

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
THOMAS GUILLAUME TREMBLAY

LA PROPAGATION DU CHANGEMENT DANS UN CONTEXTE PLM :
VERS LA MAÎTRISE DU RÔLE DES ASSOCIATIONS DANS LE
DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS ET DES PROCESSUS ASSOCIÉS

MONTRÉAL, LE 16 JANVIER 2006

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée
École technologie supérieure

M. Roland Maranzana, président du jury
Département de génie de la production automatisée
École technologie supérieure

Benoit Côté, membre du jury
Bombardier Aéronautique, ville Saint-Laurent

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 20 DÉCEMBRE 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

LA PROPAGATION DU CHANGEMENT DANS UN CONTEXTE PLM : VERS LA MAÎTRISE DU RÔLE DES ASSOCIATIONS DANS LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS ET DES PROCESSUS ASSOCIÉS

Thomas Guillaume Tremblay

SOMMAIRE

Les outils de développement de produits sont en mesure de capturer une certaine intention de conception par la modélisation de liens inter-objets au sein d'un environnement de CAO. Cela permet d'augmenter la productivité en conception et de favoriser le maintien de la cohérence au sein de la définition du produit. Dans de tels systèmes, c'est l'application de CAO qui permet d'établir des liens et de les exploiter. Dans un futur plus ou moins éloigné, on peut prévoir qu'ils seront porteurs d'information de nature technologique correspondant au savoir-faire impliqué par une tâche spécifique. Par exemple, un 'lien technologique' pourra être établi entre un arbre et un alésage correspondant à un ajustement H7f6, déterminé par le concepteur pour répondre à un objectif fonctionnel. Cette information technologique entre les deux entités sera conservée dans un lien technologique fortement typé et persistant. Lors d'une modification de diamètre, la géométrie des pièces pourra être recalculée grâce à ce lien.

Mesurés sur des cas spécifiques, les bénéfices apportés par la mise en œuvre de liens technologiques sont très importants (de l'ordre de 90%). Le potentiel d'application des liens technologiques est immense, mais leur mise en œuvre à l'échelle industrielle pose problème en raison de leur diversité. En effet, il est nécessaire de disposer d'autant de types de liens que de tâches de conception à réaliser. De plus, le domaine d'intervention devrait, à terme, déborder le domaine couvert par la CAO pour englober l'ensemble du modèle-produit (modèles CAO, dessins d'installation, liste de composants, etc.) et des processus associés (gammes de fabrication, outillage, les programmes de contrôle numérique, etc.). Pour y parvenir, nous proposons une taxonomie des différents types de liens technologiques requis pour supporter l'ensemble des tâches du domaine de développement de produits. Les termes sur lesquels repose la taxonomie sont : association, relation, lien et contrainte. Cette contribution présente un modèle générique GAPOM pour la construction d'applications orientées métiers basées sur la mise en œuvre de liens technologiques. Le modèle proposé exploite les notions d'agrégation et de décomposition au niveau des vues, au niveau des pièces et au niveau des caractéristiques. On présente également une méthode d'application du modèle en dix étapes. Le modèle est validé par sa mise en œuvre dans trois cas d'applications orientées métiers. Finalement, on évalue de quelle façon la terminologie, les concepts et le modèle proposés s'inscrivent dans un processus industriel de développement de produit. Pour ce faire, nous nous intéresserons au processus industriel de gestion des modifications.

CHANGE PROPAGATION IN A PLM CONTEXT: ON THE USE OF ASSOCIATIONS FOR PRODUCTS AND PROCESSES DEVELOPMENT

Thomas Guillaume Tremblay

ABSTRACT

The current Computer Aided Design (CAD) systems can capture a part of the design intent by creating links between objects. This increases the productivity during product development, and helps maintain the coherence of the product definition. This means that the CAD systems establish the links as well as their use. In the near and extended future, we can assume that these links will carry technological information corresponding to the know-how implied in specific tasks. For example a 'technological link' can be established between a shaft and a hole corresponding to an H7f6 adjustment, determined by the designer to satisfy any functional objective. This technological information defined between the two entities will be stored in the technological link. During the modification of the diameter, the geometry of the parts can be recalculated as a result of this link.

Measured in specific simulations, the benefits brought by these links are very important (around 90%). The potential of these links is huge, but their implementation at an industrial scale remains a problem due to the wide range of links. As a matter of fact, it is necessary to have as many links as there are tasks to be performed. Furthermore, the application's uses should, eventually, go beyond the fields covered by CAD systems, to encompass the product design-model (CAD models, assemblies, lists of components, etc.) and its associated processes (process planning, tooling, numerical control programming, etc.).

In this thesis, we propose a taxonomy of the different types of technological links required to support the set of tasks in the area of product development. The terms on which the taxonomy relies are: association, relation, link, and constraint. This contribution also introduces a new generic model named the 'GAPOM' model. This model allows for the creation of trade oriented applications based on the implementation of technological links. The model proposed uses the concepts of aggregation and decomposition applied to different objects, namely: the view, the part, and the feature. We also introduce a method of application in ten steps. The model is validated by its implementation to three trade oriented applications. We finally evaluate the way in which the terminology, the concepts and the model apply in the context of an industrial change management process.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur, M.Louis Rivest. Il a su, au cours de mes deux ans d'étude, m'orienter et me guider à travers le domaine des systèmes de gestion de données techniques. Merci pour cette expérience riche en connaissances et qui constitue un tremplin pour mon avenir.

Je remercie les membres du personnel de Bombardier pour leurs contributions.

Je tiens également à remercier mes collègues qui m'ont aidé dans cette expérience.

Mes remerciements s'adressent également à ma famille. Jacques, Ruth et Sophie, merci pour vos encouragements, vos conseils et votre support.

Ce travail a été financé par le programme d'incitation pour diplômés de l'ÉTS à poursuivre des études de 2e et 3e cycles à l'ÉTS, ainsi que par le CRSNG.

TABLES DES MATIÈRES

	Pages
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLES DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
1.1 Liens au sein des processus de développement de produits	7
1.1.1 Gestion de la complexité.....	8
1.1.2 Liens entre objets hétérogènes	13
1.2 Liens au sein des assemblages	20
1.3 Liens pour l'automatisation	27
1.4 Principes de mise en œuvre des liens.....	31
1.5 Liens dans le domaine du génie civil.....	35
1.6 Liens dans les SGDT	37
1.7 Liens dans les modeleurs géométriques.....	43
1.7.1 Modeleur CATIA V5	43
1.7.2 Modeleur Solid Edge	47
1.7.3 Synthèse	50
CHAPITRE 2 ANALYSE DES ASSOCIATIONS ET DES OBJETS ASSOCIÉS	51
2.1 Distinction entre les termes <i>Association, relation, contrainte et lien</i>	51
2.1.1 Utilisation des termes dans la littérature	52
2.1.2 Terminologie proposée pour les termes <i>Association, relation, lien et</i> <i>contrainte</i>	54
2.2 Terminologie relative aux objets associés	57
2.2.1 Terminologie de la littérature.....	57
2.2.2 Terminologie retenue pour les objets associés.....	59
2.3 Savoir-faire	60
2.3.1 Automaticité permise par une association	60
2.4 Analyse des éléments de caractérisation des associations	60
2.4.1 Direction	61
2.4.2 Cardinalité.....	61

2.4.3	Temporalité des associations	63
2.4.4	Agrégation et décomposition	63
2.4.5	Portée de l'association	71
2.5	Quelques associations essentielles	74
2.5.1	Association de composition	74
2.5.2	Association de transport.....	75
2.5.3	Association de publication.....	75
2.6	Quelques associations utiles en développement de produits	77
2.6.1	Association de type dérivation.....	78
2.6.2	Association de type procédurale	79
2.6.3	Association de type transposition	81
2.7	Mise en œuvre des associations	82
2.7.1	Instanciation d'associations	82
2.7.2	Opérations sur les instances d'associations	83
2.7.3	Opérations sur les associations génériques	83
2.7.4	Gestion de version des associations.....	83
2.7.5	Construction des associations génériques.....	83
2.8	Synthèse des éléments de caractérisation des associations utilisés dans la littérature	84
CHAPITRE 3 UN MODÈLE GÉNÉRIQUE POUR LA CONSTRUCTION D'APPLICATIONS ORIENTÉES MÉTIERS BASÉES SUR LE CONCEPT DE LIEN TECHNOLOGIQUE.....		
		91
3.1	Modèle générique d'applications orientées métiers proposé	91
3.1.1	Décomposition des niveaux d'abstraction (1ère phase du modèle).....	93
3.1.2	Étapes de construction de l'application (2ième phase du modèle).....	99
3.2	Validation du modèle GAPOM sur des cas existants	106
3.2.1	Application pour la modélisation des soyages et des découpes.....	107
3.2.2	Application pour la modélisation de poches d'allègement dans un panneau de revêtement de fuselage.....	122
3.2.3	Application pour la modélisation du gabarit de découpe pour les poches d'allègement d'un panneau de revêtement de fuselage	134
3.3	Synthèse globale sur le modèle GAPOM	145
CHAPITRE 4 LES ASSOCIATIONS DANS UN PROCESSUS INDUSTRIEL DE GESTION DES MODIFICATIONS		
		149
4.1	Le processus de gestion des modifications chez Bombardier Aéronautique	150
4.1.1	Aperçu général du processus de gestion des modifications.....	150
4.1.2	Description détaillée du processus de gestion des modifications	153
4.2	Scénario – Problème de fissure dans la structure du toit	161
4.2.1	Mise en situation	161
4.2.2	Description du problème et des pistes de solution.....	162
4.2.3	Cheminement du cycle de modification.....	165

4.3	Cartographie des associations dans le scénario de modification	175
4.3.1	Analyse de la cartographie.....	183
4.3.2	Synthèse relative à la cartographie	187
CONCLUSION.....		189
RECOMMANDATIONS.....		191
ANNEXE 1 Définitions des documents officiels chez Bombardier Aéronautique....		193
BIBLIOGRAPHIE.....		195

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I Synthèse des associations (Cardinalité, Direction, Agrégation, Savoir-faire)	86
Tableau II Synthèse des associations (Opérations sur les instances d'association)	87
Tableau III Synthèse des associations (Opérations sur les prototypes d'associations).....	88
Tableau IV Synthèse des associations (Représentation et gestion des versions).....	89
Tableau V Temps-homme alloué pour chaque type de modification (données fictives)	157
Tableau VI Liste des signatures saisies par le RFC	166
Tableau VII Liste des documents impactés - étape 2	167
Tableau VIII Liste des signatures saisies par le DCP	167
Tableau IX Liste des documents impactés - étape 3	169
Tableau X Liste des signatures saisies par le <i>DCP Impact Analysis</i>	169
Tableau XI Liste des documents impactés - étape 5	171
Tableau XII Liste des signatures saisies par le EDRN.....	172
Tableau XIII Liste des signatures saisies par le MODSUM.....	172
Tableau XIV Liste des documents d'ingénierie libérés - étape 8	174
Tableau XV Liste des documents de méthodes libérés – étape 8.....	175

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1	Liens de projection entre les structures fonctionnelle et technique 15
Figure 2	La pièce et l'abstraction de l'esquisse..... 17
Figure 3	Carte de connexion 19
Figure 4	Agrégation de liens 22
Figure 5	Neuf types de lien 24
Figure 6	Assemblage de sept pièces..... 25
Figure 7	Représentation symbolique de l'assemblage 26
Figure 8	Esquisse de l'assemblage 26
Figure 9	Deux graphes d'assemblages représentant la même structure 27
Figure 10	Un lien fondé sur l'unicité de l'information 29
Figure 11	Représentation du modèle produit comme un râteau..... 39
Figure 12	Lien de composition..... 41
Figure 13	Lien d'interface 42
Figure 14	Rapport entre le niveau d'abstraction et la formalisation du savoir-faire 56
Figure 15	Quatre cas de cardinalité 62
Figure 16	Exemple d'agrégation et de décomposition..... 64
Figure 17	Quatre cas d'agrégation – décomposition 66
Figure 18	Lien d'assemblage "Insert" 67
Figure 19	Contraintes résultant de la décomposition du Lien <i>Insert</i> 68
Figure 20	Exemple d'agrégation d'associations parallèles 69
Figure 21	Exemple d'agrégation d'associations séquentielles..... 69
Figure 22	Exemple d'agrégation mixte 70
Figure 23	Niveaux d'abstraction de l'association agrégée 71
Figure 24	Exemples de familles 72
Figure 25	Association inter-familles (lien de transport)..... 73
Figure 26	Association intra-famille..... 74
Figure 27	Exemples d'associations de transport et de publication 77

Figure 28	Propagation d'un changement via une association de dérivation	79
Figure 29	Propagation d'un changement via des relations procédurales	80
Figure 30	Propagation d'un changement via une association de transposition.....	82
Figure 31	Abstraction au niveau des vues A) Vue indépendante B) Association inter-vues.....	94
Figure 32	Abstraction au niveau des documents : une vue et deux documents	95
Figure 33	Abstraction au niveau des documents : deux vues et deux documents..	95
Figure 34	Abstraction au niveau des caractéristiques : une vue, deux documents et deux caractéristiques	97
Figure 35	Abstraction au niveau des caractéristiques : deux vues, deux documents et deux caractéristiques.....	97
Figure 36	Abstraction au niveau des caractéristiques : une vue, un document et deux caractéristiques	98
Figure 37	Abstraction au niveau des caractéristiques : une vue, un document, une caractéristique, deux attributs.....	98
Figure 38	Les dix étapes de la construction d'une application (phase 2).....	100
Figure 39	Les associations dans le fonctionnement du modèle GAPOM	101
Figure 40	Dessins de référence du soyage et de la découpe.....	104
Figure 41	Exemples de soyage a) sur une pièce de métal en feuille b) sur une pièce usinée (machined step)	107
Figure 42	Éléments de structure aéronautique typique	108
Figure 43	Abstraction au niveau des vues pour l'application de modélisation des soyages et des découpes.....	109
Figure 44	Abstraction au niveau des documents pour l'application de modélisation des soyages et des découpes.....	110
Figure 45	Abstraction au niveau des caractéristiques pour l'application de modélisation des soyages et des découpes.....	111
Figure 46	Signification des symboles dans les diagrammes exprimant la phase deux du modèle GAPOM.....	112
Figure 47	Identification de l'application et récupération des intrants pour l'application de modélisation des soyages et des découpes.....	114
Figure 48	Exploitation de l'empreinte pour l'application de modélisation des soyages et des découpes.....	116

Figure 49	Savoir-faire employé dans la génération des pseudo-empreintes de l'application de modélisation des soyages et des découpes.....	117
Figure 50	Description du générateur de pseudo-empreinte pour la création de la saillie de soyage	119
Figure 51	Description du générateur de pseudo-empreinte pour la création de la saillie de découpe	120
Figure 52	Application pour la modélisation des poches d'allègement par B. Lamarche.....	122
Figure 53	Abstraction au niveau des vues pour l'application de modélisation d'une poche d'allègement	123
Figure 54	Abstraction au niveau des documents pour l'application de modélisation d'une poche d'allègement	124
Figure 55	Dessin de référence – contour de la poche d'allègement.....	125
Figure 56	Abstraction au niveau des caractéristiques pour l'application de modélisation d'une poche d'allègement A) Lien (agrégation niveau B) B) contraintes (agrégation niveau A).....	126
Figure 57	Identification de l'application et récupération des intrants pour la modélisation de poche d'allègement dans le panneau de revêtement du fuselage	128
Figure 58	Exploitation de l'empreinte pour l'application de modélisation d'une poche d'allègement dans le panneau de revêtement du fuselage.....	130
Figure 59	Savoir-faire employé dans la génération de la pseudo-empreinte pour l'application de modélisation de poche d'allègement.....	131
Figure 60	Description du générateur de pseudo-empreinte pour la création de la saillie de poche.....	132
Figure 61	Exemple de pièce et de gabarit de découpe	135
Figure 62	Abstraction au niveau des vues pour l'application de modélisation du gabarit de découpe	136
Figure 63	Abstraction au niveau des documents pour l'application de modélisation du gabarit de découpe.....	137
Figure 64	Abstraction au niveau des caractéristiques pour l'application de modélisation du gabarit de découpe.....	138
Figure 65	Identification de l'application et récupération des intrants pour la modélisation d'une fenêtre du gabarit de découpe.....	140
Figure 66	Exploitation de l'empreinte pour la modélisation d'une fenêtre du gabarit de découpe	142

Figure 67	Savoir-faire employé dans la génération de la pseudo-empreinte de l'application de modélisation de fenêtres du gabarit de découpe	143
Figure 68	Description du générateur de pseudo-empreinte pour la création de la saillie de découpe	144
Figure 69	Étapes du processus de gestion des modifications.....	152
Figure 70	Étapes détaillées du processus de gestion des modifications (1 de 2) ...	154
Figure 71	Étapes détaillées du processus de gestion des modifications (2 de 2) ...	155
Figure 72	Phase préliminaire de l'intervention de Méthodes.....	159
Figure 73	Phase de planification et de réalisation de la modification par Méthodes.....	160
Figure 74	Structure du Canopy	162
Figure 75	Pièce AC725-33021 devant être modifiée	162
Figure 76	Localisation de la fissure	163
Figure 77	Solution 1- Ajout d'un angle.....	164
Figure 78	Associations de transport pour la portion gestion du processus de changement	178
Figure 79	Associations non définies (inclus associations de transport) pour la portion gestion du processus de changement.....	179
Figure 80	Association dans la portion documentation technique.....	182

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

AM	Application de la modification
APP	Approval
BOM	Bill of material
BS	Bulletin de service
CAO	Conception assistée par ordinateur
CDM	Catia Data Management
CM	Change Management
DM	Demande de modification
ECCB	Engineering Change Control Board
ECN	Engineering Change Notice
ECO	Engineering Change Order
ECP	Engineering Change Proposal
ECR	Engineering Change Request
ECS	Engineering configuration statement
EDRN	Engineering Data Release Notice
EO	Engineering Order
ERP	Enterprise Ressource Planning
ETDS	Engineering Technical Data Service
ÉTS	École de technologie supérieure
FAA	Federal Aviation Administration
MBOM	Manufacturing Bill of Material
M&P	Material & Process
MODSUM	Modification Summary
NIEO	Non Incorporated Engineering Order
OM	Ordre de modification
PDM	Product Data Management
PLM	Product Life Cycle Management

PM	Proposition de modification
PP&C	Program Planning & Control
REL	Release
RFC	Request for change
SGDT	Système de gestion des données techniques
STEP	Standard for Exchange of Product Data
TI	Technologie de l'information
VPM	Virtual Product Management
WIP	Work In Progress

INTRODUCTION

Mise en contexte

Les industriels du domaine de l'aéronautique sont à la recherche de moyens pour augmenter leur compétitivité. Celle-ci passe par la réduction des coûts et des temps associés à la conception ainsi qu'à la fabrication de nouveaux produits. Cette compétitivité est donc étroitement liée aux processus internes de chaque entreprise. Au cours du processus de conception, la définition d'un produit évolue constamment et continue généralement d'être modifiée même après la mise en service du produit.

De manière générale, la conception d'une pièce est soumise à un ensemble de contraintes, dont plusieurs proviennent des pièces environnantes. Cet ensemble de contraintes implique qu'une modification apportée à une pièce induit aussi des changements à d'autres pièces de même qu'à des processus en aval de la conception. Présentement, les outils de développement de produits ne permettent pas, ou très peu, de saisir l'intention de conception. Les outils plus anciens capturent le résultat géométrique alors que les outils plus récents capturent des contraintes de bas niveau, tel qu'une coaxialité, entre objets géométriques.

En raison du faible niveau de sémantique capturé et de la diversité des applications employées, la propagation de changements doit faire intervenir un savoir-faire qui requiert une intervention manuelle. Cela a pour conséquence d'insérer des délais, éventuellement des erreurs, et d'augmenter les coûts de conception et de fabrication de produits. Aussi, plus les changements surviennent tard dans le cycle de conception, plus les coûts engendrés sont élevés. Selon l'allocution de John Holding (Vice président directeur, Ingénierie et développement de produits, Bombardier Aéronautique, Montréal), 13967 changements d'ingénierie ont été dénombrés chez Bombardier Aéronautique en 2001 et il n'est pas rare que le délai de traitement d'un changement requière plus de 100 jours dans un environnement industriel [1].

Les outils de conception orientés-métier exploitant des liens technologiques fortement typés peuvent capturer l'intention de conception inhérente aux relations inter-pièces ou inter-domaines et permettre ainsi d'augmenter la productivité en conception et de garantir la cohérence au sein de la définition du produit et des processus associés. Dans de tels systèmes c'est l'application de conception orientée-métier qui permet d'établir les liens technologiques et de les exploiter. Pour comprendre le sens du terme lien technologique, prenons pour exemple un arbre et un alésage reliés par un ajustement H7f6, déterminé par le concepteur pour répondre à un objectif fonctionnel. Ce lien entre les deux entités est conservé dans un lien technologique typé qui a une persistance. Lorsqu'il y aura modification du diamètre, causé par un changement de design, la géométrie des pièces pourra être recalculée parce que l'intention est conservée sous la forme d'un lien technologique H7f6.

Il serait nécessaire de disposer d'autant de types de liens que de situations de design. Le potentiel d'application des liens technologiques est immense, mais la mise en œuvre à l'échelle industrielle pose problème en raison de la variété des cas et des savoir-faire impliqués. Mesurés sur des cas isolés, les bénéfices apportés par la mise en œuvre de liens typés sont très importants (environ 90%)[2;3]. L'idéal serait de disposer d'un système qui implémente et exploite les liens technologiques typés à travers l'ensemble du modèle-produit (exemples : modèles CAO, dessins d'installation, liste des composants, etc.) et des processus associés (exemples : outillage requis pour la fabrication, les programmes de contrôle numérique, gammes de fabrication, etc.). Cela pourrait permettre de dégager le potentiel du concept de lien technologique avec les bénéfices qu'il promet en termes de productivité et de qualité.

Plus précisément, le développement d'un système de propagation automatique des changements permettrait de diminuer les coûts et les délais liés aux erreurs susceptibles de se glisser dans un modèle produit lors d'une propagation manuelle. Bien que la mise en œuvre des liens technologiques soit complexe, le nombre important de

changements apportés au produit justifie l'exploration d'un système qui permettra la réexploitation des liens technologiques et ce à chaque modification. À terme, la capture des relations intra et inter-pièces devrait permettre d'analyser l'impact d'une modification potentielle pour en déterminer le coût a priori et de garantir l'intégrité de la définition numérique d'un produit lors d'une modification (propagation). Elle devrait également permettre de retracer, a posteriori, les décisions ayant mené à un état de design (traçabilité).

La problématique de généralisation du concept des liens technologiques

Lors du traitement manuel des modifications au modèle produit, la propagation des changements induits des délais, des erreurs et des coûts. L'utilisation de liens technologiques est une avenue plausible pour gérer plus efficacement la propagation des changements. Toutefois, la mise œuvre de liens technologiques constitue un défi de taille composé par la complexité du produit, la variété des savoir-faire impliqués dans la conception, la fabrication et la maintenance de celui-ci, ainsi que la nature de l'environnement qui est constitué d'un grand nombre de données, d'intervenants et d'applications informatiques. Plus spécifiquement, dans ce mémoire, il est tenté de généraliser le concept de lien technologique lors du développement de produit et des processus associés. Pour Giguère [2] le lien technologique relie une caractéristique de référence, dont on extrait l'empreinte, via un lien de dérivation capturant le savoir-faire de conception, à une caractéristique cible dont on définit la pseudo-empreinte [4]. Il décrit le lien de dérivation comme un lien technologique spécialisé qui exprime une dépendance unidirectionnelle entre une caractéristique cible et une caractéristique de référence. L'objectif principal de ce projet consiste à proposer une terminologie, des concepts et un modèle permettant d'organiser la vaste variété d'associations qui interviendraient dans un système automatique de propagation des modifications.

L'intérêt des liens technologiques est mis en évidence par les résultats rapportés par Giguère. Il a mesuré les bénéfices des liens technologiques lors de la mise en œuvre

d'une application orientée métier dans un cas spécifique, en gains de temps de 72% à 94% par rapport à l'exécution de la tâche de façon manuelle. Pour progresser dans cette réflexion, suite à ces résultats positifs, il serait pertinent d'analyser si les liens technologiques peuvent être généralisés à un problème de plus grande envergure (processus industriel de gestion des changements), en offrant toujours des bénéfices malgré une mise en place complexe et coûteuse de ceux-ci. Cette intégration permettrait de créer un réseau de connexions entre les données pour propager de façon automatique les changements.

Méthodologie de recherche

Afin de débiter l'exploration de cette avenue, il a été d'abord nécessaire de dresser un inventaire des liens présentés dans la littérature scientifique et commerciale. Celui-ci établit un portrait de la situation, tout autant au niveau des concepts théoriques qu'au niveau de leur mise en pratique dans les applications informatiques d'aujourd'hui. La réalisation de l'inventaire alimente notre analyse du sujet et nous amène à poser un vocabulaire unifié pour définir les concepts. Par la suite, l'analyse mène à la mise en place des fondements essentiels à la réflexion sur la généralisation du concept de lien technologique lors du développement de produit et des processus associés.

Nous proposons un modèle générique de mise en œuvre des associations (terme générique définit au chapitre 2) au sein d'applications orientées métiers, ainsi qu'une analyse du potentiel d'exploitation des liens pour le processus de gestion des changements. Le modèle fournit un cadre de référence pour la conception d'applications basées sur les liens technologiques. L'analyse tente de mesurer le potentiel d'exploitation des liens par la création et l'examen d'une cartographie des liens qui se retrouve dans un processus industriel de gestion des changements. La cartographie proposée vise essentiellement à illustrer la quantité et le type de liens exploités par le processus de gestion de changements de Bombardier Aéronautique. Elle met en

évidence des informations nous permettant d'évaluer la pertinence des concepts et du modèle présentés aux chapitres précédents.

Structure du mémoire

Le premier chapitre de ce mémoire propose un inventaire des concepts relatifs aux liens qui se retrouvent dans la littérature scientifique et commerciale en identifiant leurs caractéristiques telles que leurs rôles, leurs fonctionnalités, leurs niveaux d'abstraction, le savoir-faire qui est formalisé dans les liens, etc.

Le second chapitre, propose une terminologie relative au concept d'association et aux objets associés. Ensuite, il présente une analyse des éléments de caractérisation des associations. Différents rôles des associations en développement de produit sont décrits. Une synthèse des éléments de caractérisation des associations utilisés dans la littérature est finalement proposée.

Le troisième chapitre fournit un modèle générique pour la conception d'applications exploitant le concept de lien technologique. Le modèle générique propose un cadre de référence pour la conception d'applications orientées métiers afin d'en réduire l'effort de développement. La section 3.1 décrit le modèle générique nommé GAPOM. La section 3.2 valide le modèle générique en l'appliquant à trois applications orientées métiers.

Au chapitre 4, nous utilisons un scénario complexe pour évaluer la portée du modèle dans un cas de propagation de modification, afin de déterminer dans quelle mesure le modèle proposé est utilisable dans le monde réel. Tout d'abord, la section 1 documente le processus de gestion des modifications actuellement implanté chez Bombardier Aéronautique. La section 2 documente un scénario de gestion des modifications chez ce partenaire industriel. Ensuite, la section 3 présente une cartographie du processus basée sur les deux premières sections. Le chapitre se termine par une analyse du fonctionnement des concepts et du modèle dans le contexte de cette cartographie.

Finalement, le rapport se termine par une conclusion et une section qui discute des perspectives possibles pour la continuité du projet.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'objectif de cette revue est de dresser un inventaire des liens décrits par la littérature scientifique et commerciale en identifiant leurs caractéristiques telles que leurs rôles, leurs fonctionnalités, leurs niveaux d'abstraction, la nature du savoir-faire formalisé dans les liens, etc. Cela permettra ensuite de situer le projet par rapport à l'existant. Le chapitre est composé de sept sections.

La première section situe les liens au sein des processus de développement de produits. On s'intéresse alors à la gestion de la complexité et aux liens entre objets hétérogènes. Par la suite, on discute des liens d'assemblage et des relations qu'ils expriment entre les composants d'un assemblage. On aborde ensuite les liens pour l'automatisation, dont certains formalisent un niveau de savoir-faire suffisant pour automatiser par exemple des tâches répétitives du processus de conception. Puis, on étudie les principes de mise en œuvre des liens. Ensuite, on s'intéresse au domaine du génie civil qui est confronté lui aussi au problème de gestion de changement tout en minimisant les erreurs. Finalement, le chapitre se termine par un regard sur l'offre logicielle. Ces dernières sections présentent l'utilisation des liens au sein des systèmes de gestion de données techniques (SGDT) destinés à gérer l'ensemble des données techniques se rattachant à un produit durant son cycle de vie, ainsi qu'au sein de deux modélisateurs solides (CATIA V5 et Solid Edge).

1.1 Liens au sein des processus de développement de produits

Dans cette section, on s'intéresse aux liens au sein de systèmes complexes et aux liens entre objets hétérogènes. Ces deux sujets sont pertinents à notre réflexion puisqu'ils nous indiquent l'état du concept de lien dans les processus développement de produits. Cette base nous permettra de consolider nos assises pour ensuite explorer de nouvelles idées.

1.1.1 Gestion de la complexité

Dans les années 1980 la compagnie Computervision a réalisé que les concepteurs avaient besoin de partager des dessins et d'autres informations numériques relatives au produit. La réponse à ce besoin a été le développement d'un système de partage d'information connu sous le nom de "Product Data Manager" qui fut le premier PDM (Product data Management) [5]. L'accessibilité des modeleurs solides au cours des années 1990 a apporté des gains significatifs de productivité pour les tâches d'ingénierie. Ainsi, la modélisation 3D a permis de compléter des designs et d'effectuer des changements plus rapidement qu'en 2D. De plus, la création assistée de dessins et la réutilisation d'anciens modèles a permis de réduire le temps de design des nouveaux produits. La combinaison de ces facteurs a créé une explosion des données techniques [6].

Par ailleurs, les processus de conception ont vu l'avènement de l'ingénierie concourante, ce qui a amené les départements de méthode, production, achat et autres à consulter les données plus tôt dans le cycle de vie du produit. En conséquence, l'explosion des données et l'implantation de nouveaux processus d'ingénierie simultanée ont complexifié la gestion des accès, le contrôle des versions et la propagation des changements.

Ce domaine, de la gestion de la complexité, regroupe plusieurs concepts qui sont pertinents à notre projet tels que le maintien de la cohérence des informations par les liens, l'agrégation des vues du produit et les opérations (création, suppression, modification et propagation) pour gérer les liens.

CIMdata [7] indique que la gestion des données d'ingénierie est complexe en raison de la quantité de données d'ingénierie qui existent dans l'entreprise, de l'utilisation des données par plusieurs personnes pour différentes fonctions et souvent en différents sites,

de l'utilisation des données par différents programmes ou applications, de l'existence de différentes définitions du produit et de différentes versions du produit.

Jacobs [8] et Eustache et al. [9-11] présentent des modèles qui tentent de mieux gérer la complexité des changements. Schuh et al. [12] présentent une stratégie de gestion des changements qui en réduit la complexité.

Jacobs [8] présente un cadre de référence qui supporte la gestion de design complexe, qui intègre plusieurs représentations de design et qui construit des relations entre elles. L'objectif est d'offrir un environnement flexible aux concepteurs pour développer et gérer des représentations du produit pour une variété de processus (conception, fabrication, vente) et d'applications (CAO, FAO).

Il utilise des objets de design (design object) pour représenter la hiérarchie d'agrégation (représentation du produit selon différents niveaux de détail) et les relations entre les représentations de design. Le design est organisé dans une hiérarchie multi niveaux en encapsulant les composants de design dans des objets.

Un objet se définit comme toute entité de design qui peut être créée ou manipulée dans un environnement de design. Par exemple, les objets de design incluent les courbes, les surfaces et tout les autres entités géométriques, les caractéristiques, les modèles mathématiques, les contraintes, les entités textuelles et numériques.

Pour définir une agrégation, qui correspond à la représentation du produit selon différents niveaux de détail, il est nécessaire de disposer de deux types de relations : une relation hiérarchique parent-enfant (hierarchical parent-child relationships) et une relation poste à poste (peer-to-peer relationships). La relation hiérarchique parent-enfant est implantée dans le système comme étant une relation de composition (attachements) qui relie le composant enfant à son parent. La relation d'attachement contient les informations de localisation pour positionner le composant enfant relativement au

parent. La relation poste à poste a pour rôle de définir la façon dont les composants à un même niveau interagissent les uns par rapport aux autres. Par exemple, les informations contenues dans ce type de relation sont: position d'un composant par rapport un autre, contraintes cinématiques qui décrivent les mouvements relatifs d'une pièce par rapport à une autre, toute autre information de design qui décrit la conduite des éléments les uns par rapport aux autres tels que connecteurs, attachement, forces, etc.

Finalement, la notion de versionning des objets pour Jacobs [8] permet de contrôler les changements à un composant de design et de retracer les différences entre les versions d'un composant de design quand le changement a été fait.

Le travail de Jacobs est orienté vers la gestion de la complexité. Toutefois, il exploite plusieurs concepts qui sont en relation avec notre projet tels que les relations, l'agrégation et les objets techniques.

Eustache [9-11] a effectué une étude qui contribue à minimiser les incohérences des informations relatives au produit au cours de son cycle de vie. Ses principaux objectifs sont d'automatiser la propagation des modifications et de s'assurer de la qualité des informations relatives au produit.

Pour améliorer la gestion de la cohérence des données du produit, l'auteur propose un nouveau modèle qui se base sur les mêmes phases que le produit et ce dès le début de la phase conceptuelle (Phase : conceptuelle= fonction -> concrète=modélisation -> physique= produit fini). De plus, il peut atteindre différents niveaux de granularité selon l'état de l'information et l'évolution du modèle produit.

Ce modèle nommé Graphe Hiérarchique d'Entités et de Contraintes (GHEC) se définit comme une hiérarchie/structure d'entités et de contraintes permettant la représentation et la gestion des informations externes (informations indépendantes des outils qui les ont générées). Pour ce faire le modèle crée des relations entre les informations générées par les

différents métiers afin de pouvoir tenir compte de leur savoir-faire et des informations qu'ils ont déjà produites (Relation= savoir-faire).

Dans ce modèle, les entités possèdent des attributs et des méthodes pour stocker les divers renseignements non seulement sur leur définition abstraite, mais aussi sur leur représentation concrète (fichier, document, numéro de série). Une entité est composée de plusieurs attributs qui définiront les propriétés et l'adresse de l'information ciblée. Les attributs de l'entité sont le nom du contenant et sa localisation (nom du fichier et chemin d'accès), le type de contenant (tableur, fichier CATIA), et la référence pour retrouver l'information dans le contenant.

La construction du modèle se fait à partir de quatre types de contraintes : la contrainte de dépendance, la contrainte relationnelle, la contrainte booléenne et la contrainte règle. Pour chacune des quatre contraintes, un niveau représentant le niveau de propagation lui est assigné. La contrainte de dépendance (niveau 1) indique une relation de dépendance entre les deux éléments d'information. Cette relation doit être interprétée par l'opérateur avec ses propres connaissances afin de satisfaire cette relation. La contrainte relationnelle (niveau 2) est un opérateur arithmétique, une fonction mathématique, ou un des six opérateurs relationnels (<,=,>,&neq;≥,≤). La contrainte booléenne (niveau 2) sont les opérations logique (et, ou, etc). La contrainte règle (niveau 3) est une règle métier appliquée à une entité.

Les différents niveaux assignés aux contraintes ont pour signification de déterminer le niveau de propagation. Le premier niveau (manuel) indique la relation de dépendance entre les deux entités. L'utilisateur est le seul à pouvoir définir si la relation est vérifiée ou non. Le deuxième niveau (semi automatique) associe l'expression de dépendance (une expression de type booléenne ou relationnelle) à la contrainte. L'évaluation de la contrainte est assistée. Cependant la propagation est toujours manuelle. Le troisième niveau (automatique) illustre une action (propagation automatique) qui est associée à

une règle. Une règle possède une description, des attributs et des méthodes qui permettent de la manipuler :

- 1) un identifiant unique,
- 2) un type (type de la contrainte : relationnel, booléen),
- 3) une fonction à satisfaire (l'expression en tant que telle),
- 4) sa satisfaction (contrainte satisfaite ou non),
- 5) droit accès,
- 6) des méthodes (qui permettent de manipuler la contrainte- retrouver l'information ciblée, recherche de satisfaction).

Pour manipuler le modèle, il est nécessaire de disposer des opérations de base suivantes : création, suppression, modification et propagation (opération applicable sur les entités et les contraintes). Selon l'auteur, il existe six raisons qui mènent à modifier le modèle. Les raisons qui causent la modification d'une entité sont :

- 1) modification de l'élément physique (vérifier que les contraintes, qui lui sont associées, sont toujours satisfaites),
- 2) modification de la composition de l'entité (ajout ou suppression d'une entité fille, ajout ou suppression de contrainte associée),
- 3) modification de cet état par la propagation.

Les raisons qui causent la modification d'une contrainte sont :

- 1) altération de son expression,
- 2) ajout ou suppression de composant,
- 3) l'invalidation par propagation.

Une idée intéressante est proposée par Eustache pour réduire la complexité de la gestion des données. Pour des raisons de gestion, certaines entreprises utilisent une approche systématique. Dans ce cas, ils divisent le produit en sous-produits. Cependant, ce gain a pour effet négatif de complexifier le problème de cohérence des données. Cette division a pour effet d'isoler certaines pièces par rapport à leur contexte (à d'autres pièces ou éléments géométriques qui leurs sont dépendants).

Pour rétablir la situation Eustache propose d'utiliser des liens immuables. Ils sont des interfaces d'égalité permanente entre certaines entités des sous-produits. Ces interfaces d'égalité permettent de maintenir la cohérence d'une même information qui se retrouve dans différentes entités à travers plusieurs sous-produits.

Eustache propose certaines idées qui sont en relation avec notre projet telles que l'identification de types de contraintes (contrainte relationnelle, contrainte booléenne, contrainte règle) et la reconnaissance de quatre opérations sur les entités et les contraintes (création, suppression, modification, propagation).

Schuh et al. [12] propose une stratégie plutôt qu'un modèle pour gérer la complexité. Le *release engineering* est une stratégie de gestion des changements qui permet de réduire le nombre de changements lors du cycle de conception du produit. La stratégie est de regrouper un certain nombre de changements pour les propager en même temps. Cela produit une réduction de l'effet des interdépendances ainsi que du nombre de changements réactifs.

1.1.2 Liens entre objets hétérogènes

Les liens entre objets hétérogènes formalisent la relation entre deux objets qui ne sont pas membres d'un même ensemble. Un ensemble regroupe des objets de nature homogène. Dans un ensemble, tous les membres sont représentatifs d'une définition commune. Voici quelques exemples d'ensembles : une vue, un département, une

discipline, un article, une fonction, etc.. Chacun des auteurs suivants présente des liens qui ont pour caractéristique de lier des objets appartenant à des ensembles différents. Le niveau de connaissance capturé par ces liens va de faible à nul. Dans certain cas, les liens hétérogènes sont de simples liens conteneur à conteneur. Dans d'autres cas, ils assurent la cohérence des contraintes géométriques entre les modèles de conception et de fabrication.

Maurino [13] propose un lien de projection (fonctionnelle) ou de correspondance qui formalise la correspondance entre article et fonction. Ce lien permet d'associer des fonctions de la structure fonctionnelle avec des articles de la structure technique. La structure fonctionnelle correspond à la description des niveaux successifs de décomposition du produit en fonctions, alors que la structure technique (ou nomenclature d'études) représente la décomposition hiérarchisée du produit en organes matériels et logiciels (Figure 1).

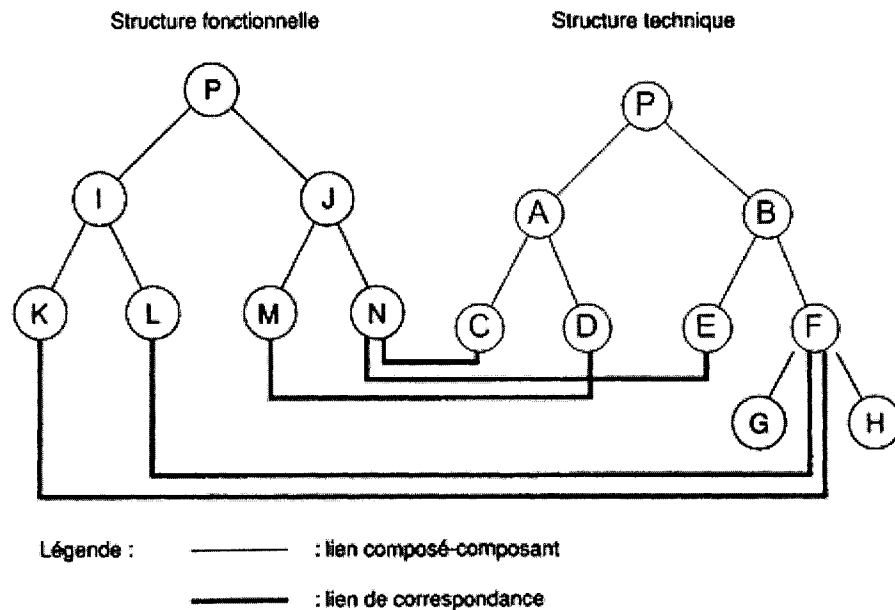


Figure 1 Liens de projection entre les structures fonctionnelle et technique [13]

De Kraker et al. [14;15] proposent une contrainte inter-vues pour connecter les vues (design et fabrication) et permettre la propagation des changements. Ainsi, pour propager une modification de la vue *édition* (modèle où s'effectue la première modification, design ou fabrication) aux autres vues, les graphes de contraintes sont connectés par des contraintes inter-vues (*Inter-view constraints*) appelées liens. Les graphes de contraintes représentent les contraintes géométriques contenues dans une vue. Il existe un graphe de contraintes pour chaque vue. Lors d'une modification, les nouvelles valeurs de paramètres (de la vue *édition*) empruntent les liens pour être propagées aux paramètres des caractéristiques appartenant aux autres vues. Les liens sont unidirectionnels de la vue *édition* vers les autres vues. Selon le type de propagation, trois situations surviennent. La première correspond à une propagation de changement sans conflit. La nouvelle valeur du paramètre est propagée aux autres vues en utilisant

les contraintes géométriques. La deuxième situation correspond à une propagation de changement avec conflit. Le changement de valeur du paramètre dans la vue *édition* crée un conflit avec une contrainte d'une autre vue. Le troisième changement se veut une propagation de changement plus sévère. Le changement de valeur du paramètre dans la vue édition requiert qu'une autre vue voie sa topologie changer. Par ailleurs les auteurs [14] mentionnent qu'il est indésirable de faire certains changements dans certaines vues. Par exemple, il est non justifié de faire une modification à l'intérieur de la vue de fabrication qui a pour conséquence de détruire certaines propriétés du produit qui ont été intentionnellement créés dans la vue de design. Par contre, il est justifié de faire une modification dans la vue de fabrication qui a pour conséquence de réduire le coût de production.

Mukherjee et Liu [16] proposent une forme de représentation des pièces pendant le design conceptuel. La représentation est appelée "sketching abstraction". Cette représentation est constituée de la géométrie discrétionnaire, de la géométrie non discrétionnaire, des liens quasi-links et des quasi-nœuds. La géométrie discrétionnaire (géométrie qui a une fonction à assurer, tel un trou ayant pour rôle d'attacher la pièce à une autre) d'une pièce est capturée par des caractéristiques fonctionnelles (tels les trous à la Figure 2). La géométrie non discrétionnaire (géométrie qui n'a pas de fonction précise à remplir) est représentée en utilisant un mécanisme de lien (Figure 2). Il existe deux types de quasi-link. Le quasi-link faible (Weak quasi-link) qui porte une relation de nature géométrique (concentricité, angularité, parallélisme, perpendicularité, etc...) entre deux caractéristiques. Le quasi-link fort (Strong quasi-link) est utilisé pour représenter la géométrie entre deux caractéristiques fonctionnelles. La Figure 2 illustre deux exemples de représentation appelée "abstraction de l'esquisse".

Un autre concept important est le Quasi-node. Le Quasi-node est un nœud abstrait entre deux ou plusieurs quasi-links qui représente un point de changement significatif dans la géométrie. Par exemple, une courbure qui compose la pièce est un Quasi-nodes.

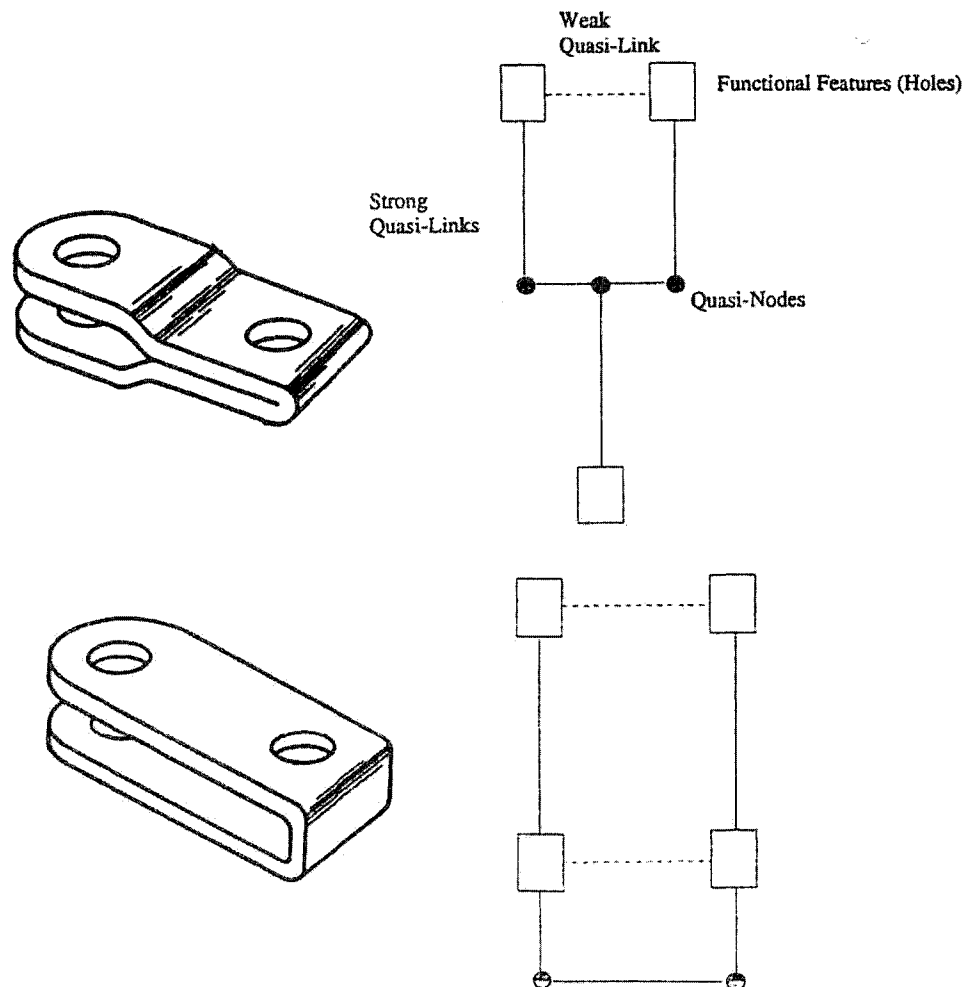


Figure 2 La pièce et l'abstraction de l'esquisse [16]

Le système de Zimmermann et al. [17] contient des liens inter-vues nommés "cross-linked product models". Ils ont pour objectif de formaliser la relation entre deux objets techniques (engineering object) provenant de deux vues différentes (design, usage, assurance qualité). Les liens inter-vues, comme les liens intra-caractéristique (intra feature link), sont instanciés dans les modèles produits à partir du lien générique du UMEO (Unified Model of Engineering Objects).

