entre bibliothèques (PEB) auprès de nos services :

<http://www-sicd.u-strasbg.fr/services/peb/>

Contradiction Matrix

Worsening Feature Improving Feature		Loss of Substance	Loss of Information	Loss of Time	Quantity of substance	Reliability	Measurement accuracy	Manufacturing precision	Object-affected harmful factors	Object-generated harmful factors	Ease of manufacture	Ease of operation	Ease of repair	Adaptability or versatility	Device complexity	Difficulty of detecting and measuring	Extent of automation	Productivity
		23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1	Weight of moving object	5, 35, 3, 31	10, 24, 35	10, 35, 20, 28	3, 26, 18, 31	1, 3, 11, 27	28, 27, 35, 26	28, 35, 26, 18	22, 21, 18, 27	22, 35, 31, 39	27, 28, 1, 36	35, 3, 2, 24	2, 27, 28, 11	29, 5, 15, 8	26, 30, 36, 34	28, 29, 26, 32	26, 35, 18, 19	35, 3, 24, 37
2	Weight of stationary object	5, 8, 13, 30	10, 15, 35	10, 20, 35, 26	19, 6, 18, 26	10, 28, 8, 3	18, 26, 28	10, 1, 35, 17	2, 19, 22, 37	35, 22, 1, 39	28, 1, 9	6, 13, 1, 32	2, 27, 28, 11	19, 15, 29	1, 10, 26, 39	25, 28, 17, 15	2, 26, 35	1, 28, 15, 35
3	Length of moving object	4, 29, 23, 10	1, 24	15, 2, 29	29, 35	10, 14, 29, 40	28, 32, 4	10, 28, 29, 37	1, 15, 17, 24	17, 15	1, 29, 17	15, 29, 35, 4	1, 28, 10	14, 15, 1, 16	1, 19, 26, 24	35, 1, 26, 24	17, 24, 26, 16	14, 4, 28, 29
4	Length of stationary object	10, 28, 24, 35	24, 26,	30, 29, 14		15, 29, 28	32, 28, 3	2, 32, 10	1, 18		15, 17, 27	2, 25	3	1, 35	1, 26	26		30, 14, 7, 26
5	Area of moving object	10, 35, 2, 39	30, 26	26, 4	29, 30, 6, 13	29, 9	26, 28, 32, 3	2, 32	22, 33, 28, 1	17, 2, 18, 39	13, 1, 26, 24	15, 17, 13, 16	15, 13, 10, 1	15, 30	14, 1, 13	2, 36, 26, 18	14, 30, 28, 23	10, 26, 34, 2
6	Area of stationary object	10, 14, 18, 39	30, 16	10, 35, 4, 18	2, 18, 40, 4	32, 35, 40, 4	26, 28, 32, 3	2, 29, 18, 36	27, 2, 39, 35	22, 1, 40	40, 16	16, 4	16	15, 16	1, 18, 36	2, 35, 30, 18	23	10, 15, 17, 7
7	Volume of moving object	36, 39, 34, 10	2, 22	2, 6, 34, 10	29, 30, 7	14, 1, 40, 11	25, 26, 28	25, 28, 2, 16	22, 21, 27, 35	17, 2, 40, 1	29, 1, 40	15, 13, 30, 12	10	15, 29	26, 1	29, 26, 4	35, 34, 16, 24	10, 6, 2, 37
8	Volume of stationary object	10, 39, 35, 34		35, 16, 32, 18	35, 3	2, 35, 16		35, 10, 25	34, 39, 19, 27	30, 18, 35, 4	35		1		1, 31	2, 17, 26		35, 37, 10, 2
9	Speed	10, 13, 28, 38	13, 26		10, 19, 29, 38	11, 35, 27, 28	28, 32, 1, 24	10, 28, 32, 25	1, 28, 35, 23	2, 24, 35, 21	35, 13, 8, 1	32, 28, 13, 12	34, 2, 28, 27	15, 10, 26	10, 28, 4, 34	3, 34, 27, 16	10, 18	
10	Force (Intensity)	8, 35, 40, 5		10, 37, 18, 36	3, 35, 13, 21	35, 10, 23, 24	35, 10, 23, 24	28, 29, 37, 36	1, 35, 40, 18	13, 3, 36, 24	15, 37, 18, 1	1, 28, 3, 25	15, 1, 11	15, 17, 18, 20	26, 35, 10, 18	36, 37, 10, 19	2, 35	3, 28, 35, 37