Yassine et al. [18] proposent une représentation, nommée carte de connexions (connectivity maps), capable de capturer et d'analyser les relations de dépendance entre des éléments hétérogènes tels que les tâches de développement, les concepts d'architecture et différents types d'informations. Pour être capable de capturer les relations de dépendance entre les éléments, les auteurs se sont inspirés des cartes de relations (relationship maps). Celles-ci capturent la relation de dépendance entre les éléments à l'aide d'une matrice. Ainsi, comme l'illustre la Figure 3, chaque X représente une relation de dépendance entre un élément de type A et de type B. Cette représentation ne permet pas d'exposer et d'explorer la logique derrière une relation. Elle permet seulement de capturer des dépendances entre les éléments. Le niveau de sémantique traité via cette représentation demeure faible.

De son côté, la carte de connexion (Figure 3) est un regroupement de matrices qui contient les relations de dépendance des éléments. Les chiffres portés à la carte de connexion font référence aux sous-éléments de type A.

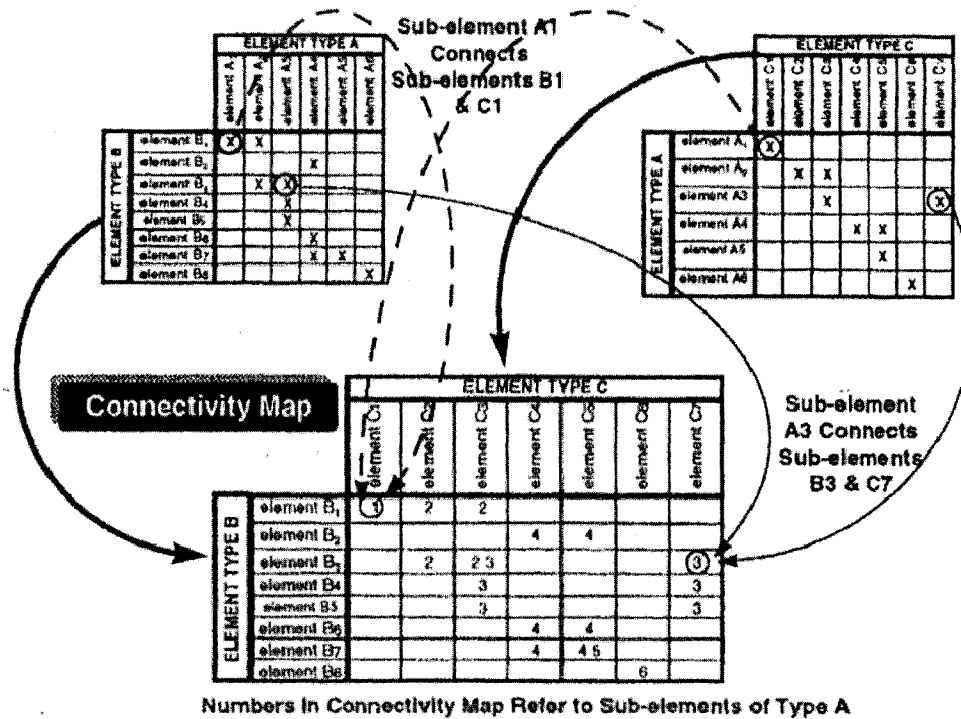


Figure 3 Carte de connexion [18]

Au premier coup d'œil, la carte de connexions (connectivity maps) semble être une extension simple de la carte de relations (relationship map) qui saisit les relations de dépendance entre trois types d'éléments. Cependant, ce qui permet d'explorer et d'analyser la logique derrière la relation est le choix des types d'éléments. Pour comprendre le fonctionnement de la méthode prenons par exemple les trois types d'éléments suivant : tâche, fonction et produit physique (composant). Si une analyse est effectuée par rapport à ces éléments, il sera possible d'évaluer si une tâche satisfait partiellement ou totalement une fonction et d'évaluer le lien entre une fonction et le composant. De cette analyse, il serait possible de conclure que, si une tâche ou un composant n'est pas identifié ou associé à une fonction, alors les responsables devraient investiguer pour vérifier si la tâche ou le composant ajoute de la valeur au produit.

Michaud [3] démontre qu'une préparation adéquate des modèles de pièces à l'aide d'une méthodologie tirant parti de l'approche métier, du typage des entités et des liens technologiques permet un gain de temps appréciable lors de la propagation des changements, depuis la pièce jusqu'à l'outillage associé. Ce gain a été conclu par une analyse comparative entre CATIA V4 et CATIA V5 pour la modélisation des tôles de revêtement d'aéronefs et des gabarits de découpe employés pour la préparation de leur usinage. Il en résulte que l'effort supplémentaire consenti lors de la création des modèles avec liens technologiques est rapidement récupéré lors des modifications subséquentes.

L'aspect intéressant pour notre projet est que Michaud [3] établi un lien entre objets hétérogènes. Celui-ci est représenté comme un lien technologique persistant entre un modèle de tôle (ensemble : conception) et son gabarit de découpe (ensemble : fabrication). À partir du moment où des liens technologiques persistants existent entre le modèle d'une pièce et son outillage, les deux modèles restent associés, ce qui permet la propagation de tout changement apporté au modèle de la pièce à sa contrepartie outillage.

1.2 Liens au sein des assemblages

Les liens au sein des assemblages sont présentement utilisés dans les systèmes de CAO. Dans certains cas, ils sont stockés dans les systèmes de gestion de données techniques. Étant donné leurs places importantes dans les systèmes d'aujourd'hui, il est essentiel de traiter de ce sujet afin d'alimenter notre réflexion.

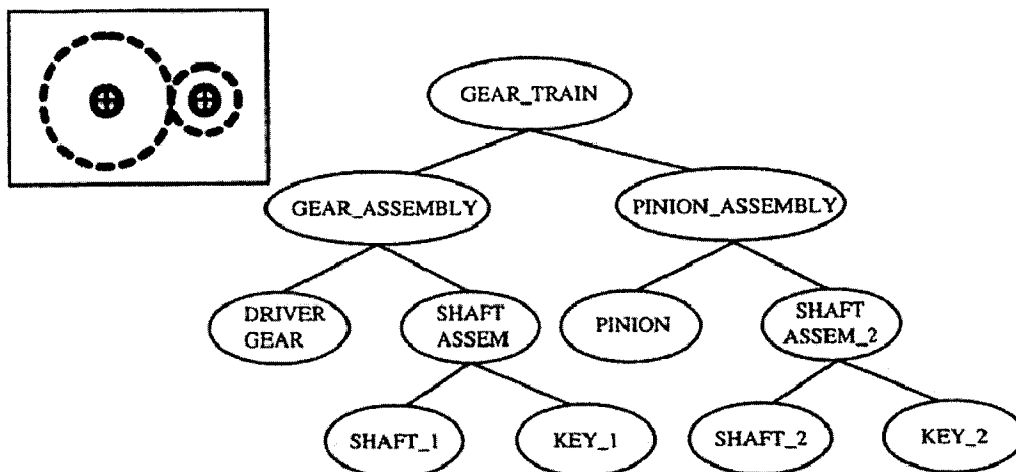
Les liens d'assemblage sont établis entre les composants d'un assemblage. Entre autres, ils permettent d'orienter et de positionner les composants les uns par rapport aux autres. Pour cela des contraintes de contact sont notamment utilisées. Dans certains cas plus avancés, ces liens décrivent plus précisément la nature du lien d'assemblage. Par exemple, ils peuvent informer sur la manière dont le contact est maintenu (colle, vis, soudure, etc.).

Lee et Gossard [19] expliquent cette relation d'assemblage comme un lien virtuel (virtual link) qui décrit la façon dont les composants sont connectés ensemble. Le lien contient l'information suivante sur une paire de composants reliés : une description de l'attachement rigide ou conditionnel, une description des contraintes de translation, une description des contraintes de rotation et des caractéristiques reliées par un contact (mating feature). Les liens contiennent les adresses des composants reliés. Il est possible, à partir des caractéristiques de contact, de déterminer les matrices de transformation qui permettent de localiser et d'orienter les composants. Dans le cas où il est nécessaire de relier plus de deux composants ensemble, plusieurs liens virtuels sont utilisés. Lors de la création d'un lien virtuel l'utilisateur fournit les informations nécessaires pour instruire la structure de données du lien générique.

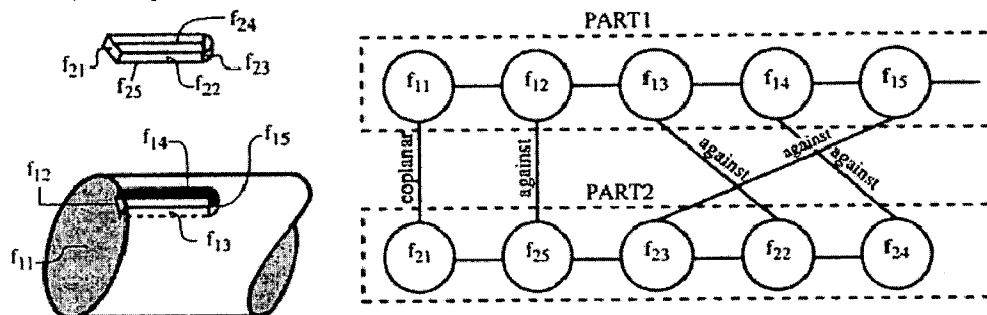
Shah et Mantyla [20] introduisent la caractéristique d'assemblage (Assembly feature) comme une association de deux caractéristiques de forme appartenant à des pièces différentes. Elle contient une structure pour spécifier les contraintes mutuelles de forme, les contraintes de position et d'orientation des caractéristiques de contact. Le terme caractéristique de forme (form feature) se définit comme une agrégation de plusieurs éléments géométriques qui, combinées ensemble, possèdent une certaine signification [21]. L'ajout de Shah et Mantyla [20], par rapport aux autres auteurs, est qu'ils agrègent (agrégation) l'ensemble des contraintes décrivant la relation dans une caractéristique d'assemblage. La Figure 4 donne un exemple de lien agrégé. En a), la figure représente la nomenclature d'un train d'engrenages (gear train). La Figure 4 b) représente les différents liens "géométriques" entre la clavette (key) et la rainure (keyway) de l'arbre (shaft). Finalement, à la Figure 4 c), la caractéristique d'assemblage regroupe l'ensemble des liens en une unité pour augmenter le niveau d'abstraction du modèle.

Ceci a pour premier avantage d'amener la création d'un assemblage à un plus haut niveau d'abstraction en stockant l'ensemble des contraintes entre deux groupes d'éléments géométriques dans un seul lien. Le deuxième avantage est de permettre aux

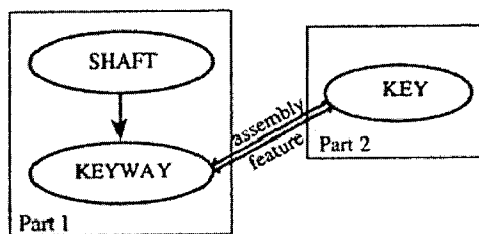
contraintes d'être exprimées entre des caractéristiques significatives d'un point de vue fonctionnel plutôt que des relations entre les faces.



(a) Component Level Assembly Model



(b) Geometry Level Assembly Model



(c) Feature Level Assembly Model

Figure 4 Agrégation de liens [20]

Masclé et al. [22] proposent un système appelé SCAP (Système de Caractéristiques d'assemblage Produits) dont le rôle est de représenter les états du produit et les séquences de génération du produit. De plus, il saisie des informations non-géométriques telles que la priorité d'assemblage, les caractéristiques du matériel. Dans SCAP les informations sont contenues dans des liaisons à chacun des niveaux (assemblage, pièce et face) des caractéristiques d'assemblage.

Dans le système, il existe au moins quatre types de liaison qui sont la liaison virtuelle (décrit les interférences entre les solides en mouvement), la liaison réelle (décrit la technologie employée telles que soudage, collage, etc), la liaison de contact (décrit le pré-positionnement géométrique des pièces) et la liaison fonctionnelle (représente un aspect fonctionnel de la liaison de contact). Pour ces auteurs la signification du terme caractéristique d'assemblage est de contenir des informations géométriques (face), technologiques (processus) ou fonctionnelles (fonction du produit) assignée à une face, une pièce ou un sous-assemblage.

Pour faciliter la description des liens entre les composants, Fouda et al. [23] proposent neuf différents liens (Figure 5). Ils décrivent les principales relations de contact entre les pièces et certaines relations de non-contact (Un à un, un à un avec plusieurs contacts, plusieurs à un, un à plusieurs semblables, un à plusieurs différents, etc.). Les liens saisissent les caractéristiques fonctionnelles des relations (stabilité, mouvement relatif, le démontage et la direction de l'insertion).

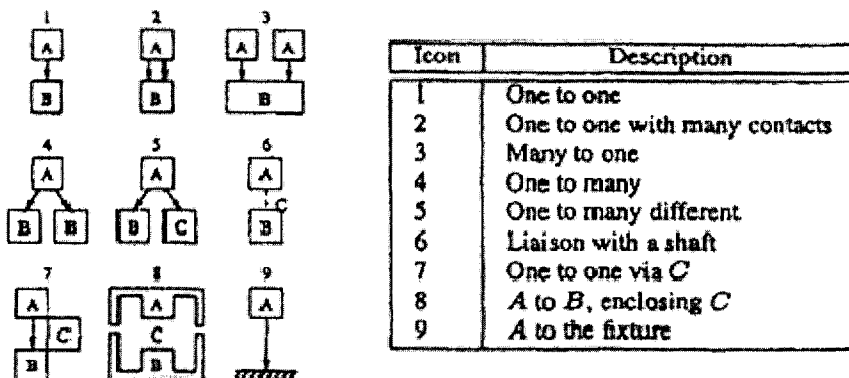


Figure 5 Neuf types de lien [23]

Salomons et al. [24] présentent un outil de support au re-design appelé FROOM. Ce système à base de connaissances permet de modéliser des composants et des assemblages. La particularité de ce système est qu'il supporte des relations entre n'importe quelles combinaisons de ces différents types d'objets : assemblage-assemblage, assemblage-caractéristique, composant-caractéristique, caractéristique-caractéristique, face – face, etc. La représentation des relations se fait sous la forme de graphe conceptuel. Celui-ci est composé de nœuds tels que les objets (assemblages, composants, caractéristiques, face et autres éléments géométriques de bas niveaux) et de relations conceptuelles (les relations entre les éléments sont des contraintes fonctionnelles ou de fabrication). Les nœuds sont reliés par des arcs. Les arcs ont pour caractéristique d'être unidirectionnels ou bidirectionnels.

Pour la construction des graphes, le système fournit une librairie contenant les composants et les relations conceptuelles de base. De plus, il est possible de raffiner la librairie en ajoutant des nouveaux concepts et relations conceptuelles. Il existe plusieurs types de graphe. On trouve le graphe conceptuel pour représenter les assemblages. Celui-ci peut représenter l'assemblage selon deux approches qui sont l'approche descendante et l'approche ascendante. Par exemple, pour l'approche ascendante, les

relations de bas niveaux suivantes ont été implantées pour positionner les composants (concepts) les uns par rapport aux autres : contre (against), alignement (align/fit), contact (contact), orientation (orient) et décalage parallèle (parallel offset). On trouve le graphe conceptuel pour représenter les relations entre les composants et les caractéristiques. Dans ce cas, les concepts sont les faces planes et les faces cylindriques alors que les relations sont les suivantes : adjacent, perpendiculaire, parallèle et coaxiale. Finalement, il existe le graphe conceptuel pour représenter les contraintes. Dans ce cas, les différentes contraintes pouvant être représentées sont les contraintes géométriques nominales, contraintes de tolérances et les contraintes de paramètres.

Tan et Zhang [25] proposent un système, basé sur des contraintes relationnelles, qui supporte le design conceptuel, lors d'un processus de design qui débute par la conception d'un ensemble et qui se termine par la conception des composants (approche descendante). La réalisation de l'assemblage, par exemple l'assemblage de sept pièces de la Figure 6, se fait à partir d'une représentation symbolique (Figure 7) ou d'une esquisse d'assemblage (Figure 8).

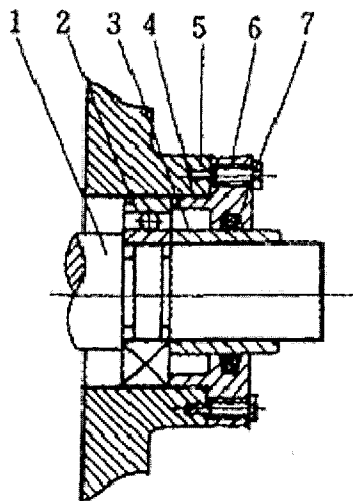


Figure 6 Assemblage de sept pièces [25]

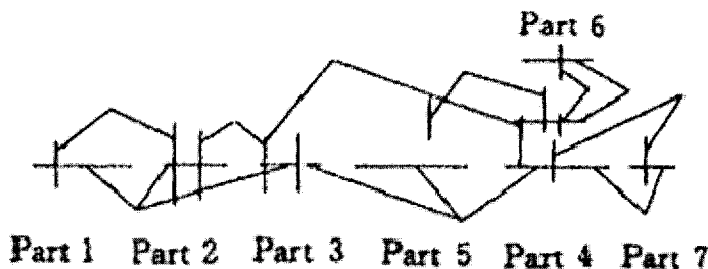


Figure 7 Représentation symbolique de l'assemblage [25]

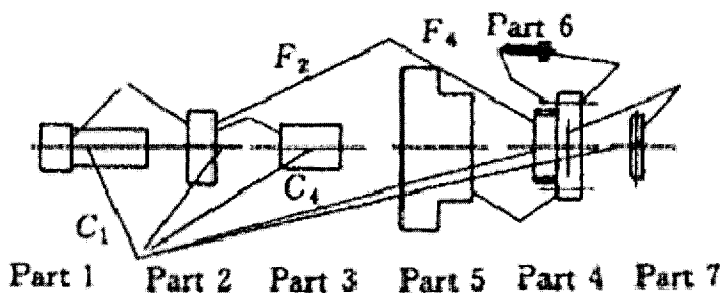


Figure 8 Esquisse de l'assemblage [25]

Dans ces représentations les détails sont ignorés, cependant il est important de définir les contraintes. Ceux-ci contiennent l'information d'assemblage et les relations entre les pièces. Le rôle des contraintes (constraint entities) est de décrire la position spatiale des pièces dans l'assemblage. Dans l'expression symbolique les pièces sont remplacées par des symboles spécifiques qui expriment les relations entre les pièces. Cette représentation rend le design conceptuel plus facile à exprimer et à réviser. Afin d'exprimer les relations (contraintes d'assemblage) entre les pièces, l'auteur utilise un graphe de structure. Pour un même assemblage, il existe différents graphes de structure. Par exemple la Figure 9 illustre deux graphes qui représentent la même structure.

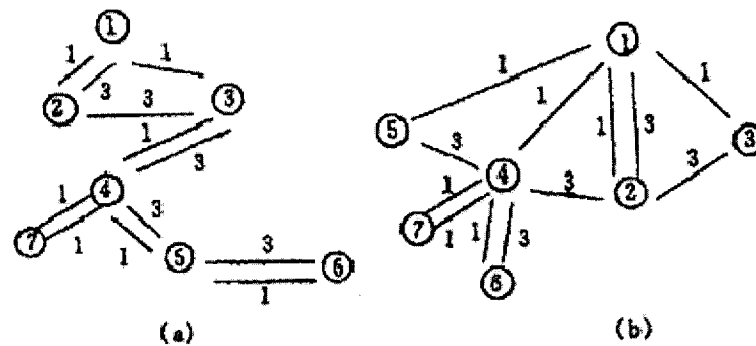


Figure 9 Deux graphes d'assemblages représentant la même structure [25]

Tan et Zhang [25] prétendent que les contraintes d'assemblage n'ont pas à être imposées directement sur les surfaces de contact des pièces. Selon eux, l'usage de seulement deux contraintes ne permet pas de couvrir l'ensemble des relations d'assemblage retrouvées normalement dans les cas typiques. Pour tenter de couvrir un plus grand ensemble de relations d'assemblage, l'auteur propose six types de contraintes d'assemblage : ajustée (fits), équidistante (equidistant), contre (against), point fixe (fixed-point), perpendiculaire (perpendicular) et parallèle (parallel). L'auteur englobe les six contraintes d'assemblage dans la famille des contraintes relationnelles (relational constraint). Il ne définit pas ce terme, cependant il est pertinent de déduire que les contraintes relationnelles formalisent des relations entre deux éléments. Dans ce cas précis, les éléments sont des pièces d'assemblage et les relations sont des contraintes d'assemblage.

1.3 Liens pour l'automatisation

Les liens pour l'automatisation sont utilisés pour tenter d'automatiser le processus de conception afin de pouvoir automatiser les tâches répétitives qui le constituent et d'automatiser la propagation des changements. L'implantation de tels liens permet de mieux gérer le changement, de minimiser les erreurs et, du même coup, d'améliorer la

cohérence des modèles. Les améliorations visées par les liens pour l'automatisation sont communes avec les améliorations ciblées dans notre projet.

Dans certains cas spécialisés, les liens pour l'automatisation peuvent être utilisés dans la modélisation de tâches orientées métiers où le savoir-faire est formalisé dans un lien technologique. Ce point de vue est décrit par François Giguère [2;4;26]. Giguère [2] présente une solution permettant d'assister et d'automatiser des tâches de modélisation répétitives tout en saisissant et en réutilisant le savoir afin de maintenir la cohérence des données à l'intérieur du modèle d'assemblage. Pour ce faire, il a développé un mécanisme basé sur les caractéristiques conceptuelles qui saisit les relations entre les pièces appropriées en instanciant un lien typé entre elles, qui extrait une caractéristique de la pièce de référence, qui crée, grâce au lien, une caractéristique en utilisant les informations dérivées de la caractéristique de référence, et qui préserve ce lien afin de permettre la gestion des changements [26]. Il définit la caractéristique contextuelle comme une métacaractéristique se composant d'une caractéristique de référence, dont on extrait l'empreinte, d'un lien de dérivation capturant le savoir faire de conception, ainsi que d'une caractéristique cible dont on définit la pseudo-empreinte [4]. Il décrit le lien de dérivation comme un lien technologique spécialisé qui exprime une dépendance unidirectionnelle entre une caractéristique cible et une caractéristique de référence. Il joue un rôle essentiel dans la gestion des changements. Selon Giguère, un lien technologique est un lien exprimant une relation de dépendance entre des éléments d'information [27]. De façon générale, ce lien est établi entre deux groupes de pièces.

Dans le même ordre d'idées, Macabies [28;29] propose des concepts, une méthodologie et un prototype d'application visant à éliminer les incohérences causées par les diverses représentations, tant 2D que 3D, des attachements dans le domaine de l'aéronautique.

Le travail de Macabies, bien que centré sur le problème de gestion des attachements, propose une réflexion pertinente à notre projet. L'auteur amène la notion de lien technologique pour gérer la cohérence des données à travers plusieurs modèles. Des

relations dites technologiques mettent en relation des éléments d'informations technologiques. Pour un assemblage, les liens correspondent à des composants d'attachement utilisés pour assembler des pièces. L'auteur pose deux manières fondamentales de considérer un lien. Il peut être fondé soit sur un principe de duplication, soit d'unicité de l'information. Dans un lien fondé sur la duplication de l'information, la donnée X par exemple est contenue dans deux conteneurs différents. Chacun des conteneurs est indépendant de l'autre. Ainsi, la destruction de l'un n'entraîne pas la destruction de l'autre. La cohérence de la donnée X, dans les conteneurs, est maintenue grâce à la mise en place d'un mécanisme de synchronisation.

À l'inverse, le lien fondé sur l'unicité de l'information (Figure 10) stocke la donnée X à l'extérieur des modèles (dans un fichier). De plus, la donnée X est accessible à l'extérieur des modèles.

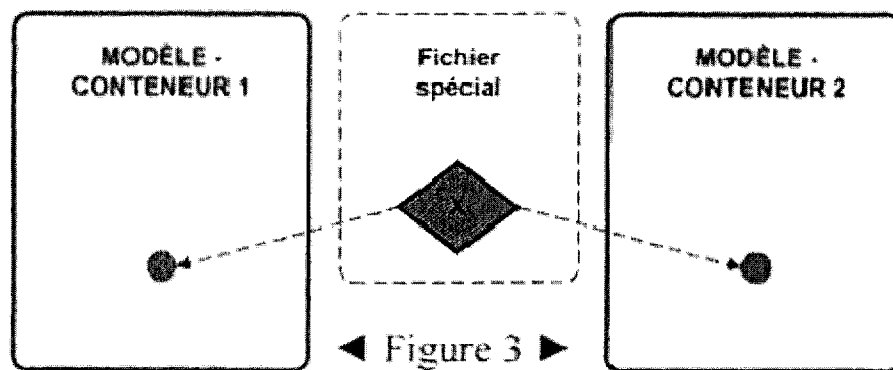


Figure 10 Un lien fondé sur l'unicité de l'information [29]

Lee et Andrews [30] présentent une méthode automatique qui permet l'extraction de données (relations spatiales) qui seront transformés par la suite en d'autres informations (matrices de transformations) qui, elles, seront nécessaires pour positionner les composants de l'assemblage [30]. Selon Ambler et Popplestone [31], les relations spatiales définissent les conditions de rencontre de deux composants selon des

équations. Les deux types de conditions sont "against" et "fit". La première condition s'applique entre deux faces planes de composants, alors que la deuxième condition s'applique entre un arbre et un alésage. Il est important de noter l'âge des travaux de Lee et Andrews [30] (20 ans) et Ambler Popplestone [31] (30 ans) pour comprendre que ces concepts étaient innovateurs à leur époque.

Shih et Anderson [32] ont tenté de prouver la faisabilité de capturer certains aspects clés de l'intention de conception dans un modèle de données neutre qui représente les contraintes, les paramétrages, l'historique de design et les caractéristiques. Les auteurs proposent des définitions utiles à notre réflexion. L'historique de design est défini comme un enregistrement des activités de design ou des événements dans la création de design. Les auteurs définissent aussi le terme *contrainte géométrique* comme une limitation de la valeur d'un attribut d'un item par rapport à lui-même ou par rapport à un autre élément du design tel que la forme, la position, l'orientation, la dimension, la relation logique (identique, distincte et un ensemble de relations), aussi bien que les contraintes d'ingénierie. Ces auteurs ont identifié trois classes de contraintes pour la représentation géométrique. La première classe, nommée *prédéfinie*, regroupe les types de contraintes qui possèdent une sémantique définie avec des paramètres (variables) bien connus dans une formulation bien établie. Toutes les entités géométriques sont des gabarits; par exemple : parallèle pour une ligne. La deuxième classe, nommée *forme libre* (free form), rassemble les types de contraintes qui ne possèdent pas de sémantique préconçue, ni de cadre de travail. Par exemple, la somme de la longueur et de la largeur doit être égale à 10. Finalement, la troisième classe, nommée *constructive* (Construct), regroupe les types de contraintes qui sont incorporés dans le processus de création d'éléments de design. Selon les auteurs, une contrainte établie une condition posée sur une entité de design ou une relation entre plusieurs entités de design. La relation peut être de l'un des types suivants : un à un, plusieurs à un, un à plusieurs et plusieurs à plusieurs. Pour chaque type de contraintes, les éléments de design sont classifiés selon leurs rôles (cible - (target), référence - (referent)). Ainsi, les variables

indépendantes sont de type références, alors que les variables dépendantes sont de type cibles.

La GR (Géométrie relationnelle, relational geometry) [33] a été développée principalement par John S. Letcher et ses associés. La GR fournit un cadre de référence pour capturer, entreposer et utiliser les relations entre les objets (éléments géométriques). Le cadre de référence est représenté par un graphe où les nœuds sont les objets et les liens représentent les relations entre les objets. Chacune des relations exprime une dépendance (constructive dependency) d'un objet vis-à-vis un autre, ou en d'autres termes, permet de supporter un second objet par le premier. Certains objets peuvent dépendre de deux ou plusieurs autres objets.

Le principal avantage de capturer et maintenir les relations interobjets est qu'un ensemble d'objets affectés peut être identifiés et exploités automatiquement dans une séquence appropriée suivant un changement depuis n'importe quel objet. Cela se fait en préservant tous les liens capturés.

Pour ce qui est des objets, chacun d'eux possède un nom unique afin d'identifier la dépendance inter-objets. Ils possèdent deux autres attributs nommés *In-degree* et *Out-degree*. *In-degree* est le nombre d'objets que supporte cet objet. Alors que *Out-degree* est le nombre d'objets qui dépendent de cet objet. Finalement, il est possible à partir du graphe de déterminer, relativement à un objet, ses descendants et ses ancêtres.

1.4 Principes de mise en œuvre des liens

Les principes de mise en œuvre des liens sont basés sur l'instanciation de liens à partir de gabarits de liens (liens génériques) contenus dans un catalogue. Lors de la construction d'un modèle produit, les liens génériques sont instanciés. Ainsi, la librairie offre des outils de base pour la construction de modèles. Elle peut être étendue selon les

besoins. Il s'avère que beaucoup d'auteurs, implicitement ou explicitement, discutent de ce concept.

Laako et Mantyla [34] tentent de résoudre le problème de satisfaction de contraintes en proposant un système qui localise le problème et le résout. Dans la solution proposée, notre attention se porte plus particulièrement sur la gestion des contraintes par le système. Tout d'abord, Shah et Mantyla [20] mentionnent dans un ouvrage connexe que les combinaisons de contraintes sont souvent représentées par un graphe de contraintes, où les nœuds sont les entités géométriques et les arcs représentent les contraintes entre les nœuds. Ensuite, ils indiquent que les contraintes peuvent être utilisées pour représenter différentes relations entre une ou plusieurs caractéristiques telles qu'une relation entre les attributs (paramètre de dimension, paramètre d'orientation, tolérance, règle de validation, etc.) d'une même caractéristique, une relation entre les attributs de plusieurs caractéristiques et une relation entre les entités géométriques des caractéristiques [20]. Dans le système EXTdesign [34], la conception d'un modèle à base de caractéristiques (model feature) se fait à partir d'une structure de données contenant les modèles génériques de tous les types de caractéristiques. Les caractéristiques contenues dans le modèle à base de caractéristiques sont en fait des instances des modèles génériques. Une instance est associée à une classe (un modèle générique) par une relation d'instanciation.

Afin de localiser les contraintes devant être résolues, le système EXTDesign représente les contraintes à différents niveaux de complexité. Les niveaux sont les suivants : un système de contraintes, une chaîne de contraintes, un groupe de contraintes, un item de contraintes et une variable de contraintes. De plus, le système permet trois types d'opérations sur les contraintes qui sont l'ajout de contraintes, la suppression de contraintes et l'enregistrement d'un ensemble de contraintes pour former une définition de contraintes [34].

Le système de Kraker et al. [14;15] utilise la notion de lien entre objets hétérogènes et la notion d'instance. En fait, ce système possède des bibliothèques de modèles génériques de caractéristiques et de contraintes. Lors de la construction d'un modèle géométrique, plusieurs outils interviennent. Le gestionnaire de caractéristiques géométriques (*feature geometry manager*) et le gestionnaire de contraintes (*constraint manager*) ont pour rôle de contenir (*store*) les instances des caractéristiques et des contraintes (géométrique et paramétrique) et de maintenir la validité des modèles géométriques à base de caractéristiques. Toutes les instances de contraintes sont contenues dans un graphique de contraintes qui contient des sous-graphes pour chaque vue. Puis, le *view manager* communique avec les deux autres gestionnaires pour gérer la validité des modèles.

Dans son modèle relationnel, Mortenson [33] fait une distinction entre un objet et une entité. Une entité est une classe d'objets abstraits, alors que l'objet est une instance de l'entité.

Zimmerman et al. [17] résument le fruit des recherches portant sur l'intégration des étapes du processus de développement pour l'industrie de l'automobile afin d'y augmenter la qualité du flux d'information entre les différentes applications. Les auteurs divisent le processus de développement en une chaîne d'étapes nommée *process step application* (ProSAP). Chacune de ces étapes offre une vision spécifique du produit qui permet aux concepteurs de résoudre des problèmes spécifiques. Pour ce faire, le système doit utiliser des caractéristiques spécialisées afin de construire des vues spécifiques du produit. L'utilisation de ces caractéristiques crée une séparation logique entre les vues. Les auteurs cherchent à relier de façon permanente les caractéristiques contenues dans chacune des vues. Les solutions déjà proposées pour solutionner cette problématique, nommées *feature mapping*, *feature conversion* et *feature transformation*, ne créent pas de lien permanent entre deux groupes de caractéristiques contenues dans des vues différentes. Par exemple, lorsque le système doit générer une vue spécifique

pour résoudre un problème, le système génère un nouveau groupe de caractéristiques spécialisées B à partir d'un groupe de caractéristiques A par un ou des liens éphémères.

Créer des liens permanents aura pour effet d'améliorer la qualité du flux d'informations et d'offrir un système automatique qui permettrait de régénérer le modèle. L'approche ULEO [17] permet de construire un modèle produit possédant différentes vues du produit. Pour construire les modèles, les usagers utiliseront des EO (engineering object) et EOR (engineering object relation). Les EO sont des objets d'ingénierie telles que : assemblages, caractéristiques, surfaces, tolérances, matériel, etc. Les EOR sont des liens permanents informationnels (de type association, agrégation ou héritage). Les EO et les EOR possèdent chacun leur taxinomie. Chacune de ces taxinomies est unique et globale pour toutes les applications du système. Lors de la construction du modèle produit les usagers instancient des EO et EORs. Il y a deux types principaux de liens. Le premier lien, nommé lien informationnel, gère la relation logique entre les deux EO. Par exemple, le lien informationnel (semblable au lien de projection de Maurino [13] et de certains concepts de Michaud [3]) gère la relation d'association entre n caractéristiques de design et m caractéristiques de fabrication. Dans ce cas, le lien indique quelles caractéristiques de fabrication sont nécessaires pour fabriquer telles caractéristiques de design. Le deuxième lien, nommé lien génératif, décrit la connaissance qui permet d'instancier les EO et les EOR automatiquement à partir des EO et EOR génériques.

Un élément important du système est qu'il permet la propagation des modifications pour deux cas spécifiques. Dans le premier cas, il permet de propager le changement d'un élément A à un élément B selon le savoir-faire du lien. Dans le deuxième cas, il permet de modifier le savoir-faire du lien générique et de le propager dans les instances de ce lien.

Le système de Bowland, Gao et Sherma [35], présenté à la section Liens au sein des assemblages, intègre un SGDT (Système de gestion de données techniques) avec un CAAPP (Computer-aided assembly process planning). Ce système utilise la notion

d'instance lors de la construction du graphe de liaisons. Ainsi, l'utilisateur va chercher la définition/modèle de l'entité/objet (classe de l'objet) dans l'une des tables de la base de données (base de données relationnelles du SGGT) pour ensuite l'instancier.

1.5 Liens dans le domaine du génie civil

Le domaine du génie civil est confronté lui aussi au problème de gestion des changements. Dans ce domaine, plusieurs disciplines entrent en jeu lors de la conception d'un bâtiment. Chacune ayant son propre point de vue sur le produit, il existe plusieurs représentations du produit. L'existence de plusieurs représentations et vues nécessitent la création d'un environnement collaboratif permettant de maintenir la cohérence des données par des relations entre les informations [36].

Pour y parvenir Mokhtar et al. [37] proposent un modèle d'information où il y a une seule source d'information pour un même composant. Ainsi, lors d'un changement, le composant est responsable de trouver toutes les disciplines qui sont affectées par le changement. Le composant envoie à chacune des disciplines un message qui décrit clairement le changement et la façon dont il affecte cette discipline. Par exemple, si le designer d'enveloppe décide d'augmenter la hauteur d'un mur, le composant mur renseigne l'ingénieur de structure de la décision et l'avise que cette décision peut affecter la conception du mur. Le mécanisme qui permet aux composants de communiquer entre eux repose sur un *lien de connaissance* (knowledge link). Les liens identifient les disciplines affectées par le changement et la façon dont elles sont affectées. Le système capture la connaissance dans une base de données sous forme de règles. Le système considère deux types de règles qui sont la règle préconstruite (Prebuilt) et la règle de construction dynamique (dynamically built rules). Une règle préconstruite est capturée au tout début du design. Par exemple, le changement de la hauteur d'un mur affecte la structure du bâtiment. Une règle de construction dynamique est capturée au besoin pendant le projet. Par exemple, une telle règle pourrait stipuler que la hauteur d'un mur est égal à la longueur du plancher plus 1000mm.

Dans un deuxième article, Mokhtar et al. [38] présentent une méthodologie assistée par ordinateur pour aider le designer à gérer un changement de design inter-relié qu'il nomme aussi l'effet domino. La méthodologie consiste en quatre grandes étapes qui sont la collecte de données, l'organisation des changements (déterminer le chemin du changement ainsi que la séquence de modification), l'horaire de changement (la durée de chaque étape est déterminé) et l'évaluation des coûts et de la durée.

Contrairement au système assisté de Mokhtar[37;38], Soh et Wang [39] proposent un système complètement automatique qui gère la propagation des changements entre les modèles géométriques. Leur système est composé de deux principaux modules. Le premier module nommé la *base de données des composants* (component model database) contient l'ensemble des dessins géométriques (geometric component drawings) du projet. Le deuxième module nommé *boîte d'outils* (function tools) possède les fonctions pour manipuler les données dans la base de données des composants. Dans ce module, il y a trois fonctions. L'outil d'esquisse (sketcher tools) est utilisé pour dessiner les composants à l'aide de contraintes implicites (dimension) et explicite (parallélisme, perpendicularité). L'outil de gestion (management tools) permet de créer et de maintenir les liens (linking constraint knowledge) entre les composants. Ce type de lien est utilisé pour lier des composants géométriques situés dans des dessins de composants différents où l'un est la cible et l'autre, la référence. Par exemple la dimension d1 d'un cadre provient de la largeur w d'un plancher. Finalement, il y a le solveur de contraintes à base de connaissances qui résout le système automatiquement après une modification d'un composant.

Dans un second article, Wang et Soh [40] étendent la propagation des changements aux autres vues du modèle. Selon les auteurs, un système qui gère la cohérence des multiples vues d'un modèle doit, lors d'une modification, propager le changement au modèle présent et aux composants apparentés, mais aussi aux entités dans les autres vues qui ont été projetées à partir d'un composant situé dans le modèle où la modification a

été initiée. Pour ce faire, les auteurs définissent des techniques de projection d'éléments (que nous pourrions nommer lien de projection) qui ont pour rôle, par exemple, de maintenir la cohérence d'une ligne dans les différentes vues de projection orthographique (orthographic projection views).

1.6 Liens dans les SGDT

Cette section s'intéresse aux SGDT pour ajouter à la revue de la littérature scientifique une vue d'ensemble des concepts matérialisés dans les outils. Elle n'est pas exhaustive, mais elle donne un bon aperçu des liens qui se retrouvent dans les SGDTs.

Le système de gestion de données techniques (SGDT, PDM Product Data Management) est une solution actuellement utilisée dans l'industrie pour aider à la gestion des changements et maintenir des liens entre les documents. Un SGDT est un outil destiné à gérer l'ensemble des données techniques se rattachant à un produit durant son cycle de vie [13]. Pour ce faire, le SGDT permet l'échange d'information entre les intervenants à de multiples moments du processus que sont le design, la production et le support après vente. Un autre rôle du système est de gérer l'échange d'information entre les différents intervenants de la chaîne d'approvisionnement. Ainsi, le SGDT est utilisé comme un pont connectant les intervenants tels que les sous-contractants, vendeurs, consultants, partenaires et clients.

Randoing [41] et Maurino [13] présentent les liens pouvant être exploités par un SGDT. Les deux auteurs utilisent des représentations différentes pour structurer les données. Randoing [41] propose une super nomenclature qui contient l'ensemble des différentes vues alors que Maurino [13] propose plusieurs nomenclatures qui représentent chacune des vues spécifiques. Bowland, Gao et Sherma [35] intègrent un SGDT avec un CAAPP (Computer-aided assembly process planning).

Selon Randoing [41], les SGDT "rallongent" la nomenclature des composants physiques, en une nomenclature dite super nomenclature. Cette super nomenclature permet de référencer toutes les informations nécessaires pour fabriquer, en ajoutant à la suite des constituants physiques, les plans, les spécifications, etc. Ces éléments sont classés par un attribut de nature (c->composant, s->spécification, p->plan, etc.). Ainsi, grâce à un tri de la super nomenclature sur l'attribut de nature, on peut définir une notion de vue par nature. Cette fonction de référencement et de structuration est employée pour référencer l'ensemble du patrimoine informationnel d'un produit, c'est-à-dire toutes les informations relatives à un produit, générées depuis sa conception jusqu'à sa destruction. Celui est composé de plusieurs vues du produit : la vue d'étude, la vue de fabrication, la vue de qualité, la vue de notice, la vue de composant, la vue de document et la vue de gamme. Le modèle produit que propose Randoing [41] est une super nomenclature qui contient l'ensemble des différentes vues. On peut se représenter son modèle comme un râteau (Figure 11).

Un lien composé-composant est un lien de nomenclature défini entre un composé et un composant (lien père-fils). Ce type de lien possède une quantité illimitée d'attributs. Les attributs sur ces liens sont principalement utilisés pour identifier à quelles vues appartient un élément.

Le "râteau" de Randoing gère des liens qui organisent des méta données. Avec sa vision, le SGDT n'a aucun moyen de comprendre ou d'exploiter le contenu des boîtes. Il gère des méta données sur des conteneurs. Cette vision ne peut pas nous mener à des outils semi-automatique ou automatique de propagation de changement.

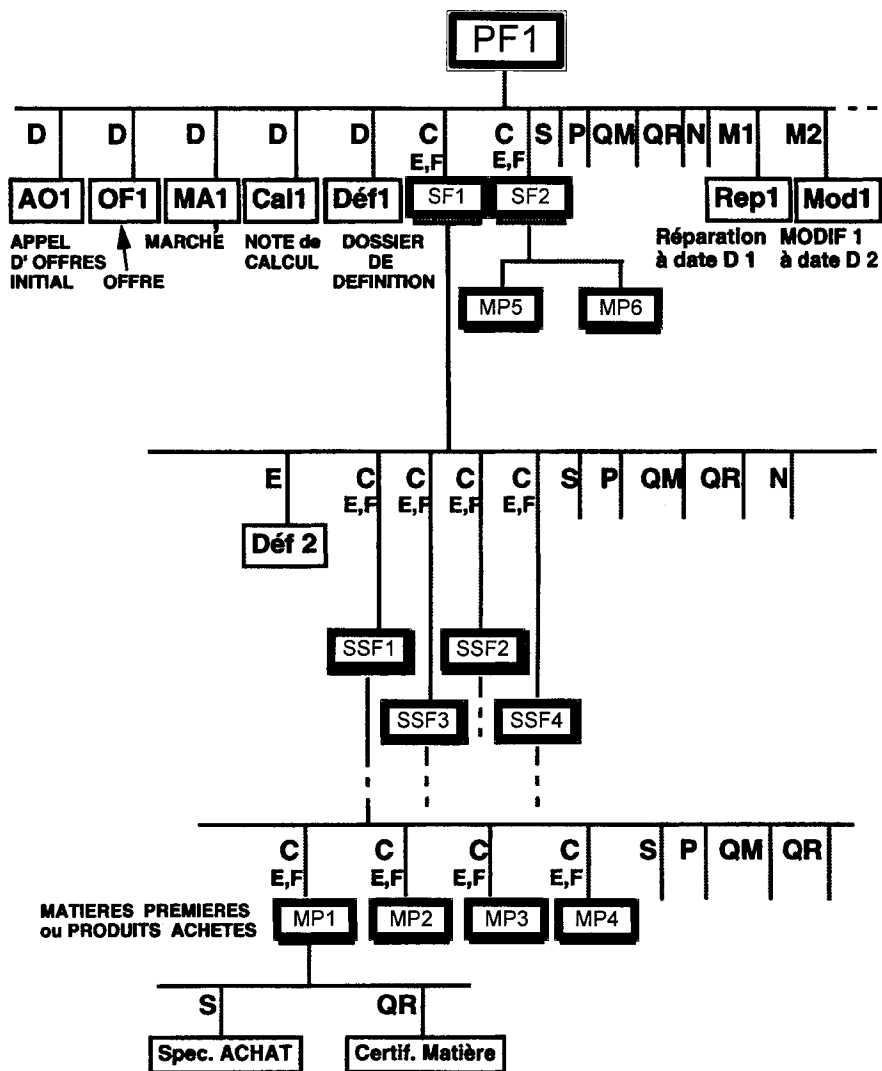


Figure 11 Représentation du modèle produit comme un réseau [41]

Maurino [13] souligne que la première action à entreprendre pour être en mesure de gérer les données techniques de l'entreprise consiste à les structurer, c'est-à-dire à en définir un modèle produit partagé par tous les acteurs du cycle de vie du produit. Celui-ci contient différentes structures du produit, chacune correspondant à une vue particulière (vue fonctionnelle, vue technique, vue industrielle, vue logistique). Pour réaliser les structures, chacun des acteurs doit hiérarchiser et compléter les objets

techniques communs en fonction de ses propres besoins. L'objet technique est un élément constitutif d'un produit (ex : vis, pièce usinée, assemblage mécanique, vernis). À chacune des vues une structure est associée. La structure fonctionnelle décrit les niveaux successifs de décompositions du produit en fonctions. La structure technique représente la décomposition hiérarchique du produit en organes matériels et logiciels (nomenclature du bureau des études). La structure industrielle évoque la nomenclature de production. La structure logistique décrit l'arborescente des éléments de soutien logistique et de maintenance.

Maurino [13] décrit quatre liens utilisés dans la réalisation des structures : le lien de composition, le lien d'interface, le lien de représentation et le lien de projection. Le lien de composition, illustré à la Figure 12, est utilisé pour décomposer le produit en différents niveaux. Celui-ci possède les attributs suivants : l'identification du lien, la quantité de composants et la validité du lien.

CHAPITRE 2

ANALYSE DES ASSOCIATIONS ET DES OBJETS ASSOCIÉS

Le premier chapitre de ce mémoire présentait un inventaire des concepts relatifs aux liens qui se retrouvent dans la littérature scientifique et commerciale. Le présent chapitre propose d'abord une terminologie relative au concept de lien et aux objets associés. Ensuite, il présente une analyse des éléments de caractérisation des associations. Elle est suivie par la présentation de quelques associations, de même que des opérations de mise en œuvre des associations. Finalement, on présente une synthèse des éléments de caractérisation des associations utilisés dans la littérature illustrée sous forme de tableaux qui présentent les auteurs, leurs idées et leurs éléments communs.

2.1 Distinction entre les termes *Association, relation, contrainte et lien*

Cette section présente une synthèse des différents sens accordés aux termes *relation, contrainte* et *lien* dans la littérature. Cette synthèse nous amènera ensuite à proposer une définition pour chacun de ces termes.

Association : action d'associer (mettre ensemble) quelqu'un à quelque chose [56].

Relation : caractère de deux objets qui sont tels qu'une modification de l'un entraîne une modification de l'autre [56].

Contrainte : règle obligatoire [56].

Lien : ce qui attache, unit, établit un rapport logique ou de dépendance [57]

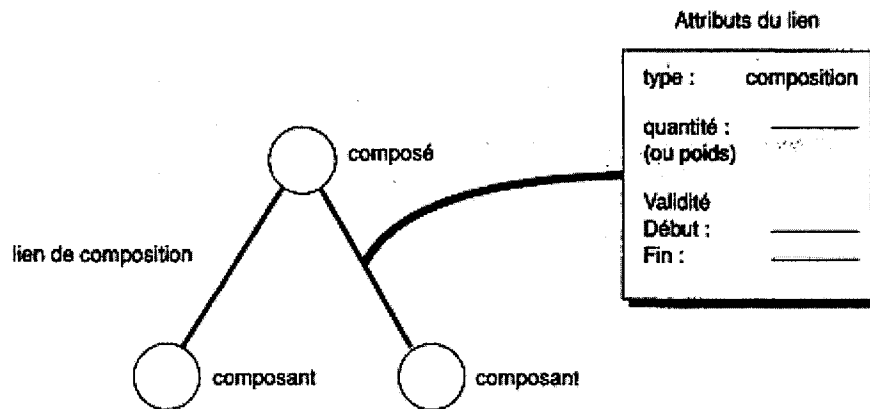


Figure 12 Lien de composition [13]

Les liens d'interface illustrés à Figure 13 associent des objets techniques d'une même structure de façon transversale. Ils sont utiles pour formaliser des relations de dépendance entre des fonctions ou des organes mécaniques. Celui-ci possède les attributs suivants : identification, poids (pondérer la dépendance relative des deux objets associés par le lien) et validité (début et fin).

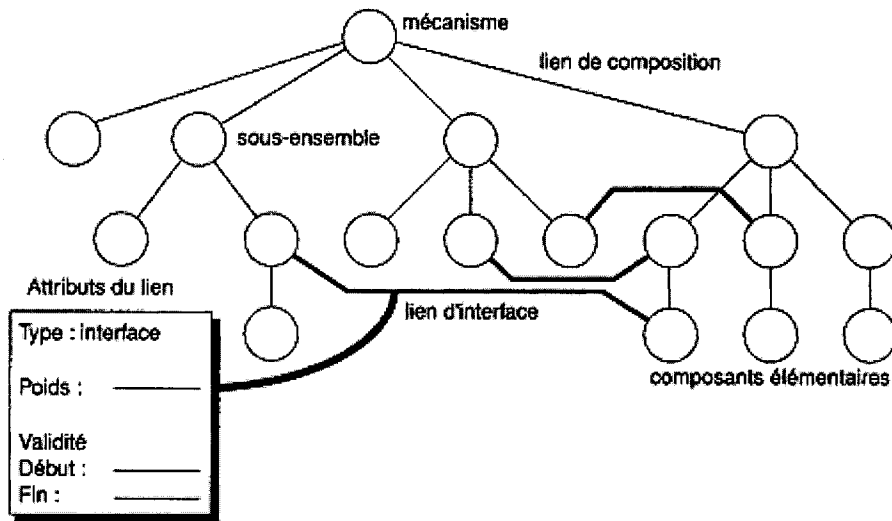


Figure 13 Lien d'interface [13]

Le lien de représentation sert à formaliser la relation entre l'objet technique et un document qui le définit (lien de représentation). Le lien de représentation permet de connaître tous les documents représentant un objet déterminé (par exemple un modèle 3D, un plan, un programme destiné à une machine outil à commande numérique).

Également, il est nécessaire de disposer de liens qui permettent de relier des éléments appartenant à différentes structures. Pour se faire, l'auteur propose le lien de projection dont le but est de formaliser précisément la correspondance entre l'article et la fonction. Une description plus complète du lien de projection, est fournie à la section portant sur les liens entre objets hétérogènes.

Bowland, Gao et Sherma [35] intègrent un SGDT avec un CAAPP (Computer-aided assembly process planning) pour offrir un environnement nommé MAPS ayant un meilleur contrôle des données et une librairie des composants pouvant être utilisées lors de la conception. Pour cela, les auteurs extériorisent les données relatives à l'assemblage à l'extérieur du CAAPP. Ainsi, les entités (Composants, attachements, configuration à un niveau inférieur) constituant un assemblage sont représentées dans le SGDT par leur

document de définition. Dans l'environnement MAPS, la conception d'un assemblage passe par la construction d'un graphe de liaison.

Pour ce faire, l'utilisateur va chercher la définition/modèle de l'entité/objet (classe de l'objet) dans l'une des tables de la base de données pour ensuite l'instancier (base de données relationnelles du SGDT) dans le graphe de liaison. Ensuite, le concepteur pose des liens d'assemblage entre les composants. Ces liens possèdent les attributs suivants : clé (identificateur), composant A, composant B, matrice, attachement et processus. Les opérations possibles sur le graphe de liaison sont l'ajout ou la suppression de nœuds, de liens et d'attachements.

Suite à cette revue des divers liens typiques des SGDT, on peut conclure que les liens utilisés dans les SGDT sont essentiellement des liens entre conteneurs.

1.7 Liens dans les modeleurs géométriques

Cette section a pour objectif d'identifier les concepts relatifs aux liens présents dans les outils de modélisation géométrique. Cette revue n'est pas exhaustive, mais elle donne un bon aperçu des concepts déployés dans les modeleurs solides actuels. Le regard porte particulièrement sur deux logiciels de modélisation : CATIA V5 et SOLID EDGE.

1.7.1 Modeleur CATIA V5

Le modeleur géométrique CATIA V5 contient une variété de notions associées au concept de lien. Pour débiter, on examine la terminologie relative aux liens employée dans l'interface et la documentation du logiciel (contrainte, association et relation). Ensuite, on présente les outils de modélisation possédant un faible niveau de sémantique tels que les contraintes 2D et 3D, contraintes d'assemblage et les caractéristiques d'assemblage. Finalement, on expose les outils destinés à la capture de l'intention de

conception tels que le design relationnel, la paramétrisation, la publication, les UDFs (User defined features) et les "power copy".

Terminologie sous CATIA V5

L'utilisation du modelleur CATIA V5 et l'examen de la documentation permettent d'identifier quatre termes relatifs au concept de lien dans l'univers CATIA V5. Ces termes sont : contrainte, associativité, association et relation. Selon le contexte d'utilisation, ils possèdent plusieurs définitions.

- Une contrainte est une relation géométrique ou de dimensionnement entre deux ou plusieurs éléments géométriques appartenant à un ou plusieurs composants [42].
- Une associativité est une relation interdépendante entre des entités [42].
- Une association est un lien entre un paramètre d'un document et son équivalent dans une table de design externe. Les associations ont besoin d'être créées quand le paramètre d'un document ne correspond pas exactement au nom du paramètre lu dans la table de design [43].
- Une relation est le contexte ou le chemin par lequel un objet est relié à son environnement [44].

Outils de modélisation capturant un faible niveau de sémantique

Les outils de modélisation possédant un faible niveau de sémantique permettent de construire une esquisse, d'orienter un élément géométrique par rapport à un autre ou de positionner les composants mécaniques dans un assemblage (contraintes). Ils peuvent

être aussi utilisés pour créer liens persistants dans le modèle entre des éléments géométriques, des pièces ou des caractéristiques (caractéristiques d'assemblage).

Une contrainte 2D ou 3D est une relation géométrique ou de dimensionnement placée entre deux éléments géométriques appartenant à un même composant [42]. Voici des exemples de contraintes: distance, longueur, angle, rayon, diamètre, symétrie, équidistance, fixe, coïncidence, concentricité, tangence, parallélisme, perpendicularité, horizontale, verticale, point milieu [42].

Une contrainte d'assemblage est une relation géométrique ou de dimensionnement placée entre plusieurs éléments (faces, arêtes) géométriques de différents composants. Elle peut être utilisée pour définir le positionnement des composants [45]. Les contraintes d'assemblage permettent de positionner correctement les composants mécaniques qui sont en relation dans un assemblage. Exemples : contrainte de coïncidence, contrainte de contact, contrainte de décalage et contrainte d'angle [46].

Une caractéristique d'assemblage permet d'effectuer la création d'une caractéristique géométrique sur plusieurs pièces dans une même opération. Exemples de caractéristiques d'assemblage : division (split), trou (hole), série de trous (hole series), poche (pocket), soustraction (remove), addition (add), symétrie (symmetry) [47-49].

Outils pour la capture de l'intention de conception

Les outils pour la capture de l'intention de conception favorisent une mise en oeuvre de l'idée du concepteur en établissant un certain savoir-faire formalisé dans les modèles.

Dassault Systèmes propose une méthodologie nommée design relationnel. Celui-ci est basé sur la construction (de façon automatique ou manuelle) de relations (liens) pendant la progression de la définition du produit. La technologie utilisée pour supporter l'implantation du design relationnel est le PPR (Product, Process, Resources). PPR

(acronyme de Dassault Systèmes) est un modèle qui intègre les diverses représentations d'un produit (conception, fabrication (outils, usines et opérateurs) et le processus de production). Ainsi, l'intégration de ces composants par le PPR permet de propager un changement à partir du modèle produit jusqu'au processus manufacturier. Dans son état le plus avancé dans CATIA, le design relationnel peut propager des changements automatiquement à partir des objectifs d'affaire jusqu'aux définitions d'objets. Par exemple, pour la conception d'un avion, l'une de ces spécifications d'affaire (maximiser le temps de vol) pourrait être liée à une spécification de design (capacité de carburant), elle-même reliée à la dimension des ailes. Ainsi, lors d'un changement dans le temps de vol ou de la capacité de carburant, il y aurait une propagation des changements qui aurait pour impact de modifier l'envergure des ailes, le nombre ainsi que la géométrie des cadres, des lisses et des nervures [50].

La paramétrisation permet de décrire les attributs dimensionnels d'un modèle géométrique non seulement par des nombres, mais aussi par des expressions qui relient les dimensions à des variables ou à d'autres dimensions paramétriques [51].

La vision de Dassault Systèmes s'appuie sur un ensemble d'outils et de concepts mentionnés ci-dessous.

La publication d'éléments géométriques ou de paramètres est un mécanisme qui rend disponible les caractéristiques géométriques pour différents utilisateurs (UDF) [52].

La paramétrisation et la publication sont des outils qui utilisés seuls ont leurs utilités, mais qui, combinés avec les "User define feature" (UDF) ou le "PowerCopy", voient multiplier leur utilité.

Le UDF et le PowerCopy sont des outils puissants car ils permettent des gains de productivités en réduisant des tâches répétitives par la réutilisation de constructions géométriques.

Un UDF est une géométrie définie par un usager qui contient des relations (design relationnel). À partir d'une collection de caractéristiques (géométries, formules, contraintes, etc.) l'utilisateur peut créer sa propre caractéristique. Le résultat est une caractéristique géométrique qui peut être instanciée dans le design d'une autre pièce. La nouvelle caractéristique peut être conservée dans un catalogue [53].

Un power copy est un ensemble de caractéristiques (éléments géométriques, formules, contraintes et autres) qui, étant groupées d'une certaine façon, peut être utilisé dans différents contextes. Il présente l'habileté d'être complètement redéfinissable quand il est copié. Le power copy capture l'intention de conception et le savoir-faire du concepteur tout en permettant une plus grande réutilisation et des gains d'efficacité [54].

La différence majeure entre le PowerCopy et le UDF est le niveau de liberté permis par ces outils pour modifier la géométrie créée. Le PowerCopy est une copie intégrale d'un body, part, etc., incluant toute la géométrie, les formules, les relations, les paramètres, etc., nécessaires pour qu'il "vive" d'un contexte à un autre. Une fois la géométrie instanciée, l'utilisateur peut travailler directement sur les éléments géométriques du PowerCopy et le retoucher à volonté. À l'opposé, l'UDF (User Defined Feature) fait office de boîte noire. Son concepteur pourra permettre l'accès à des "paramètres" ou à des éléments géométriques spécifiques. S'il n'y a pas de paramètres accessibles, il est impossible d'utiliser le UDF pour "ajuster" le comportement de sa géométrie.

1.7.2 Modeleur Solid Edge

Le modeleur solide SOLID EDGE met lui aussi en oeuvre plusieurs notions associées au concept de lien. Pour commencer, on examine le vocabulaire utilisé sous Solid Edge. Subséquemment, on explore les outils de modélisation possédant un faible niveau de sémantique tels que les relations géométriques et les relations d'assemblage. Finalement,

un outil destiné à la capture de l'intention de conception nommé "system library document" est discuté.

Terminologie sous Solid Edge

Suite à l'utilisation du modelleur SOLID EDGE et à un examen de la documentation, on identifie trois termes relatifs au concept de lien. Ces termes sont associativité (associatif), relation et lien. Selon le contexte, ils possèdent plusieurs définitions.

Le terme associativité regroupe toutes les techniques permettant de capturer l'intention de design telles que le design variationnel, le design paramétrique et la conception à base de caractéristiques [55].

Le terme associativité est une condition (exemple : relation géométrique qui doit être respectée) par laquelle un élément est relié à un autre élément [55].

Le terme copie associative est une copie qui conserve une connexion avec l'original. Si l'original est modifié la copie est mise à jour [55].

Le terme relation est une condition qui existe entre des éléments. Si l'option "Maintain Relationships" est réglée (le lien est persistant), alors la relation permet de propager le changement à l'autre élément lié lors d'une modification. Par exemple, si deux droites ont une relation de parallélisme, elles demeurent parallèles quand l'une d'elle est bougée. Cependant si l'option "Maintain Relationships" n'est pas réglée (le lien est éphémère), alors la relation ne sera pas maintenue quand une droite est modifiée [55].

Le terme lien est une méthode pour insérer de l'information, qui est entreposée dans un document source, vers un document actif. Les deux documents sont interconnectés, ce qui a pour conséquence qu'un changement effectué dans un document source est reflété dans le document actif [55].

Outils de modélisations capturant un faible niveau de sémantique

Les outils de modélisation possédant un faible niveau de sémantique que l'on retrouve dans CATIA V5 sous les noms de contrainte géométrique et contrainte d'assemblage sont nommés relation géométrique et relation d'assemblage dans Solid Edge.

Une relation géométrique contrôle l'orientation d'un élément par rapport à un autre élément ou un plan de référence. Par exemple, il est possible de définir une relation de tangence entre une droite et un arc. Si l'élément adjoint est modifié, la relation de tangence est maintenue entre les éléments. Voici quelques exemples de telles relations : concentricité, égalité, horizontale/verticale, tangence, symétrie et parallélisme [55].

Les relations d'assemblage sont utilisées pour placer les pièces ou les sous-assemblages dans un assemblage. Ces relations définissent la façon dont la pièce ou le sous-assemblage sera placé par rapport aux autres pièces de l'assemblage. Voici quelques exemples de telles relations : raccordement, alignement de plans, alignement d'axes, connexion et angle [55].

Outil pour la capture de l'intention de conception

Le concept d'automatisation de tâche se retrouve dans le "system library document" de Solid Edge [55]. Un "system library document" est un document d'assemblage spécialisé qui contient un groupe de pièces et de caractéristiques de pièces. Les pièces et les caractéristiques sont de nature répétitive et peuvent être utilisées dans plusieurs assemblages. L'utilité du "system library document" est d'automatiser le placement d'un groupe de pièces et caractéristiques de pièces dans un assemblage. Le regroupement de ces éléments en un seul groupe permet un placement plus rapide de ceux-ci dans un assemblage.

1.7.3 Synthèse

On constate que la nouvelle génération de modeleurs solides possède une variété d'outils pour capturer différents niveaux de l'intention de conception. Les caractéristiques géométriques expriment un aspect technique propre à un groupe d'élément géométrique tels que la caractéristique trou et la caractéristique soyage. Les outils plus complexes permettent d'automatiser des tâches répétitives orientées métiers tel que la définition des soyages et des découpes imposées par les lisses dans les cadres d'une structure d'avion [2]. Un autre exemple est la création de liens persistants entre le modèle d'une tôle et son gabarit d'usinage pour que les deux modèles restent associés et permettent la propagation de tout changement apporté au modèle de la pièce et à sa contrepartie outillage (Michaud [3]). Enfin, si on se fit à la définition du design relationnel de Dassault Systèmes, l'on comprend que la gestion des liens est quelque chose d'important dans la vision de cette entreprise. Le vocabulaire employé par les différentes sources est disparate. Le prochain chapitre propose un vocabulaire unifié et caractérise les associations et les objets associés. Une fois que le vocabulaire sera unifié, un tableau synthèse des liens que l'on retrouve dans la revue de la littérature sera proposé.

2.1.1 Utilisation des termes dans la littérature

Dans le contexte d'un assemblage, plusieurs auteurs ([24], [19], [25]) utilisent le terme *relation de contact* (mating relation) pour décrire une dépendance entre deux composants d'un assemblage. Lorsqu'ils veulent décrire plus précisément le type de dépendance, ils utilisent le terme *contrainte* "fit" et "against". Le rôle d'une contrainte "against" est d'établir une condition de contact entre deux faces planes [30]. La signification d'une contrainte "fit" est d'établir une condition de contact entre un alésage et un arbre [30].

Le terme *lien* signifie une entité qui contient un ensemble d'informations (contraintes de forme, contraintes de dimension, contraintes de position et d'orientation des caractéristiques de contact [20]) décrivant la relation entre deux pièces ou deux caractéristiques d'un même assemblage. Pour ce terme (*lien*), un attribut commun peut être décelé. Selon les auteurs ([19], [20], [23]) leurs liens ont en commun d'agréger plusieurs contraintes de contact en une unité.

Selon les auteurs Randoing [41] et Maurino [13], les *liens* contenus dans un SGDT ont pour rôle de lier des éléments [41] ou objets techniques [13] entre eux. Pour Randoing, un élément correspond à toute information relative à un produit (exemples : spécification, plan et composant). Pour sa part, Maurino décrit un objet technique comme un élément constitutif d'un produit (ex : vis, pièce usinée, assemblage mécanique, vernis). Ces liens possèdent des attributs qui capturent de l'information décrivant l'association entre deux éléments ou objets techniques.

Dans sa discussion sur les liens d'automatisation, Eustache [11] présente quatre types de *contraintes* qui sont la contrainte de dépendance, la contrainte relationnelle ($<, =, >, \neq, \geq, \leq$), la contrainte booléenne (opérations logique : et, ou, etc) et la contrainte règle. Selon Eustache, la contrainte de dépendance indique une association de dépendance entre deux éléments. Les contraintes relationnelles et booléennes relèvent de

fonctions mathématiques et d'opérations logiques. Finalement, la contrainte règle est une règle métier appliquée à une entité. Cette dernière contrainte ressemble beaucoup au lien de dérivation de Giguère [2] par le fait que les deux tentent d'automatiser des tâches orientées métiers.

Shih et Anderson [32] définissent le terme *contrainte géométrique* comme une limitation de la valeur d'un attribut d'un élément par rapport à lui-même ou par rapport à un autre élément du design telles que la forme, la position (coïncidence, concentrique), l'orientation (parallèle, angle), la dimension (longueur égale, rayon égal), la relation logique (identique, distincte et un ensemble de relations) aussi bien que les contraintes d'ingénierie. Plus globalement, Mantyla et al. [58] donnent une définition du terme contrainte. Selon ces auteurs, une contrainte est la déclaration d'une relation qui doit être maintenue valide par un système autonome.

Dans le domaine de la géométrie relationnelle, Letcher [33] décrit le terme *relation* comme l'expression d'une dépendance constructive d'un objet vis-à-vis un autre, ou en d'autres termes, qui permet de supporter un second objet par le premier. Mukherjee et Liu [16] mentionnent qu'ils utilisent un mécanisme de lien pour représenter de la géométrie discrétionnaire (géométrie qui a une signification pertinente au design conceptuel). De plus, ils discutent d'un lien nommé *quasi-link* qui a pour objectif de décrire la relation géométrique (concentricité, angularité, parallélisme, perpendicularité, etc...) entre deux caractéristiques. Il est pertinent de noter que la définition de *lien* de Mukherjee et Liu [16] concorde avec la définition de *contrainte* donnée par Shih et Anderson [32].

Laako et Mantyla [34] utilisent le terme instance de relation ("relation instance") pour décrire l'héritage entre l'instance et son gabarit. Zimmermann et al. [17] décrivent deux liens. L'un gère la relation logique (relation entre m caractéristiques de design et n caractéristiques de fabrication) entre deux EOs (engineering object). L'autre décrit la

connaissance qui permet d'instancier les EO et les EOR (engineering object relation) automatiquement à partir des EO et EOR génériques.

Giguère [2] définit le lien technologique comme un lien exprimant une dépendance entre deux éléments d'information. De façon générale, ce lien est établi entre deux groupes de pièces.

Finalement, Yassine et al. [18], dans leur discussion sur les liaisons d'éléments hétérogènes, emploient le terme *relation*. Pour eux, une relation indique une dépendance entre deux éléments sans pour autant capturer précisément le type de dépendance.

2.1.2 Terminologie proposée pour les termes *association, relation, lien et contrainte*

Nous proposons ici de définir les termes *association, relation, lien et contrainte*. Nous offrons aussi une définition du terme *dépendance* puisqu'il est utilisé pour définir chacun des autres termes. Ces définitions seront utilisées dans l'ensemble du mémoire.

Dépendance : rapport qui fait qu'une chose dépend d'une autre [56].

Association : l'association est le terme générique qui désigne la famille qui regroupe les termes relation, contrainte et lien. Une association exprime une dépendance entre des éléments d'information.

Relation : une relation établit une dépendance abstraite entre deux éléments sans faire intervenir un savoir faire précis ou formalisé. Une relation est un grappin qui peut être exploité pour récupérer un objet associé à un autre afin de réaliser, dans un deuxième temps, un traitement au moyen d'un savoir-faire qui n'est pas formalisé par cette relation. Par exemple, une relation de composition relie un composé et un composant dans une nomenclature de produit. Un autre exemple

est le lien de représentation de Maurino [13] qui permet d'associer un fichier à un objet technique afin de documenter ce dernier. Le savoir-faire nécessaire pour exploiter la relation entre deux objets n'est pas maîtrisé ou formalisé. Par exemple, le document définissant l'outillage employé dans la fabrication d'une pièce est associé par une relation au document définissant la pièce elle-même. Cependant, le savoir-faire requis pour définir l'outillage à partir de la définition de la pièce n'est pas formalisé dans cette relation. En conséquence, une modification apportée à la pièce ne peut être propagée à l'outillage sans intervention humaine.

Lien : un lien établit une dépendance entre deux éléments qui fait intervenir un savoir-faire formalisé pour réaliser une tâche donnée. Un lien peut être exploité pour réaliser une tâche directement au moyen du savoir-faire formalisé par ce lien. Par exemple, définir un soyage à l'intersection d'un cadre et d'une lisse [2], ou définir la géométrie d'une poche d'allègement par rapport aux cadres et aux lisses environnant [59], sont des tâches réalisables par des liens. Le savoir-faire associé à un lien est totalement maîtrisé et formalisé, contrairement à celui sous-tendu par une relation.

Contrainte : la contrainte décrit concrètement et précisément un type de dépendance entre deux entités. Par exemple, une contrainte de parallélisme peut être appliquée entre deux droites. Une contrainte se situe donc au niveau des opérations à réaliser (savoir-faire de bas niveau - non décomposable), alors qu'un lien se situe au niveau d'une tâche (savoir-faire qui formalise l'intention de conception - décomposable). Une contrainte constitue une condition à respecter pour valider le modèle. Le niveau d'abstraction d'une contrainte est plus faible que celui d'un lien. Un lien constitue une agrégation organisée de contraintes. Par exemple, on peut se référer à l'application orientée métier de Giguère [2] qui

utilise le lien de dérivation pour concevoir un soyage. Dans ce cas, le lien de dérivation est une agrégation de contraintes.

Suivant ces définitions, ces quatre termes peuvent être organisés selon des ensembles. Ainsi, l'association contient les trois ensembles relation, lien et contrainte.

La Figure 14 présente également le rapport entre le niveau d'abstraction des associations et le savoir-faire formalisé par la relation, le lien et la contrainte.

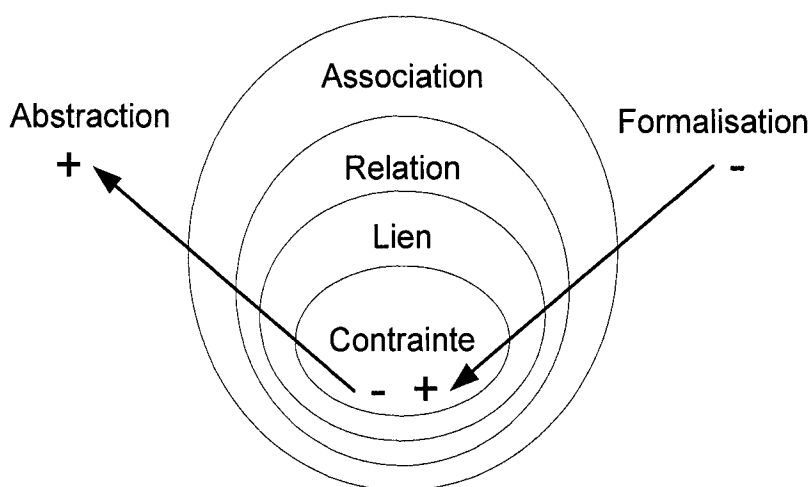


Figure 14 Rapport entre le niveau d'abstraction et la formalisation du savoir-faire

Il s'avère que plus le savoir-faire est complexe, plus le niveau d'abstraction augmente. En effet, plus le niveau d'abstraction d'une association est élevé, plus les objets associés sont complexes. En première approche, on pourrait prévoir que les objets associés par des relations sont des documents concernant par exemple une pièce, un outillage, etc. Les objets associés par des liens sont des caractéristiques (porteuse de sens pour un observateur humain) tels un soyage, une découpe. Les objets associés par des contraintes prennent un sens dans un contexte très précis, tels que deux axes concentriques, deux droites parallèles, etc. Un exemple de situation où le savoir-faire est bien formalisé est le

lien de dérivation [2]. Un exemple où le niveau d'abstraction est élevé est le lien de représentation [13].

Les progrès scientifiques à long terme pourront permettre de qualifier de lien des associations qui sont aujourd'hui des relations, au fur et à mesure que la compréhension des relations entre les objets s'améliore. Ainsi, on sera peut-être un jour en mesure d'utiliser des liens qui permettront de définir un outillage à partir de la définition d'un produit comme les logiciels de CAO sont aujourd'hui capables de créer une vue sur un dessin à partir d'un modèle solide.

2.2 Terminologie relative aux objets associés

2.2.1 Terminologie de la littérature

La grande majorité des associations sont utilisées au sein de modèles géométriques. Une façon de les distinguer consiste à examiner la nature des objets associés. Certaines associations relient des entités géométriques (ligne, point, cercle, etc.), d'autres relient des faces de composants, alors que d'autres relient des caractéristiques. Toutefois, il existe des liens qui tentent de sortir du contexte géométrique comme par exemple le lien de représentation [13] et la carte de connectivité [18] qui relient des objets autres que des éléments géométriques.

La littérature fournit différents termes et définitions pour désigner les objets associés au moyen de relations, de liens ou de contraintes.

- **Objet technique**, Maurino [13] : un objet technique est un élément constitutif d'un produit. La nature de l'objet technique peut varier selon le point de vue considéré : la fonction "propulsion" d'un véhicule automobile relève du besoin, alors que l'article "moteur" est un objet technique qui relève de la définition du produit.

- Élément, Randoing [41] : un élément désigne toutes les natures physiques possibles correspondant aux codes cités dans la supernomenclature : article physique, plan généré en CAO, document sous format bureautique, photo ou plan numérisé, programme de machine à commande numérique.
- Élément, Yassine [18] : un élément est une tâche, une fonction, un composant qui contribue au développement du produit. Ils sont utilisés dans une méthode visant à capturer et analyser les relations de dépendance entre eux. Pour comprendre le fonctionnement de la méthode, considérons les trois types d'éléments suivant : tâche, fonction et produit physique (composant). Une analyse est effectuée de façon à évaluer si une tâche satisfait à une fonction (partiellement ou totalement) et d'évaluer le lien entre une fonction et un composant. De cette analyse, il serait possible de déterminer si une tâche ou un composant n'est pas associé à une fonction, et n'ajoute donc pas de valeur au produit.
- Entité, Eustache [11] : une entité est définie comme un objet ou une idée qui existe en soi, en dehors de tout contexte. Une entité possède des attributs et des méthodes pour stocker les divers renseignements non seulement sur la définition conceptuelle du produit, mais aussi sur sa représentation concrète (fichier, document, numéro de série, etc.).
- Objet d'ingénierie (Engineering Object), Zimmermann [17] : tous les objets pertinents à l'ingénierie tels qu'un assemblage, une caractéristique, une pièce, une surface, une tolérance, du matériel, etc.
- Nœud : dans la littérature, les termes arc et nœud ([23], [16], [33], [24]) sont fréquemment utilisés pour représenter une association, où l'arc représente graphiquement l'association et les nœuds représentent graphiquement les objets associés.

- Objet de design (Design Object), Jacobs [8]: un objet se définit comme toute entité de design qui peut être créée ou manipulée dans un environnement de design. Par exemple, les objets de design incluent les courbes, les surfaces et toutes les autres entités géométriques, les caractéristiques, les modèles mathématiques, les contraintes, les entités textuelles et numériques. Les types d'objets pouvant être reliés sont : le document, la face, l'entité de bas niveau (ligne, point cercle et etc.), la caractéristique (feature), la pièce/assemblage, la discipline, la fonction, le contenant, la tâche, etc.

2.2.2 Terminologie retenue pour les objets associés

Suite à l'inventaire de différents termes et définitions employés dans la littérature, il s'avère qu'un objet technique possède l'une ou l'autre ou les deux significations suivantes : une signification conceptuelle et une signification concrète. La première signification contient la représentation abstraite des idées de conception sans posséder la définition détaillée de celle-ci. La deuxième signification contient la représentation concrète (détaillée) des idées abstraites. Les objets techniques des auteurs Maurino et Eustache possèdent les deux significations alors que les objets techniques des auteurs Zimmermann et Randoing ne possèdent que la représentation concrète. Finalement, l'objet technique de Yassine et Withney est uniquement conceptuel.

À ce stade, il est opportun de déterminer quel terme général sera utilisé dans l'ensemble du mémoire pour désigner les objets associés au moyen de relations, de liens ou de contraintes. Bien que nous adhérons à l'esprit du terme *objet d'ingénierie* de Zimmermann, nous préférons employer un terme qui nous permet de traiter l'ingénierie au sens large en incluant l'outillage, par exemple. Donc, le terme *objet technique* ainsi que la définition de Maurino pour ce terme seront utilisés dans l'ensemble du mémoire. Le terme objet technique englobera donc, de manière non-exhaustive, des éléments géométriques, caractéristiques, pièces, assemblages, documents, articles, fonctions, tâches, conteneurs.

2.3 Savoir-faire

Le savoir-faire est un ensemble de connaissances en rapport avec une association qui permet d'agir sur les objets associés. Un savoir-faire correspondant à une tâche spécialisée sera formalisé dans un lien associant deux objets.

Une fois instancié, un lien permet d'appliquer un savoir-faire sur les objets de façon automatique ou assistée. Dans le cas d'un lien directionnel, le savoir-faire peut exploiter l'état de l'objet de référence pour déterminer l'état de l'objet cible, alors que les rôles de référence et de cibles ne peuvent être intervertis.

Les associations de transport et de publication (discutées plus loin) sont deux cas particuliers où le savoir-faire se résume à connaître l'endroit où l'objet est transporté. L'association de publication a, en plus du rôle de transport, celui de rendre publique, à d'autres fichiers ou applications, un objet technique.

2.3.1 Automaticité permise par une association

L'automaticité permise par une association est fortement dépendante du savoir-faire qu'elle saisie. Pour qu'une association puisse gérer de façon complètement automatisée la propagation d'un changement, il faut que la connaissance relative à l'association établie entre deux objets techniques soit complètement formalisée (association de type dérivation : l'objet B est entièrement déterminé par l'objet A et le lien). Toutefois lorsque la propagation d'un changement nécessite l'interaction humaine, cela indique que la connaissance n'est pas complètement formalisée par l'association.

2.4 Analyse des éléments de caractérisation des associations

Cette section décrit les différents éléments de caractérisation d'une association. Ces éléments de caractérisation sont : la direction, la cardinalité, la temporalité des associations, l'agrégation et décomposition, ainsi que la portée de l'association.

2.4.1 Direction

La direction décrit l'orientation du flux de l'information. Il y a trois possibilités : une association est non-directionnelle, directionnelle ou bi-directionnelle.

Une association est non-directionnelle quand le savoir-faire qui se rapporte à l'association ne permet pas de réaliser directement une action qui détermine l'état de l'un ou l'autre des objets techniques associés. Par exemple, le lien de composition est une relation qui relie un composé et un composant dans une nomenclature de produits.

Une association est directionnelle si le savoir-faire qui s'y rapporte permet de déterminer l'état d'un élément cible en réalisant directement une action sur l'élément de référence. Les objets techniques référence et cible ne sont pas interchangeables. Par exemple, la création d'un soyage sur un cadre (cible) à partir d'une lisse se fait au moyen d'un lien directionnel [2].

Une association est bi-directionnelle quand le savoir-faire se rapportant à l'association permet de réaliser directement une action sur un des objets techniques selon l'état de l'objet technique associé. Les rôles de référence et de cible peuvent être redéfinis au besoin. Par exemple, une contrainte de parallélisme établie entre deux droites permettra d'agir sur l'une ou l'autre des deux droites selon la situation. On remarquera que le caractère directionnel n'est pas forcément persistant. Par exemple, avec le modeleur Solide Edge, la contrainte d'égalité est directionnelle au moment où elle est instanciée, puisqu'une référence et une cible sont déterminées par la séquence de sélection. Par la suite, l'un ou l'autre des éléments reliés peut-être modifié; l'élément associé sera modifié en conséquence.

2.4.2 Cardinalité

La cardinalité d'une association se rapporte au nombre d'objets qu'elle associe. Ainsi, une association peut compter m éléments de référence et n éléments cibles. On

dénombrer quatre cas : 1 X 1 (cas 1), m X 1 (cas 2), 1 X n (cas 3), m X n (cas 4). Les objets techniques constituant les nœuds d'une association 1 X 1 forment une paire.

La cardinalité de l'association dépend du niveau de granularité considéré. Par exemple, une association de cardinalité de type m X n se représente par le cas 4 de la Figure 15.

Un exemple concret d'association m X n est le lien "Insert" du modèleur solide Solid Edge qui positionne un attachement, tel qu'un boulon, par rapport à un trou d'une pièce (discuté plus loin). Au niveau de l'interface usager, le concepteur crée un lien éphémère possédant un certain niveau d'abstraction comme illustré par le cas 4 de la Figure 15.

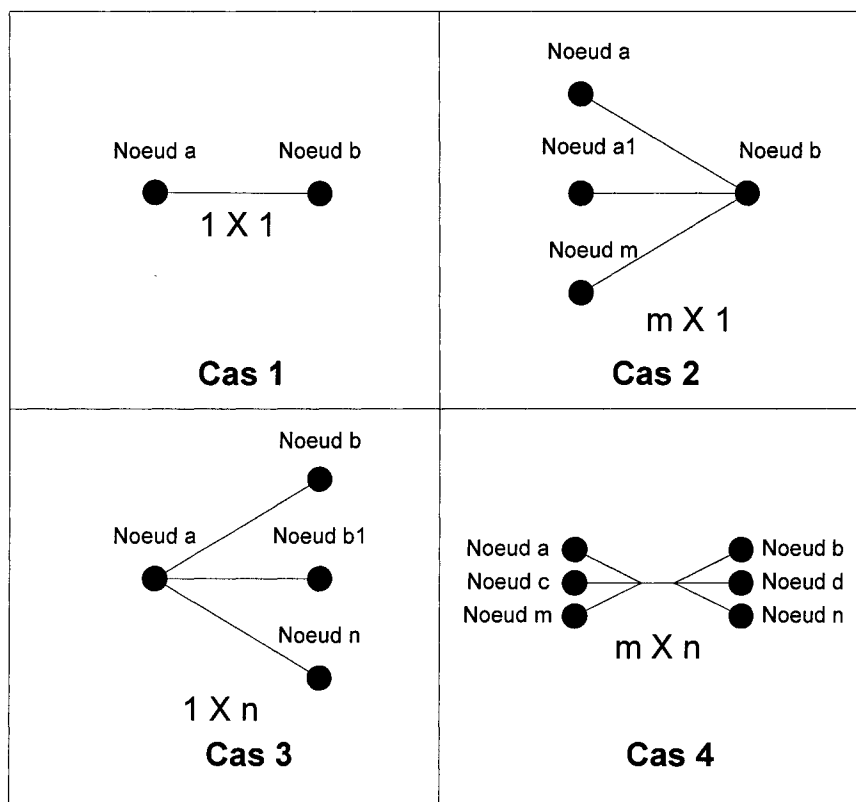


Figure 15 Quatre cas de cardinalité

2.4.3 Temporalité des associations

La temporalité des associations peut être de deux types : persistante ou éphémère. Selon Michaud [3], la notion de persistance des associations est une des différences fondamentales entre CATIA V4 et CATIA V5.

2.4.3.1 Association persistante

Une association persistante a pour caractéristique d'être permanente (maintenue) entre les objets techniques qu'elle associe. Cela facilite la propagation d'un changement dans le cas d'une modification. Par exemple, une contrainte de perpendicularité établie de manière persistante entre deux droites maintient la contrainte géométrique lorsqu'une modification est apportée à l'une des droites. Dans le travail de Michaud [3], des liens technologiques persistants existent entre le modèle d'une pièce et de son outillage; les deux modèles restent associés, ce qui permet la propagation de tout changement apporté au modèle de la pièce, à sa contrepartie outillage.

2.4.3.2 Association éphémère

Une association éphémère a pour caractéristique de ne pas être préservée après avoir associé temporairement deux objets techniques. Par exemple, une contrainte de perpendicularité est établie de manière éphémère entre une droite existante et une droite en cours de création (la contrainte n'existe que pendant la création de cette dernière). Cette association ne protège donc pas la relation entre les deux objets techniques après une modification puisque la contrainte n'existe plus.

2.4.4 Agrégation et décomposition

L'agrégation est un regroupement d'un ensemble d'associations ou d'objets techniques en une unité afin d'en faciliter la manipulation à un niveau d'abstraction plus élevé. Prenons pour exemple la création d'un lien rainure-clavette. L'intention de conception est de créer un lien entre la rainure et la clavette (Figure 16.A et C). Idéalement, le

concepteur n'aura pas à se préoccuper du détail des contraintes de contacts (Figure 16.B et C).

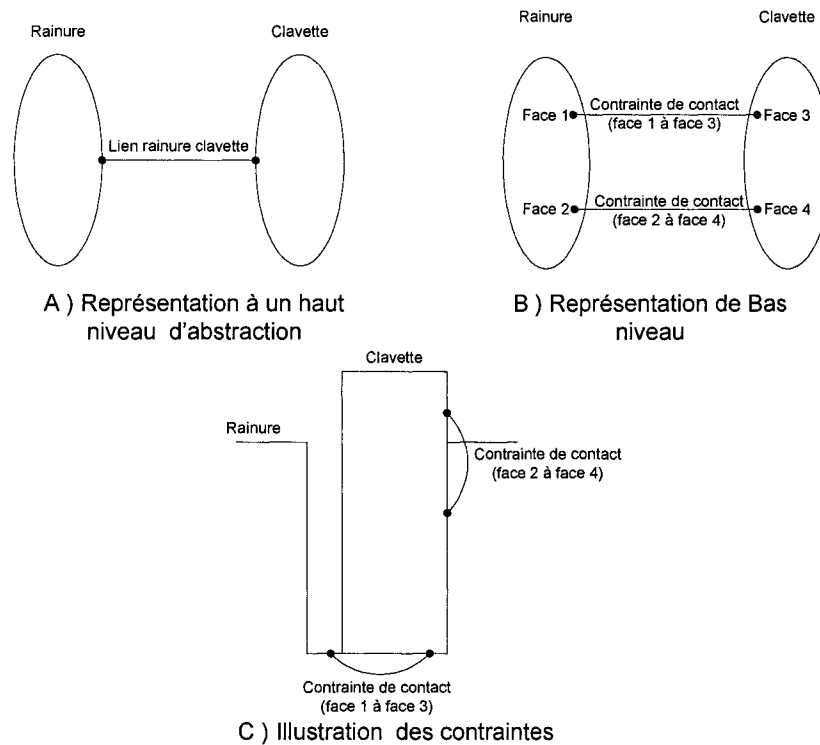


Figure 16 Exemple d'agrégation et de décomposition

La notion d'agrégation est applicable aux nœuds et aux associations. Il existe donc au moins quatre situations différentes d'agrégation. La Figure 17.A illustre des contraintes dans un système de CAO courant (aucune agrégation). La Figure 17.B illustre une agrégation des contraintes en une seule association réalisée tout en gardant les nœuds au niveau de granularité précédent. La Figure 17.C illustre une agrégation des nœuds, réalisée tout en gardant les contraintes au niveau de granularité de la Figure 17 A. La Figure 17.D illustre une agrégation des nœuds et une agrégation des associations.

Nous venons de discuter de l'action d'agréger des associations en une unité. Il est aussi possible de défaire une agrégation par une décomposition. La décomposition est considérée ici comme exactement l'inverse de l'agrégation. Par exemple, à partir de la Figure 17 D, on peut décomposer l'association (Figure 17 C). Il est aussi possible de décomposer les nœuds (Figure 17 B). Ou encore, on peut décomposer les associations et les nœuds (Figure 17 A).

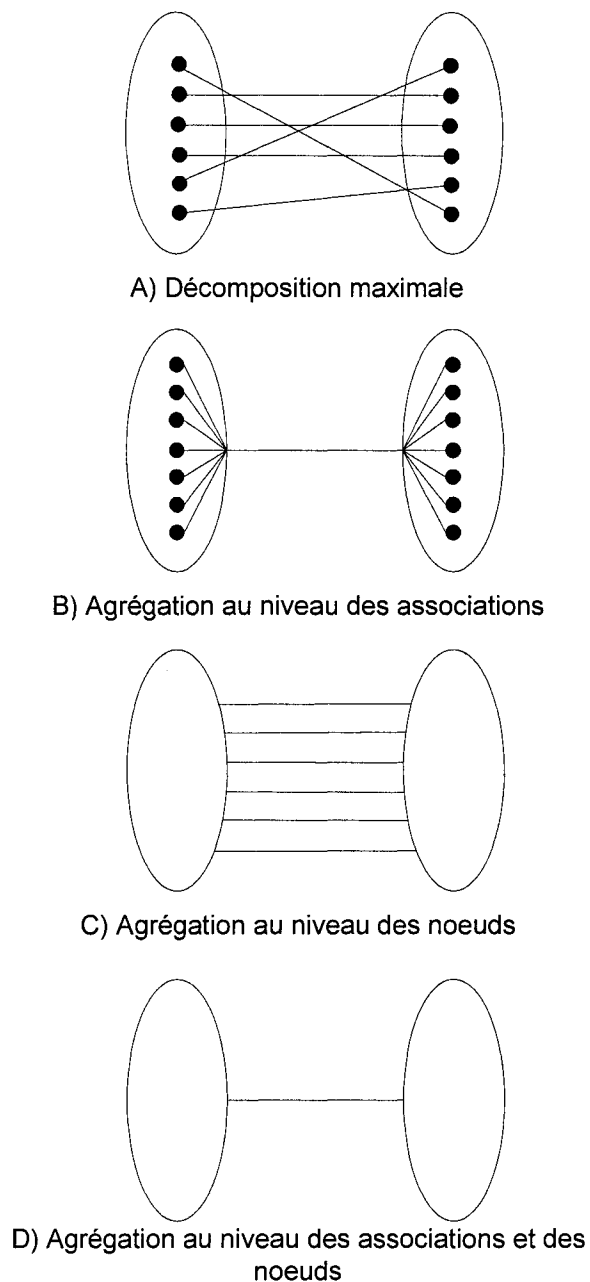


Figure 17 Quatre cas d'agrégation - décomposition

Idéalement, il serait souhaitable que les concepteurs puissent exprimer une intention de conception en manipulant des liens agrégés entre des nœuds ayant un certain niveau d'abstraction (exemples : Figure 16.A et Figure 17.D), pour ensuite laisser le système de

CAO s'occupe de les décomposer en contraintes atomiques entre des objets techniques de bas niveau (exemples : Figure 16.B et Figure 17.A). Les contraintes atomiques correspondent à des associations entre des éléments de bas niveau, tels que des éléments géométriques (droite, point, cercle,...). La perpendicularité entre deux droites constitue un exemple de contrainte atomique. Avec les systèmes de CAO courants, le concepteur manipule généralement des contraintes de bas niveau (exemples : Figure 16.B et Figure 17.A). Quelques fois, les concepteurs peuvent établir des liens possédant un certain niveau d'abstraction (exemple : Figure 17.B). Un exemple concret est le lien "Insert" du modèleur solide Solid Edge qui permet de positionner un attachement par rapport à un trou d'une pièce. Au niveau de l'interface usager, le concepteur crée un lien (éphémère) possédant un certain niveau d'abstraction (Figure 18).

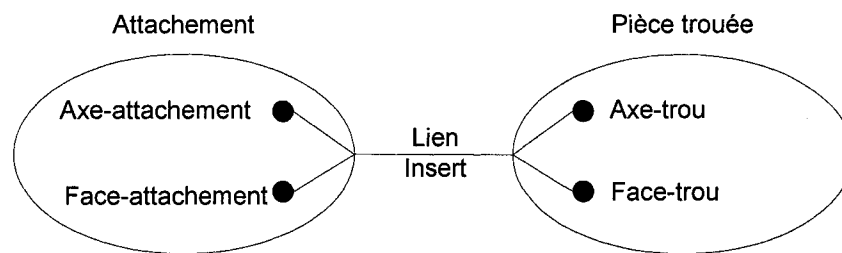


Figure 18 Lien d'assemblage "Insert"

Une fois l'opération terminée, le système de CAO aura décomposé ce lien pour créer deux contraintes (persistantes) de bas niveau (Figure 19).

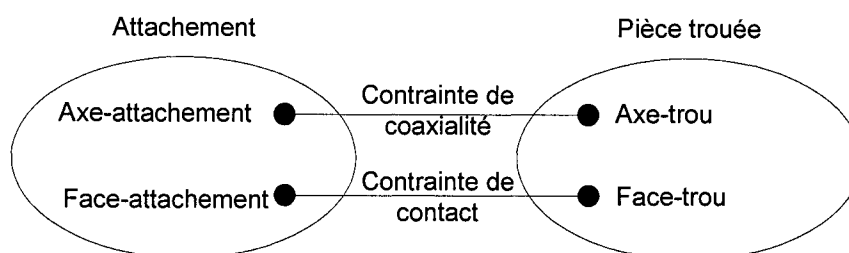


Figure 19 Contraintes résultant de la décomposition du lien Insert

Nous pensons qu'il existe une dépendance entre la cardinalité et le niveau de granularité. Par exemple, à un faible niveau d'abstraction, nous nous attendons à ce qu'il existe plusieurs associations 1 X 1.

2.4.4.1 Agrégations d'associations parallèles et séquentielles

Les associations agrégées sont utilisées pour faciliter la compréhension de l'organisation des données. Ils simplifient la présentation des données en regroupant un ensemble de liens en une unité et en augmentant le niveau d'abstraction.