11	Stress or pressure	10, 36, 3, 37		37, 36, 4	10, 14, 36	10, 13, 19, 35	6, 28, 25	3, 35	22, 2, 37	2, 33, 27, 18	1, 35, 16	11	2	35	19, 1, 35	2, 36, 37	35, 24	10, 14, 35, 37
12	Shape	35, 29, 3, 5		14, 10, 34, 17	36, 22	10, 40, 16	28, 32, 1	32, 30, 40	22, 1, 2, 35	35, 1	1, 32, 17, 28	32, 15, 26	2, 13, 1	1, 15, 29	16, 29, 1, 28	15, 13, 39	15, 1, 32	17, 26, 34, 10
13	Stability of the object's composition	2, 14, 30, 40		35, 27	15, 32, 35		13	18	35, 24, 30, 18	35, 40, 27, 39	35, 19	32, 35, 30	2, 35, 10, 16	35, 30, 34, 2	2, 35, 22, 26	35, 22, 39, 23	1, 8, 35	23, 35, 40, 3
14	Strength	35, 28, 31, 40		29, 3, 28, 10	29, 10, 27	11, 3	3, 27, 16	3, 27	18, 35, 37, 1	15, 35, 22, 2	11, 3, 10, 32	32, 40, 25, 2	27, 11, 3	15, 3, 32	2, 13, 25, 28	27, 3, 15, 40	15	29, 35, 10, 14
15	Duration of action of moving object	28, 27, 3, 18	10	20, 10, 28, 18	3, 35, 10, 40	11, 2, 13	3	3, 27, 16, 40	22, 15, 33, 28	21, 39, 16, 22	27, 1, 4	12, 27	29, 10, 27	1, 35, 13	10, 4, 29, 15	19, 29, 39, 35	6, 10	35, 17, 14, 19
16	Duration of action by stationary object	27, 16, 18, 38	10	28, 20, 10, 16	3, 35, 31	34, 27, 6, 40	10, 26, 24		17, 1, 40, 33	22	35, 10	1	1	2		25, 34, 6, 35	1	20, 10, 16, 38
17	Temperature	21, 36, 29, 31		35, 28, 21, 18	3, 17, 30, 39	19, 35, 3, 10	32, 19, 24	24	22, 33, 35, 2	22, 35, 2, 24	26, 27	26, 27	4, 10, 16	2, 18, 27	2, 17, 16	3, 27, 35, 31	26, 2, 19, 16	15, 28, 35
18	Illumination intensity	13, 1	1, 6	19, 1, 26, 17	1, 19		11, 15, 32	3, 32	15, 19	35, 19, 32, 39	19, 35, 28, 26	28, 26, 19	15, 17, 13, 16	15, 1, 19	6, 32, 13	32, 15	2, 26, 10	2, 25, 16
19	Use of energy by moving object	35, 24, 18, 5		35, 38, 19, 18	34, 23, 16, 18	19, 21, 11, 27	3, 1, 32		1, 35, 6, 27	2, 35, 6	28, 26, 30	19, 35	1, 15, 17, 28	15, 17, 13, 16	2, 29, 27, 28	35, 38	32, 2	12, 28, 35
20	Use of energy by stationary object	28, 27, 18, 31			3, 35, 31	10, 36, 23			10, 2, 22, 37	19, 22, 18	1, 4					19, 35, 16, 25		1, 6
21	Power	28, 27, 18, 38	10, 19	35, 20, 10, 6	4, 34, 19	19, 24, 26, 31	32, 15, 2	32, 2	19, 22, 31, 2	2, 35, 18	26, 10, 34	26, 35, 10	35, 2, 10, 34	19, 17, 34	20, 19, 30, 34	19, 35, 16	28, 2, 17	28, 35, 34
22	Loss of Energy	35, 27, 2, 37	19, 10	10, 18, 32, 7	7, 18, 25	11, 10, 35	32		21, 22, 35, 2	21, 35, 2, 22		35, 32, 1	2, 19		7, 23	35, 3, 15, 23	2	28, 10, 29, 35
23	Loss of substance	+		15, 18, 35, 10	6, 3, 10, 24	10, 29, 39, 35	16, 34, 31, 28	35, 10, 24, 31	33, 22, 30, 40	10, 1, 34, 29	15, 34, 33	32, 28, 2, 24	2, 35, 34, 27	15, 10, 2	35, 10, 28, 24	35, 18, 10, 13	35, 10, 18	28, 35, 10, 23
24	Loss of Information		+	24, 26, 28, 32	24, 28, 35	10, 28, 23			22, 10, 1	10, 21, 22	32	27, 22				35, 33	35	13, 23, 15

Contradiction Matrix