On distingue deux types d'agrégations : l'agrégation d'associations parallèles, qui regroupe des associations parallèles en une unité, et l'agrégation d'associations séquentielles, qui regroupe une succession d'associations en une unité. La Figure 20 donne un exemple d'agrégation d'associations parallèles. Le cylindre représente l'agrégation des trois associations d'attachement qui relient un cadre et une lisse sous une seule association dont le niveau d'abstraction est plus élevé.

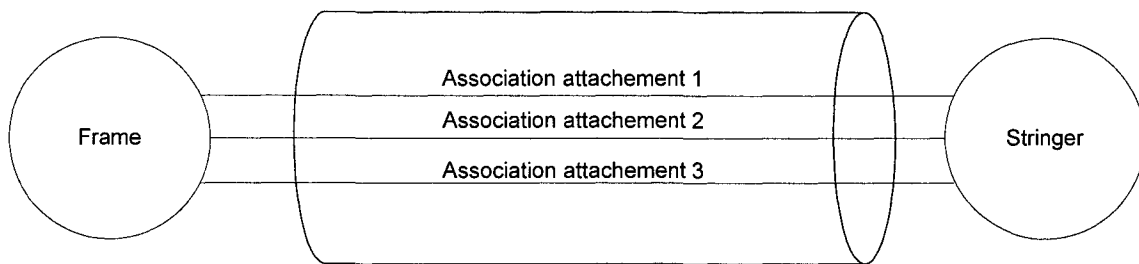


Figure 20 Exemple d'agrégation d'associations parallèles

La Figure 21 donne un exemple d'associations séquentielles. Le cylindre représente l'agrégation des éléments qui mènent à la création de la version 2 de la pièce B.

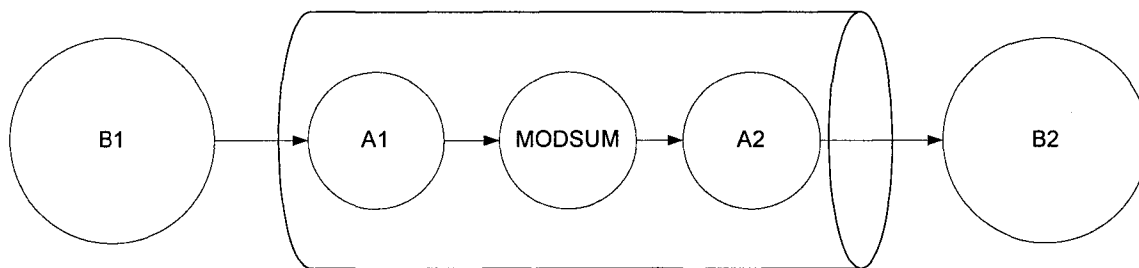


Figure 21 Exemple d'agrégation d'associations séquentielles

Une agrégation peut contenir des éléments regroupés sous un autre type d'agrégation. Par exemple, une agrégation parallèle peut contenir une agrégation d'éléments séquentiels (Figure 22). Nous désignons ce cas agrégation mixte.

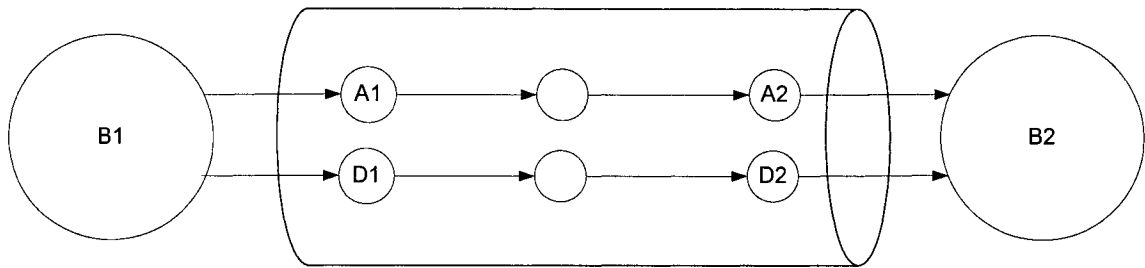


Figure 22 Exemple d'agrégation mixte

Une association agrégée s'illustre comme une boîte noire contenant un réseau d'associations. Cela permet de représenter l'information à un niveau de granularité plus élevé [27] (Figure 23 A). Dans l'agrégation, il y a aussi l'idée que les objets reliés par l'association agrégée sont d'un niveau d'abstraction plus élevé que les objets reliés par les associations cachées par l'agrégation (Figure 23 B).

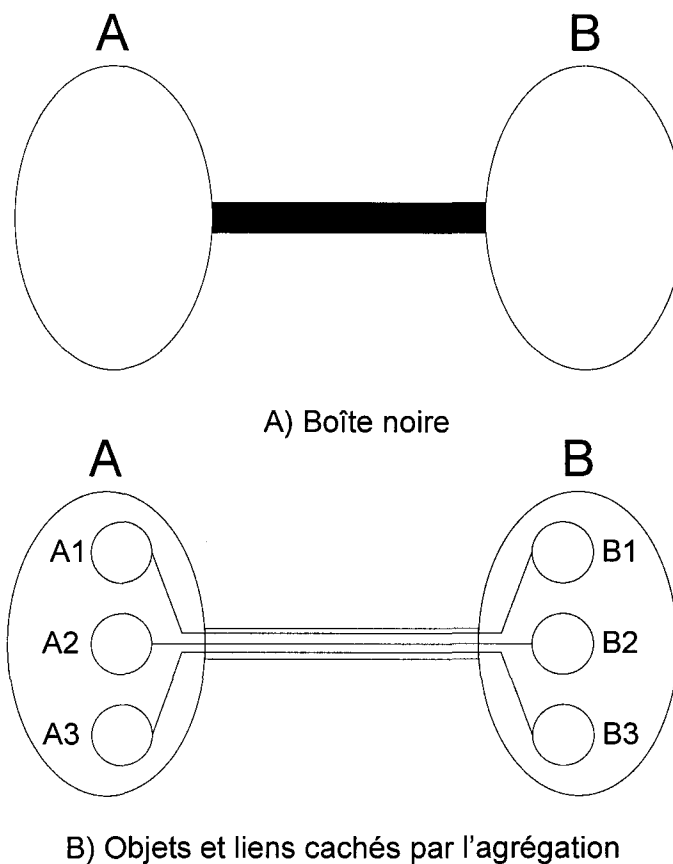


Figure 23 Niveaux d'abstraction de l'association agrégée [27]

2.4.5 Portée de l'association

Pour distinguer les associations internes et externes, il est nécessaire de définir la notion de famille. Une famille se définit comme étant un groupe d'appartenance constitué de plusieurs objets techniques membres. Par exemple, les départements d'une entreprise (ingénierie, méthodes, qualité, etc.) constituent des familles.

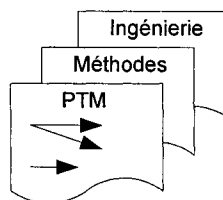


Figure 24 Exemples de familles

Les documents sous la gestion d'un département sont des objets techniques membres de cette famille (Figure 24). Toutefois, le document n'est pas nécessairement l'objet de base d'une famille; une famille peut regrouper des objets de granularité plus fine. Une famille peut être basée sur le type de vue du produit (assemblage, fonction, pièce), le type de document (Word, Excel, CATIA), etc.

2.4.5.1 Association externe

Une association externe relie des objets techniques (OT) qui n'appartiennent pas à la même famille.

La Figure 25 illustre une association inter famille. Cette association relie deux éléments d'information qui constituent (en partie) deux fichiers différents appartenant à deux familles distinctes. Dans cet exemple, le fichier de référence se nomme MODSUM. Il appartient à la famille ingénierie, alors que le fichier cible nommé *Dossier d'action* appartient à la famille méthodes. Le numéro de MODSUM constitue à la fois l'empreinte et la pseudo-empreinte de ce lien de transport. Le transport est inter-familles.

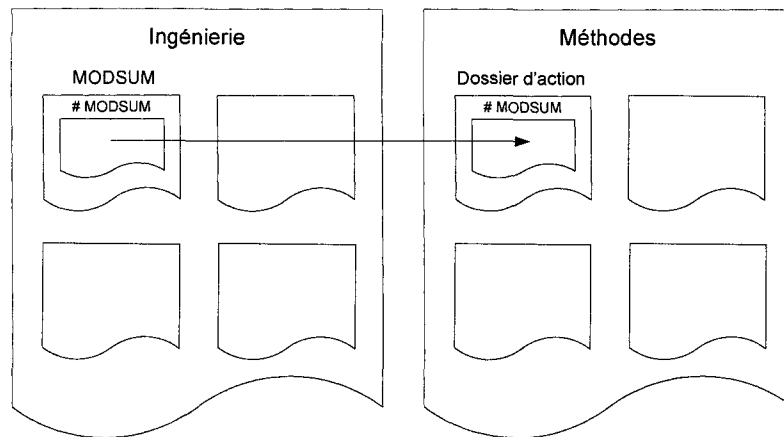


Figure 25 Association inter-familles (lien de transport)

2.4.5.2 Association interne

Une association interne relie des OT qui appartiennent à la même famille.

Le Figure 26 illustre une association interne. Cette association relie deux caractéristiques géométriques qui appartiennent à deux modèles CAO distincts. Néanmoins, les deux documents (modèles CAO) sont membres d'une même famille nommée ingénierie. Les caractéristiques géométriques sont le diamètre d'une vis et le diamètre d'un écrou.

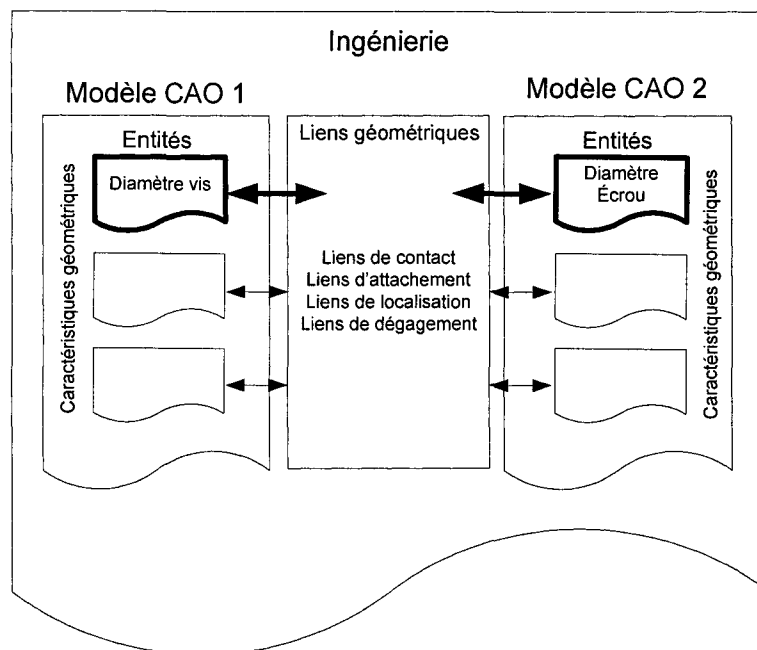


Figure 26 Association intra-famille

2.5 Quelques associations essentielles

Cette section décrit trois associations qui nous semblent essentielles au développement d'un modèle générique d'applications orientées métiers. Elles sont : l'association de composition, l'association de transport et l'association de publication.

2.5.1 Association de composition

L'association de composition relie un composé à un composant. Elle est utilisée pour représenter la composition d'un composant. Une association de composition peut être employée pour exprimer la nomenclature d'un produit en différents niveaux (Maurino [11]). Par exemple, l'assemblage A est composé des sous-assemblages B, C et D, eux-mêmes composés de pièces. Ainsi, l'association de composition peut être utilisée pour exprimer la notion de décomposition d'une agrégation. Par exemple, une première association de composition peut associer une caractéristique à une pièce. Ensuite, une

seconde association de composition peut associer un élément géométrique à une caractéristique.

2.5.2 Association de transport

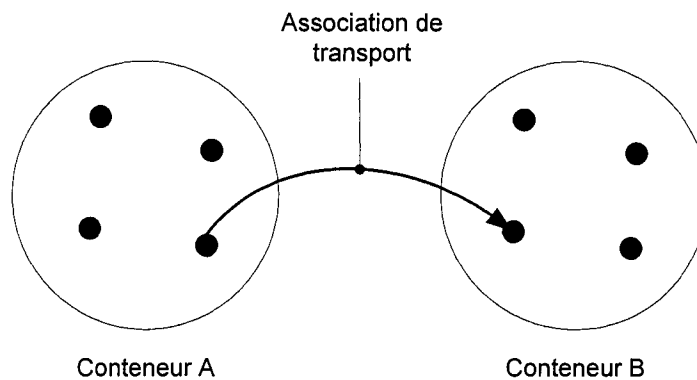
Nous proposons le terme *Association de transport* pour exprimer le cas d'une association qui sert essentiellement à transporter une information d'un objet technique A à un objet technique B. Dans un tel cas, l'empreinte et la pseudo-empreinte sont identiques. Ce lien se distingue du lien de dérivation où l'objet technique de référence est différent de l'objet technique cible.

Par exemple, une association de transport permet de transporter le numéro de MODSUM du document MODSUM au document Dossier d'action. Le MODSUM (*Modification summary*) est un document autorisant un changement. Il contient une description du changement et l'effectivité de la pièce (de tel numéro de série à tel numéro de série). Un deuxième exemple d'association de transport concerne la longueur d'un segment de droite, qui est transportée d'un chiffrier EXCEL vers un croquis CATIA V5.

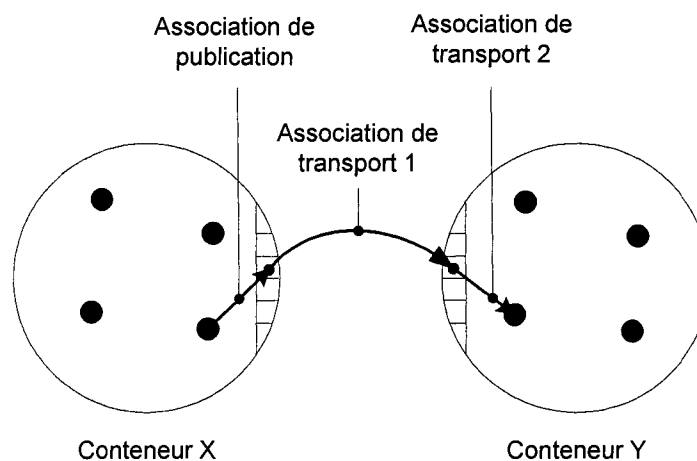
2.5.3 Association de publication

Nous proposons le terme *Association de publication* pour exprimer le cas d'une association qui sert essentiellement à rendre publique un élément d'information afin de le partager entre des fichiers ou des applications différentes. En d'autres termes, son rôle consiste à mettre à disposition les objets techniques résultant d'une application ou d'une tâche pour qu'elles puissent être utilisées comme objets de référence par d'autres applications ou tâches. Par exemple, pour l'application de modélisation des soyages et des découpes de Giguère, les objets techniques publiés sont la saillie de soyage et la saillie de découpe.

La Figure 27 A) illustre une association de transport entre un élément du conteneur A et un élément du conteneur B. Ce transport se fait sans le recours à une association de publication. La Figure 27 B) illustre un partage comparable via une association de publication et deux associations de transport. La première association de transport a pour rôle de porter l'élément publié du premier conteneur au deuxième conteneur alors que la deuxième association de transport amène l'information au lieu où l'information sera consommée. Ainsi, l'association de publication décompose une association externe au conteneur en une série d'associations interne et externes. Elle permet aussi de découpler la définition de l'objet de référence de son exploitation à l'externe.



A) Partage de l'information entre deux conteneurs via une association de transport



B) Partage de l'information entre deux conteneurs via une association de publication et deux associations de transport

Figure 27 Exemples d'associations de transport et de publication

2.6 Quelques associations utiles en développement de produits

Nous proposons de distinguer trois cas d'associations relatives au développement de produits, soit les associations de type *dérivation*, *procédurale* et de *transposition*. Les sous-sections suivantes discutent du cheminement d'une propagation de changement pour chacune de ces associations. L'objectif ici consiste à illustrer les rôles de ces

différentes associations dans la propagation du changement en développement de produit selon le niveau de savoir-faire formalisé.

2.6.1 Association de type dérivation

Une association de type dérivation formalise un ensemble de connaissances techniques propres à un lien. Les liens de dérivation sont utilisés pour effectuer des tâches orientées métiers en automatique. Pour illustrer l'association de dérivation prenons le cas documenté par Giguère [2] où l'objet technique B (cadre) est dépendant de l'objet technique A (lisse). Le lien de dérivation suppose que lorsque l'objet technique A évolue, l'objet technique B évolue aussi. Puisque le savoir-faire reliant l'objet technique A à l'objet technique B est maîtrisé, il pourra y avoir propagation automatique de la modification de l'objet technique A vers B lors de l'évolution de l'objet technique A. En conséquence, le traitement d'une modification est peu coûteux. La Figure 28 illustre le cheminement d'une propagation de changement dans un tel cas. Giguère [2] donne un exemple d'implémentation d'une association de dérivation. Conformément au vocabulaire établi, puisque le savoir-faire métier est maîtrisé, l'association est un lien.

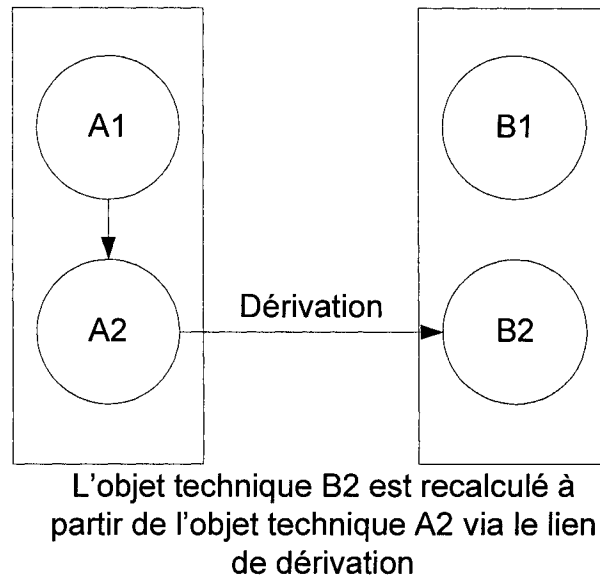


Figure 28 Propagation d'un changement via une association de dérivation

2.6.2 Association de type procédurale

La relation de type procédurale fait appel à un ensemble de procédures qui ne permettent pas la propagation automatique des changements. La propagation du changement se fait alors à l'aide d'une procédure confiée à l'interaction humaine. Pour l'illustrer, prenons le cas de l'objet technique B qui dépend de l'objet technique A. Lorsque l'objet technique A évolue, l'objet technique B doit évoluer aussi. Contrairement à l'association de type dérivation, le savoir-faire reliant les deux objets techniques n'est pas complètement maîtrisé par la relation. Ainsi, lors de l'évolution de l'objet technique A, l'évolution de l'objet technique B nécessite des interactions humaines, ce qui signifie que le traitement d'une modification ne se fait pas de façon automatique. Prenons pour exemple un objet technique A, un modèle géométrique, et un objet technique B, le code NC permettant l'usinage du modèle géométrique A. Pour parvenir au code NC il est

nécessaire d'effectuer une chaîne d'opérations nécessitant des interactions humaines : simulation de fabrication, génération du code APT, génération du code G.

La Figure 29 présente deux exemples de relations procédurales. La Figure A associe les objets techniques A1 (modèle géométrique) et A2 (modèle géométrique). La connaissance permettant de faire évoluer A1 vers A2 provient du processus de gestion des changements (connaissance synthétisé dans un document de type MODSUM (*Modification summary*)). Le MODSUM est un document officiel autorisant un changement (chez Bombardier Aéronautique). Il contient une description du changement et son effectivité. De plus, il documente le passage d'une version de pièce à une autre version de pièce [60]. On s'intéresse ici au MODSUM puisqu'il s'agit d'un cas d'application discuté plus loin.

Le deuxième exemple (Figure 29 B) se situe entre l'objet technique A1 (modèle géométrique) et l'objet technique B1 (code NC). La connaissance en jeu provient de la procédure suivante : simulation de fabrication, génération du code APT, génération du code G.

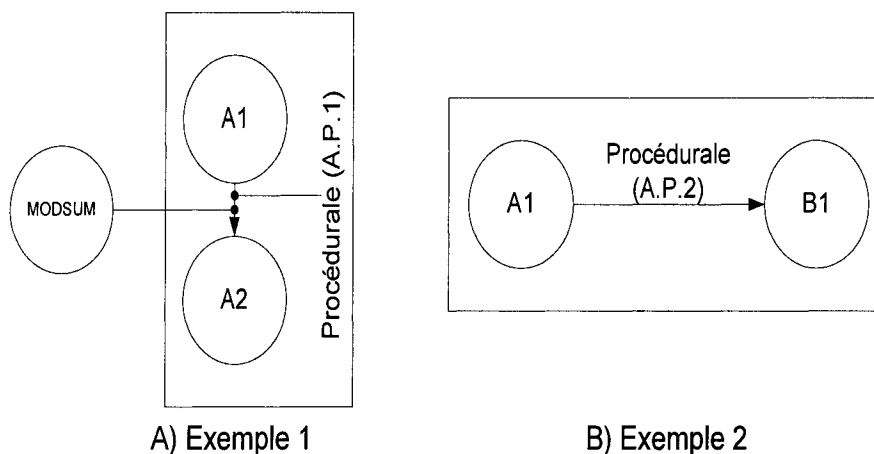


Figure 29 Propagation d'un changement via des relations procédurales

2.6.3 Association de type transposition

L'association de type transposition, à l'instar de l'association de type procédurale, ne formalise pas toutes les connaissances nécessaires à la propagation du changement entre les objets associés. Cependant, une association de type transposition vise à "transposer" une association, déjà établie entre deux objets, à une nouvelle paire d'objets, afin d'obtenir un objet cible modifié en empruntant un chemin plus court (Figure 30).

Reprenons l'exemple d'un objet technique B qui est dépendant de l'objet technique A. L'objet B1 est donc associé à l'objet A1 par une association procédurale. Lorsque l'objet technique A évolue, l'objet technique B doit évoluer aussi. L'objet A2, qui est une évolution de A1, est également associé à l'objet A1 par une association procédurale. La combinaison des associations procédurales A1-A2 et A-B permet d'obtenir B2. Tel qu'illustré à la Figure 30, il existe cependant une alternative à l'association procédurale pour créer l'objet technique B modifié lors de l'évolution de A : l'association de transposition. C'est elle qui permet d'obtenir B2 à partir de B1 en transposant l'association procédurale A1-A2 à la paire d'objets B1-B2, afin d'éliminer le recours à l'association procédurale A2-B2. Ainsi, le concepteur n'a pas à refaire tout le processus de création de B2 à partir de A2.

Les liens de transposition peuvent permettre de réduire les coûts et les délais en évitant d'exploiter les liens procéduraux. Cependant, la limite d'utilisation d'un lien de transposition par rapport à un lien procédural vient de la complexité de la modification. Par exemple, lorsque la position d'un trou est déplacée dans un modèle géométrique (A), il n'est pas nécessaire de recréer entièrement le parcours d'usinage. Un usager expérimenté (programmeur) peut transposer l'évolution A1-A2 au programme B1-B2 en modifiant simplement quelques lignes de code.

Globalement, l'association procédurale respecte une procédure régulière qui est maîtrisée par des intervenants humains. L'association de transposition constitue un raccourci par rapport à la procédure régulière.

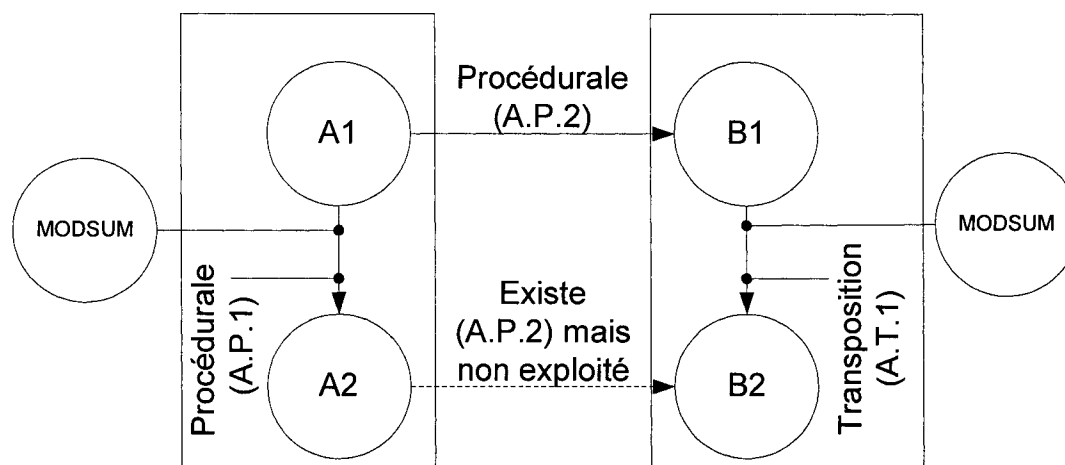


Figure 30 Propagation d'un changement via une association de transposition

2.7 Mise en œuvre des associations

Cette section décrit les différentes opérations requises par la mise en œuvre des associations dans le processus de développement de produit. Les cas suivants sont abordés : l'instanciation d'associations, les opérations sur les instances d'associations, les opérations sur les associations génériques, la gestion de version d'associations et la construction d'associations génériques.

2.7.1 Instanciation d'associations

L'instanciation d'associations permet de construire le modèle produit et les processus associés à partir des différentes associations génériques. Par exemple, un UDF (*User Defined Feature*, sous CATIA V5) est un gabarit d'une nouvelle caractéristique

conservée dans un catalogue. Cette nouvelle caractéristique peut être instanciée dans le design d'autres pièces [53].

2.7.2 Opérations sur les instances d'associations

On compte cinq types d'opérations sur les instances d'associations : instanciation, suppression, modification (exemple : modifier la valeur d'un paramètre qui appartient au savoir-faire formalisé par un lien), exploitation initiale (utilisation du lien après son instanciation afin de déterminer la pseudo-empreinte de l'objet cible) et exploitation de maintien (propagation de changement via le lien après qu'une modification aie été apportée à l'empreinte de l'objet de référence).

2.7.3 Opérations sur les associations génériques

On compte cinq types d'opérations sur les associations génériques : création (création d'une variante d'un gabarit d'association), enregistrement (création d'un gabarit à partir d'un gabarit existant), suppression, modification (exemple : modification au savoir-faire formalisé par l'association) et propagation (propagation aux instances de la modification apportée à l'association générique – besoin d'un mécanisme de contrôle).

2.7.4 Gestion de version des associations

Cette opération gère la modification des associations en assignant un numéro de version à chaque association. Ainsi, il est possible de conserver l'historique des modifications.

2.7.5 Construction des associations génériques

La construction des associations peut être de deux types : planifiée et ad hoc.

2.7.5.1 Association planifiée

Les associations planifiées prennent leur utilité dans l'organisation des données de façon structurée et planifiée. Ainsi, lors de la planification d'un projet de développement de produit, l'on voudra préalablement prévoir l'organisation de ces données. Une association planifiée peut être mise en place (identifier le type de l'objet de référence, de la cible et le type d'association) sans pour autant que l'association soit exploitée immédiatement. Par exemple, la cible pourrait être une gamme de fabrication, la référence, la définition d'une pièce et l'association correspond à une tâche qui consiste à établir la gamme de fabrication. À l'aide des associations planifiées on pourrait construire un catalogue d'associations.

Les associations planifiées permettent de construire un réseau d'objets techniques et d'associations basé sur un modèle d'organisation de données d'un produit où les objets techniques et les associations sont prêts à être exploités. En d'autres termes, il s'agit de construire un catalogue d'associations prêtes à être instanciées.

2.7.5.2 Association Ad hoc

Les associations ad hoc sont utiles puisqu'il est impossible de prévoir à l'avance toutes les associations pour un projet donné. Leur rôle est la mise en place d'associations non planifiées. Pour y parvenir, il faudra disposer d'outils souples permettant au concepteur de définir des associations génériques selon ses besoins.

2.8 Synthèse des éléments de caractérisation des associations utilisés dans la littérature

Cette section fait suite à la terminologie afin de faire une synthèse au moyen d'un vocabulaire unifié. Elle permet de juxtaposer les différents travaux à l'intérieur du vocabulaire qui vient d'être établi. La synthèse des éléments de caractérisation des associations discutés dans la littérature scientifique est construite sous forme de

tableaux. Les tableaux donnent la liste des différents types d'associations, de relations, de liens et de contraintes en donnant pour chacun leurs caractéristiques. Lorsqu'il y a un X dans une case, cela signifie que l'association possède cette caractéristique. Les X sont établis lorsque suffisamment d'information est fournie par l'auteur pour déterminer que l'association possède une certaine caractéristique.

Tableau I Synthèse des associations (Cardinalité, Direction, Agrégation, Savoir-faire)

Auteur	Nom de l'association	Cardinalité (mXn)	Direction	Agrégation	Savoir-faire
Ambler Popplestone	Spatial Relationships				
Bowland, Gao et Sherma	N/A	1 X 1			
De Kraker, Dohmen et F. Bronsvort	Inter-view constraints	1 X 1	directionnelle		
Eustache	Contrainte dépendance	1 X 1	non-directionnelle		
Eustache	Contrainte relationnelle	1 X 1	non-directionnelle		
Eustache	Contrainte booléenne	m X n	non-directionnelle	X	
Eustache	Contrainte règle	m X n	directionnelle		X
Eustache	Lien immuable	1 X 1	bidirectionnelle		
Fouda Danloy et al		1 X 1, 1 X 2, 2 X 1	bidirectionnelle	X	
Giguère	Lien dérivation	1 X 1	directionnelle		X
Jacob				X	
Laako et Mantyla	Constraint	1 X 1		X	
Lee Andrews	de transformation à partir des relations spatiales				
Lee Goossard	lien virtuel	1 X 1, 1 X m	non-directionnelle	X	
Letcher		1 X 1	directionnelle		
Mäntylä Shah	Assembly feature	1 X 1		X	
Maurino	Lien de composition	1 X 1	non-directionnelle		
Maurino	lien d'interface	1 X 1	non-directionnelle		
Maurino	lien de projection	1 X 1	non-directionnelle		
Maurino	lien de représentation	1 X n, m X 1	non-directionnelle		
Mokhtar et al	Knowledge link	1 X 1	directionnelle		X
Mukherjee Liu	Quasi-link (Weak et strong)	1 X 1	directionnelle		
Randoing	composé-composant	1 X 1	non-directionnelle		
Salomons et Al	combinaisons de ces différents types objets : assemblage-assemblage, assemblage-caractéristique, composant-caractéristique, caractéristique-caractéristique ou etc	1 X 1, 1 X 2, 1 X 3	bidirectionnelle		
Shih et Anderson	Contrainte géométrique	1 X 1, m X 1, 1 X n, m X n	directionnelle		
Solid Edge	System library document	m X n			X
Yassine, Withney et Al	Connectivity maps	1 X n, m X 1	non-directionnelle		
Zimmermann et al	lien informationnel	m X n		X	
Zimmermann et al	lien génératif	1 X 1	directionnelle		X
Zimmermann et al	cross-linked product models	1 X 1			

Tableau II Synthèse des associations (Opérations sur les instances d'association)

Auteur	Nom de l'association	Opérations sur les instances d'association			
		Instanciation	Suppression	Exploitation initiale	Exploitation de propagation
Ambler Popplestone	Spatial Relationships				
Bowland, Gao et Sherma	N/A	X	X	X	X
De Kraker, Dohmen et F. Bronsvort	Inter-view constraints	X	X	X	X
Eustache	Contrainte dépendance	X	X	X	X
Eustache	Contrainte relationnelle	X	X	X	X
Eustache	Contrainte booléenne	X	X	X	X
Eustache	Contrainte règle	X	X	X	X
Eustache	Lien immuable	X			
Fouda Danloy et al.		X	X	X	
Giguère	Lien dérivation	X	X	X	X
Jacob					
Laako et Mantyla	Constraint	X	X	X	X
Lee Andrews	matrice de transformation à partir des relations spatiales				
Lee Goossard	lien virtuel	X	X	X	
Letcher		X	X	X	X
Mäntylä Shah	Assembly feature	X	X	X	X
Maurino	Lien de composition	X	X	X	
Maurino	lien d'interface	X	X	X	
Maurino	lien de projection				
Maurino	lien de représentation	X	X	X	
Mokhtar et al.	Knowledge link	X	X	X	X
Mukherjee Liu	Quasi-link (Weak et strong)	X	X	X	X
Randoing	composé-composant	X	X	X	
Salomons et Al	combinaisons de ces différents types objets : assemblage-assemblage, assemblage-caractéristique, composant-caractéristique, caractéristique-caractéristique ou etc	X	X	X	
Shih et Anderson	Contrainte géométrique	X	X	X	
Solid Edge	System library document	X	X	X	X
Yassine, Withney et Al	Connectivity maps				
Zimmermann et al	lien informationnel	X	X	X	X
Zimmermann et al	lien génératif	X	X	X	X
Zimmermann et al	cross-linked product models	X	X	X	X

Tableau III Synthèse des associations (Opérations sur les prototypes d'associations)

Auteur	Nom de l'association	Opérations sur les prototypes d'associations				
		Création	Enregistrement	Suppression	Modification	Propagation
Ambler Popplestone	Spatial Relationships					
Bowland, Gao et Sherma	N/A	X		X		
De Kraker, Dohmen et F. Bronsvooort	Inter-view constraints	X		X		
Eustache	Contrainte dépendance					
Eustache	Contrainte relationnelle					
Eustache	Contrainte booléenne					
Eustache	Contrainte règle	X	X	X	X	X
Eustache	Lien immuable	X				
Fouda Danloy et al						
Giguère	Lien dérivation					
Jacob						
Laako et Mantyla	Constraint	X		X		
Lee Andrews	matrice de transformation à partir des relations spatiales					
Lee Goossard	lien virtuel					
Letcher		X		X		
Mäntylä Shah	Assembly feature					
Maurino	Lien de composition					
Maurino	lien d'interface					
Maurino	lien de projection					
Maurino	lien de représentation					
Mokhtar et al	Knowledge link	X				
Mukherjee Liu	Quasi-link (Weak et strong)					
Randoing	composé-composant	X		X		
	combinaisons de ces différents types objets : assemblage-assemblage, assemblage-caractéristique, composant-caractéristique, caractéristique-caractéristique ou etc					
Salomons et Al		X		X		
Shih et Anderson	Contrainte géométrique	X		X		
Solid Edge	System library document	X		X		
Yassine, Withney et Al	Connectivity maps					
Zimmermann et al	lien informationnel	X	X	X	X	X
Zimmermann et al	lien génératif					
Zimmermann et al	cross-linked product models	X	X	X	X	X

Tableau IV Synthèse des associations (Représentation et gestion des versions)

Auteur	Nom de l'association	Représentation				Gestion des versions
		Graphe	Nomenclature	Équation	matrice	
Ambler Popplestone	Spatial Relationships			X		
Bowland, Gao et Sherma	N/A		X			
De Kraker, Dohmen et F. Bronsvoort	Inter-view constraints	X				
Eustache	Contrainte dépendance	X				
Eustache	Contrainte relationnelle	X				
Eustache	Contrainte booléenne	X				
Eustache	Contrainte règle	X				
Eustache	Lien immuable	X				
Fouda Danloy et al			X			
Giguère	Lien dérivation	X				
Jacob						X
Laako et Mantyla	Constraint	X				
Lee Andrews	Méthode pour dériver la matrice de transformation à partir des relations spatiales					
Lee Goossard	lien virtuel		X		X	
Letcher		X				
Mäntylä Shah	Assembly feature					
Maurino	Lien de composition		X			
Maurino	lien d'interface		X			
Maurino	lien de projection		X			
Maurino	lien de représentation		X			
Mokhtar et al	Knowledge link	X				X
Mukherjee Liu	Quasi-link (Weak et strong)				X	X
Randoing	composé-composant				X	
Salomons et Al	combinaisons de ces différents types objets : assemblage-assemblage, assemblage-caractéristique, composant-caractéristique, caractéristique-caractéristique ou etc	X				
Shih et Anderson	Contrainte géométrique					X
Solid Edge	System library document					
Yassine, Withney et Al	Connectivity maps				X	
Zimmermann et al	lien informationnel	X				
Zimmermann et al	lien génératif	X				
Zimmermann et al	cross-linked product models	X				

Pour la cardinalité, il existe quatre possibilités (1 X 1, m X 1, 1 X n, m X n). Celle qui est la plus abondamment discutée est le lien 1 X 1 (un élément de référence à un élément cible). Un aspect à noter est que la possibilité m X n est discutée par cinq auteurs.

Dans le cas de la direction, la majorité des liens qui transforment de l'information sont directionnels. Par exemple le lien génératif de Zimmermann et al. [17] transforme des caractéristiques de conception en caractéristiques de fabrication. Le lien de dérivation [2] et le lien règle [11] sont eux aussi directionnels. Cependant, la plupart des liens des SGDTs sont non-directionnels car ils indiquent une relation de dépendance sans établir une référence et une cible.

L'agrégation, la décomposition et le savoir-faire sont relativement peu discutés dans la littérature consultée. En effet, sur les 29 associations étudiées seulement six possèdent la caractéristique d'agrégation et quatre d'entre elles formalisent un certain savoir-faire. Le concept d'instanciation est par contre largement répandu dans la littérature. La majorité des systèmes qui intègrent des liens aux modèles produits possèdent une librairie de liens génériques qui constituent des gabarits. Sur ces liens, les opérations suivantes sont communes : instanciation, suppression, exploitation initiale et exploitation de propagation. Plusieurs de ces systèmes permettent de créer de nouveaux liens génériques. Pour ce qui est de gérer les modifications aux liens par la gestion des versions, peu d'auteurs discutent cette idée.

CHAPITRE 3

UN MODÈLE GÉNÉRIQUE POUR LA CONSTRUCTION D'APPLICATIONS ORIENTÉES MÉTIERS BASÉES SUR LE CONCEPT DE LIEN TECHNOLOGIQUE

Le chapitre 2 présentait une analyse des associations et des objets reliés. Il nous a permis de définir les bases du modèle générique présenté ici. Le présent chapitre fournit un modèle générique pour la conception d'applications exploitant le concept de lien technologique. Il a été constaté lors de la revue de la littérature que la mise en œuvre d'une application orientée métier dans un cas isolé avait apporté des gains de temps de 72% à 94% [2] par rapport à l'exécution de la tâche de façon traditionnelle. Cependant, la conception de telles applications requiert un effort considérable. Pour la conception d'un avion entier, il faudrait disposer de milliers d'applications orientées métiers. Dans l'état actuel des choses, il n'est pas raisonnable de penser concevoir des milliers de cas applications orientés métiers. Le modèle générique propose un cadre de référence pour la conception d'applications orientées métiers afin d'en réduire l'effort de développement. La section 3.1 décrit le modèle générique nommé GAPOM. La section 3.2 valide le modèle générique en l'appliquant à trois applications orientées métiers. Il est à noter que pour ce chapitre les termes relations, liens et contraintes sont utilisés pour permettre d'exprimer plus précisément notre réflexion conformément aux vocabulaires et aux concepts définis au chapitre 2.

3.1 Modèle générique d'applications orientées métiers proposé

Le modèle proposé se nomme GAPOM (Générique d'Applications Orientées Métiers). Il comporte deux phases : la décomposition des niveaux d'abstraction et les étapes de construction de l'application. La première phase s'intéresse à structurer l'information requise par l'application à développer, alors que la deuxième phase s'intéresse à la construction de l'application. La première phase distingue trois niveaux d'abstraction décrivant une application donnée : le niveau des vues, le niveau des documents et le

niveau des caractéristiques. La deuxième phase présente chacune des étapes détaillées de construction d'applications, à partir de l'étape 1, nommée "déclaration de la nature de la caractéristique contextuelle à créer", jusqu'à l'étape 10, nommée "intégration de la pseudo-empreinte au contexte".

La première phase a pour rôle de poser la fondation de l'application à développer. En quelque sorte, il consiste en une méthodologie permettant d'identifier les composants majeurs (les vues (marketing, conception, production, etc), les documents (modèle CAO, plan, etc), les caractéristiques (géométrique) et les associations (relation, lien, contrainte)) exploités par l'application. Pour y parvenir, nous proposons d'identifier trois niveaux d'abstraction énumérés en ordre décroissant d'abstraction : les vues, les documents et les caractéristiques. La représentation de chacun de ces niveaux d'abstraction est utile car elle illustre la portée de l'application dans son environnement et ce pour différents niveaux de complexité. Il existe d'autres niveaux d'abstraction plus faibles (ex : attributs de caractéristiques) que les trois niveaux prévus au modèle ne présentent pas. Le modèle ne les illustre pas parce que de tels niveaux (attributs de caractéristiques) n'apporteraient que des informations très détaillées alors que notre objectif est de donner une vue simple et globale des éléments en jeu pour une application donnée.

L'objectif principal de la deuxième phase est de structurer la démarche de construction de l'application afin d'offrir un cadre de référence commun aux diverses applications à développer. La réalisation de cette deuxième phase est basée sur l'information fournie par la première phase. En effet, les objets techniques et les associations identifiées lors de la première phase se retrouvent dans la deuxième phase. Cette phase se représente par un diagramme composé de dix étapes. Un des principaux moyens pour réaliser cette phase est de situer la notion d'empreinte/pseudo-empreinte dans un contexte plus large de mise en œuvre des liens technologiques pour le développement de produits.

3.1.1 Décomposition des niveaux d'abstraction (1ère phase du modèle)

La décomposition se fait selon trois niveaux d'abstraction : vue, document et caractéristique.

On distingue les associations internes à une vue des associations externes à cette vue. Une association interne correspond à une association entre des éléments appartenant à un même ensemble. Une association externe, correspond à une association entre des éléments appartenant à deux ou plusieurs ensembles.

3.1.1.1 Abstraction au niveau des vues

Ce niveau d'abstraction permet d'identifier les vues qui sont en jeu pour une application donnée ainsi que les associations établies entre elles. Dans ce modèle, une vue est un regroupement d'éléments en vertu d'une ou de plusieurs propriétés communes qui permet de remplir une fonction. Ainsi, une vue est un type d'ensembles correspondant à un certain niveau d'abstraction. Voici des exemples de type d'ensembles : vues (conception, fabrication, méthode), documents (pièce, gamme de fabrication), caractéristiques (soyage, découpe). Or, au niveau des vues, l'ensemble en question correspond à une fonction ou discipline d'une organisation ou à un département d'une entreprise. L'identification des départements permet de cerner les domaines touchés par une application donnée.

Lorsqu'une abstraction au niveau des vues est considérée, les associations internes à la vue ne sont pas représentées. Par ailleurs, lorsqu'une vue est indépendante des autres pour une application donnée, il n'y a alors pas d'association externe à représenter (c'est le cas de la vue A, Figure 31 A). Toutefois, lorsqu'il y a une dépendance entre deux vues, il existe alors une association inter-vues telle que celle représentée par une flèche entre les vues B et N à la Figure 31 B.

Notre modèle se limite à identifier les associations directionnelles entre les vues, considérant l'une comme la cible et l'autre, la référence, tout en n'étant pas interchangeables. En effet, les associations bi-directionnelles ne sont pas considérées dans notre modèle. Soulignons qu'il est possible d'avoir des contraintes de bas niveau qui possèdent la caractéristique de bi-directionnalité telle que les contraintes d'égalité ou de parallélisme. Un autre cas de bi-directionnalité est l'association de transport inter-vues. B est obtenu par le transport de A, A pourrait éventuellement être obtenu par le transport de B.

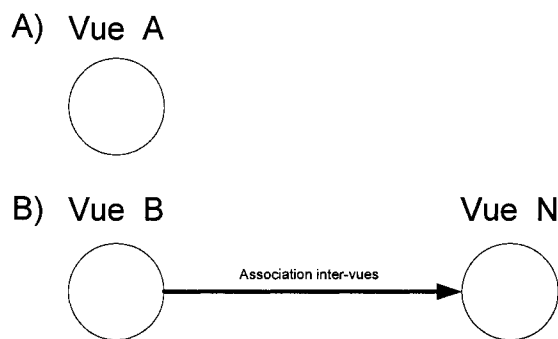


Figure 31 Abstraction au niveau des vues
A) Vue indépendante
B) Association inter-vues

3.1.1.2 Abstraction au niveau des documents

Ce niveau d'abstraction permet d'identifier et de représenter les documents contenus dans les ensembles nommés vues (conception, méthode, analyse structurale, etc) pour une application donnée, ainsi que les associations entre ces documents. À ce niveau, chacune des vues contient un ou plusieurs ensembles nommés documents.

Un document, dans le contexte de la gestion des données techniques, peut être défini comme un ensemble cohérent d'informations visant à décrire un objet technique. Les informations qu'il contient sont structurées, de manière lisible (un texte) ou perceptible (un dessin, un programme de machine-outil à commande numérique) par un homme ou

une machine; le document possède une unité, en terme de contenu : il est fini; le document a une finalité : décrire un objet technique, son processus d'acquisition, de réalisation ou d'utilisation [13]

Comme cela a été décrit au niveau d'abstraction des vues, lorsqu'il y a une dépendance entre deux documents, il y a existence d'une relation inter-documents, comme l'illustrent la Figure 32 et la Figure 33. Les relations intra-document ne sont pas représentées au niveau d'abstraction des documents. La Figure 32 illustre des documents qui appartiennent à la même vue (vue A) pour une application donnée. La Figure 33 illustre des documents qui n'appartiennent pas à la même vue (vue B et vue N).

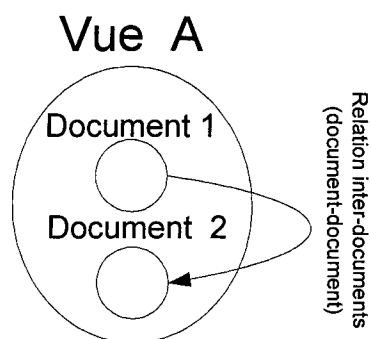


Figure 32 Abstraction au niveau des documents : une vue et deux documents

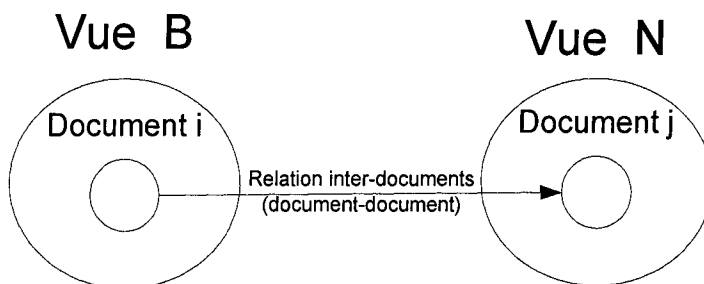


Figure 33 Abstraction au niveau des documents : deux vues et deux documents

3.1.1.3 Abstraction au niveau des caractéristiques

Ce niveau d'abstraction permet d'identifier les caractéristiques contenues dans les ensembles nommés documents aussi que les associations entre caractéristiques. Nous considérons la caractéristique comme un élément fonctionnel d'un objet qui a une signification selon une vue spécifique (exemple : conception, fabrication) et qui structure un ensemble d'informations, tel que préconisé par Giguère [2]. Une caractéristique possède différents paramètres et éléments qui contraignent sa forme, sa position, etc. Elle est constituée de paramètres internes (indépendants d'un autre objet technique) et de paramètres externes (dépendants d'un autre objet technique, exemple : paramètre d'interface). La notion de paramètre d'interface est discutée plus loin. Chaque ensemble du niveau des documents contient des éléments qui sont des caractéristiques. Dans ce cas aussi, il existe des associations internes et externes qui sont régies par les mêmes conventions que celles discutées aux deux autres niveaux. Une association interne relie deux attributs d'une même caractéristique, alors qu'une association de type externe relie des attributs de caractéristiques différentes. La Figure 34 illustre une association inter-caractéristiques établie entre deux documents eux-mêmes contenus à l'intérieur d'un ensemble nommé vue A. La Figure 35 illustre une association inter-caractéristiques entre deux ensembles nommés vue B et vue D. La Figure 36 illustre une association inter-caractéristiques entre des caractéristiques appartenant au même document. Finalement, la Figure 37 illustre une association intra-caractéristique (contenue dans une même caractéristique).

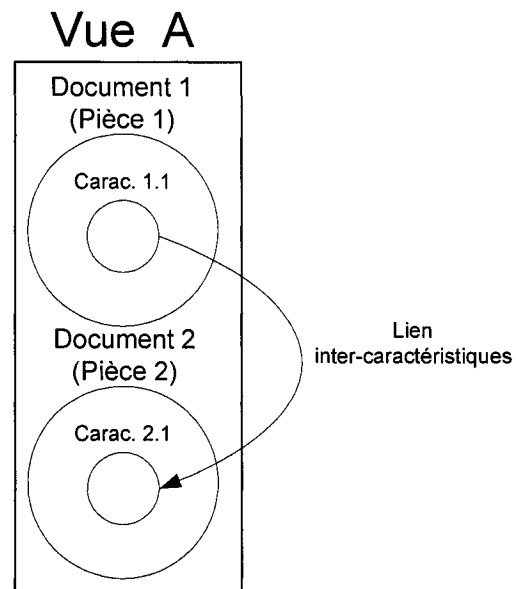


Figure 34 Abstraction au niveau des caractéristiques : une vue, deux documents et deux caractéristiques

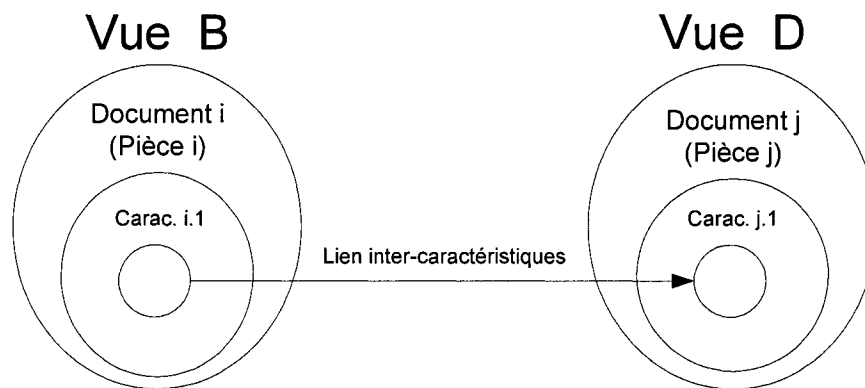


Figure 35 Abstraction au niveau des caractéristiques : deux vues, deux documents et deux caractéristiques

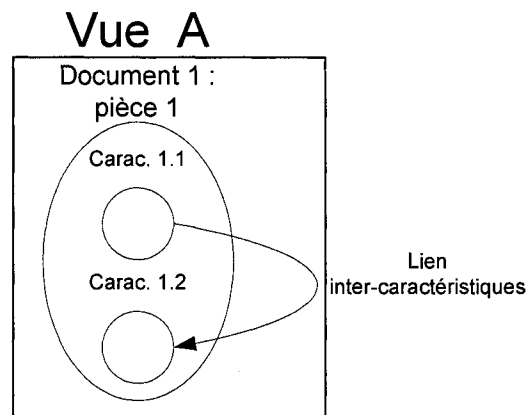


Figure 36 Abstraction au niveau des caractéristiques : une vue, un document et deux caractéristiques

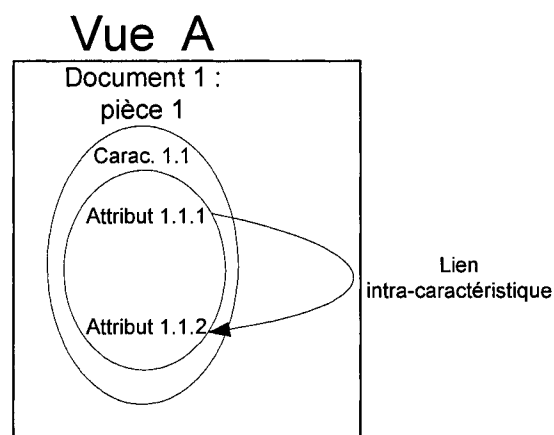


Figure 37 Abstraction au niveau des caractéristiques : une vue, un document, une caractéristique, deux attributs

Les liens externes relient seulement des attributs de propriété extrinsèque. Selon Shah et Mantyla [20] une propriété extrinsèque (ou propriété inter-caractéristiques) relève d'attributs qui impliquent deux ou plusieurs caractéristiques. Ces propriétés sont appelées extrinsèques parce qu'elles ne peuvent être définies entièrement au sein de la caractéristique.

Ainsi, pour instancier une caractéristique, il est nécessaire de posséder de l'information relative à des paramètres d'autres caractéristiques. À titre d'exemples, mentionnons les paramètres et dimensions dérivés à partir de caractéristiques, localisation de caractéristiques, orientation de caractéristiques, etc [20].

À l'inverse, une propriété intrinsèque (ou propriétés intra-caractéristique) correspond à des attributs qui sont indépendants des autres caractéristiques du modèle. Exemples : formes géométriques, noms ou étiquettes des paramètres, etc [20].

3.1.2 Étapes de construction de l'application (2ième phase du modèle)

L'objectif principal de la deuxième phase est de structurer la démarche de construction de l'application afin d'offrir un cadre de référence commun aux diverses applications à développer. La réalisation de cette deuxième phase est basée sur l'information fournie par la première phase. Les dix étapes de cette phase sont illustrées à la Figure 38. Premièrement, il est nécessaire de procéder à l'identification de l'application (étapes 1-2). Deuxièmement, les intrants nécessaires à la création de l'empreinte sont récupérés du contexte (étapes 3-5). Troisièmement, les valeurs à utiliser par le générateur sont spécifiées (étapes 6-7). Quatrièmement, on procède à la génération de la pseudo-empreinte (étape 8). Cinquièmement, on exploite les extrants (étapes 9-10).

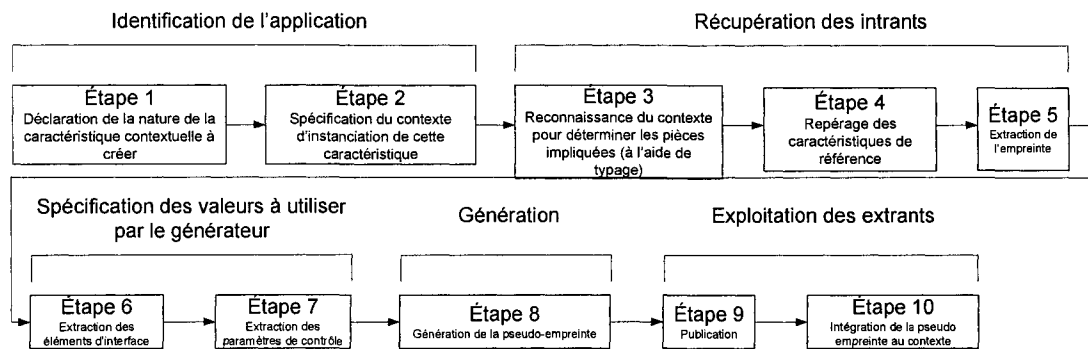


Figure 38 Les dix étapes de la construction d'une application (phase 2)

La nature des liens impliqués dans le fonctionnement d'une application est illustrée à la Figure 39. Dans un premier temps, il est nécessaire de reconnaître le contexte de travail (associations de composition documents-pièces). Dans un deuxième temps, on doit décomposer les documents-pièces en plusieurs caractéristiques (liens de composition caractéristiques - éléments géométriques). Dans un troisième temps, on doit extraire des caractéristiques les éléments géométriques qui les composent. Ceux-ci sont ensuite fournis au générateur de la pseudo-empreinte comme élément d'interface avec les paramètres externes (associations de transport). La boîte noire représente le générateur de pseudo-empreinte. Les sorties sont le résultat de chacune des pseudo-empreintes générées par la boîte noire. Les pseudo-empreintes sont publiées afin d'être accessibles pour qu'elles soient intégrées au contexte (associations de publication et associations de transport).

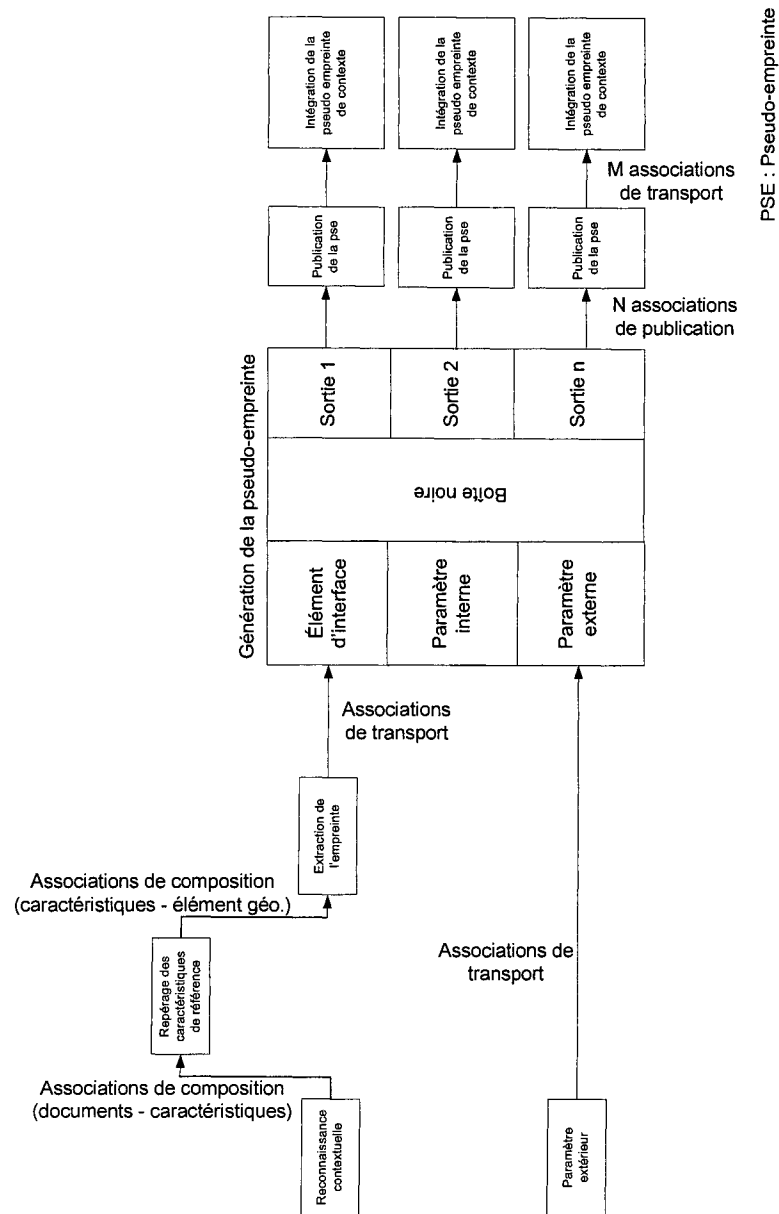


Figure 39 Les associations dans le fonctionnement du modèle GAPOM

3.1.2.1 Identification de l'application (étapes 1-2)

L'étape 1 et l'étape 2 ont pour rôle d'identifier l'application (Figure 38). Le rôle général de ces applications est de créer des associations génériques qui seront par la suite instanciées lors de la création du modèle produit. Dans la logique des étapes 1 et 2, la

première s'intéresse à la caractéristique à créer alors que la deuxième s'intéresse aux documents et aux paramètres externes qui constituent le contexte. L'étape 1, nommée déclaration de la nature de la caractéristique contextuelle [2] à créer, a pour objectif d'identifier, par un titre significatif, ce que l'application orientée métier doit générer. L'étape 2, nommée spécification du contexte d'instanciation de cette caractéristique, a pour objectif de spécifier les pièces, les documents et les paramètres externes qui appartiennent au contexte.

3.1.2.2 Récupération des intrants (étapes 3-5)

Ces étapes ont pour rôle de récupérer les intrants nécessaires à la définition de l'empreinte. À l'étape 3, le contexte de référence à partir duquel l'empreinte sera créée est déterminé. Le contexte est composé de plusieurs documents. Aux étapes 4 et 5, on identifie successivement les caractéristiques et les éléments géométriques qui composent les documents. Cette méthodologie en trois étapes permet de récupérer les intrants nécessaires à la définition de l'empreinte en décomposant le contexte (niveau d'abstraction élevé) jusqu'aux éléments géométriques (niveau d'abstraction faible). Dans le texte qui suit, le terme *pièce* est employé pour faciliter la compréhension. Toutefois, le terme *document* demeure le terme générique.

L'étape 3 est nommée Reconnaissance du contexte pour déterminer les pièces impliquées (à l'aide de typage). À cette étape, les pièces impliquées sont déterminées et elles sont typées (si elles ne le sont pas au préalable) afin de pouvoir être identifiées ultérieurement. Le typage s'effectue par l'écriture de nouveaux attributs sur la pièce. Deux situations sont possibles. Idéalement, les pièces du contexte ont déjà été typées et cette information, sous forme d'attribut, est accessible par l'application. Il est aussi possible que les pièces en jeu doivent être typées au moment de l'exploitation de l'application.

À l'étape 4, nommée Repérage des caractéristiques de référence, les caractéristiques de référence composant les documents impliqués dans le contexte (document CAO, exemple : lisse et cadre) sont identifiées. Ces caractéristiques sont nécessaires pour déterminer ce qui composera l'empreinte. Par exemple, le document nommé lisse contient la caractéristique section. [2]. Il est possible qu'il y ait plus d'une caractéristique par document.

L'étape 5, nommée extraction de l'empreinte, a pour but de générer l'empreinte à partir du contexte. Pour ce faire, les éléments qui composent l'empreinte sont extraits à partir d'un groupe de pièces de référence par l'intermédiaire des caractéristiques de référence. Par exemple, pour l'application de modélisation des soyages et des découpes, quelques uns des éléments géométriques qui composent le document lisse et, par le fait même, la caractéristique section sont : épaisseur tête (E), plan départ 1, plan départ 2 (Figure 40).

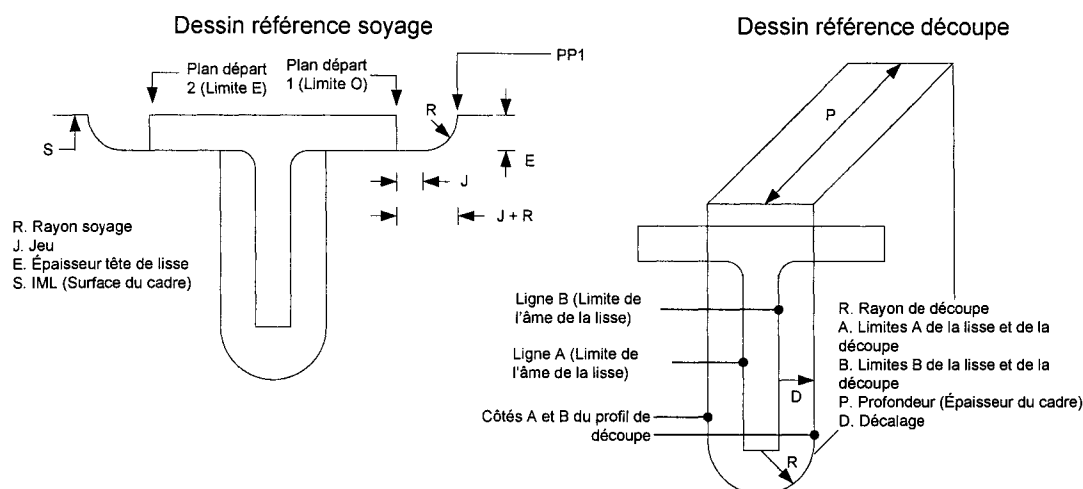


Figure 40 Dessins de référence du soyage et de la découpe [2]

3.1.2.3 Spécification des valeurs à utiliser par le générateur (étapes 6-7)

La spécification des valeurs à utiliser par le générateur a pour rôle de récupérer les informations nécessaires à l'application du savoir-faire. Lors de ces étapes, deux types d'informations sont recueillis : les éléments d'interface et les paramètres de contrôle. Les éléments d'interfaces sont des instances d'objets techniques ou de paramètres qui proviennent de documents de référence. Les paramètres de contrôle proviennent soit du contexte (étape 2) ou ils sont internes aux générateurs. Toutes ces informations seront utilisées par le générateur pour créer la pseudo-empreinte.

À l'étape 6, nommée Extraction des éléments d'interface, les éléments sont des instances d'objets techniques provenant du contexte. L'instanciation est effectuée grâce à une association de transport persistante. L'association de transport a pour rôle de construire une instance d'un objet technique ou d'un paramètre à partir d'une pièce originale vers une autre pièce ou vers elle-même. Son caractère persistant signifie que l'association de transport est maintenue pour conserver une réplique cohérente. En d'autres termes, lorsque l'objet technique ou le paramètre original est modifié, sa ou ses instances

suivent la modification (le concept est semblable à "Associative copy" [55] qu'on retrouve dans Solid Edge).

À l'étape 7, nommée Extraction des paramètres de contrôle, les paramètres de contrôle sont des variables dont les valeurs doivent être déterminées pour que la pseudo-empreinte puisse être construite. Les valeurs des paramètres peuvent avoir différentes sources telles que des tables, des règles de design, le concepteur, etc. Le rôle de ces paramètres de contrôle est de pouvoir ajuster le résultat obtenu (pseudo-empreinte) par le générateur selon le contexte spécifié. La variation de tels paramètres aura une répercussion prévisible et localisée sur la pseudo-empreinte. Cet ajustement peut se faire à partir de paramètres externes et internes. Les paramètres externes proviennent du contexte spécifié (étape 2) et ils sont variables. Les paramètres internes sont intrinsèques à l'application (ils correspondent à un savoir-faire). Un exemple de paramètre provenant de l'application de modélisation des soyages et des découpes est le rayon de soyage (Figure 40). La variation de ce rayon aura comme impact de modifier le soyage.

3.1.2.4 Génération de la pseudo-empreinte (étape 8)

L'étape 8, nommée Génération de la pseudo-empreinte, génère un aspect de la caractéristique cible, souvent de la géométrie. Cette étape décrit le savoir-faire de conception associé à l'association de dérivation. Ce savoir-faire sera appliqué automatiquement aux éléments d'interface (étape 6) et aux paramètres de contrôle (étape 7) pour ensuite générer la pseudo-empreinte. Par la suite, dans le monde de la géométrie solide, par exemple d'une maquette numérique, un solide est créé à partir de la pseudo-empreinte. Celui-ci sera intégré au contexte pour générer la caractéristique cible. Il est possible que plus d'une pseudo-empreinte soit créée. Par exemple pour l'application de modélisation des soyages et des découpes, deux pseudo-empreintes sont créées : une pseudo-empreinte pour générer la géométrie du soyage et une autre pseudo-empreinte pour générer la géométrie de la découpe.

3.1.2.5 Exploitation des extrants (étapes 9-10)

La publication est un mécanisme qui rend disponible les caractéristiques géométriques pour différentes utilisations. À l'étape 9, nommée Publication, les caractéristiques exploitant la pseudo-empreinte sont publiées pour être utilisées à l'étape 10 (intégrer la pseudo-empreinte au contexte) afin de générer la caractéristique cible. Un autre rôle de la publication est de mettre à disposition les caractéristiques résultant de l'application pour qu'elles puissent être utilisées comme caractéristiques de référence pour d'autres applications. Par exemple, pour l'application de modélisation des soyages et des découpes, les caractéristiques publiées sont la saillie de soyage et la saillie de découpe.

Finalement, à l'étape 10, nommée Intégration de la pseudo-empreinte au contexte, la caractéristique cible est générée à partir des éléments publiés à l'étape neuf et du contexte.

3.2 Validation du modèle GAPOM sur des cas existants

Cette section tente de valider le modèle GAPOM sur différentes applications orientées métiers. Pour ce faire, le modèle générique sera transposé sur trois applications existantes, chacune possédant des spécificités. Cela permettra de valider le fonctionnement et la portée du modèle générique. Ces choix sont motivés par le fait qu'il s'agit de trois cas étudiés en profondeur dans notre laboratoire (LIPPS, École de technologie supérieure), qu'ils sont bien documentés et maîtrisés, et qu'ils correspondent à une réalité industrielle.

Chacune de ces trois applications exploite la notion d'associations persistantes au moyen des outils disponibles au moment où les travaux ont été réalisés et selon la lecture qu'en font les différents auteurs. Rappelons que notre contribution vise à proposer un modèle générique pour l'emploi des associations en développement de produit et que nous vérifions la capacité de ce modèle à supporter ces différentes applications.

3.2.1 Application pour la modélisation des soyages et des découpes

Cette section présente la validation du modèle générique (GAPOM) sur l'application de Giguère [2;4;26], qui a été développée de 2000 à 2002. Celle-ci a pour objectif d'assister les concepteurs de structure aéronautiques dans la modélisation des soyages et des découpes. Le soyage peut être défini comme une déformation locale réalisée sur une pièce dans le but de générer une surface de contact adéquate entre deux pièces juxtaposées, tel qu'illustré à la Figure 41.

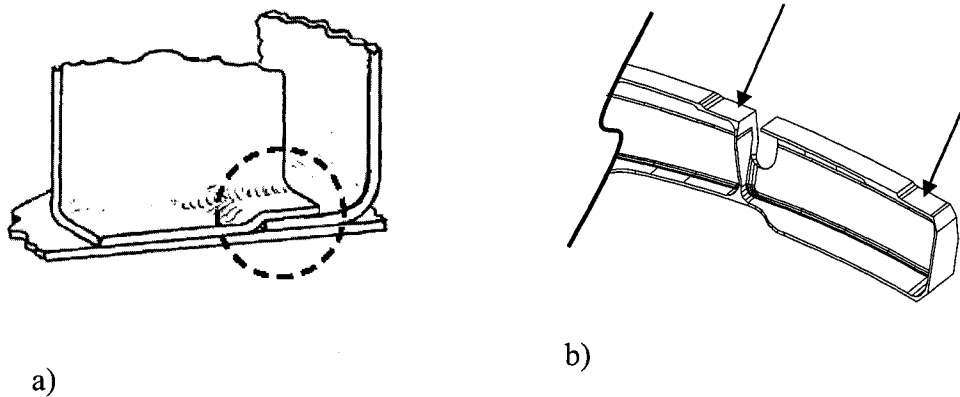


Figure 41 Exemples de soyage a) sur une pièce de métal en feuille [61]
b) sur une pièce usinée (machined step) [75]

La découpe est une ouverture pratiquée sur un cadre afin de permettre le passage d'une lisse. La maquette simplifiée de la Figure 42 montre des pièces typiques d'une structure aéronautique.

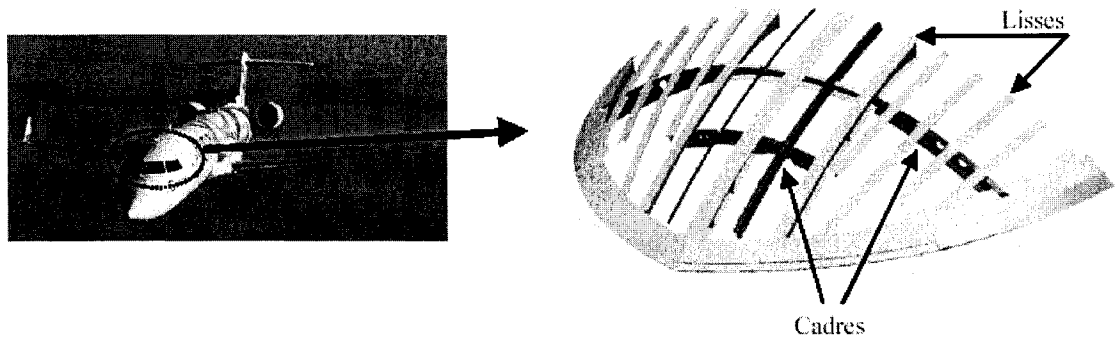


Figure 42 Éléments de structure aéronautique typique [2]

Le fonctionnement de cet application se décompose comme suit. Premièrement, les relations entre les pièces d'un assemblage sont capturées au moyen de liens technologiques spécialisés appelés liens de dérivation. Ceux-ci encapsulent le savoir-faire et l'intention de conception. Ces liens sont ensuite utilisés afin d'extraire une caractéristique et son empreinte d'un groupe de pièces de référence dont les paramètres permettront ensuite de générer les caractéristiques manquantes et leurs pseudo-empreintes sur un groupe de pièces cibles [2].

L'application de Giguère est utilisée ici comme un premier cas nous permettant de valider le fonctionnement du modèle proposé. Plus spécifiquement, il permet de tester la capacité du modèle GAPOM à accueillir une caractéristique contextuelle composée d'une seule pièce de référence et une seule pièce cible. Les différents aspects du modèle générique se traduisent comme suit : niveau d'abstraction de la vue = une seule vue (conception); niveau d'abstraction Document = 2 documents - 2 pièces ; niveau caractéristique = 2 intrant - 2 extrants. Dans l'application originale de Giguère, la reconnaissance contextuelle et le typage des pièces sont effectués manuellement, au moment de l'exploitation de l'application. Ensuite le lien de dérivation est établi entre la pièce cible et la pièce de référence. Avec ce lien de dérivation, l'application procède à

l'analyse de la pièce de référence afin d'en extraire la caractéristique de référence. Par la suite, les pseudo-empreintes sont créées sur le cadre, formant ainsi le soyage et la découpe [2].

3.2.1.1 Décomposition des niveaux d'abstraction (1ère phase)

La Figure 43, la Figure 44 et la Figure 45 présentent les trois niveaux d'abstraction pour l'application de Giguère. Au premier niveau d'abstraction, on constate qu'il y a une seule vue, qui se nomme vue de conception. Le niveau d'abstraction de la vue est décomposé pour passer au niveau d'abstraction des documents, Figure 44. Pour alléger la Figure 44 et la Figure 45, le niveau de la vue y est omis.

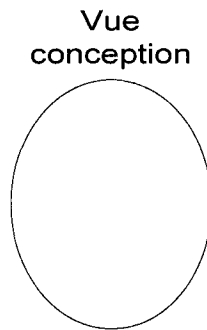


Figure 43 Abstraction au niveau des vues pour l'application de modélisation des soyages et des découpes

À la Figure 44, on remarque que la lisse est le document de référence et le cadre, le document cible. Cette figure montre la composition du contexte (documents de référence : la lisse et le cadre) ainsi que le document cible (le cadre). Le contexte et le document cible sont reliés par une association dédiée à l'aménagement de l'espace à l'intersection d'un cadre et d'une lisse.

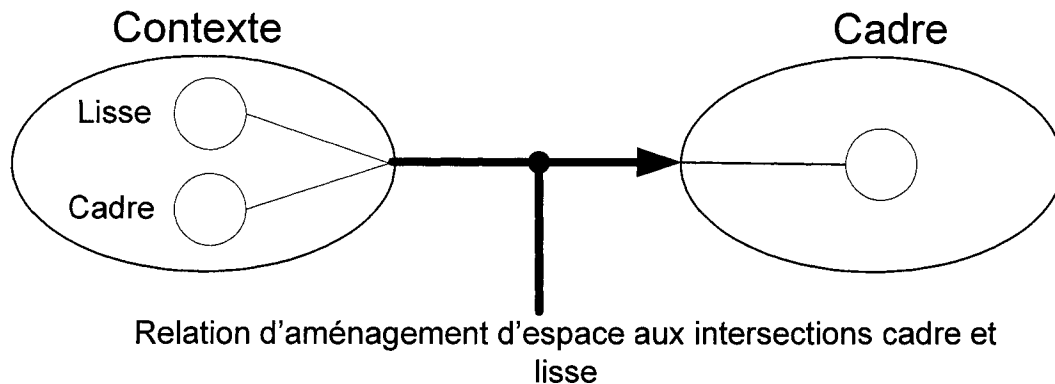


Figure 44 Abstraction au niveau des documents pour l'application de modélisation des soyages et des découpes

Ensuite, l'on décompose le niveau d'abstraction du document pour passer au niveau des caractéristiques. À la Figure 45, on constate qu'il y a quatre caractéristiques : elles se nomment section, soyage, découpe et limites. Le soyage et la découpe sont deux caractéristiques cibles qui sont créées par deux liens de dérivation ici nommés lien soyage et lien découpe, qui ont comme point de départ les caractéristiques de référence Section et Limites. Un autre aspect intéressant à noter à la Figure 45 est que le terme "lien" est utilisé au lieu du terme "relation" comme à la Figure 44. Ceci s'explique par le fait qu'au niveau des caractéristiques la maîtrise du savoir-faire est suffisante pour que le terme "lien" s'applique. Par contre au niveau des documents ça n'est pas le cas. On utilise alors le terme général "relation". En d'autres termes, si le niveau d'abstraction des caractéristiques implique deux liens (Figure 45), l'abstraction au niveau des documents (Figure 44) implique aussi deux liens, mais agrégés en une seule relation [59].

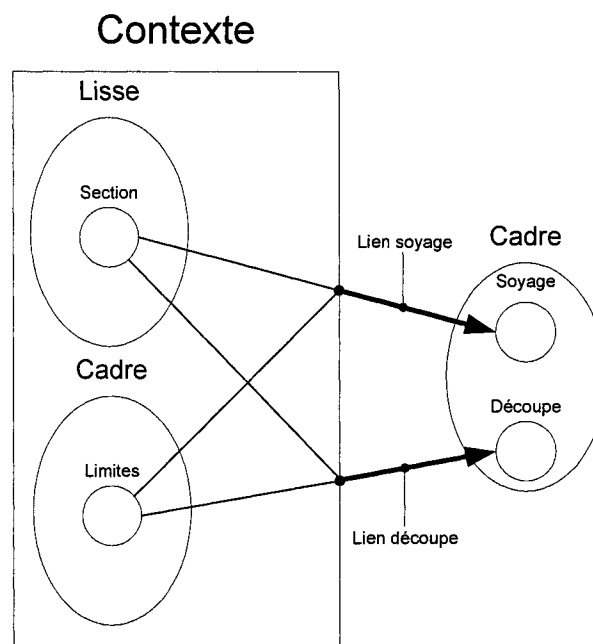


Figure 45 Abstraction au niveau des caractéristiques pour l'application de modélisation des soyages et des découpes

3.2.1.2 Étapes de construction de l'application (2ième phase)

Les dix étapes exprimant la phase deux du modèle GAPOM sont illustrées par des diagrammes. Pour chacune de ces étapes, une explication est donnée. La Figure 46 montre la signification des symboles employés dans les diagrammes.

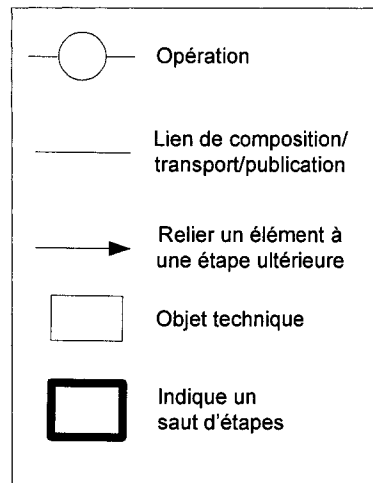


Figure 46 Signification des symboles dans les diagrammes exprimant la phase deux du modèle GAPOM

La Figure 47 illustre les étapes 1 à 5 de l'application pour la modélisation des soyages et des découpes. À l'étape 1, la nature de la caractéristique contextuelle à créer est déclarée "intersection cadre lisse". À cette étape, l'objectif est d'identifier, par un titre significatif, ce que l'application orientée métier doit générer.

Ensuite, à l'étape 2, on spécifie le contexte de la caractéristique. En d'autres termes, on doit mentionner les pièces, les documents et les informations qui appartiennent au contexte. Pour cette application le contexte comprend des aspects géométriques (tels que lisse et cadre) et des valeurs numériques à employer lors de l'application des règles de savoir-faire, qui correspondront à des valeurs standard ou à des valeurs indiquées par l'utilisateur.

À l'étape 3, les pièces impliquées (cadre et lisse) sont identifiées et sont typées afin de pouvoir être exploitées ultérieurement. Idéalement, les pièces du contexte ont déjà été typées et cette information, sous forme d'attribut, est accessible par l'application. Il est aussi possible que le typage des pièces en jeu doive être réalisé manuellement au

moment de l'exploitation de l'application. C'est le cas qui prévaut ici. L'opération de typage est illustrée sur la Figure 47 entre les étapes 2 et 3 par un cercle.

À l'étape 4, les caractéristiques de référence composant les documents impliqués dans le contexte (document CAO, exemple : lisse et cadre) sont identifiées. Ces caractéristiques sont nécessaires pour déterminer ce qui composera l'empreinte. Par exemple, le document nommé lisse contient la caractéristique section alors que le document nommé cadre contient la caractéristique limite intérieure [2]. Les deux associations entre les étapes 3 et 4 illustrent la décomposition des documents en caractéristiques. La connexion entre la phase de décomposition des niveaux d'abstraction et la phase de construction du modèle GAPOM résident dans le détail des intrants et des extrants du contenu du lien voyage et du lien découpe. Ainsi, les étapes 4, 5 et 6 sont basées sur l'information identifiée par les trois niveaux d'abstraction. Logiquement les documents et les caractéristiques des étapes 4, 5 et 6 sont les mêmes que ceux identifiés dans les trois niveaux d'abstraction.

L'étape 5 a pour but d'extraire l'empreinte à partir du contexte. Pour ce faire, les éléments géométriques qui composent l'empreinte sont extraits à partir d'un groupe de pièces de référence par l'intermédiaire des caractéristiques de référence. Pour cette application, quelques uns des éléments géométriques qui composent le document lisse et, par le fait même, la caractéristique section sont : épaisseur tête (E), plan départ 1, plan départ 2. Pour le document cadre, les éléments géométriques qui le composent sont : Épaisseur (P) et surface IML (S) (Figure 40). Les sept associations entre les étapes 4 et 5 illustrent la décomposition des caractéristiques en ces éléments géométriques (Figure 47).

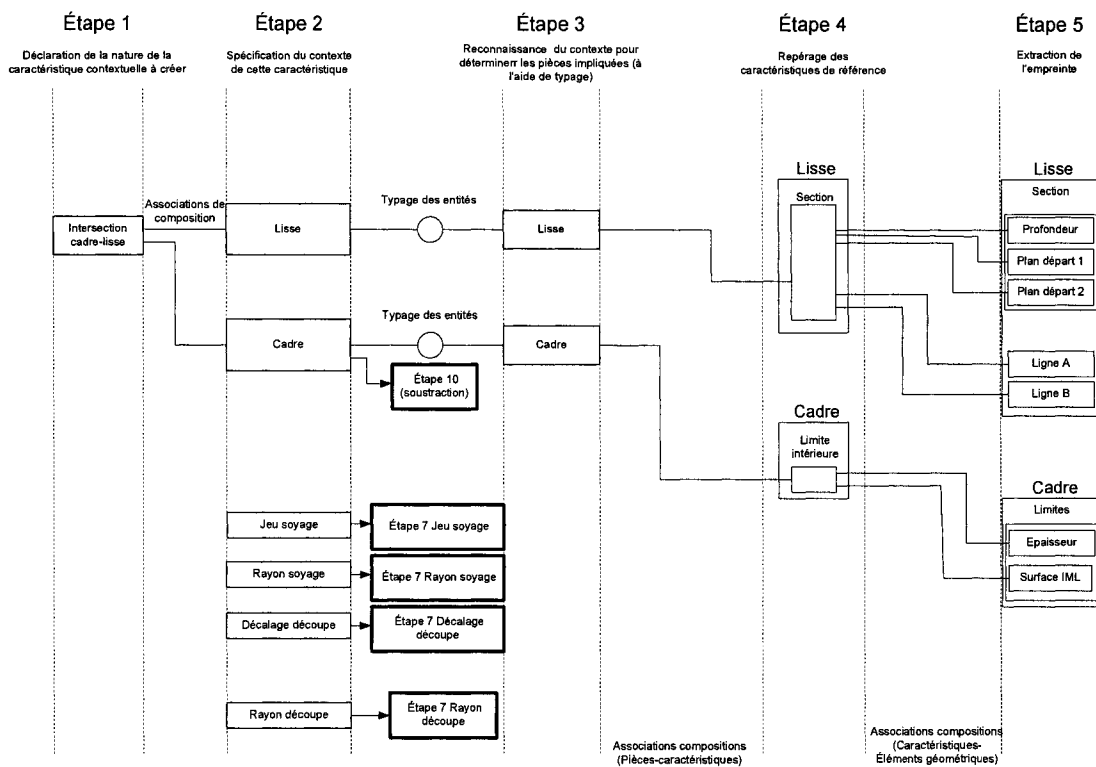


Figure 47 Identification de l'application et récupération des intrants pour l'application de modélisation des soyages et des découpes

La Figure 48 illustre les étapes 5 à 10 de l'application de modélisation des soyages et des découpes. Aux étapes 6 et 7, les intrants nécessaires à la réalisation de la pseudo-empreinte sont déterminées. À l'étape 6, sont extraits les éléments d'interface permettant de connecter l'empreinte à la pseudo-empreinte (Figure 49). Pour cette application les éléments d'interface sont : profondeur (soyage), limite O (soyage), limite E (soyage), surface cadre (soyage), ligne A (découpe), ligne B (découpe) et profondeur (découpe). À l'étape 6, les termes qui décrivent les éléments d'interface (ex : profondeur soyage) expriment une réalité de la pseudo-empreinte, alors que la contre partie de l'étape 5 exprime une réalité du contexte (l'empreinte). De plus entre l'étape 5 et 6, on exploite des associations de transport.

À l'étape 7, les valeurs des paramètres de contrôle sont déterminées pour que la pseudo-empreinte puisse être construite. Pour cette application les paramètres externes sont : décalage découpe, rayon découpe, jeu soyage et rayon soyage. Ici, il n'y a pas de paramètres internes (Figure 48).

Ensuite, les intrants déterminés aux étapes 6 et 7 sont connectés au générateur de pseudo-empreinte (étape 8) qui est, à cette étape de nos explications, composé de deux boîtes noires indépendantes pour la création de la saillie de soyage et de la saillie de découpe.

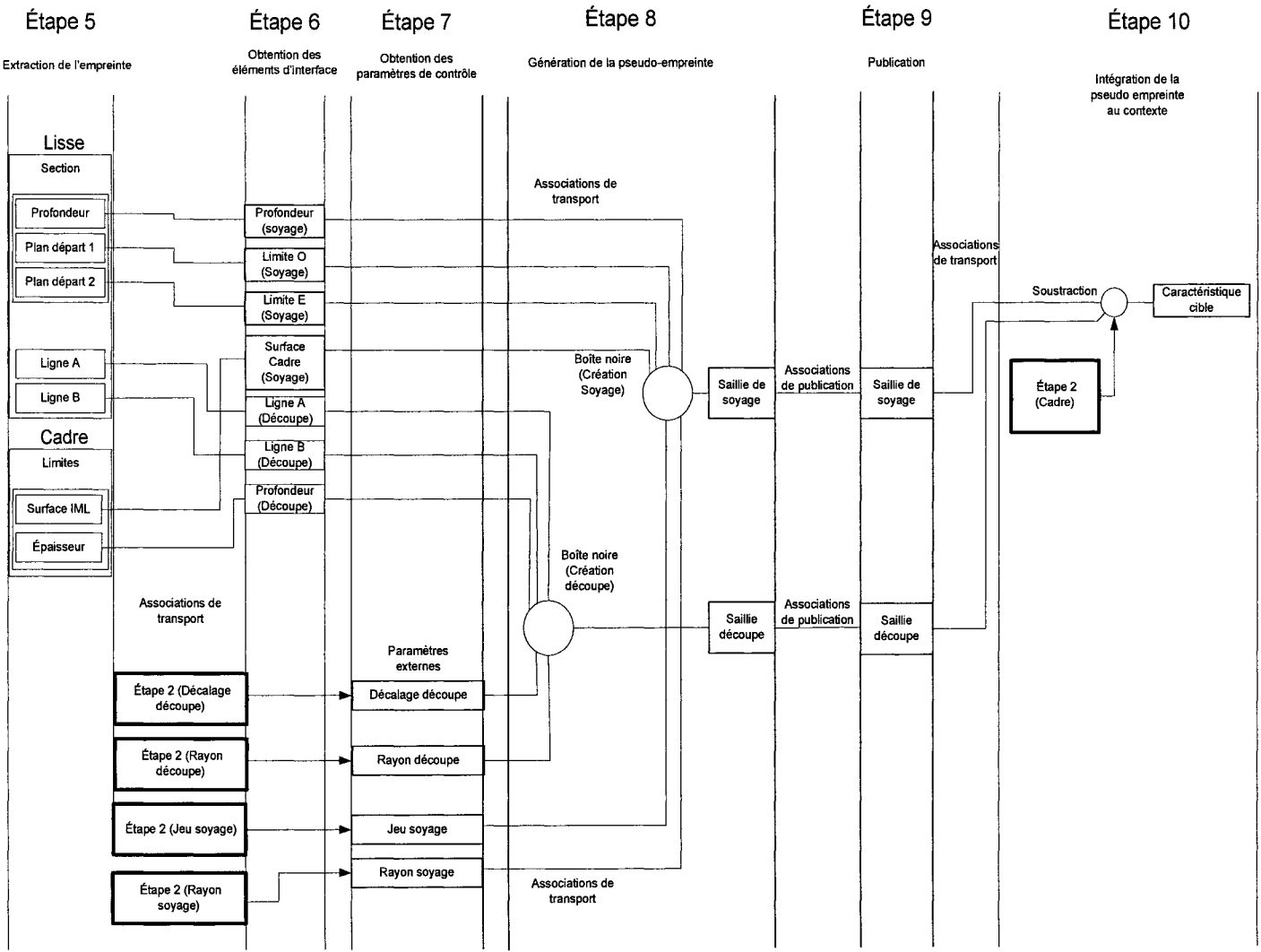


Figure 48 Exploitation de l'empreinte pour l'application de modélisation des soyages et des découpes

La Figure 49 contient une description du savoir-faire employé dans la génération des pseudo-empreintes de l'application pour la modélisation des soyages et des découpes. Ce savoir-faire est formalisé dans les deux boites noires.

Savoir-faire employé dans la génération des pseudo-empreintes de l'application pour la modélisation des soyages et des découpes

Soyage

- 1) Solide offset à partir de la surface IML (Inside Mode Line) du cadre S de l'épaisseur de la tête de la lisse E
- 2) Créer deux plans parallèles (PP1 et PP2) aux plans de départ (offset : $J(\text{jeu}) + R$)
- 3) Deux opérations splits sur le solide à partir de PP1 et PP2
- 4) Créer les arrondis sur le solide selon R

Découpe

- 1) Décalage des limites de l'âme de la lisse (ligne A et ligne B) selon D
- 2) Allonger les côtés A et B (limites du profil de découpe) vers le haut
- 3) Créer une ligne droite entre A et B (fermer le haut du contour)
- 4) Créer un demi-cercle selon R entre les côtés A et B (fermer le bas du contour)
- 5) Créer un solide par décalage selon P

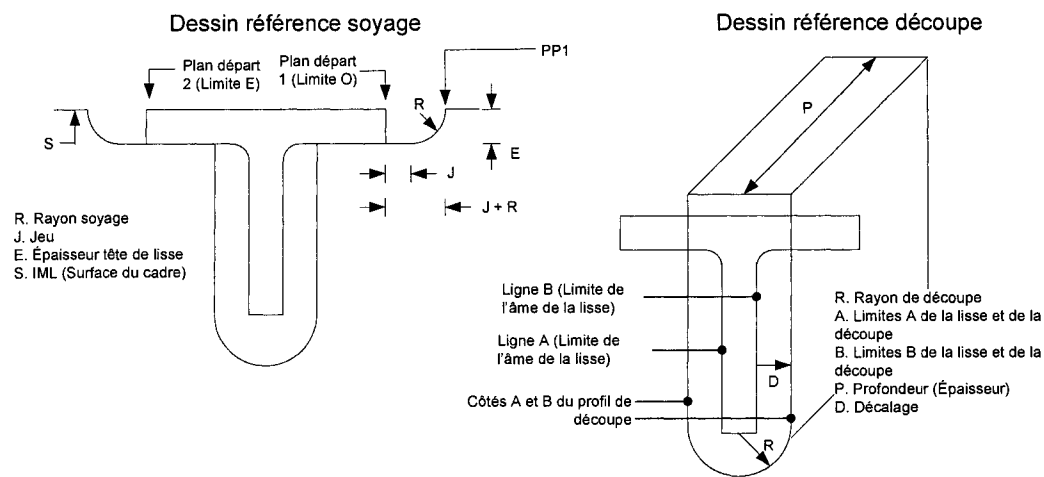


Figure 49 Savoir-faire employé dans la génération des pseudo-empreintes de l'application de modélisation des soyages et des découpes [2]

La Figure 50 et la Figure 51 illustrent en détail les regroupements logiques d'opérations qui correspondent à une décomposition des boîtes noires dont l'une est créatrice de la saillie de soyage et l'autre est créatrice de la saillie de découpe. De plus, les figures illustrent les intrants nécessaires au générateur de la pseudo-empreinte.

Globalement, la création du soyage (Figure 50) comprend les opérations suivantes. La première opération consiste en un décalage (Solide offset) à partir de la surface IML du cadre S de l'épaisseur de la tête de la lisse E. La deuxième opération consiste à créer deux plans parallèles (PP1 et PP2) aux plans de départ (offset : jeu + R). La troisième opération consiste à effectuer deux coupes (splits) sur le solide à partir de PP1 et PP2. Finalement, la cinquième étape consiste à créer les arrondis sur le solide selon R.