	Worsening Feature	Improving Feature	Weight of moving object	Weight of stationary object	Length of moving object	Length of stationary object	Area of moving object	Area of stationary object	Volume of moving object	Volume of stationary object	Speed	Force (Intensity)	Stress or pressure	Shape	Stability of the object's composition	Strength	Duration of action of moving object	Duration of action of stationary object	Temperature	Illumination intensity	Use of energy by moving object	Use of energy by stationary object	Power	Loss of Energy
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
25	Loss of Time	10, 20, 37, 35	10, 20, 26, 5	15, 2, 29	30, 24, 14, 5	26, 4, 5, 16	10, 35, 17, 4	2, 5, 34, 10	35, 16, 32, 18		10, 37, 36, 5	37, 36, 4	4, 10, 34, 17	35, 3, 22, 5	29, 3, 28, 18	20, 10, 28, 18	28, 20, 10, 16	35, 29, 21, 18	1, 19, 26, 17	35, 38, 19, 18	1	35, 20, 10, 6	10, 5, 18, 32	
26	Quantity of substance/the matter	35, 6, 18, 31	27, 26, 18, 35	29, 14, 35, 18		15, 14, 29	2, 18, 40, 4	15, 20, 29		35, 29, 34, 28	35, 14, 3	10, 36, 14, 3	35, 14	15, 2, 17, 40	14, 35, 34, 10	3, 35, 10, 40	3, 35, 31	3, 17, 39		34, 29, 16, 18	3, 35, 31	35	7, 18, 25	
27	Reliability	3, 8, 10, 40	3, 10, 8, 28	15, 9, 14, 4	15, 29, 28, 11	17, 10, 14, 16	32, 35, 40, 4	3, 10, 14, 24	2, 35, 24	21, 35, 11, 28	8, 28, 10, 3	10, 24, 35, 19	35, 1, 16, 11		11, 28	2, 35, 3, 25	34, 27, 6, 40	3, 35, 10	11, 32, 13	21, 11, 27, 19	36, 23	21, 11, 26, 31	10, 11, 35	
28	Measurement accuracy	32, 35, 26, 28	28, 35, 25, 26	28, 26, 5, 16	32, 28, 3, 16	26, 28, 32, 3	26, 28, 32, 3	32, 13, 6		25, 10, 35	10, 28, 32	28, 19, 34, 36	3, 35	32, 30, 40	30, 18	3, 27	3, 27, 40		19, 26	3, 32	32, 2		3, 6, 32	26, 32, 27
29	Manufacturing precision	28, 32, 13, 18	28, 35, 27, 9	10, 28, 29, 37	2, 32, 10	28, 33, 29, 32	2, 29, 18, 36	32, 23, 2	25, 10, 35	10, 28, 32	28, 19, 34, 36	3, 35	32, 30, 40	30, 18	3, 27	3, 27, 40		19, 26	3, 32	32, 2		32, 2	13, 32, 2	
30	Object-affected harmful factors	22, 21, 27, 39	2, 22, 13, 24	17, 1, 39, 4	1, 18	22, 1, 33, 28	27, 2, 39, 35	22, 23, 19, 27	34, 39, 37, 35	21, 22, 35, 28	13, 35, 39, 18	22, 2, 37	22, 1, 3, 35	35, 24, 30, 18	18, 35, 37, 1	22, 15, 33, 28	17, 1, 40, 33	22, 33, 35, 2	1, 19, 32, 13	1, 24, 6, 27	10, 2, 22, 37	19, 22, 31, 2	21, 22, 35, 2	
31	Object-generated harmful factors	19, 22, 15, 39	35, 22, 1, 39	17, 15, 16, 22		17, 2, 18, 39	22, 1, 40	17, 2, 40	30, 18, 35, 4	35, 28, 3, 23	35, 28, 1, 40	2, 33, 27, 18	35, 1	35, 40, 27, 39	15, 35, 22, 2	15, 22, 33, 31	21, 39, 16, 22	22, 35, 2, 24	19, 24, 39, 32	2, 35, 6	19, 22, 18	2, 35, 18	21, 35, 2, 22	
32	Ease of manufacture	28, 29, 15, 16	1, 27, 36, 13	1, 29, 13, 17	15, 17, 27	13, 1, 26, 12	16, 40	13, 29, 1, 40	35	35, 13, 8, 1	35, 12	35, 19, 1, 37	1, 28, 13, 27	11, 13, 1	1, 3, 10, 32	27, 1, 4	35, 16	27, 26, 18	28, 24, 27, 1	28, 26, 27, 1	1, 4	27, 1, 12, 24	19, 35	
33	Ease of operation	25, 2, 13, 15	6, 13, 1, 25	1, 17, 13, 12		1, 17, 13, 16	18, 16, 15, 39	1, 16, 35, 15	4, 18, 39, 31	18, 13, 34	28, 13, 35	2, 32, 12	15, 34, 29, 28	32, 35, 30	32, 40, 3, 28	29, 3, 8, 25	1, 16, 25	26, 27, 13	13, 17, 1, 24	1, 13, 24		35, 34, 2, 10	2, 19, 13	
34	Ease of repair	2, 27, 35, 11	2, 27, 35, 11	1, 28, 10, 25	3, 18, 31	15, 13, 32	16, 25	25, 2, 35, 11	1	34, 9	1, 11, 10	13	1, 13, 2, 4	2, 35	11, 1, 2, 9	11, 29, 28, 27	1	4, 10	15, 1, 13	15, 1, 28, 16		15, 10, 32, 2	15, 1, 32, 19	
35	Adaptability or versatility	1, 6, 15, 8	19, 15, 29, 16	35, 1, 29, 2	1, 35, 16	35, 30, 29, 7	15, 16	15, 35, 29		35, 10, 14	15, 17, 20	35, 16	15, 37, 1, 8	35, 30, 14	35, 3, 32, 6	13, 1, 35	2, 16	27, 2, 3, 35	6, 22, 26, 1	19, 35, 29, 13		19, 1, 29	18, 15, 1	
36	Device complexity	26, 30, 34, 36	2, 26, 35, 39	1, 19, 26, 24	26	14, 1, 13, 16	6, 36	34, 26, 6	1, 16	34, 10, 28	26, 16	19, 1, 35	29, 13, 28, 15	2, 22, 17, 19	2, 13, 28	10, 4, 28, 15		2, 17, 13	24, 17, 13	27, 2, 29, 28		20, 19, 30, 34	10, 35, 13, 2	
37	Difficulty of detecting and measuring	27, 26, 28, 13	6, 13, 28, 1	16, 17, 26, 24	26	2, 13, 18, 17	2, 39, 30, 16	29, 1, 4, 16	2, 18, 26, 31	3, 4, 16, 35	30, 28, 40, 19	35, 36, 37, 32	27, 13, 1, 39	11, 22, 39, 30	27, 3, 15, 28	19, 29, 39, 25	25, 34, 6, 35	3, 27, 35, 16	2, 24, 26	35, 38	19, 35, 16	18, 1, 16, 10	35, 3, 15, 19	
38	Extent of automation	28, 26, 18, 35	28, 26, 35, 10	14, 13, 17, 28	23	17, 14, 13		35, 13, 16		28, 10	2, 35	13, 35	15, 32, 1, 13	18, 1	25, 13	6, 9		26, 2, 19	8, 32, 19	2, 32, 13		28, 2, 27	23, 28	
39	Productivity	35, 26, 24, 37	28, 27, 15, 3	18, 4, 28, 38	30, 7, 14, 26	10, 26, 34, 31	10, 35, 17, 7	2, 6, 34, 10	35, 37, 10, 2		28, 15, 10, 36	10, 37, 14	14, 10, 34, 40	35, 3, 22, 39	29, 28, 10, 18	35, 10, 2, 18	20, 10, 16, 38	35, 21, 28, 10	26, 17, 19, 1	35, 10, 38, 19	1	35, 20, 10	28, 10, 29, 35	

Contradiction Matrix

Worsening Feature Improving Feature		Loss of Substance	Loss of Information	Loss of Time	Quantity of substance	Reliability	Measurement accuracy	Manufacturing precision	Object-affected harmful factors	Object-generated harmful factors	Ease of manufacture	Ease of operation	Ease of repair	Adaptability or versatility	Device complexity	Difficulty of detecting and measuring	Extent of automation	Productivity
		23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
25	Loss of Time	35, 18, 10, 39	24, 26, 28, 32	+	35, 38, 18, 16	10, 30, 4	24, 34, 28, 32	24, 26, 28, 18	35, 18, 34	35, 22, 18, 39	35, 28, 34, 4	4, 28, 10, 34	32, 1, 10	35, 28	6, 29	18, 28, 32, 10	24, 28, 35, 30	