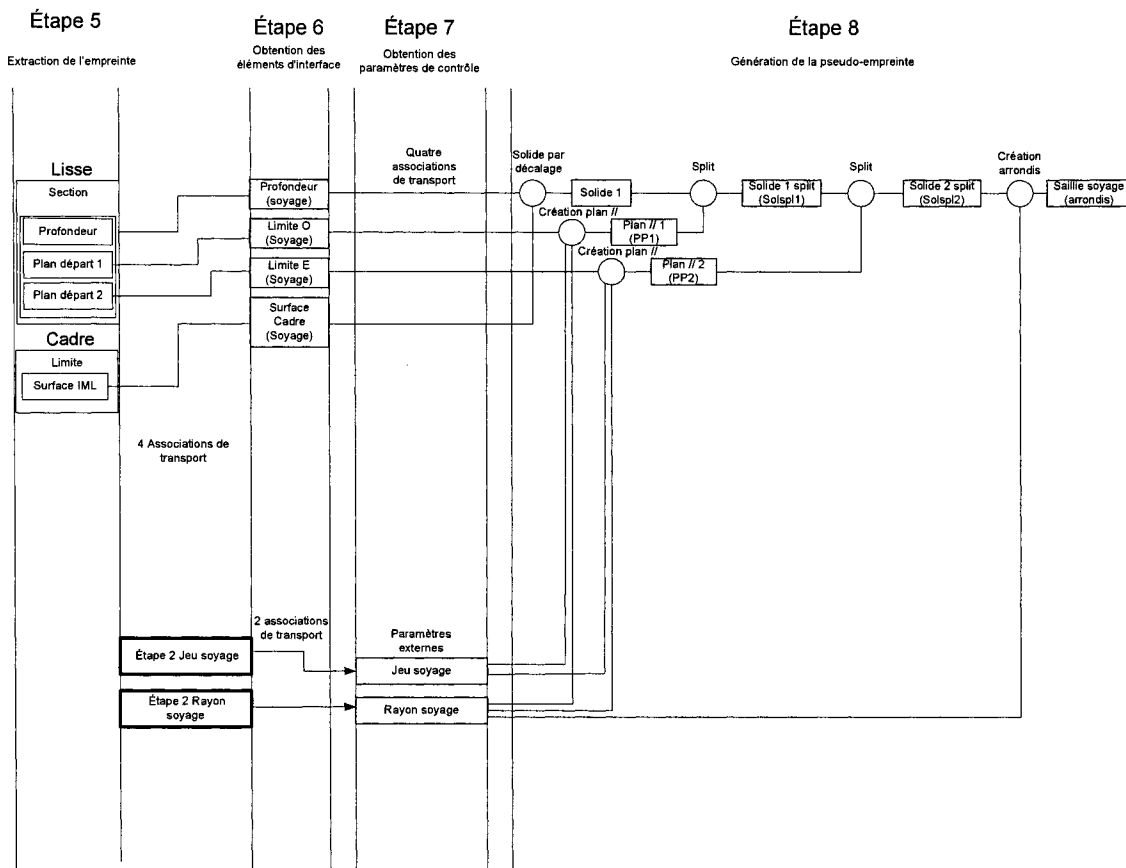


Figure 50 Description du générateur de pseudo-empreinte pour la création de la saillie de soyage

La création de la saillie de découpe (Figure 51), pour sa part, comprend les opérations suivantes. La première opération consiste en un décalage des lignes A et B (limites de l'âme de la lisse) selon D. Suite au décalage, les lignes A et B sont nommés côtés A et B dans l'étape 8. La deuxième opération consiste à allonger les côtés A et B vers le haut. La troisième opération consiste à créer une ligne droite entre les côtés A et B (fermer le haut du contour). La quatrième opération consiste à créer un demi-cercle entre les côtés A et B selon R (fermer le bas du contour). Finalement, la cinquième opération consiste à créer un solide par décalage selon P.

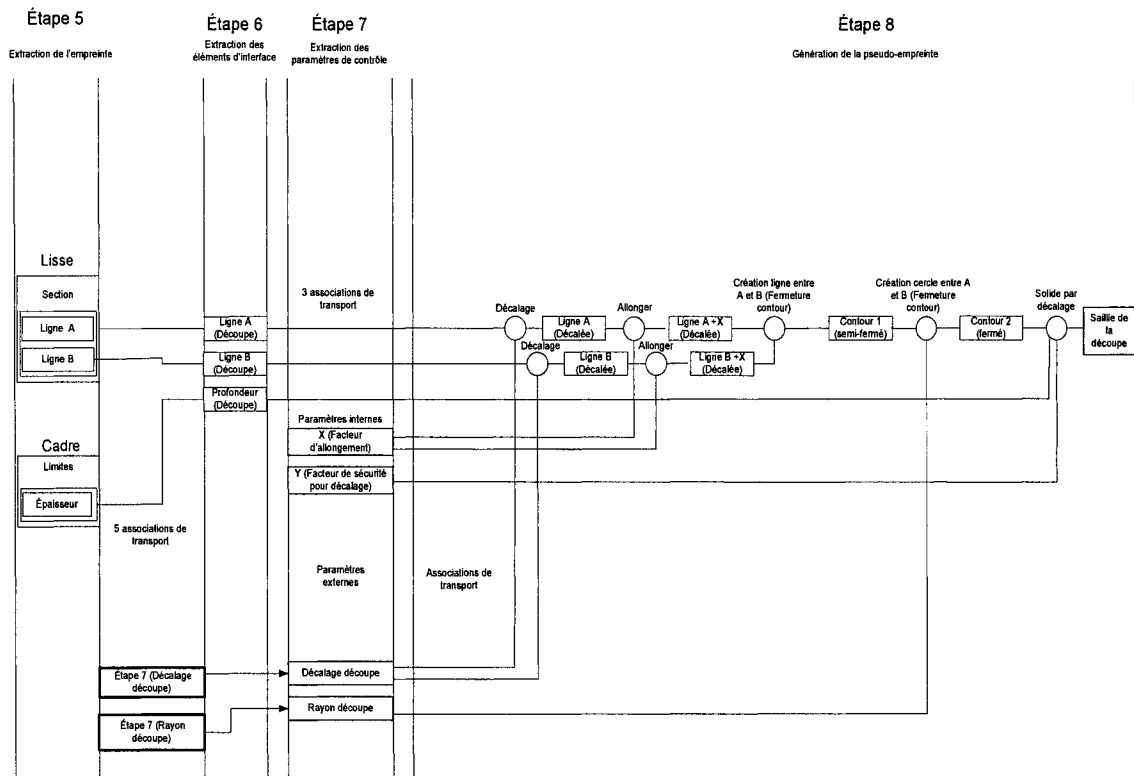


Figure 51 Description du générateur de pseudo-empire pour la création de la saillie de découpe

Finalement, les extrants du générateur de la pseudo-empire (la saillie de soyage et la saillie de découpe) sont publiés (étape 9) pour être accessibles au besoin. Ils sont utilisés à l'étape 10 pour créer la caractéristique cible. Celle-ci est produite grâce à la soustraction des deux saillies sur le cadre.

3.2.1.3 Remarques sur la transposition du modèle GAPOM à l'application de modélisation des soyages et des découpes

Cette section conclut sur le résultat obtenu de la transposition du modèle GAPOM à l'application de modélisation des soyages et des découpes.

Tout d'abord, il est intéressant de constater que pour l'étape 8, nommée génération de la pseudo-empreinte, les créations des deux saillies sont indépendantes l'une de l'autre. D'ailleurs, la Figure 45, qui porte sur l'abstraction au niveau des caractéristiques pour l'application de Giguère, exprime bien cette relation d'indépendance entre la création de la saillie de soyage et la saillie de découpe. Cette indépendance est clairement indiquée dans cette figure par les deux liens distincts. De plus, la Figure 48 présente la création des deux saillies comme étant deux boîtes noires indépendantes.

Un autre fait intéressant est que le savoir-faire de conception illustré à l'étape 8 (Figure 50 et Figure 51) est utilisé comme un plan de travail pour réaliser le cœur de l'application. Par exemple, il pourrait être le plan de travail pour réaliser un "user defined feature" sous le logiciel CATIA V5 (décrit au chapitre 1).

Le modèle GAPOM couvre l'ensemble de l'application développée par Giguère, incluant les portions réalisées en mode manuel et en mode automatique. En effet, l'application décrite par Giguère automatise les étapes 5 à 10 du modèle générique. Par contre, les quatre premières étapes du modèle doivent être effectuées manuellement par un usager.

Dans le cas où l'automatisation est partielle, les étapes de reconnaissance du contexte (étape 3) et de repérage des caractéristiques de référence (étape 4) sont effectuées manuellement. Dans le cas où l'automatisation est complète, il est nécessaire d'automatiser les étapes 3 et 4. Dans l'éventualité où les pièces sont typées, une simple analyse d'interférence pourrait détecter les situations où l'application doit être automatiquement invoquée pour éliminer les interférences entre les cadres et les lisses par création ou mise à jour des soyages et des découpes.

Finalement, le modèle GAPOM supporte bien les besoins mis en lumière par ce premier cas de validation.

3.2.2 Application pour la modélisation de poches d'allègement dans un panneau de revêtement de fuselage

Cette section présente la validation du modèle GAPOM à l'aide de l'application développée par Bruno Lamarche [59]. Celle-ci a pour objectif d'assister les concepteurs de structure dans la création de poches d'allègement dans les panneaux de revêtement de fuselage d'avion. Ces panneaux de revêtement comprennent des évidements, ou poches, destinés à alléger le poids de l'avion. La définition de chacune des poches d'allègement est régie par les positions respectives des cadres et des lisses. La définition de chacune des poches est donc dépendante du contexte dans lequel elle est produite (Figure 52).

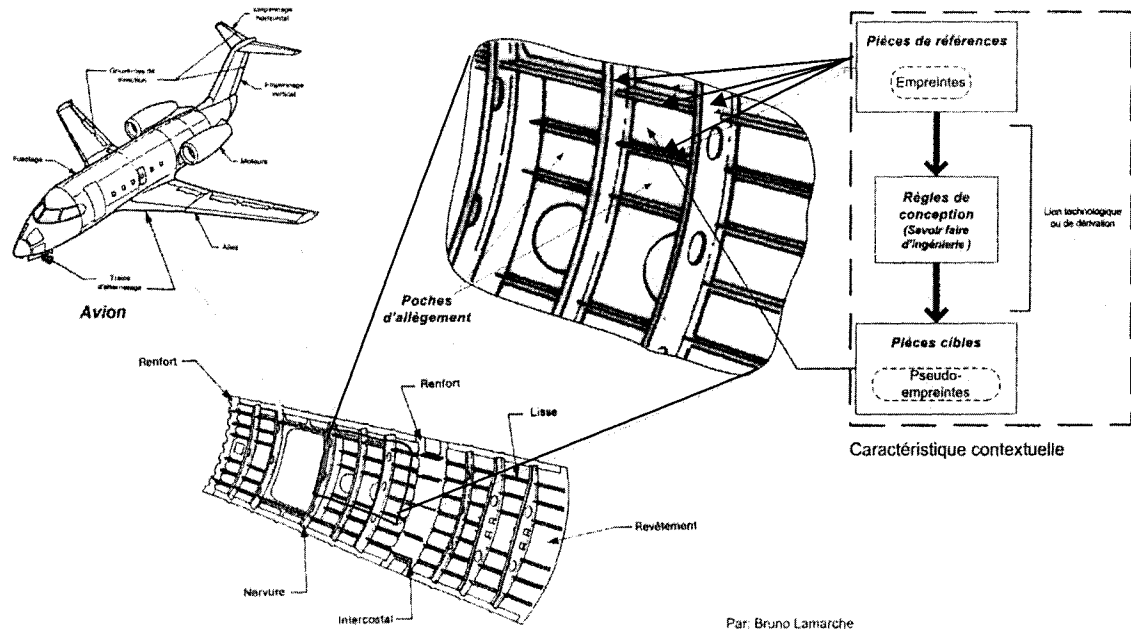


Figure 52 Application pour la modélisation des poches d'allègement par B. Lamarche [59]

L'application de Bruno Lamarche nous permet de tester, entre autres, la capacité du modèle GAPOM à accueillir une caractéristique contextuelle composée de plusieurs pièces de référence et d'une seule pièce cible. Les différents aspects du modèle générique se traduisent comme suit : niveau d'abstraction de la vue = une seule vue

(conception); niveau d'abstraction Document = 5 documents - 5 pièces ; niveau caractéristique = 6 intrants - 1 extrant. Ensuite le lien de dérivation est établi entre la pièce cible et les pièces de référence. Avec ce lien de dérivation, l'application procède à l'analyse des pièces de référence afin d'en extraire l'empreinte. Par la suite, la pseudo-empreinte est obtenue menant ainsi à la création de la poche d'allégement sur le panneau. Il est à noter que l'application pour la modélisation de poche d'allégement sert de cas d'application dans un mémoire qui sera déposé par Bruno Lamarche au printemps 2006.

3.2.2.1 Décomposition des niveaux d'abstraction (1ère phase)

La Figure 53, la Figure 54 et la Figure 56 présentent les trois niveaux d'abstraction pour l'application de Bruno Lamarche. Au premier niveau d'abstraction, on constate qu'il y a une seule vue qui se nomme vue de conception. Pour alléger la Figure 54 et la Figure 56 la représentation de cette vue y est omise.

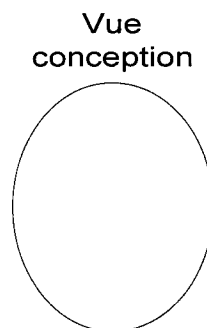


Figure 53 Abstraction au niveau des vues pour l'application de modélisation d'une poche d'allégement

La Figure 54 correspond au niveau d'abstraction des documents. Cette figure montre la composition du contexte (documents de référence : la lisse 1, la lisse 2, le cadre 1, le cadre 2 et le panneau de revêtement) ainsi que le document cible (panneau de revêtement). La Figure 55 illustre le dessin de référence du contour de la poche

d'allégement. Le contexte et le document cible sont reliés par un lien de définition d'une poche d'allégement.

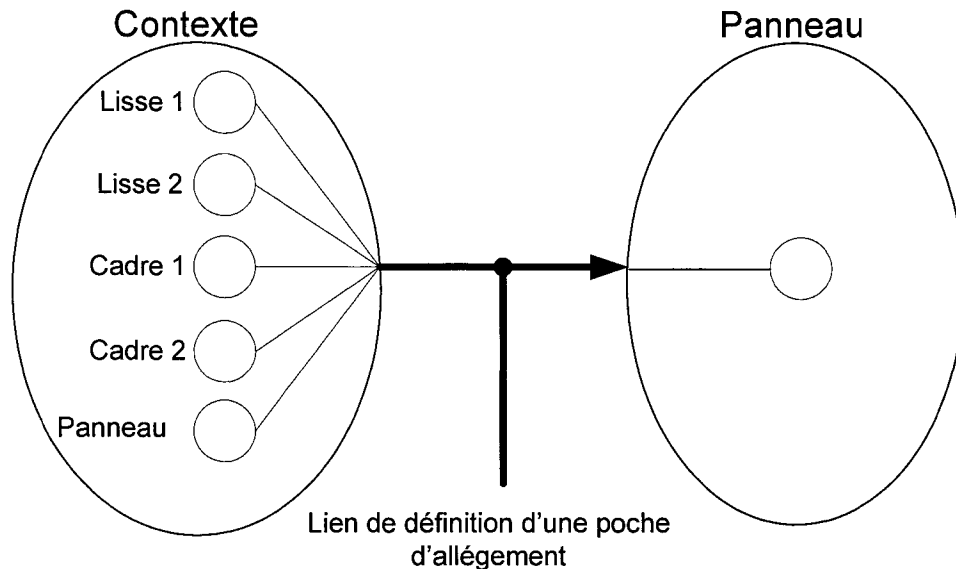


Figure 54 Abstraction au niveau des documents pour l'application de modélisation d'une poche d'allégement

Ensuite, on passe du niveau d'abstraction des documents au niveau des caractéristiques. Six caractéristiques de référence concourent à définir une seule caractéristique cible, la "poche" (Figure 55). Les limites des lisses et des cadres définissent une région du panneau où une poche doit être définie. La Figure 56 A) illustre un lien agrégé au niveau des associations (niveau B) qui relie le contexte à la pièce cible, discuté au chapitre 2. La Figure 56 B) illustre les liens entre les caractéristiques (décomposition maximale - niveau A) qui relient le contexte à la pièce cible. Ces caractéristiques proviennent des documents identifiés à la Figure 54. Quatre de ces caractéristiques sont externes au document cible : limite intérieure de la lisse 1, limite intérieure de la lisse 2, limite intérieure du cadre 1 et limite intérieure du cadre 2. Deux autres caractéristiques de référence proviennent de la pièce "panneau de revêtement" : les caractéristiques "OML" et "Épaisseur".

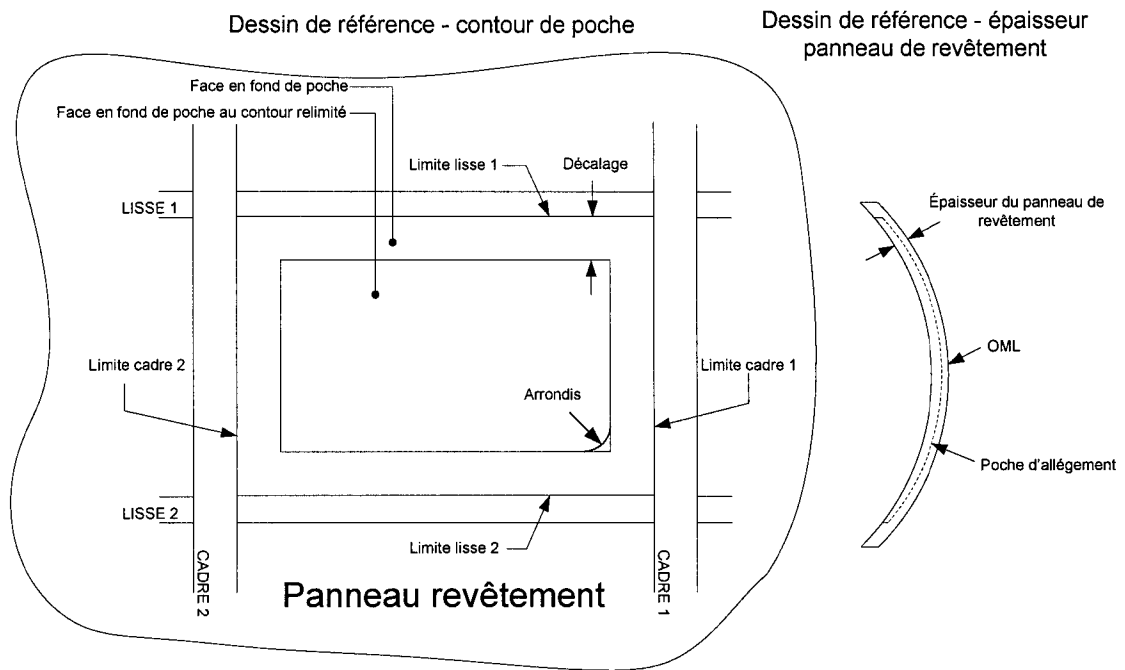


Figure 55 Dessin de référence – contour de la poche d'allègement

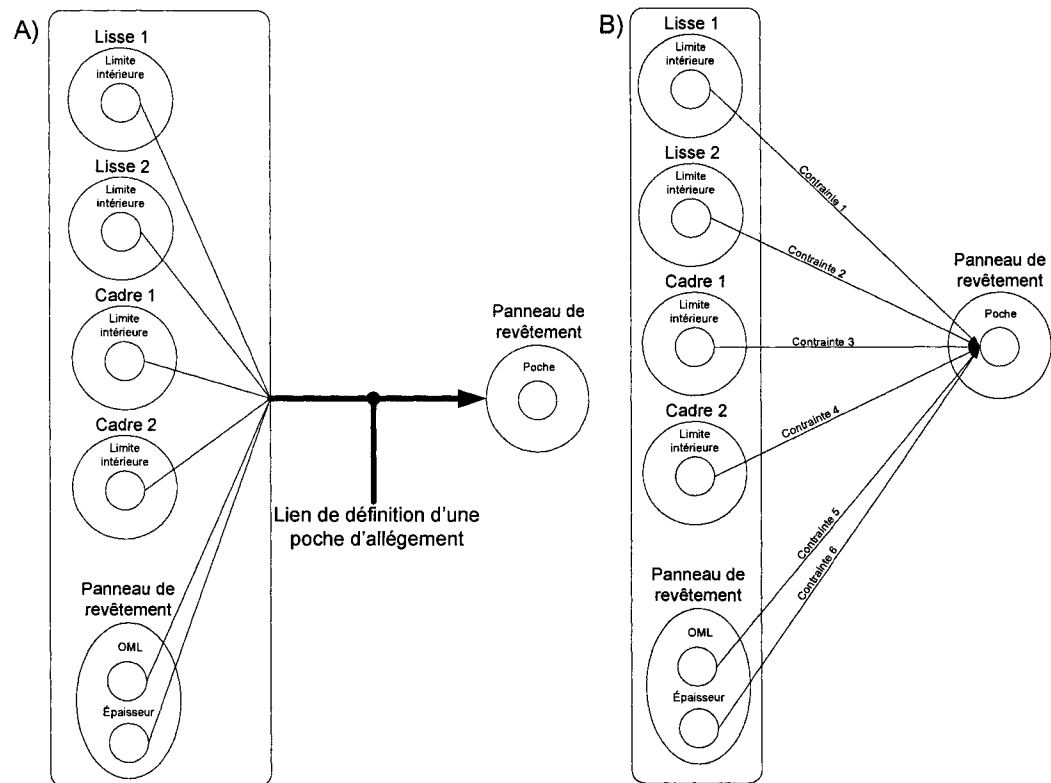


Figure 56 Abstraction au niveau des caractéristiques pour l'application de modélisation d'une poche d'allégement A) Lien (agrégation niveau B) B) contraintes (agrégation niveau A)

3.2.2.2 Étapes de construction de l'application (2ième phase)

Les dix étapes exprimant la phase deux du modèle GAPOM sont illustrées par des diagrammes. Pour chacune de ces étapes, une explication est donnée. La Figure 46 contient la signification des symboles utilisés dans les diagrammes.

La Figure 57 illustre les étapes 1 à 5 de l'application pour la modélisation d'une poche d'allégement dans un panneau de revêtement du fuselage. À l'étape 1, la nature de la caractéristique contextuelle à créer est déclarée "poche d'allégement".

Ensuite, à l'étape 2, on spécifie le contexte de la caractéristique qui comprend des aspects géométriques et des valeurs numériques à employer lors de l'application des règles de savoir-faire (tels que le décalage à appliquer aux limites lisse 1, lisse 2, cadre 1, cadre 2 et les arrondis, Figure 55), qui correspondront à des valeurs standards de l'entreprise ou à des valeurs indiquées par l'utilisateur.

À l'étape 3, les pièces impliquées (cadre 1, cadre 2, lisse 1, lisse 2 et panneau de revêtement) sont identifiées et elles sont typées afin de pouvoir être exploitées ultérieurement. Le typage s'effectue par l'écriture d'un attribut sur la pièce à cette étape, mais il aurait pu l'être antérieurement.

À l'étape 4, les caractéristiques de référence appartenant aux documents impliqués dans le contexte (document CAO, exemple : lisse 1, lisse 2, cadre 1, cadre 2 et panneau de revêtement) sont identifiées. Ces caractéristiques sont nécessaires pour déterminer ce qui composera l'empreinte. Chacun des documents contient une caractéristique limite intérieure. Les cinq associations entre l'étape 3 et l'étape 4 illustrent la décomposition des documents en caractéristiques. La connexion entre les deux phases du modèle GAPOM (*décomposition des niveaux d'abstraction et étapes de construction de l'application*) réside dans l'exploitation de la décomposition qui conduit au détail des intrants et des extrants du lien de la poche d'allégement. Ainsi les étapes 4, 5 et 6 sont basées sur l'information identifiée par les trois niveaux d'abstraction. Logiquement, les documents et les caractéristiques des étapes 4, 5 et 6 sont les mêmes que ceux identifiés dans les trois niveaux d'abstraction.

L'étape 5 a pour but d'extraire l'empreinte du contexte. Pour ce faire, les éléments géométriques qui composent l'empreinte sont extraits à partir d'un groupe de pièces de référence par l'intermédiaire des caractéristiques de référence. Pour cette application, les éléments géométriques qui sont extraits des documents lisses 1, 2 et des documents cadres 1, 2 sont les plans 1, 2, 3 et 4. Pour le document panneau de revêtement,

l'élément géométrique qui le compose est OML. Les associations entre l'étape 4 et l'étape 5 illustrent la décomposition des caractéristiques en éléments géométriques.

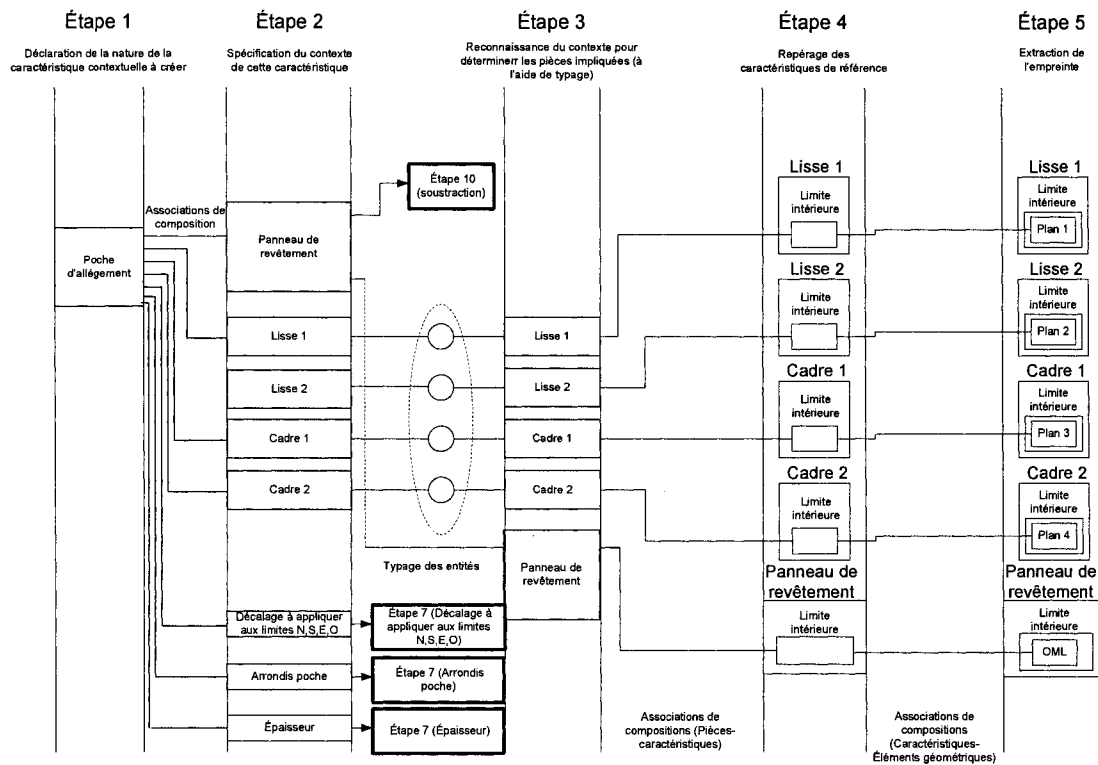


Figure 57 Identification de l'application et récupération des intrants pour la modélisation de poche d'allègement dans le panneau de revêtement du fuselage

La Figure 58 illustre les étapes 5 à 10 de l'application de modélisation d'une poche d'allègement dans le panneau de revêtement du fuselage. Aux étapes 6 et 7, les intrants nécessaires à la réalisation de la pseudo-empreinte sont déterminés. À l'étape 6, les éléments d'interface permettant de connecter l'empreinte à la pseudo-empreinte sont extraits. Pour cette application les éléments d'interface sont : limite N, limite S, limite E et limite O (Figure 59).

À l'étape 7, les valeurs des paramètres de contrôle sont déterminées pour que la pseudo-empainte puisse être construite. Pour cette application les paramètres externes sont : épaisseur panneau de revêtement, décalage à appliquer aux limites N, S, E, O et arrondis poche. Il y a aussi deux paramètres internes qui sont profondeur de la poche (1/3) et épaisseur de la saillie. Les paramètres internes correspondent à un savoir-faire stocké dans l'application. Le créateur de l'application aurait pu choisir d'externaliser ces paramètres.

Ensuite, les intrants déterminés aux étapes 6 et 7 sont connectés au générateur de la pseudo-empainte (étape 8) qui est, à cette étape de nos explications, composé d'une boîte noire pour la création de la saillie de la poche.

Finalement, l'extrait du générateur de la pseudo-empainte (la saillie de la poche) est publié (étape 9) pour être accessible au besoin par une autre application. Elle est utilisée à l'étape 10 pour créer la caractéristique cible. Celle-ci est produite grâce à la soustraction de la saillie du panneau de revêtement.

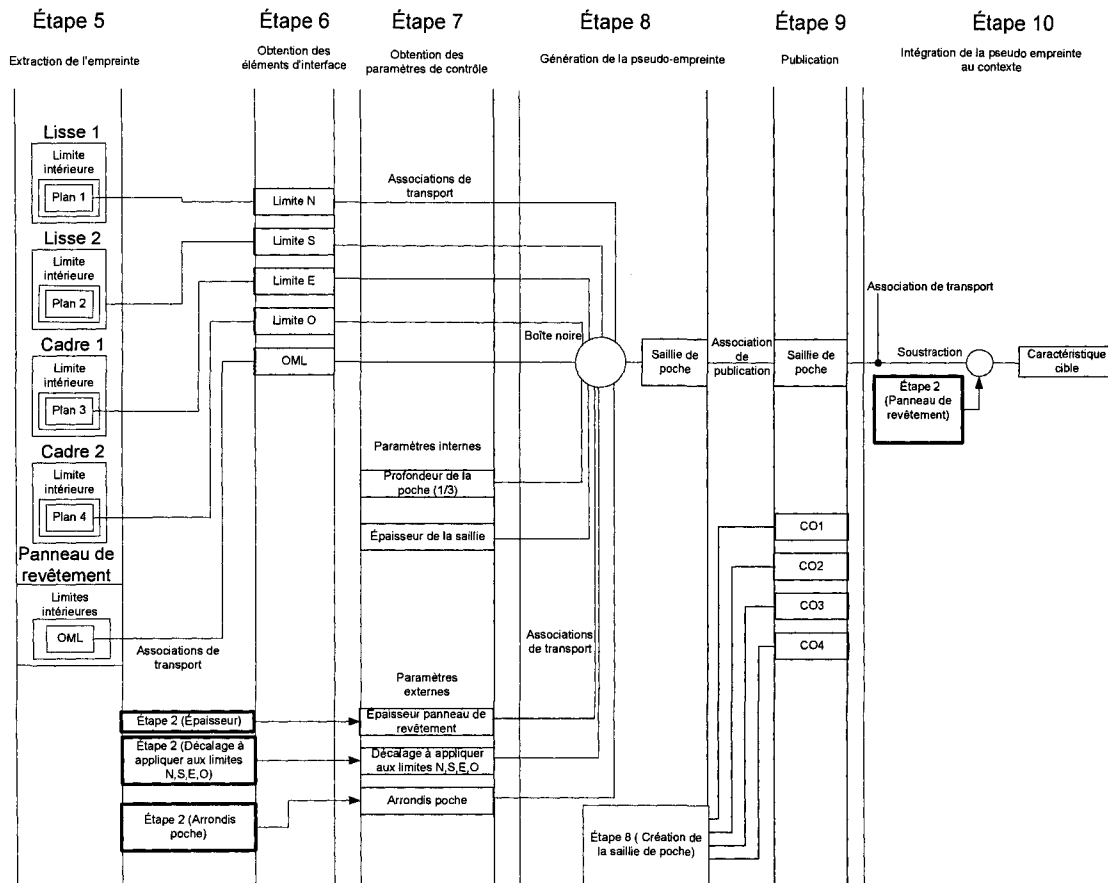


Figure 58 Exploitation de l'empreinte pour l'application de modélisation d'une poche d'allégement dans le panneau de revêtement du fuselage

La Figure 59 contient une description du savoir-faire employé dans la génération de la pseudo-empreinte de l'application pour la modélisation de poches d'allégement dans le panneau de revêtement du fuselage. Ce savoir-faire est formalisé en un regroupement logique d'étapes (Figure 60) qui correspondent à une décomposition de la boîte noire.

Description littéraire de l'étape 8 (Génération de la pseudo-empreinte)

- 1) Créer une face (face en fond de poche) à partir de l'OML selon un décalage égal à $1/3$ de l'épaisseur du panneau de revêtement.
- 2) Projeter les limites N,S,E,O sur l'OML (création de CI1 à CI4)
- 3) Décalage de CI1 à CI4 vers l'intérieur selon la valeur d'offset VO1-décalage à appliquer aux limites N,S,E,O (création de CO1 à CO4)
- 4) Création d'une face (Face en fond de poche au contour relimité) à partir de CO1 à CO4
- 5) Créer un solide par décalage selon l'offset VO3
- 6) Créer les arrondis sur le solide selon VR1

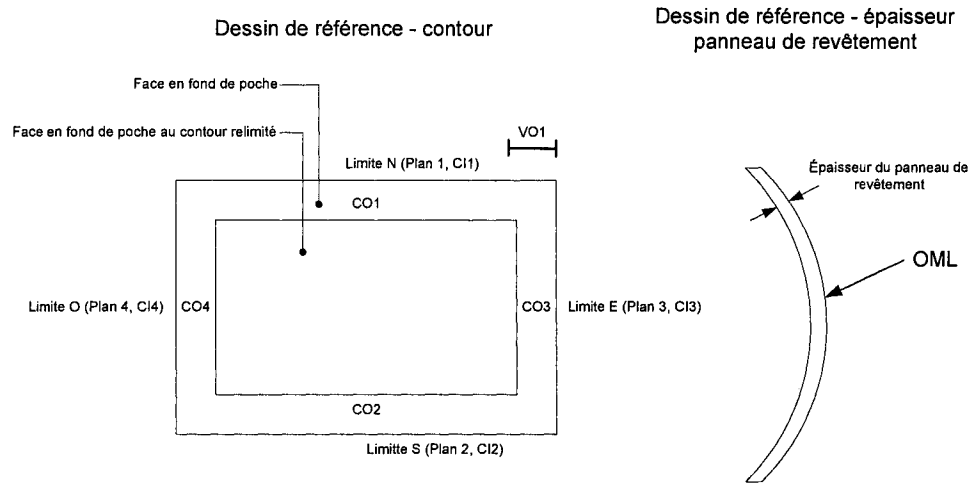


Figure 59 Savoir-faire employé dans la génération de la pseudo-empreinte pour l'application de modélisation de poche d'allégement

La Figure 60 illustre la logique contenue dans la boîte noire créatrice de la saillie de poche (étape 8). Globalement, la création de la poche comprend les six opérations suivantes. La première opération consiste à créer une face (face en fond de poche) à partir de l'OML selon un décalage égal à $1/3$ de l'épaisseur du panneau de revêtement. Cette valeur de $1/3$ est un paramètre relevant du savoir-faire de conception. La deuxième opération consiste à projeter les limites N,S,E,O (plans limites extraits des documents de références cadre 1, cadre 2, lisse 1 et lisse 2) sur l'OML (création de CI1 à CI4). La troisième opération consiste à décaler CI1 à CI4 vers l'intérieur selon la valeur d'offset VO1-décalage à appliquer aux limites N,S,E,O (création de CO1 à CO4). La quatrième opération consiste à créer une face (Face en fond de poche au contour relimité) à partir

de CO1 à CO4. La cinquième opération consiste à créer un solide par décalage selon l'offset VO3. Finalement, la sixième opération consiste à créer les arrondis sur le solide selon VR1.

Un fait à noter est que les quatre éléments CO1 à CO4 sont publiés pour être utilisés ultérieurement par l'application de création de l'outillage (gabarit de découpe en vue de l'usinage chimique, de Michel Michaud) discutée plus loin.

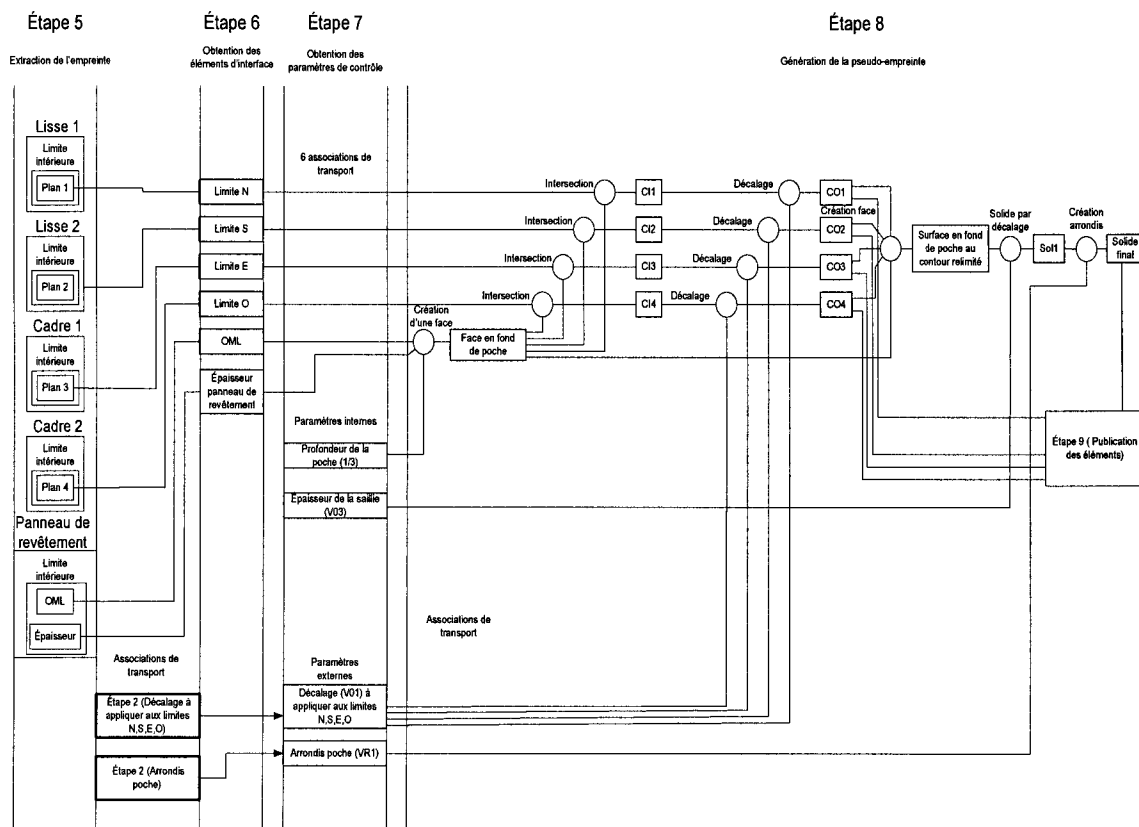


Figure 60 Description du générateur de pseudo-empainte pour la création de la saillie de poche

3.2.2.3 Remarques sur la transposition du modèle GAPOM à l'application de modélisation de poche d'allègement dans le panneau de revêtement du fuselage

Cette section conclut sur le résultat obtenu de la transposition du modèle GAPOM à l'application de modélisation de poche d'allègement dans le panneau de revêtement du fuselage.

Ce cas permet notamment de valider la capacité du modèle générique à accueillir une caractéristique contextuelle composée de plusieurs pièces et caractéristiques de référence et d'une pièce et caractéristique cible. Ainsi, la Figure 54 illustre qu'il est nécessaire de faire interagir cinq pièces pour la construction de la poche d'allègement sur le panneau de revêtement. À la Figure 56, on constate qu'il y a six caractéristiques de référence et une caractéristique cible. On y remarque que la pièce Panneau de revêtement possède trois caractéristiques concernées par cette application (deux références et une cible).

Le modèle GAPOM traite les différentes pièces de référence comme des intrants qui fournissent des données au générateur de pseudo-empreinte. Un autre aspect intéressant à noter, à l'étape 9, nommée publication, est que le modèle publie les éléments nécessaires à court et moyen terme. Pour cette application, la saillie de poche est utilisée à court terme (étape 10) pour réaliser la caractéristique cible. À moyen terme, les quatre éléments CO1 à CO4 sont utilisés comme intrants pour l'application de Michel Michaud, décrite ci-dessous.

Un dernier fait à noter est qu'il est possible d'automatiser les étapes 1 et 2 en typant au préalable les pièces de l'assemblage. Dans ce cas, l'application peut être réutilisée à multiples reprises pour créer toutes les poches en automatiques (c'est d'ailleurs ce que fait le prototype de Bruno Lamarche). Il est aussi pertinent d'indiquer que le modèle GAPOM proposé permet de décrire le fonctionnement du prototype proposé sous V5 par Bruno Lamarche. En effet, à l'analyse de l'application de modélisation de poche d'allègement dans un panneau de revêtement du fuselage, on voit que le modèle

GAPOM proposé s'applique adéquatement à la conception d'applications sous CATIA V5.

3.2.3 Application pour la modélisation du gabarit de découpe pour les poches d'allégement d'un panneau de revêtement de fuselage

Cette section présente la validation du modèle GAPOM à l'aide de l'application développée par Michel Michaud [3] en 2003 et 2004. Celle-ci a pour objectif d'assister les concepteurs d'outillage dans la modélisation du gabarit de découpe employé dans la fabrication des poches d'allégement de panneaux de revêtement de fuselage. Le rôle de cette application est de démontrer qu'une préparation adéquate des modèles de pièces à l'aide d'une méthodologie tirant partie de l'approche métier, du typage des entités et des liens technologiques permet un gain de temps appréciable lors de la propagation des modifications depuis la pièce jusqu'à l'outillage associé [3]. La Figure 61 illustre la propagation d'un changement à partir d'une pièce de référence vers son outillage associé. Le gabarit de découpe est utilisé dans le processus de fabrication des tôles de revêtement. Les grandes étapes du processus sont : la pièce est formée; la pièce est trempée dans un bain de gomme (pour protéger des attaques chimiques); pour fabriquer la pièce, on veut enlever la gomme où il y a l'opération chimique; le gabarit de découpe est utilisé par l'opérateur pour enlever la gomme. De plus, cette même figure illustre l'association procédurale décrite au chapitre 2. Le fait que la procédure de création de l'outillage à partir de la pièce soit automatisée rend inutile le recours à une association de transposition.

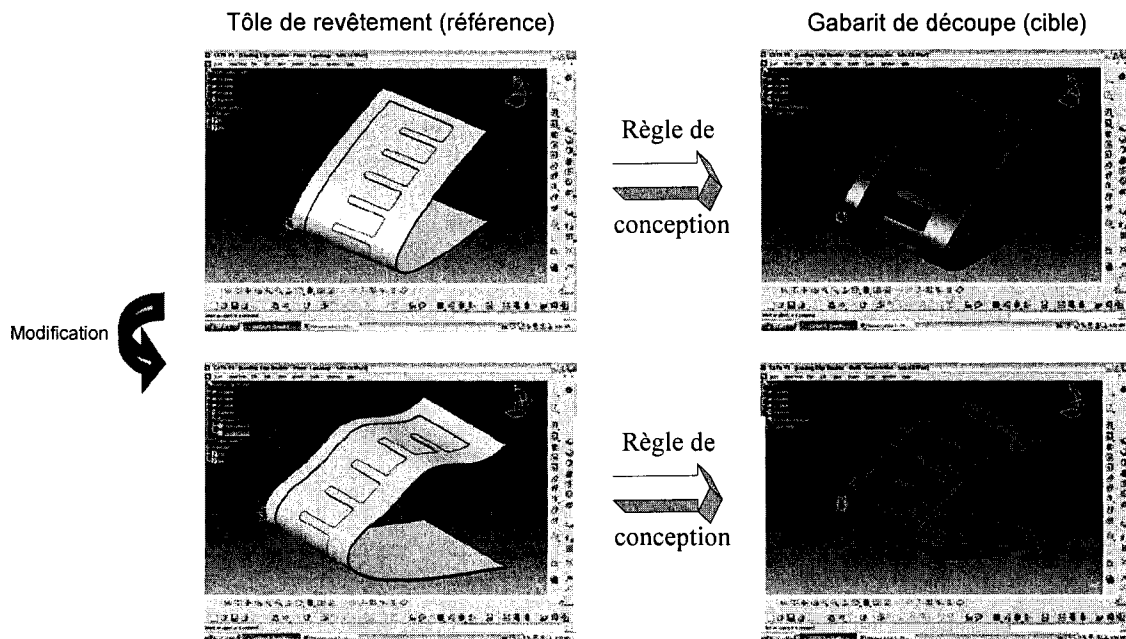


Figure 61 Exemple de pièce et de gabarit de découpe [3]

L'application de Michaud [3] est utilisée ici comme un troisième cas nous permettant de valider le modèle proposé. Il permet notamment d'appliquer le modèle GAPOM à une caractéristique contextuelle composée de pièces provenant de domaines différents (conception et méthode). Les différents aspects du modèle générique se traduisent comme suit : niveau d'abstraction de la vue = deux vues (conception et méthode); niveau d'abstraction Document = 2 documents - 2 pièces ; niveau caractéristique = 2 input - 1 output. La reconnaissance contextuelle et le typage des pièces sont effectués. Ensuite le lien de dérivation est établi entre le document cible et le document de référence. Avec ce lien de dérivation, l'application procède à l'analyse de la pièce de référence afin d'en extraire la caractéristique de référence. Par la suite, la pseudo-empreinte est créée et la saillie formée est soustraite du gabarit de découpe.

3.2.3.1 Décomposition des niveaux d'abstraction (1ère phase)

La Figure 62, la Figure 63 et la Figure 64 présentent les trois niveaux d'abstraction pour l'application de Michel Michaud [3]. Au premier niveau d'abstraction, contrairement aux deux applications précédentes, on constate qu'il y a deux vues, qui se nomment vue de conception et vue méthodes.

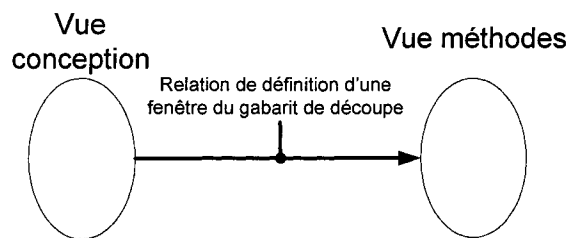


Figure 62 Abstraction au niveau des vues pour l'application de modélisation du gabarit de découpe

Le niveau d'abstraction de la vue est ensuite décomposé pour passer au niveau d'abstraction des documents. Ainsi, à la Figure 63, on remarque que le panneau de revêtement est le document de référence et le gabarit de découpe, le document cible.

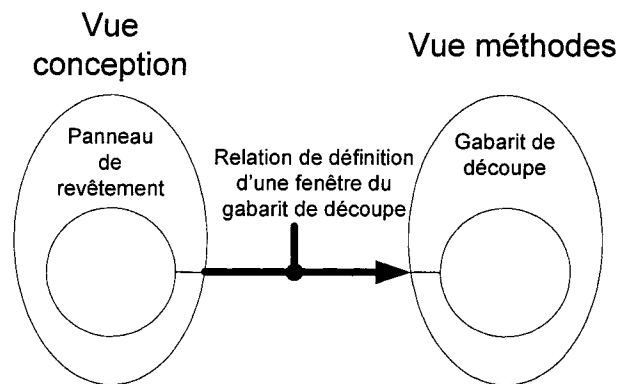


Figure 63 Abstraction au niveau des documents pour l'application de modélisation du gabarit de découpe

Ensuite, l'on décompose le niveau d'abstraction du document pour passer au niveau des caractéristiques. À la Figure 64, on constate qu'il y a trois caractéristiques; elles se nomment caractéristique de poche usinée chimiquement, caractéristique de fenêtre de découpe et caractéristique épaisseur. La caractéristique cible est la caractéristique de fenêtre de découpe. Les deux autres sont des caractéristiques de référence. Ainsi la vue méthodes possède une caractéristique cible et une caractéristique de référence. Le lien de définition d'une fenêtre de découpe se décompose en un certain nombre de contraintes. Certaines sont établies entre la *poche d'allègement* et la *fenêtre de découpe*. Une autre est établie entre *l'épaisseur* et la *fenêtre de découpe*.

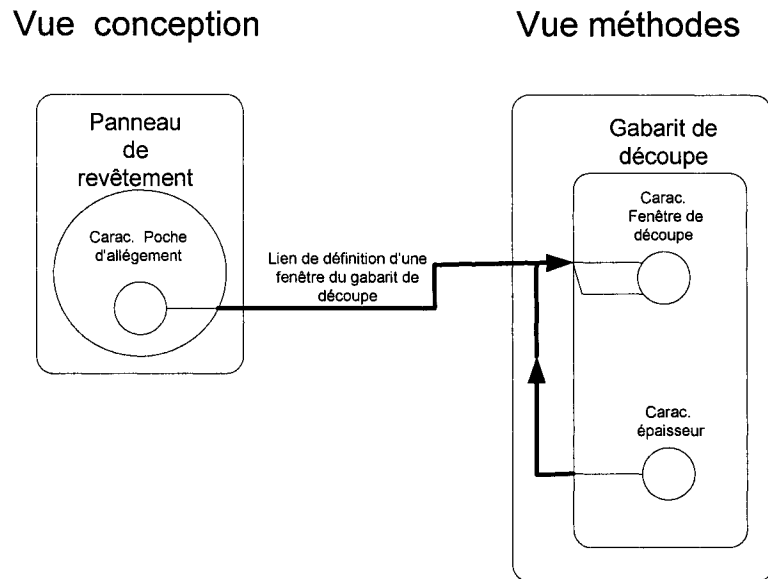


Figure 64 Abstraction au niveau des caractéristiques pour l'application de modélisation du gabarit de découpe

3.2.3.2 Étapes de construction de l'application (2ième phase)

La Figure 65 illustre les étapes 1 à 5 de l'application de modélisation du gabarit de découpe pour la création des poches d'allègement dans le panneau de revêtement de fuselage. À l'étape 1, la nature de la caractéristique contextuelle à créer est déclarée "gabarit de découpe". Ici, on doit sous-entendre que l'application et le modèle générique ne couvre pas le gabarit en entier mais seulement la création d'une fenêtre de découpe.

Ensuite, à l'étape 2, on spécifie le contexte de la caractéristique qui comprend des aspects géométriques (le panneau de revêtement et le gabarit de découpe sans fenêtres), et des valeurs numériques à employer lors de l'application des règles de savoir-faire (tels que l'épaisseur du gabarit), le décalage à appliquer aux limites N, S, E et O (Figure 67), le rayon des coins des ouvertures, qui correspondent à des valeurs standard ou à des valeurs indiquées par l'utilisateur.

À l'étape 3, la pièce impliquée (panneau de revêtement) est identifiée et elle est typée afin de pouvoir être exploitée ultérieurement. Le typage s'effectue ici manuellement par l'écriture de nouveaux paramètres sur la pièce.

À l'étape 4, les caractéristiques de références appartenant aux documents impliqués dans le contexte (panneau de revêtement et gabarit de découpe) sont identifiées. Ces caractéristiques sont nécessaires pour déterminer ce qui composera l'empreinte. Pour le document Gabarit de découpe, la caractéristique est l'épaisseur du gabarit. Les deux associations entre l'étape 3 et l'étape 4 illustrent la décomposition des documents en caractéristiques. La phase 1 du modèle GAPOM permet ici encore d'alimenter la phase 2 en fournissant le détail des intrants et des extrants de la définition d'une fenêtre du gabarit de découpe. Ainsi les étapes 4, 5 et 6 sont basées sur l'information identifiée par les trois niveaux d'abstraction.

L'étape 5 a pour but d'extraire l'empreinte du contexte. Pour ce faire, les éléments géométriques qui composent l'empreinte sont extraits à partir d'un groupe de pièces de référence par l'intermédiaire des caractéristiques de référence. Pour cette application, les éléments géométriques qui composent le document panneau de revêtement sont C01, C02, C03, C04 (limites de la poche) et IML (Inside mold line). Pour le gabarit de découpe, le composant géométrique qui le compose est l'épaisseur du gabarit. Les six associations entre l'étape 4 et l'étape 5 illustrent la décomposition des caractéristiques en éléments géométriques.

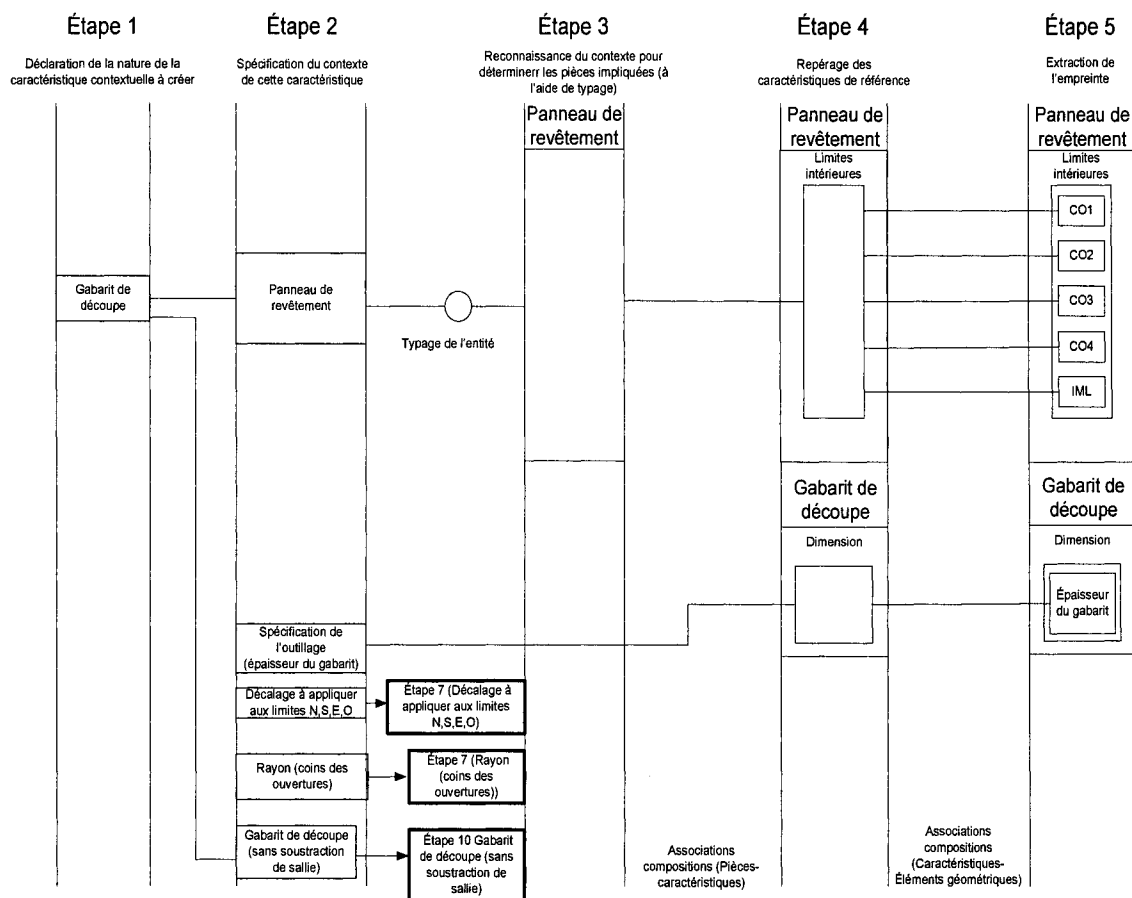


Figure 65 Identification de l'application et récupération des intrants pour la modélisation d'une fenêtre du gabarit de découpe

La Figure 66 illustre les étapes 5 à 10 de l'application de modélisation d'une fenêtre du gabarit de découpe. Aux étapes 6 et 7 les intrants nécessaires à la réalisation de la pseudo-empreinte sont déterminés. À l'étape 6, les éléments d'interface permettant de connecter l'empreinte à la pseudo-empreinte sont extraits. Pour cette application les éléments d'interface sont : limite N, limite S, limite E, limite O, IML et épaisseur gabarit.

À l'étape 7, les valeurs des paramètres de contrôle sont déterminées pour que la pseudo-empreinte puisse être construite. Pour cette application les paramètres externes sont : décalage à appliquer aux limites N, S, E, O et rayon (coins des ouvertures).

Ensuite, les intrants déterminés aux étapes 6 et 7 sont connectés au générateur de la pseudo-empreinte (étape 8) qui est, à cette étape de nos explications, composé d'une boîte noire pour la création de la saillie de découpe.

Finalement, l'extrait du générateur de la pseudo-empreinte (la saillie de découpe) est publié (étape 9). Elle est utilisée à l'étape 10 pour créer la caractéristique cible. Celle-ci est produite grâce à la soustraction de la saillie du gabarit de découpe.

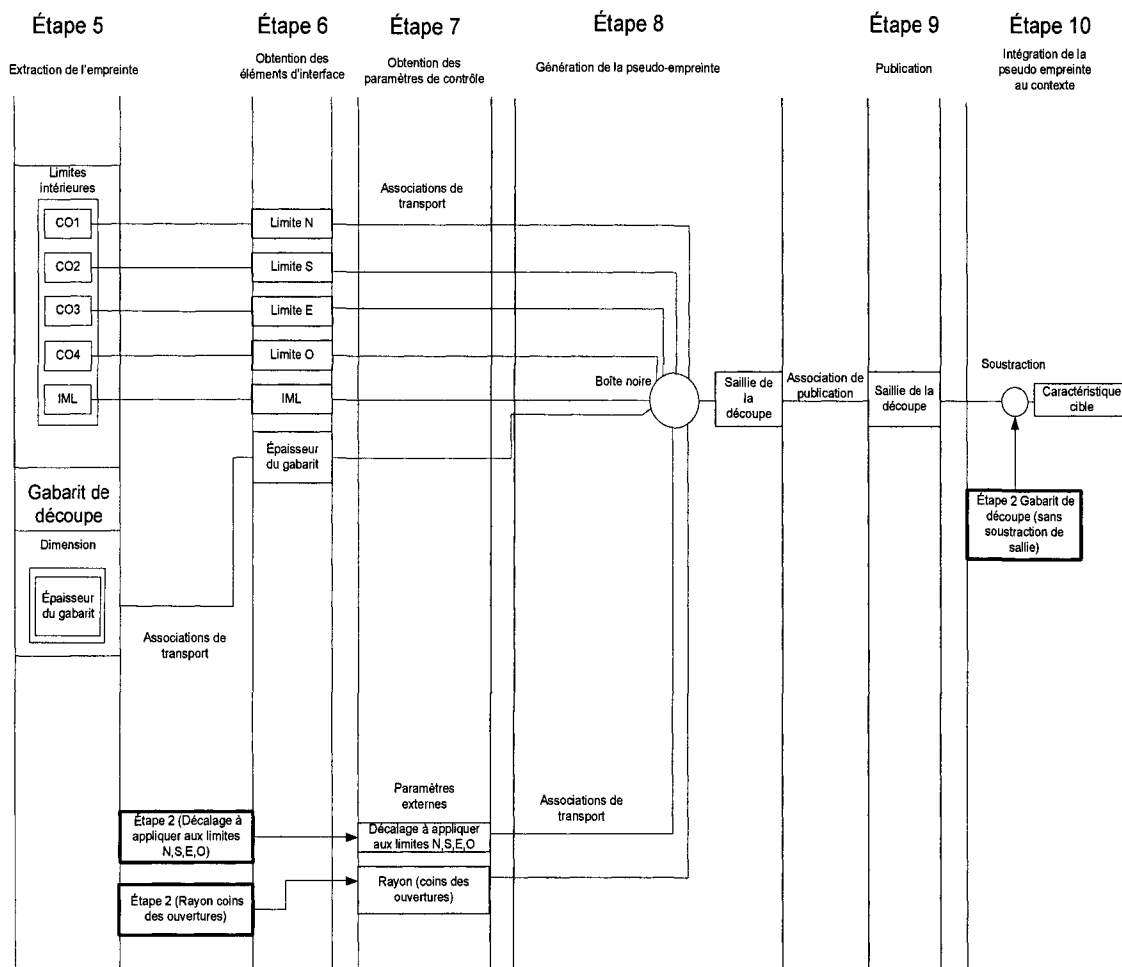


Figure 66 Exploitation de l'empreinte pour la modélisation d'une fenêtre du gabarit de découpe

La Figure 67 contient une description du savoir-faire employé dans la génération de la pseudo-empreinte de l'application de modélisation des fenêtres du gabarit de découpe. Ce savoir-faire est exprimé en un regroupement logique d'étapes (Figure 68) qui correspondent à une décomposition de la boîte noire.

Description littéraire de l'étape 8 (Génération de la pseudo-empreinte)

- 1) Projeter les limites N,S,E,O sur IML (création de CP1 à CP4)
- 2) Offset de CP1 à CP4 vers l'intérieur selon la valeur d'offset VO (création de CPO1 à CPO4)
- 3) Créer les arrondis selon R (Voir étapes détaillées de création des arrondis)
- 4) Créer un solide par décalage selon l'épaisseur du gabarit

Étapes détaillées de création des arrondis

- 3.1) Création de CC1
- 3.2) Création de CC2
- 3.3) Break de CPO4
- 3.4) Création de CC3
- 3.5) Création de CC4

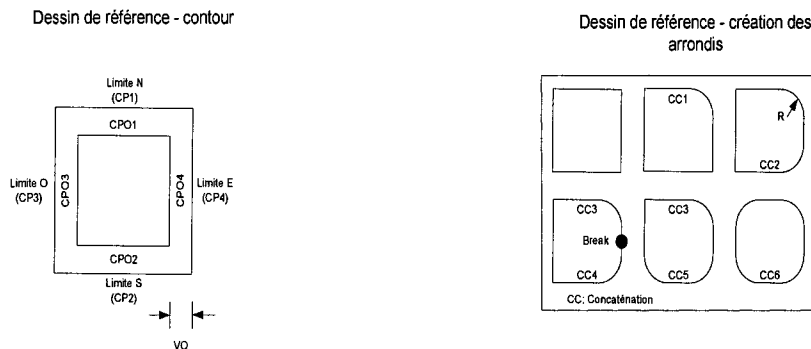


Figure 67 Savoir-faire employé dans la génération de la pseudo-empreinte de l'application de modélisation de fenêtres du gabarit de découpe [3]

La Figure 68 illustre le contenu de la boîte noire créatrice de la saillie de découpe (étape 8). Globalement, la création de la poche comprend quatre opérations. La première opération consiste en une intersection des limites N, S, E, O avec l'IML (création de CP1 à CP4). La deuxième opération consiste en un décalage (offset) de CP1 à CP4 vers l'intérieur selon la valeur VO (création de CPO1 à CPO4). La troisième opération consiste à créer les arrondis selon R. Finalement, la quatrième opération consiste à créer un solide par décalage selon l'épaisseur du gabarit.

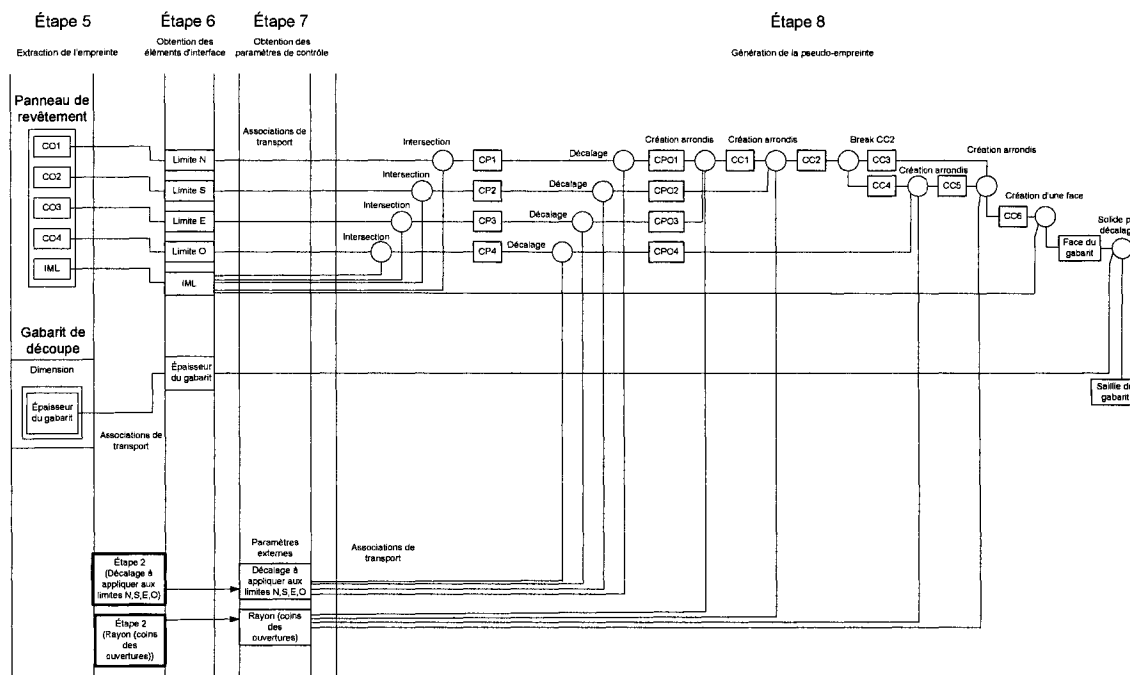


Figure 68 Description du générateur de pseudo-empreinte pour la création de la saillie de découpe

3.2.3.3 Remarques sur la transposition du modèle GAPOM à l'application de modélisation du gabarit de découpe

Cette section conclut sur le résultat obtenu de la transposition du modèle GAPOM à l'application de modélisation du gabarit de découpe.

Ce cas permet notamment de valider la capacité du modèle générique à accueillir une caractéristique contextuelle composée de pièces et de caractéristiques appartenant à des domaines différents. La Figure 62 illustre bien cette situation qui se compose d'une vue de conception et d'une vue méthodes.

Le fait que cette application fasse intervenir des documents appartenant à des domaines différents est supporté adéquatement par le modèle proposé. Ils sont traités comme des intrants ayant des sources différentes.

Un autre aspect à noter est que cette application utilise des éléments publiés par une autre application. Les quatre éléments CO1 à CO4 et l'IML ont été publiés par l'application pour la modélisation de poche d'allégement pour être utilisés ultérieurement par l'application de création de l'outillage (gabarit de découpe en vue de l'usinage chimique, de Michaud [3]).

Un dernier point à noter est que le lien contenu dans cette application concerne la création d'une fenêtre (ouverture) dans l'outillage. Cependant, au niveau d'abstraction des vues, ce qui devrait intéresser un cas pratique n'est pas une fenêtre, mais n fenêtres nécessaires à un outil. La notion de n fenêtres n'a pas été prise en compte dans le modèle. Toutefois, puisque la transposition du modèle GAPOM sur une application qui crée une fenêtre a été réalisable, on peut envisager que la transposition du modèle GAPOM sur une application qui crée plusieurs fenêtres sera réalisable.

3.3 Synthèse globale sur le modèle GAPOM

Le modèle GAPOM proposé permet d'organiser d'une manière systématique la planification, la mise en œuvre et l'exploitation d'applications orientées métiers basées sur l'utilisation de liens, grâce à la terminologie et aux concepts proposés au chapitre 2.

La discussion qui suit propose de faire une correspondance entre les concepts amenés au chapitre 2 et ceux qui sont soutenus dans le modèle générique GAPOM. Cette discussion prend toute son importance par le fait que, bien que le modèle exploite la riche variété des caractéristiques d'associations décrites au chapitre 2, les concepts sont difficilement identifiables car ils sont implicites dans le modèle.

Un des premiers aspect abordés au chapitre 2 concerne la terminologie des termes suivants : relations, liens et contraintes. Pour le modèle générique, les termes association, relation, lien et contrainte sont utilisés pour décrire la décomposition des niveaux d'abstractions. Comme il est stipulé au chapitre 2, ces termes se distinguent en

fonction du niveau d'abstraction et du niveau de savoir-faire capturé. Au niveau des vues, qui est le niveau le plus abstrait, le terme association est le plus adéquat. Au niveau des documents le terme relation est choisi car à ce niveau, il y a une relation qui établit une dépendance abstraite entre deux documents sans faire intervenir un savoir-faire précis ou formalisé. Ensuite, au niveau des caractéristiques, le terme lien est désigné car il établit une dépendance entre deux caractéristiques et fait intervenir un savoir-faire formalisé pour réaliser une tâche donnée.

La décomposition $Relation \rightarrow Lien \rightarrow Contrainte$ s'applique au modèle lors de la conception d'une application orientée métier (lorsque l'on réfléchit à la définition, notamment, de l'étape 8). Dans les cas de validation présentés, cette décomposition, liée à l'acquisition du savoir-faire, n'est pas mise en lumière puisque le savoir-faire impliqué dans chacune était maîtrisé a priori (avant d'y appliquer le modèle).

Le terme contrainte est utilisé pour décrire les dépendances entre les éléments de bas niveau comme les contraintes de transport entre les étapes 5 et 6, où les contraintes transportent des éléments géométriques.

Les clés pour organiser et manipuler de multiples contraintes sont les concepts d'agrégation et de décomposition. L'agrégation est un regroupement d'un ensemble d'associations ou d'objets techniques en une unité afin d'en faciliter la manipulation à un niveau d'abstraction plus élevé. Celui-ci est utilisé, dans le modèle générique GAPOM, à la phase de description des niveaux d'abstraction, pour illustrer les différents niveaux de granularité du modèle, tels que le niveau des vues, le niveau des documents et le niveau des caractéristiques. À l'inverse, le concept de décomposition permet de désagréger le lien en plusieurs entités. Un exemple de décomposition survient lorsque, à l'étape 8, le lien de génération de la pseudo-empreinte est décomposé en plusieurs contraintes.

Pour chacune des trois applications considérées, le savoir-faire correspond aux connaissances en rapport avec une association qui permet d'agir sur les objets associés.

Typiquement, le savoir-faire pour ces applications correspond à la tâche spécialisée qui sera formalisé dans un lien associant des objets techniques de façon à permettre la création de soyage et de découpe, la création de poches d'allègement et la création d'un gabarit de découpe.

Un deuxième concept abordé au chapitre 2 est la notion de cardinalité. Dans un premier temps, on retrouve ce concept dans l'application de modélisation des soyages et des découpes sous la forme d'une cardinalité de type 1 X 1 car le lien de dérivation se compose d'un document de référence (lisse) et d'un document cible (cadre). Dans un deuxième temps, on retrouve ce concept dans l'application pour la modélisation de poche d'allègement dans le panneau de revêtement du fuselage sous la forme d'une cardinalité de type $m \times 1$ où $m > 1$ car le lien de dérivation relie plusieurs documents de référence (lisse 1, lisse 2, cadre 1, cadre 2, panneau de revêtement) à un seul document cible (panneau de revêtement).

Un troisième concept amené par le chapitre 2 est la notion de vue et par conséquent de lien externe et interne (vue-vue). Dans l'application de modélisation du gabarit de découpe, la notion de vue est importante car les objets de référence et cible n'appartiennent pas tous à la même vue. Dans ce cas, l'objet de référence nommé panneau de revêtement appartient à la vue de conception alors que l'objet cible nommé gabarit de découpe appartient à la vue méthode. De plus, pour cette application, le lien de dérivation est externe car les objets de référence et cible n'appartiennent pas à la même vue.

Le modèle GAPOM exploite des associations de composition, des associations de publication et des contraintes de transport. De plus, chacun de ces trois cas de validation exploite la notion d'associations persistantes au moyen des outils disponibles au moment où les travaux ont été réalisés.

Finalement, le modèle proposé constitue un cadre permettant de documenter le fonctionnement d'une application à développer en incitant son créateur à se préoccuper

d'un certain nombre d'aspects : l'objectif, le contexte, les intrants géométriques, les paramètres internes et externes, les associations entre ces informations et les opérations ou elles interviennent, l'exploitation du résultat, etc. On peut souligner que le modèle proposé nous a permis d'appréhender de manière uniforme et succincte trois applications suffisamment complexes pour constituer des cas d'application valables et représentatifs de la réalité industrielle.

CHAPITRE 4

LES ASSOCIATIONS DANS UN PROCESSUS INDUSTRIEL DE GESTION DES MODIFICATIONS

Dans les précédents chapitres de ce mémoire, nous avons proposé une terminologie, des concepts et un modèle permettant d'organiser la notion d'association au sein d'applications orientées métier. Les concepts et le modèle ont été validés sur trois cas d'applications visant à définir des objets de nature géométrique (soyage et découpe, poches d'allègement, fenêtre de découpe) de manière automatique. Les gains apportés par ces applications s'obtiennent lors de la création initiale des objets, ainsi que lors de leur mise à jour, en cas de modification. Toutefois, ces cas peuvent être qualifiés d'unitaires dans la mesure où ils portent sur des tâches très spécialisées faisant intervenir, conformément au modèle, des liens technologiques formalisant un savoir-faire spécifique à chaque tâche à accomplir. Ces liens technologiques correspondent à une agrégation de contraintes entre éléments géométriques de granularité fine.

On peut estimer que des milliers de tâches spécialisées de cette nature sont impliquées dans un processus industriel de développement de produit, qui inclut la définition du produit lui-même ainsi que des processus qui lui sont associés (définition d'outillage, inspection, etc.).

Il est donc utile d'évaluer de quelle façon la terminologie, les concepts et le modèle proposés s'inscrivent dans un processus industriel de développement de produit. Pour ce faire, nous nous intéresserons au processus industriel de gestion des modifications.

Dans ce chapitre, nous allons utiliser un scénario complexe pour évaluer de façon sommaire la portée des concepts dans un cas de propagation de modification, afin de déterminer, dans une certaine mesure, si les concepts et le modèle proposés sont utiles seulement dans des cas unitaires, ou s'ils ont une portée dans le monde réel.

Tout d'abord, la section 1 documente le processus de gestion des modifications de Bombardier Aéronautique. La section 2 documente un scénario de gestion des modifications chez ce partenaire industriel. Ensuite, la section 3 illustre la cartographie du processus basé sur les deux premières sections. Le chapitre se termine par une analyse du fonctionnement des concepts et du modèle dans le cadre de cette cartographie. Finalement, on retrouve à l'annexe 1 une description sommaire des documents employés dans la gestion des modifications chez Bombardier Aéronautique.

4.1 Le processus de gestion des modifications chez Bombardier Aéronautique

Cette section décrit le processus de gestion des modifications en vigueur chez Bombardier Aéronautique à l'été 2004. Le processus exploite principalement un support papier en ce qui attrait au suivi des flux de travail (workflow). Par contre, de nouveaux processus automatisés sont présentement déployés en support au développement de nouveaux produits chez Bombardier Aéronautique. La description ci-dessous en offre une vision globale. Une description plus détaillée suit plus loin. La description du processus de gestion des modifications est basée sur les documents suivants : [62-72].

4.1.1 Aperçu général du processus de gestion des modifications

On distingue les évolutions apportées au produit en cours de conception de celles apportées à des données validées et libérées. Pour reprendre le vocabulaire de Maurino, on parlera de Correction dans le premier cas, et de Modification dans le deuxième [13]. Les modifications apportées aux dessins libérés reposent sur un processus de modification formel constitué d'un ensemble d'étapes, qui varient selon l'entreprise. Le processus documenté ici considère que le problème rapporté requiert une modification d'ingénierie. Cependant, les modifications ne font pas toujours intervenir l'ingénierie. Il est important de noter que le processus documenté s'applique à une modification portant sur des données validées et libérées, soit typiquement à des pièces en cours de

production. Voici les définitions des termes Validé et Libéré selon différentes organisations.

- Approval : the agreement that an item is complete and suitable for its intended use [73].
- Approval : an endorsement applied manually or electronically attesting to the correctness of a document or a revision made on a document [74].
- Release : the designation by the originating activity that a document or software version is approved by an appropriate authority and is subject to configuration change management procedures [73].

Le processus de gestion des modifications comporte huit étapes (Figure 69). Les huit étapes du processus sont : rapporter le problème, évaluer le problème, analyser les impacts fonctionnels et monétaires, initier la modification, modifier les documents d'ingénierie, approuver la modification, modifier les documents méthodes et approuver par CM (Change Management).

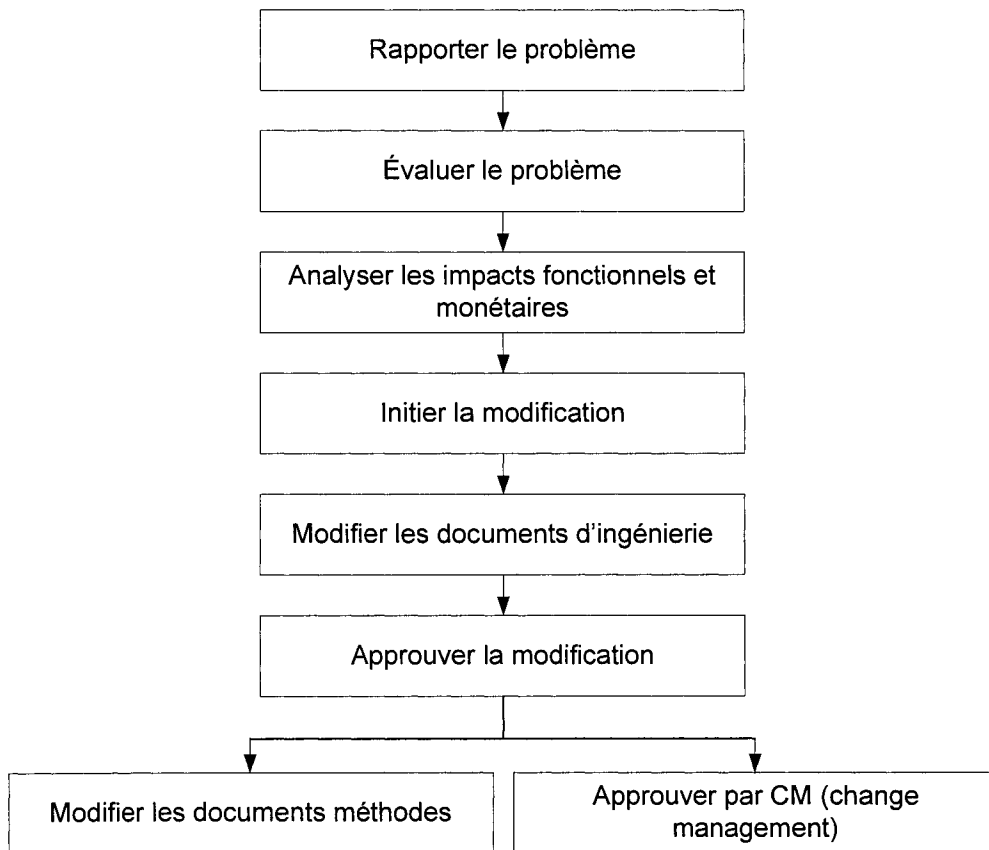


Figure 69 Étapes du processus de gestion des modifications

Le processus débute par l'identification d'un problème. Ensuite, les concepteurs proposent différentes solutions qui seront analysées afin d'en déterminer les impacts fonctionnels et monétaires. À la fin de cette analyse, une seule solution sera retenue. Celle-ci devra être approuvée par un représentant du programme. Une fois l'approbation obtenue, les modifications des documents d'ingénierie pourront être entreprises. Suite à cette modification, la solution devra être à nouveau approuvée par les départements concernés. Ensuite, la modification sera propagée aux documents de méthodes.

Enfin, la solution devra être approuvée une dernière fois par le service de CM pour libérer les documents d'ingénierie, suivie des documents de méthodes.

4.1.2 Description détaillée du processus de gestion des modifications

Cette section a pour objectif de décrire de façon détaillée le processus de gestion des modifications. Les Figure 70 et la Figure 71 décrivent chacune des étapes du processus en identifiant les tâches et les livrables de celles-ci.

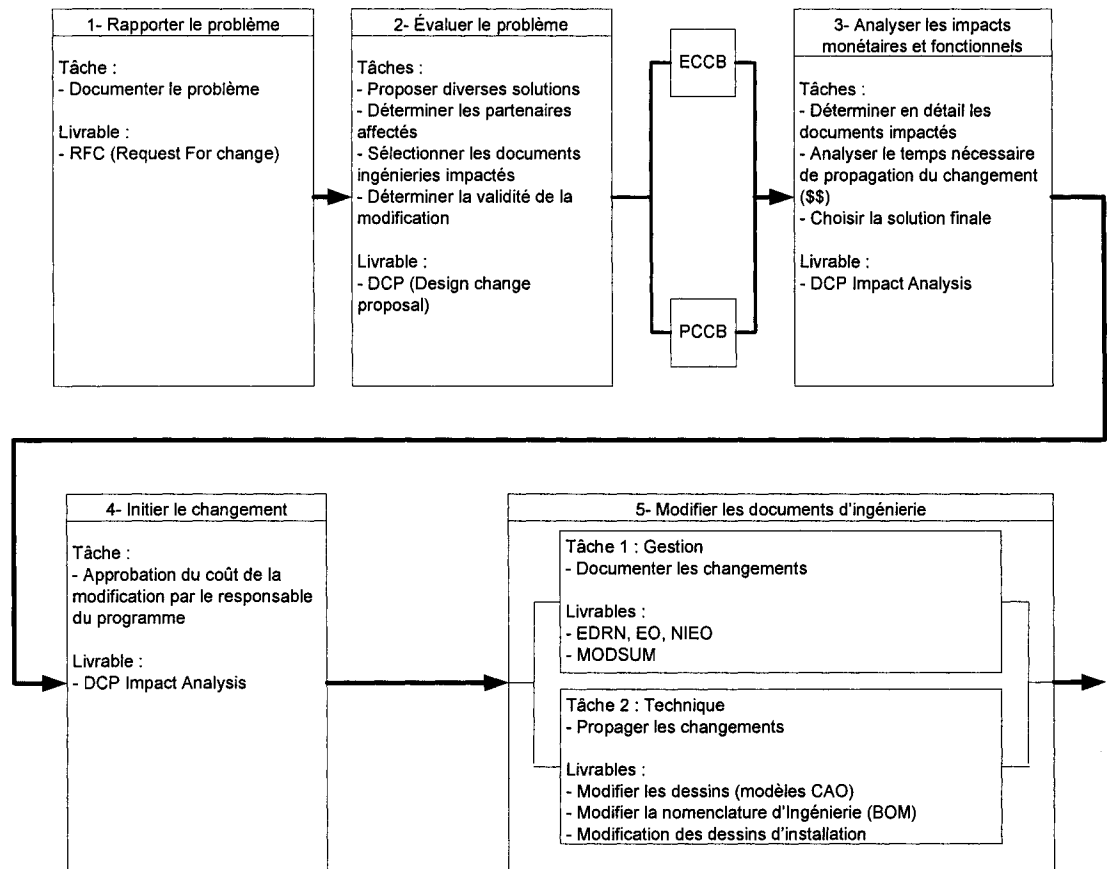


Figure 70 Étapes détaillées du processus de gestion des modifications (1 de 2)

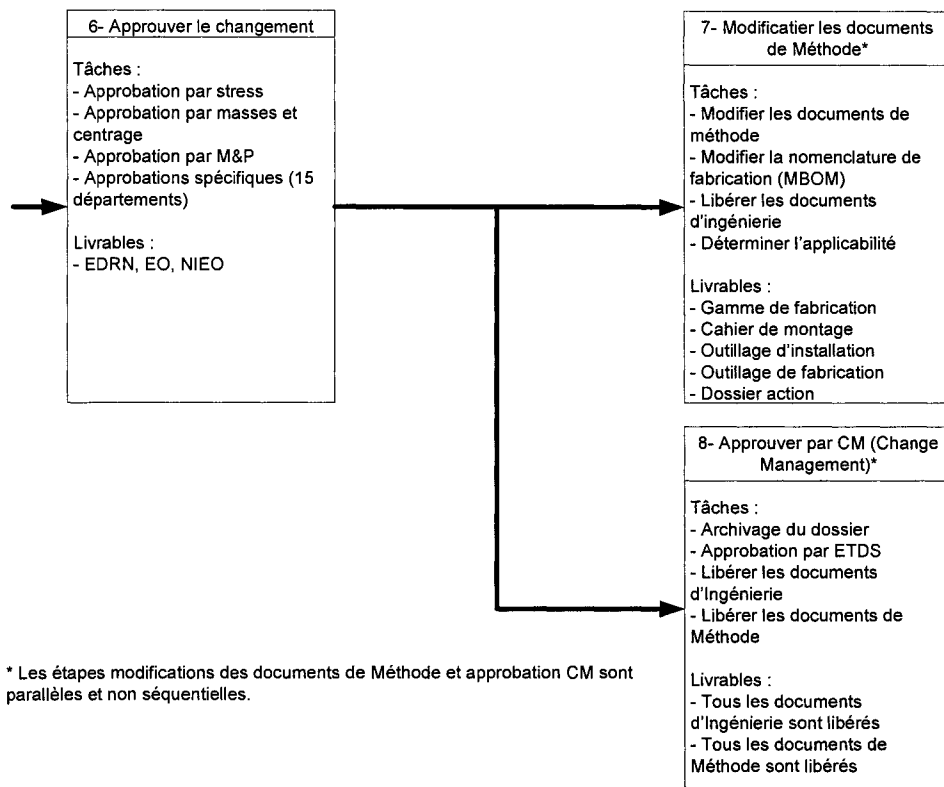


Figure 71 Étapes détaillées du processus de gestion des modifications (2 de 2)

4.1.2.1 Étape 1 : rapporter le problème

La première étape a pour tâche de documenter le problème. Le problème doit être documenté dans un formulaire nommé RFC (Request For Change). Le RFC est un document officiel qui contient deux sections. La première section contient la description du problème et les coordonnées du demandeur. La deuxième section contient les informations relatives à la réponse d'ingénierie telles qu'une brève description de la modification envisagée, le numéro de dessin de l'assemblage touché par la modification et la validité. La validité est une séquence d'unités d'avions pour lesquelles la modification est valide.

4.1.2.2 Étape 2 : évaluer le problème

La deuxième étape comprend différentes tâches. La première tâche a pour objectif de déterminer les alternatives de solutions relatives au problème décrit dans le RFC. La deuxième tâche a pour objectif de déterminer les partenaires affectés par la modification. Les partenaires peuvent être internes ou externes. Les partenaires internes sont les différents départements de la compagnie qui seront impactés par la modification tels que le département d'analyse de contraintes, Méthodes, Masses et Centrage, etc. Les partenaires externes sont les différents partenaires industriels tels que les sous-traitants, les associés et les collaborateurs dans le projet. La troisième tâche a pour objectif d'identifier les documents d'ingénierie touchés par la modification. Cette identification demeure sommaire. La quatrième tâche consiste à déterminer la validité de la modification proposée. Le formulaire officiel associé à cette étape est le DCP (Design Change Proposal).

La résolution préliminaire est suivie de deux sous-étapes qui sont l'évaluation de la solution par le comité nommé ECCB (Engineering Change Control Board) et la gestion de l'information par le PCCB. Le comité nommé ECCB, constitué de membres de différents départements, a pour objectif d'évaluer la solution en termes de faisabilité d'ingénierie. Le PCCB a pour rôle de recueillir l'information nécessaire à la prochaine étape pour analyser les impacts monétaires et fonctionnels ainsi que de compléter le document *DCP Impact Analysis*.

4.1.2.3 Étape 3 : analyser les impacts fonctionnels et monétaires

La troisième étape a pour objectif de déterminer la solution la plus appropriée, en analysant les impacts fonctionnels et monétaires des différentes solutions retenues.

Les documents résumant le cheminement de l'analyse ne sont pas conservés dans une vouîte commune ou officielle. L'analyse débute par l'étude des impacts fonctionnels menée par le concepteur. Cette analyse a pour but de déterminer le niveau d'impact de la

modification. Selon ce niveau, il fera appel à l'expertise des partenaires internes et externes impliqués par la modification. Les techniques d'analyse menant à déterminer l'impact ne sont pas normalisées. L'analyse dépend plutôt des connaissances et de l'expérience du concepteur.

L'analyse des impacts monétaires est effectuée par le calcul du temps-homme nécessaire pour accomplir la modification. Ce calcul dépend du nombre de documents à modifier et du type de la modification. Le Tableau V indique le temps-homme qui pourrait être associé à chaque type de la modification. Les temps-hommes fournis dans cette figure sont des données fictives.

Tableau V Temps-homme alloué pour chaque type de modification
(données fictives)

Types de modification	Temps homme
Ajout d'une pièce	30 heures
Modification des modèles CAO ou des dessins	15 heures
Modification des dessins d'installation	20 heures

À la suite de l'analyse, une solution finale doit être retenue. La liste détaillée des documents d'ingénierie impactés par cette solution doit être déterminée. Le formulaire officiel associé à cette étape est le *DCP Impact Analysis*.

4.1.2.4 Étape 4 : initier la modification

Lors de la quatrième étape, un responsable du programme (CM) évalue la pertinence de débloquer des fonds pour la modification. Suite à son approbation, saisie par le formulaire *DCP Impact Analysis*, le budget sera dégagé et les modifications pourront débuter.

4.1.2.5 Étape 5 : modifier les documents d'ingénierie

La cinquième étape a pour objectif de propager les modifications aux documents d'ingénierie. Lors de cette étape, deux tâches sont effectuées en parallèle.

La première tâche nommée *Gestion* a pour rôle de documenter les modifications à l'aide des documents officiels suivants : le EDRN (Engineering Data Release Notice), le EO (Engineering Order), le NIEO (Non Incorporated Engineering Order) et le MODSUM (Modification Summary).

La deuxième tâche nommée *Technique* a pour rôle de propager la modification dans les documents d'ingénierie tels que les modèles de CAO (Conception assistée par ordinateur), les dessins d'installation et la nomenclature d'Ingénierie. Suite à la propagation de la modification aux documents d'ingénierie, un rapport résumant les différentes analyses techniques menant à la solution sera rédigé.

4.1.2.6 Étape 6 : approuver la modification

La sixième étape a pour objectif de recueillir l'approbation des partenaires internes et externes. Lors de cette étape, les différents départements impactés par la modification tels que le département d'analyse de contraintes, Masses et Centrage, et M&P vont approuver la modification effectuée par le département d'ingénierie. L'approbation de la modification va être accordée après l'analyse des modifications par chacun des départements sur l'un des formulaires suivants : EDRN, EO, NIEO. Le EO est un document qui permet de faire une modification de façon simplifiée comparativement au EDRN. Le EO décrit de façon textuelle la modification. Cependant la modification n'est pas représentée sur le dessin. On assigne le EO au dessin. Donc, il est nécessaire de consulter les EOs attachés à un dessin pour obtenir toute l'information pertinente puisque le dessin ne représente plus à lui seul toute la réalité. Au maximum, cinq EO peuvent être attachés à un dessin. Le NIEO est un document qui permet de faire des modifications temporaires.

4.1.2.7 Étape 7 : modifier les documents de méthodes

La septième étape a pour objectifs de planifier l'introduction de la modification et de réaliser la modification. La réalisation de cette étape se fait en parallèle avec l'étape huit.

La phase préliminaire de l'intervention débute lorsque le département de Méthodes reçoit le MODSUM (Figure 72). C'est le sous-département Méthodes-assemblage qui s'occupe de traiter la demande. On vérifie les dessins d'ingénierie attachés au MODSUM afin de s'assurer que les dessins sont ceux nécessaires au traitement de la modification. Ensuite, le responsable du cas rédige un dossier action. Ce document a pour objectif d'aviser de la modification les départements touchés et de déterminer l'applicabilité de la modification.

La phase suivante dépend du lieu où sera fabriquée la pièce. Si la pièce est fabriquée à l'interne, alors la prochaine phase consiste à planifier l'introduction du changement (phase 1, planification, Figure 72 et Figure 73). Si la pièce est fabriquée à l'externe, la phase 1 est effectuée à l'externe et la prochaine phase pour Bombardier consiste à réaliser le changement (phase 2, réalisation, Figure 72 et Figure 73).

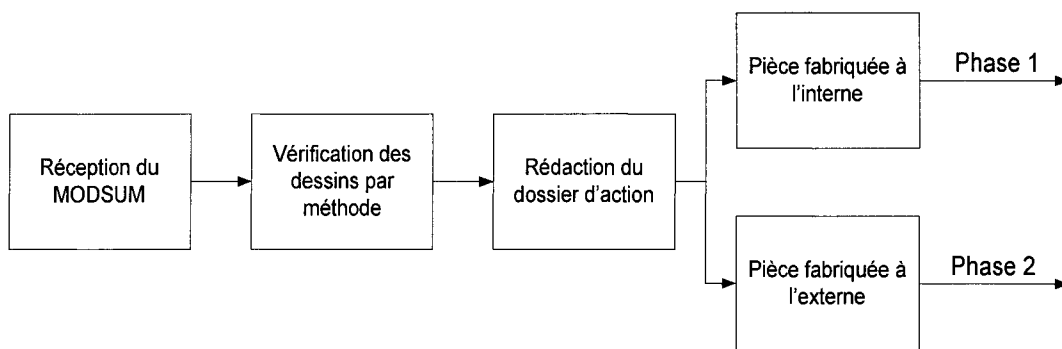


Figure 72 Phase préliminaire de l'intervention de Méthodes

La phase 1 nommée *Planification* a pour premier objectif d'aviser les départements Outillage, PTM (Planification travaux et matière), Achats et Méthodes-détail des

modifications. De plus, le responsable de Méthodes doit recueillir les délais de chacun des départements. Ces informations serviront au département de PTM pour déterminer l'applicabilité qui sera ensuite transmise au sous-département Méthodes-assemblage.

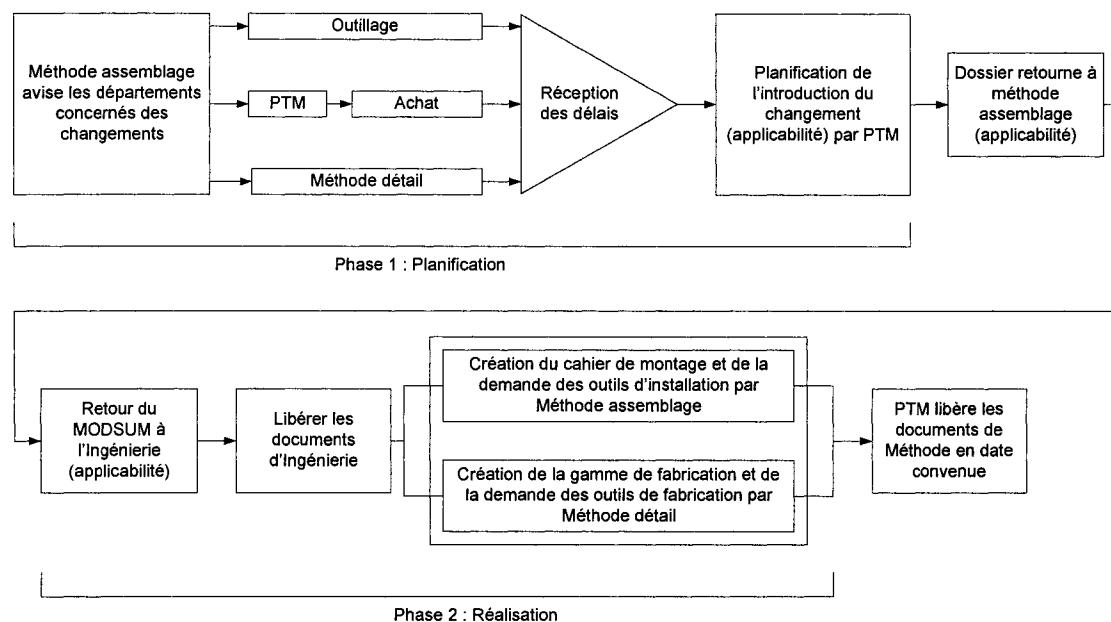


Figure 73 Phase de planification et de réalisation de la modification par Méthodes

La phase 2, nommée *Réalisation* (Figure 73), a pour objectif de libérer les documents d'ingénierie et de créer les documents de méthodes. La libération des documents d'ingénierie est précédée par le retour du MODSUM (avec l'applicabilité de la modification) au département d'ingénierie. Une fois les documents d'ingénierie libérés, la création des documents de méthodes peut débuter. Lors de la création des documents, le sous-département Méthodes-assemblage fera la création des documents suivants : le cahier de montage et la demande outils d'installation. Le sous-département Méthodes-détail fera la création des documents suivants : la gamme de fabrication et la demande des outils de fabrication. Finalement, le département PTM libère les documents de Méthodes en date convenue.