26	Quantity of substance/the matter	6, 3, 10, 24	24, 28, 35	35, 38, 18, 16	+	18, 3, 28, 40	13, 2, 28	33, 30	35, 33, 29, 31	3, 35, 40, 39	29, 1, 35, 27	35, 29, 25, 10	2, 32, 10, 25	15, 3, 29	3, 13, 27, 10	3, 27, 29, 18	8, 35	13, 29, 3, 27
27	Reliability	10, 35, 29, 39	10, 28	10, 30, 4	21, 28, 40, 3	+	32, 3, 11, 23	11, 32, 1	27, 35, 2, 40	35, 2, 40, 26		27, 17, 40	1, 11	13, 35, 8, 24	13, 35, 1	27, 40, 28	11, 13, 27	1, 35, 29, 38
28	Measurement accuracy	10, 16, 31, 28	24, 34, 28, 32	2, 6, 32	5, 11, 1, 23	+			28, 24, 22, 26	3, 33, 39, 10	6, 35, 25, 18	1, 13, 17, 34	1, 32, 13, 11	13, 35, 2	27, 35, 10, 34	26, 24, 32, 28	28, 2, 10, 34	10, 34, 28, 32
29	Manufacturing precision	35, 31, 10, 24	32, 26, 28, 18	32, 30	11, 32, 1		+		26, 28, 10, 36	4, 17, 34, 26		1, 32, 35, 23	25, 10		26, 2, 18		26, 28, 18, 23	10, 18, 32, 39
30	Object-affected harmful factors	33, 22, 19, 40	22, 10, 2	35, 18, 34	35, 33, 29, 31	27, 24, 2, 40	28, 33, 23, 26	26, 28, 10, 18	+		24, 35, 2	2, 25, 28, 39	35, 10, 2	35, 11, 22, 31	22, 19, 29, 40	22, 19, 29, 40	33, 3, 34	22, 35, 13, 24
31	Object-generated harmful factors	10, 1, 34	10, 21, 29	1, 22	3, 24, 39, 1	24, 2, 40, 39	3, 33, 26	4, 17, 34, 26		+					19, 1, 31	2, 21, 27, 1	2	22, 35, 18, 39
32	Ease of manufacture	15, 34, 33	32, 24, 18, 16	35, 28, 34, 4	35, 23, 1, 24		1, 35, 12, 18		24, 2		+	2, 5, 13, 16	35, 1, 11, 9	2, 13, 15	27, 26, 1	6, 28, 11, 1	8, 28, 1	35, 1, 10, 28
33	Ease of operation	28, 32, 2, 24	4, 10, 27, 22	4, 28, 10, 34	12, 35	17, 27, 8, 40	25, 13, 2, 34	1, 32, 35, 23	2, 25, 28, 39		2, 5, 12	+	12, 26, 1, 32	15, 34, 1, 16	32, 26, 12, 17		1, 34, 12, 3	15, 1, 28
34	Ease of repair	2, 35, 34, 27		32, 1, 10, 25	2, 28, 10, 25	11, 10, 1, 16	10, 2, 13	25, 10	35, 10, 2, 16		1, 35, 11, 10	1, 12, 26, 15	+	7, 1, 4, 16	35, 1, 13, 11		34, 35, 7, 13	1, 32, 10
35	Adaptability or versatility	15, 10, 2, 13		35, 28	3, 35, 15	35, 13, 8, 24	35, 5, 1, 10		35, 11, 32, 31		1, 13, 31	15, 34, 1, 16	1, 16, 7, 4	+	15, 29, 37, 28	1	27, 34, 35	35, 28, 6, 37
36	Device complexity	35, 10, 28, 29		6, 29	13, 3, 27, 10	13, 35, 1	2, 26, 10, 34	26, 24, 32	22, 19, 29, 40	19, 1	27, 26, 1, 13	27, 9, 26, 24	1, 13	29, 15, 28, 37	+	15, 10, 37, 28	15, 1, 24	12, 17, 28
37	Difficulty of detecting and measuring	1, 18, 10, 24	35, 33, 27, 22	18, 28, 32, 9	3, 27, 29, 18	27, 40, 28, 8	26, 24, 32, 28		22, 19, 29, 28	2, 21	5, 28, 11, 29	2, 5	12, 26	1, 15	15, 10, 37, 28	+	34, 21	35, 18
38	Extent of automation	35, 10, 18, 5	35, 33	24, 28, 35, 30	35, 13	11, 27, 32	28, 26, 10, 34	28, 26, 18, 23	2, 33	2	1, 26, 13	1, 12, 34, 3	1, 35, 13	27, 4, 1, 35	15, 24, 10	34, 27, 25	+	5, 12, 35, 26
39	Productivity	28, 10, 35, 23	13, 15, 23		35, 38	1, 35, 10, 38	1, 10, 34, 28	18, 10, 32, 1	22, 35, 13, 24	35, 22, 18, 39	35, 28, 2, 24	1, 28, 7, 10	1, 32, 10, 25	1, 35, 28, 37	12, 17, 28, 24	35, 18, 27, 2	5, 12, 35, 26	+