4.1.2.8 Étape 8 : approuver par CM

Lors de la huitième étape, le département ETDS doit archiver l'ensemble du dossier de modification afin de maintenir l'intégrité de la modification. Une fois les documents archivés, le département ETDS émet son approbation. Les documents d'ingénierie et de méthodes seront par la suite libérés. La libération des documents d'ingénierie se fait avant ceux de méthodes car les documents d'ingénierie sont nécessaires pour la création des documents de méthodes. De plus, une longue période de temps peut s'écouler entre les deux libérations de documents. La durée de cette attente dépend des délais des différents départements.

4.2 Scénario – Problème de fissure dans la structure du toit

La section 4.2 présente un scénario fictif, mais représentatif du processus de gestion de modification chez Bombardier Aéronautique à l'été 2004. Ce scénario sera utilisé par la suite dans la section 4.3 pour faire la cartographie du processus de gestion des modifications chez Bombardier Aéronautique.

4.2.1 Mise en situation

La compagnie Bombardier Aéronautique, qui développe et fabrique notamment des avions d'affaires, a conçu un nouvel appareil.

Le département d'analyse de contraintes (stress) a identifié un problème majeur qui pourrait endommager gravement la structure et mettre en péril l'intégrité de l'appareil. Le problème doit donc être résolu. Le scénario suivant illustre le cheminement d'une modification à travers le processus de gestion des modifications en vigueur chez Bombardier Aéronautique à l'été 2004.

4.2.2 Description du problème et des pistes de solution

Le département d'analyse de contraintes a identifié un problème dans la structure du toit de la cabine de pilotage, soit le Canopy. Le Canopy simplifié utilisé pour ce scénario est une structure composée d'une trentaine de pièces métal en feuille ou usinées (lisses, cadres, longerons). La Figure 74 montre la structure du Canopy.

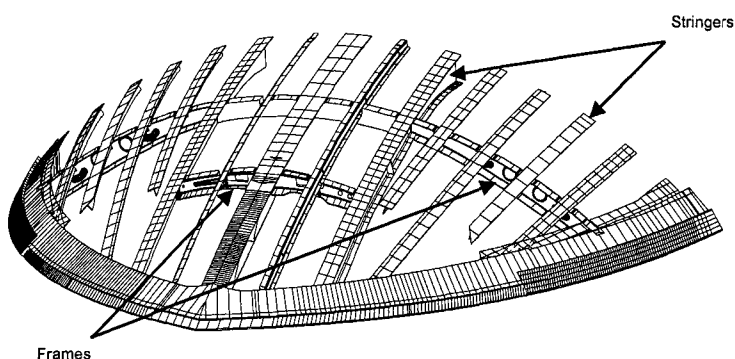


Figure 74 Structure du Canopy [26]

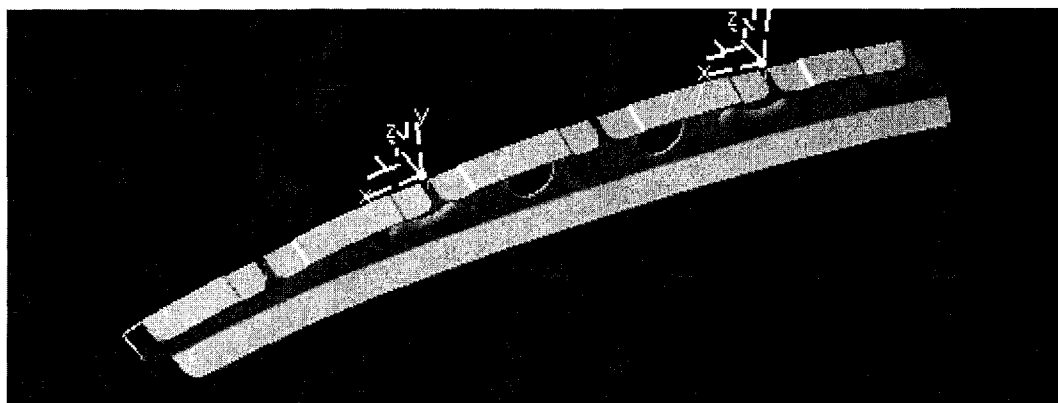


Figure 75 Pièce AC725-33021 devant être modifiée

Les essais de fatigue démontrent que le cadre AC725-33021 (Figure 75) se fissure après 10 000 cycles (voir Figure 76 pour la localisation de la fissure). Cependant, la semelle devrait supporter 15 000 cycles. Cela pourrait endommager gravement la structure et mettre en péril l'intégrité de l'appareil. Ce problème est attribuable à une concentration

de contraintes à l'une des semelles du cadre. Pour résoudre ce problème, le département d'ingénierie a déterminé trois pistes de solution qui permettraient de répartir les contraintes sur les autres semelles ou de solidifier la semelle en question.

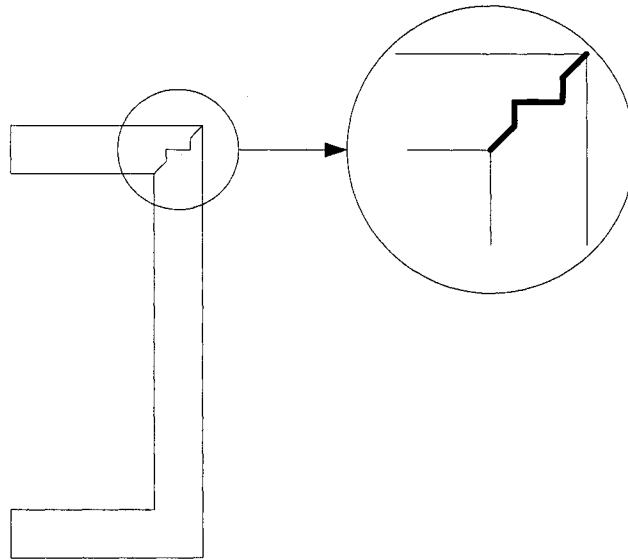


Figure 76 Localisation de la fissure

Une première solution passe par l'ajout d'un angle (Figure 77). Cette solution permettrait de solidifier l'endroit où il y a concentration des contraintes. Cependant, elle aurait pour conséquence d'allonger certains rivets et d'ajouter une pièce à l'assemblage.

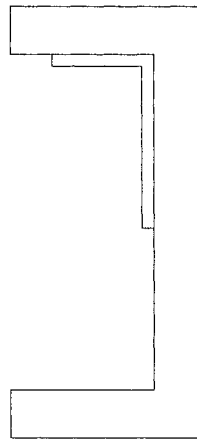


Figure 77 Solution 1- Ajout d'un angle

Une deuxième solution consiste à épaissir la semelle à l'endroit où il y a concentration des contraintes. Pour réaliser cette solution, il serait nécessaire d'allonger certains rivets. Il est à noter que cette solution est faisable seulement sur les pièces usinées, alors que la pièce concernée est de métal en feuille.

Une troisième solution consiste à changer le type d'attachement pour un autre ayant un diamètre plus petit. Cette solution permettrait de réduire la longueur de la semelle et par le fait même de transférer des charges aux autres semelles. Pour réaliser cette solution, la longueur de la semelle devrait être diminuée. Cette modification entraînerait le déplacement des rivets sur le cadre et le revêtement extérieur.

Pendant le processus de modification, les trois solutions seront analysées. Suite à une première analyse, la solution proposant d'épaissir la semelle sera rejetée. La cause de ce rejet est que la solution ne s'applique pas aux pièces de métal en feuille.

La solution d'ajout d'un angle (solution 1) est une solution viable. Les changements nécessaires sont la création d'une nouvelle pièce et le changement de rivets dû à l'ajout de la nouvelle pièce à maintenir. Cependant, elle entraîne des changements plus importants que la troisième solution.

La solution qui consiste à changer l'attachement et à réduire la longueur de la semelle est simple et n'entraîne pas de modifications importantes. Cependant, elle a pour désavantage d'augmenter les risques d'erreurs lors de la fabrication, car elle implique l'emploi de différents rivets par l'opérateur.

Finalement, la solution qui consiste à changer le type d'attaches sera retenue car elle n'implique que le changement du type de rivets et la réduction de la semelle, comparativement aux autres solutions qui impliquent des modifications plus importantes.

4.2.3 Cheminement du cycle de modification

Cette section présente le cheminement du changement à travers le processus de modification. Pour chacune des huit étapes, qui constituent le processus, le traitement de la modification effectué, les personnes responsables et les documents impactés sont présentés.

4.2.3.1 Etape 1 : rapporter le problème

Lors de la première étape nommée Rapporter le problème, le formulaire officiel RFC est utilisé. Celui-ci est divisé en deux sections. La première section contient la description du problème, le nom du demandeur et un dessin illustrant le problème.

Description du problème : les essais de fatigue démontrent que le cadre AC725-33021 fissure après 10 000 cycles. Cependant la semelle devrait supporter 15 000 cycles

La deuxième section contient la réponse d'ingénierie et le nom du responsable provenant du département d'ingénierie. La réponse d'ingénierie consiste en un numéro de référence d'un MODSUM ou d'un DCP associés au RFC. Généralement, cette section est complétée une fois que le changement a été traité. Cette section peut être utilisée ultérieurement pour des fins de recherche.

La requête de changement doit être approuvée par le responsable de Méthodes pour s'assurer qu'un examen adéquat du problème a été réalisé. Pendant l'investigation, le responsable vérifie que la problématique résulte d'un problème d'ingénierie. Le Tableau VI présente la liste des signatures saisies par le formulaire RFC.

Tableau VI Liste des signatures saisies par le RFC

Titre	Numéro de case dans le formulaire	Usager (noms fictifs)
Requested by	11	Alain Dion (Ground test)
ENGINEERING RESPONSE		
Prepared by	33	W. Ford

4.2.3.2 Étape 2 : évaluer le problème

Lors de cette deuxième étape, le formulaire officiel DCP est utilisé. Celui-ci contient la raison du changement, la description du changement et la justification.

Raison du changement : les essais de fatigue démontrent que le cadre AC725-33021 fissure après 10 000 cycles. Cependant la semelle devrait supporter 15 000 cycles.

Description du changement : il y a trois solutions possibles pour renforcer la semelle. 1- Ajouter un angle 2- Epaissir la semelle 3- Changer le type d'attaches.

Justification : empêcher la création prématurée de fissures.

Lors de cette étape, une brève analyse a été réalisée afin de localiser l'assemblage qui sera impacté (Tableau VII).

Tableau VII Liste des documents impactés - étape 2

Nom du document	Description	Type
GC219-19-10	Assemblage du Canopy	Modèle CAO
AC725-33021	Cadre de l'assemblage du Canopy	Modèle CAO

La Tableau VIII présente la liste des signatures saisies par le formulaire DCP. Il est à noter que dans cet exemple le demandeur fait parti du personnel d'ingénierie. De plus, le *Systems Integration Manager* et le *Chief Design Integrator* sont des responsables d'ingénierie et membres du ECCB.

Tableau VIII Liste des signatures saisies par le DCP

Titre	Numéro de case dans le formulaire	Usager (noms fictifs)
Prepared by	25	W. Ford
SYSTEMS INTEGRATION MANAGER	26	J. Turcot
CHIEF DESIGN INTEGRATOR	27	J. Turcot
PP&C	33	C. Walther
ECCB CHAIRPERSON	33	B. Dobson
PROJECT DIRECTOR	33	T. Lamarre

4.2.3.3 Étape 3 : analyser les impacts fonctionnels et monétaires

Lors de cette troisième étape, le formulaire officiel *DCP Impact Analysis* est utilisé. Celui-ci contient la liste des solutions techniques proposées, les impacts techniques et la justification.

Listes des solutions techniques proposées :

- 1- *Ajouter un angle : angle en aluminium – si épaisseur supérieure à 32/1000 po, alors allongement des rivets*
- 2- *Epaissir la semelle : solution rejetée car non applicable sur une pièce métal en feuille*
- 3- *Diminution de la longueur de la semelle et changer le type d'attaches*

Impacts techniques :

- 1- *Création d'une nouvelle pièce (30 heures), modification des pièces impactées cadre et lisse (30 heures), modification du dessin d'installation (20 heures). Total : 80 heures*
- 2- *Solution rejetée*
- 3- *Modification de la semelle (15 heures – modèle CAO + dessin), modification du revêtement extérieur (15 heures– modèle CAO + dessin) et modification du dessin d'installation (20 heures– modèle CAO + dessin) Total: 50 heures*

Justification :

La solution 3 est choisie car elle est la moins coûteuse.

Lors de cette étape, une analyse complète a permis de déterminer les documents d'ingénierie impactés (Tableau IX).

Tableau IX Liste des documents impactés - étape 3

Nom du document	Description	Type
GC219-19-10 RevA	Assemblage du Canopy	Modèle CAO
AC725-33021 Rev A	Cadre de l'assemblage du Canopy	Modèle CAO
AC725-24100 RevB	Revêtement extérieur du Canopy	Modèle CAO
AC725-33021 RevA	Cadre de l'assemblage du Canopy	Dessin d'installation
AC725-24100 RevB	Revêtement extérieur du Canopy	Dessin d'installation

La Tableau X présente la liste des signatures saisies par le formulaire *DCP Impact Analysis*. Les trois approbations nécessaires à cette étape-ci sont celle du concepteur, du spécialiste (superviseur du concepteur) et celle du responsable du département de Masse et Centrage.

Tableau X Liste des signatures saisies par le DCP Impact Analysis

Titre	Numéro de case dans le formulaire	Usager (noms fictifs)
Signature approbation	21	Vincent Lee (Design)
Signature approbation	21	D. Ford (Spécialiste)
Signature approbation	21	E. Tui (Poids)
Signature approbation	21	W.Label (CM)

4.2.3.4 Étape 4 : initier le changement

Lors de cette quatrième étape, un responsable du programme évalue la pertinence de débloquer des fonds pour la modification. Suite à l'étude du *DCP Impact Analysis*, l'argent sera débloqué et les modifications pourront être exécutées. Les documents impactés sont les mêmes que pour l'étape précédente. L'approbation du responsable de programme est saisie sur le formulaire officiel *DCP Impact Analysis* (Tableau X).

4.2.3.5 Étape 5 : modifier les documents d'Ingénierie

Lors de cette cinquième étape, les formulaires officiels EDRN et MODSUM sont complétés. Le formulaire EDRN contient la description du changement.

Diminution de la longueur de la semelle sur le cadre AC725-33021

Diminution du diamètre des rivets

Déplacement de la position des rivets sur la semelle et le revêtement extérieur

Le formulaire MODSUM, pour sa part, contient la description de la modification, les raisons de la modification, les remarques d'ingénierie et la liste des documents d'ingénierie impactés.

Description de modification : allonger la semelle, modification de la semelle (15 heures), modification du revêtement extérieur (15 heures) et modification du dessin d'installation (20 heures) Total: 50 heures.

Raisons de modification : les essais de fatigue démontrent que le cadre AC725-33021 fissure après 10 000 cycles. Cependant la semelle devrait supporter 15 000 cycles.

Remarques d'ingénierie : la semelle doit être conçue pour supporter un essai de fatigue de 15 000 cycles.

Les documents impactés sont les mêmes que pour l'étape trois. Le Tableau XI illustre la liste des documents impactés lors de la modification des documents d'ingénierie.

Tableau XI Liste des documents impactés - étape 5

Nom du document	Description	Type
GC219-19-10 RevB	Assemblage du Canopy	Modèle CAO
AC725-33021 RevB	Cadre de l'assemblage du Canopy	Modèle CAO
AC725-24100 RevC	Revêtement extérieur du Canopy	Modèle CAO
AC725-33021 RevB	Cadre de l'assemblage du Canopy	Dessin d'installation
AC725-24100 RevC	Revêtement extérieur du Canopy	Dessin d'installation
AC725-33021 RevB_PL	Liste des pièces	Parts List
AC725-24100 RevC_PL	Liste des pièces	Parts List

La Tableau XII présente la liste des signatures saisies par le formulaire EDRN à cette étape.

Tableau XII Liste des signatures saisies par le EDRN

Titre	Numéro de case dans le formulaire	Usager (noms fictifs)
PREPARED BY & DEPT NO.	11	T. Lee
DESIGN	12	T. Teo
DESIGN AUTHORITY	16	P. Lamarche
DRAWING QUALITY	17	G. Tremblay
AUTHORIZED	18	W. Smith

La Tableau XIII présente la liste des signatures saisies par le formulaire MODSUM.

Tableau XIII Liste des signatures saisies par le MODSUM

Titre	Numéro de case dans le formulaire	Usager (noms fictifs)
ORIGINATOR	11	T. Lee
DESIGN	12	T. Teo
DESIGN AUTHORITY	13	P. Lamarche
PP&C	14	D. Lafrance

4.2.3.6 Étape 6 : approuver le changement

Lors de cette sixième étape, les différents départements concernés par le changement, tels que le département d'analyse de contraintes, Masses et Centrage ainsi que M&P vont approuver le changement. L'approbation du changement requiert l'analyse des modifications par chacun des départements. Voici le type d'analyse effectuée :

- département d'analyse de contraintes : analyse le transfert des contraintes aux autres pièces.

- masses et Centrage : analyse l'impact de la modification du cadre sur le poids de l'avion (respect des performances).
- M&P : analyse les risques de corrosion entre le nouveau type d'attache, le cadre et le revêtement extérieur.

L'approbation du département d'analyse de contraintes, Masses et Centrage, M&P et des autres départements sont saisies sur le formulaire EDRN à cette étape (Tableau XIII).

4.2.3.7 Étape 7 : modifier les documents de Méthodes

Cette étape n'est pas traitée dans ce scénario.

4.2.3.8 Étape 8 : approuver par CM

Lors de cette huitième étape, le département ETDS doit archiver l'ensemble du dossier de modification nommé « AMÉLIORATION POUR RÉSISTANCE FATIGUE ». Une fois les documents archivés, le département ETDS émet son approbation. Suite à cette approbation, les documents d'ingénierie et de Méthodes seront libérés. Le Tableau XIV présente la liste des documents d'ingénierie libérés.

Tableau XIV Liste des documents d'ingénierie libérés - étape 8

Nom du document	Description	Type
GC219-19-10 RevB	Assemblage du Canopy	Modèle CAO
AC725-33021 RevB	Cadre de l'assemblage du Canopy	Modèle CAO
AC725-24100 RevC	Revêtement extérieur du Canopy	Modèle CAO
AC725-33021 RevB	Cadre de l'assemblage du Canopy	Dessin d'installation
AC725-24100 RevC	Revêtement extérieur du Canopy	Dessin d'installation

Le Tableau XV indique la liste des documents Méthodes libérés.

Tableau XV Liste des documents de méthodes libérés – étape 8

Documents méthodes libérés
Gamme de fabrication
Cahier de montage
Outillage d'installation
Outillage de fabrication

4.3 Cartographie des associations dans le scénario de modification

La cartographie proposée vise essentiellement à illustrer la quantité et le type de liens exploités par le processus de gestion des changements de Bombardier Aéronautique. Elle met en évidence des informations nous permettant d'évaluer la pertinence des concepts et du modèle présentés aux chapitres précédents.

La cartographie représente les associations établies par le processus entre des informations qu'il exploite. Le processus documenté étant en majorité supporté par des formulaires papier (RFC, EDRN, etc.), on y identifie un grand nombre d'associations éphémères. On y retrouve aussi quelques associations persistantes. Une association éphémère a pour caractéristique de ne pas être préservée après avoir associé temporairement deux objets techniques. Une association persistante a pour caractéristique d'être permanente (maintenue) entre les objets techniques qu'elle associe. Cela facilite la propagation d'un changement en cas de modification.

La cartographie est construite en deux portions distinctes. La première portion correspond à l'initiation et à l'instruction de la modification [13]. Elle inclut la demande de modification, la proposition de modification, l'analyse d'impacts, l'identification des documents d'ingénierie impactés et un résumé de la modification. Ces étapes sont nécessaires pour exécuter la propagation du changement dans les documents.

La deuxième portion de la cartographie correspond à la propagation du changement dans les documents d'ingénierie, de méthode et de fabrication. Dans le vocabulaire de Maurino, cette portion correspond à la phase d'exécution de la modification [13].

De manière schématique, on pourrait considérer que la première portion en est une de gestion du changement, largement basée sur des formulaires, alors que la deuxième portion, plus technique, est liée à l'édition des documents, souvent numériques, définissant le produit et ses processus associés. L'interface entre ces deux portions est assurée via le document MODSUM (*Modification summary package*).

La première portion de la cartographie, portant sur l'aspect Gestion du scénario de modification, repose sur les documents papiers du processus: RFC (*Request for change*), DCP (*Design change proposal*), *DCP Analysis*, EDRN (*Engineering data release notice*) et le MODSUM. De chacun de ces documents, nous avons extrait une série d'éléments d'information, qui constituent des caractéristiques des documents, correspondant aux champs prévus dans ces documents. Dans ce contexte, chacune de ces caractéristiques contient des informations sous la forme d'une chaîne de caractères alphanumériques. Le raisonnement établi pour inclure ou non les associations dans cette première portion de la cartographie est relié au contenu des formulaires papiers. Ici, l'objectif est d'identifier les associations nécessaires pour compléter les formulaires.

La portion Gestion du scénario est illustrée par deux figures : la Figure 78 met en évidence les associations de transport, alors que la Figure 79 met en évidence les autres associations. Chacune des informations alphanumériques correspond à un champ que

l'on retrouve dans les documents relatifs au processus de gestion des modifications. Nous avons choisis de mettre en évidence les associations de transport, puisqu'elles sont présentes en grand nombre dans la première portion de cette cartographie. Leur grand nombre est attribuable au fait que plusieurs informations sont dupliquées à travers le processus papier afin de conserver une traçabilité de l'évolution de la demande de modification dans le processus. Nous avons aussi choisi de mettre en évidence d'autres associations pour illustrer des éléments cibles qui sont déterminés à partir d'éléments de références. Le choix d'exprimer ces liens en deux figures a pour but de faciliter la compréhension du lecteur. Le niveau d'abstraction choisi pour la construction de ces figures ne correspond pas rigoureusement aux niveaux d'abstraction déterminés au chapitre 2 (A, B, C ou D). Il concorde plutôt avec le niveau d'abstraction des informations contenus dans les formulaires tels que : RFC (*Request for change*), DCP (*Design change proposal*), DCP Analysis, EDRN (*Engineering data release notice*) et le MODSUM. À la Figure 78, la présence de "points d'interrogations" indique que la source de cette information provient de l'extérieur de l'ensemble des documents étudiés.

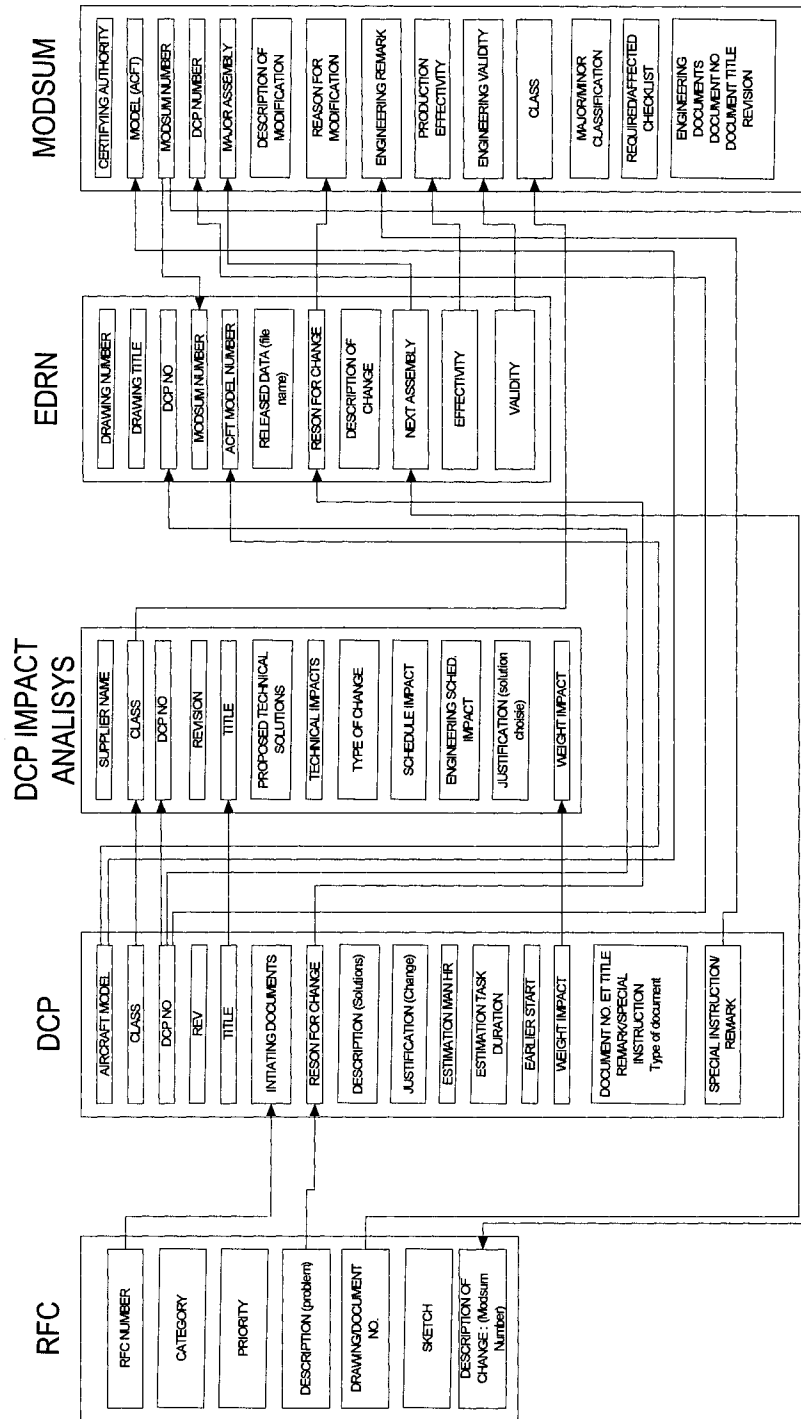


Figure 78 Associations de transport pour la portion gestion du processus de changement

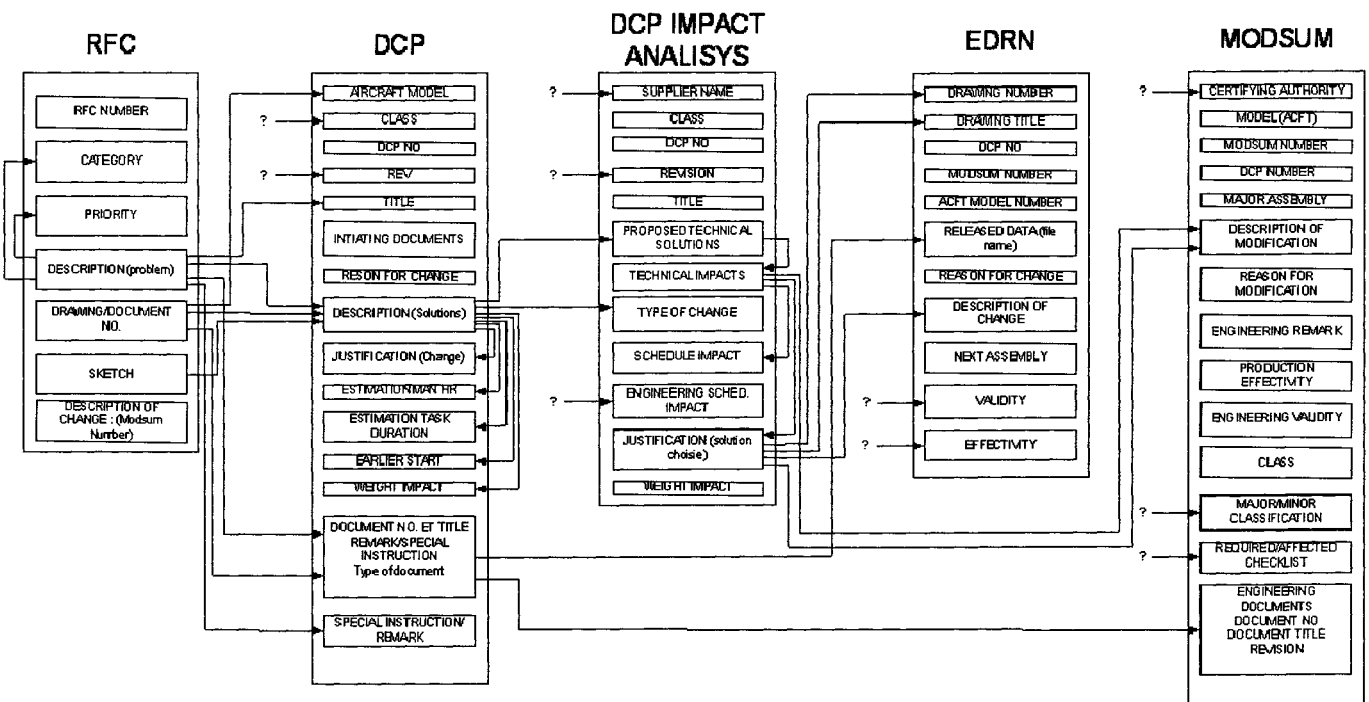


Figure 79 Associations non définies (excluant les associations de transport) pour la portion gestion du processus de changement

La deuxième portion de la cartographie, portant sur l'aspect Documentation technique du scénario de modification, s'intéresse au cheminement permettant de documenter la modification par les départements d'ingénierie, de méthodes et de fabrication, qui portent trois vues distinctes sur le produit et ses processus (Figure 80). À ce point, il est intéressant de noter que cette deuxième portion de la cartographie contient des liens externes. Ceux-ci relient un ou plusieurs objets techniques de références à un ou plusieurs objets techniques cibles qui ne sont pas membres de la même famille. Ici, on peut identifier trois familles ou vues qui sont ingénierie, méthodes et fabrication. Il est judicieux de souligner que cette portion de la cartographie est en relation étroite avec le scénario de modification documenté (on parle de longueur de semelle, de position de rivets, etc.).

Pour la vue Ingénierie, les documents concernés par le scénario de changement documenté sont les modèles CAO et les dessins des pièces, les dessins d'installation, la structure du produit et une liste de composants. Pour nous, le modèle CAO est le modèle 3D placé dans la maquette numérique alors que le dessin est distinct. Dans le monde CATIA V4, le solide et le dessin appartiennent au même document CATIA (CAO). Dans le monde CATIA V5, le solide et le dessin appartiennent à deux documents distincts. Le scénario documenté à l'été 2004, portait sur des données CATIA V4 et n'impliquaient donc qu'un seul document par pièce. Le lien entre le solide et le dessin était persistant et interne au modèle CAO.

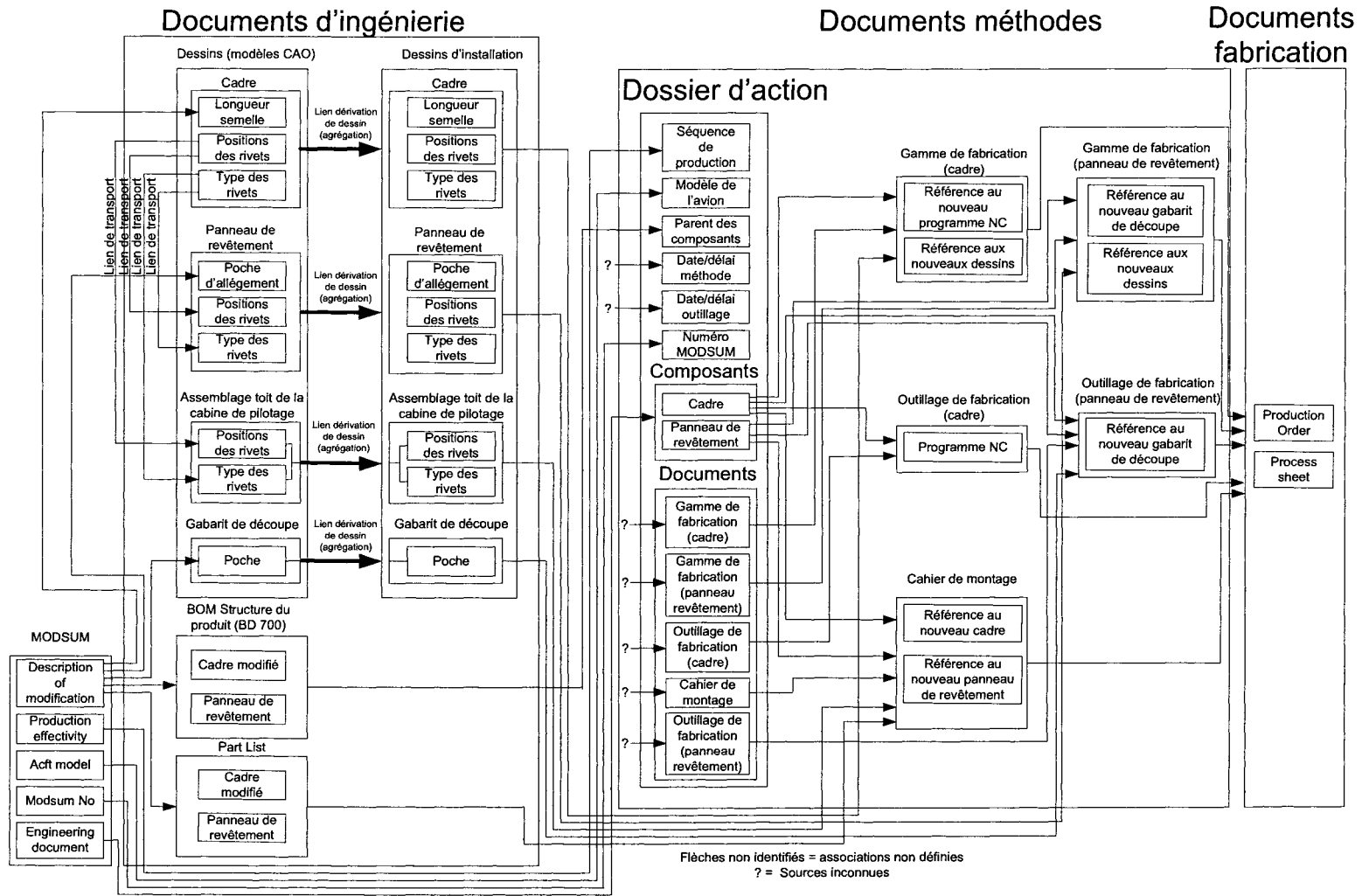
Ensuite, pour la vue Méthodes, les documents concernés sont : le dossier d'action, la gamme de fabrication, l'outillage de fabrication et le cahier de montage. Finalement, pour la vue Fabrication, les documents concernés sont : l'ordre de production et la feuille des procédés (*process sheet*). Soulignons que pour la majorité de ces documents les caractéristiques identifiées sont spécifiques au scénario considéré. Néanmoins, le dossier d'action possède des caractéristiques d'informations communes à la plupart des changements.

À la Figure 80, nous avons illustrés des associations de transport, des liens agrégés et d'autres associations. Les associations de transport ont pour unique but de transporter une information d'un objet technique A à un objet technique B, dont l'empreinte et la pseudo-empreinte sont identiques. Nous avons illustré des liens agrégés pour regrouper les liens nécessaire à la génération des dessins en une unité afin d'en faciliter la manipulation à un niveau d'abstraction plus élevé. Les autres associations expriment une dépendance dont on ne connaît pas bien la nature. Finalement, un point d'interrogation indique que ces éléments d'information ont pour source un élément externe à la cartographie. Ici, l'objectif est d'identifier les associations nécessaires pour relier les caractéristiques les unes aux autres.

Il est pertinent de souligner que le scénario documenté, et la cartographie qui s'y rattache, pourraient exploiter deux des applications ayant été étudiées dans le cadre de la validation sur des cas unitaires : celle concernant les poches d'allègement et celle concernant la création des fenêtres de découpe. Ainsi, si on décomposait la cartographie de la Figure 80, on pourrait retrouver les associations créer par ces applications selon le modèle GAPOM.

La figure illustre différents niveaux d'abstraction à la fois, ce qui fait que l'on retrouve une mixité d'associations. Entre les modèles CAO et les dessins d'installation, il y a une agrégation au niveau des associations qui correspond au niveau B. Sinon, on retrouve beaucoup d'agrégation au niveau des associations et au niveau des nœuds (caractéristiques).

Figure 80 Associations dans la portion documentation technique



4.3.1 Analyse de la cartographie

Difficultés liées à la cartographie

Le premier constat à effectuer est que la cartographie proposée ne représente pas de manière exhaustive les associations présentes dans le processus industriel. Elle offre plutôt un aperçu simplifié de la réalité.

L'étude réalisée nous a permis d'amasser, au cours des étés 2003 et 2004, un volume d'informations qui nous ont conduit à identifier, sans être exhaustif, les documents et les acteurs qui interviennent dans ce processus de gestion de modification. On a ensuite tenté d'établir les associations existant entre les documents identifiés. Cependant, il s'avère souvent difficile de qualifier chacune de ces associations sans maîtriser le savoir-faire qui y est associé, c'est-à-dire, sans qu'il ait d'abord été formalisé.

Une autre difficulté que nous avons rencontrée consiste à choisir un niveau d'abstraction adéquat pour faire apparaître les éléments utiles de la réalité en regard des objectifs visés par le modèle. Une fois les objets choisis (ici, des vues et des documents et des caractéristiques), on peut identifier les inputs et les outputs. Évidemment, plus le niveau d'abstraction est élevé, moins il y a d'objets, et plus c'est simple.

Niveaux d'abstraction

Le deuxième constat est que la cartographie nous indique qu'il existe une multitude d'associations dans le processus. Le nombre d'associations illustrés dans la cartographie dépend du niveau d'abstraction choisi. Ainsi, il est logique de s'attendre à une explosion du nombre de liens lorsque le niveau d'abstraction diminue. La complexité et l'ampleur d'un tel processus imposent des efforts considérables pour effectuer la cartographie à un faible niveau d'abstraction. Pour parvenir à cartographier le processus général de gestion des changements avec un niveau de détail similaire à celui documenté au chapitre précédent pour les trois applications orientées métiers discutées, il serait nécessaire

d'identifier au niveau des caractéristiques et des contraintes l'ensemble du savoir-faire intervenant du processus, ce qui paraît constituer une tâche gigantesque.

Afin de caractériser de manière simple la cartographie, on peut recenser le nombre de liens qui y sont documentés. Dans la portion Gestion (Figure 78 et Figure 79), 29 associations éphémères et 20 associations de transport éphémères ont été identifiées.

En ce qui concerne la cartographie de la portion Documentation technique (Figure 80), il y a 32 associations éphémères et 7 associations de transport éphémères. Comme précédemment, plusieurs associations n'y sont pas identifiées en raison d'une connaissance incomplète du processus. Ainsi, à la Figure 80, sept caractéristiques cibles ne possèdent pas une source identifiées (chacune est associée à un point d'interrogation). Il peut avoir différentes raisons pour que la source ne soit pas identifiée. Premièrement, il est possible que la source soit à l'extérieur de ce qui a été englobé dans l'effort de documentation du processus de gestion des modifications. Deuxièmement, il est possible que la source soit une contribution relevant du savoir-faire d'un intervenant du processus.

La portion Documentation technique de la cartographie, contrairement à la portion Gestion, met en évidence des liens persistants qui génèrent les dessins d'installation à partir des modèles CAO. Les associations entre les modèles CAO et les dessins d'installation correspondent à une agrégation au niveau des associations (niveau B). Soulignons que pour un niveau d'abstraction plus faible, la décomposition nous mènerait à un nombre de liens de dérivation plus grand.

Le fait que nous ne sachions pas formaliser le savoir-faire n'augmente pas le nombre de liens; il ne fait que nous empêcher de décomposer des relations en liens (conformément au modèle). Si le niveau d'abstraction est élevé, le niveau de détail est moindre; x contraintes font place à un lien, n liens font places à une relation. Ainsi, lorsque le niveau d'abstraction augmente, le nombre d'associations à illustrer diminue. Cependant,

si le niveau d'abstraction est plus élevé, et la granularité des informations montrées est plus grossière, nous pouvons couvrir un domaine plus large; ici, le domaine est très large : on couvre tout le processus de gestion des changements. Toutefois, en raison de la logique de décomposition des relations en liens, et des liens en contraintes, le nombre et les types d'associations illustrées par la cartographie peut varier considérablement selon le niveau d'abstraction considéré.

La portion Documentation technique fait intervenir différents documents qui constituent des représentations du produit. Dans la cartographie, on retrouve vingt associations de transport éphémères dans la portion Gestion et seulement sept pour la portion Documentation technique. Le plus grand nombre d'associations éphémères de la portion Gestion, comparativement au nombre d'associations permanentes, s'explique par la nature du support "papier" du processus considéré, qui n'offre pas la possibilité de conserver les liens entre les caractéristiques associées. Par ailleurs, dans la portion Documentation technique, les associations permanentes permettent une certaine automatisation de la propagation des changements entre les documents numériques impliqués. Il y a quatre associations permanentes dans la portion documentation technique qui sont les quatre liens agrégés de génération entre le modèle CAO et le dessin d'installation.

Caractérisation des associations

Le troisième constat est que la cartographie met en lumière différents aspects des associations discutés au chapitre 2. Le premier de ces aspects est l'agrégation. À l'exception des associations de transport, la majorité des autres associations sont agrégées puisque le processus est représenté à un niveau élevé d'abstraction qui n'illustre pas les contraintes.

Un deuxième aspect illustré est la direction des associations. La majorité des associations contenues dans la cartographie sont directionnelles. Ceci est vrai parce que,

à un haut niveau d'abstraction, le processus est séquentiel. Par exemple, la caractéristique 'Reason for change' circule d'un document à l'autre dans la direction du flux du processus.

Un troisième aspect présent est la notion de portée de l'association. On retrouve les types suivants : inter-départements, inter-documents, inter-caractéristiques, intra-départements, intra-documents. La notion de portée contribue à établir la cartographie selon le niveau d'abstraction considéré.

Un quatrième aspect est que, s'il est vrai que la validation du modèle sur des cas unitaires concernait principalement des éléments géométriques, le processus complexe décrit ici concerne d'avantage des informations alphanumériques dont les concepts et le modèle générique proposés s'acquittent adéquatement.

Le potentiel d'automatisation

Le quatrième constat est que la portion Gestion possède certaines caractéristiques qui favorisent l'automatisation du processus de gestion des changements. Le premier élément est son caractère séquentiel. En effet, le processus est constitué d'une séquence prédéfinie d'étapes devant être respectée. Nous considérons que la nature formelle et directionnelle du processus peut faciliter l'automatisation. De plus, les documents nécessaires pour la réalisation de chacune des étapes donnent une bonne idée de l'information à saisir. Si on s'intéresse au contenu des informations dans les documents, on constate plusieurs choses. Premièrement, que l'information circule d'un document à l'autre dans la direction du flux du processus. Deuxièmement, la majorité des informations contenues dans les documents (à l'exception des sources inconnues) correspond à des informations dupliquées.

Le deuxième élément est que la portion Gestion, qui a pour rôle de traiter la demande de changement jusqu'à la portion Propagation du changement de Maurino [13] dans les

documents techniques, est capable de traiter de n'importe quelle modification. Elle possède donc un caractère général qui ouvre la piste à la construction d'un processus automatisé de gestion des modifications. Nous croyons que cette automatisation passe par le remplacement des liens éphémères par des liens persistants au sein d'un processus basé sur l'existence de documents numériques.

En ce qui concerne la portion Documentation technique, elle demeure difficile à automatiser parce que la propagation des modifications nécessite un traitement spécifique pour chaque type de modification. Par exemple, pour la propagation des changements dans les modèles CAO, chaque traitement spécifique exigerait une application orientée métier capable de générer et d'exploiter des liens persistants entre les caractéristiques impliquées afin de propager les modifications. Pour cela, chaque relation aujourd'hui gérée par un intervenant humain, selon un savoir-faire qu'il maîtrise, devrait être décomposée en liens et en contraintes au savoir-faire parfaitement maîtrisé par l'application, non seulement pour les éléments géométriques gérés en CAO, mais aussi pour les autres éléments d'information, ce qui semble être une entreprise colossale.

4.3.2 Synthèse relative à la cartographie

Une démarche prometteuse pour l'élaboration d'une cartographie d'un processus complexe repose sur la prise en compte d'un niveau d'abstraction adéquat, d'abord plus abstrait, ensuite plus détaillé au fur et à mesure que la compréhension du processus s'accroît.

Il n'est pas nécessaire de formaliser le savoir-faire pour établir une cartographie au niveau des relations et des documents. C'est ce qui est fait dans la portion Gestion. Par contre, si l'on souhaite décomposer les relations en liens, et les liens en contraintes, le travail de formalisation du savoir-faire devient considérable, mais cela n'est nécessaire

que dans une perspective d'automatisation complète, ce qui ont hors d'atteinte à court et moyen termes, et qui n'a pas, de toutes façons à être ciblé.

La réalisation de la cartographie a mis en lumière une notion qui n'avait pas été repérée lors de l'élaboration du modèle ni lors de sa validation sur les cas unitaires. En effet, en portant la réflexion à l'échelle d'un processus complexe comme celui de la gestion des modifications, nous constatons la nécessité d'un mécanisme permettant de contrôler le passage d'une étape à l'autre au moment opportun, par exemple lorsque toutes les approbations requises ont été obtenues. Nous ne sommes toutefois pas actuellement en mesure de préciser la forme que devrait prendre ce mécanisme par rapport au modèle proposé.

Dans l'état actuel du modèle et de la cartographie, l'on note que la majorité du processus repose sur des liens éphémères. Une avenue envisageable pour parvenir à la propagation automatique des modifications pourrait reposer sur la construction d'un réseau de liens persistants. Dans un tel cas, la solution, à long terme, repose sur la création d'une multitude d'applications orientées métier, ce qui constitue une entreprise de très grande envergure. À plus court terme, une automatisation partielle peut être envisagée de manière plus pragmatique, par la mise en œuvre de liens persistants au sein d'un processus reposant sur des documents numériques et une gestion électronique des flux de travaux.

CONCLUSION

En industrie, une large part du processus de gestion des modifications est assurée de façon manuelle. Le présent projet constitue un pas vers le développement d'un système automatique de gestion des changements. L'objectif principal de ce projet consistait à proposer une terminologie, des concepts et un modèle permettant d'organiser la vaste variété d'associations qui interviendraient dans un système automatique de propagation des modifications.

La revue de littérature a montré que plusieurs propositions ont été avancées relativement à la notion d'association. Afin de clarifier le vocabulaire utilisé par la littérature, nous avons proposé d'unifier la terminologie du domaine à l'aide des termes association, relation, lien et contrainte. L'association est le terme générique qui désigne la famille qui regroupe les termes relation, contrainte et lien. Une relation établit une dépendance abstraite entre deux éléments sans en formaliser le savoir-faire. Une relation peut être exploitée pour récupérer un objet associé à un autre afin de réaliser, dans un deuxième temps, un traitement au moyen d'un savoir-faire extérieur à cette relation. Un lien établit une dépendance entre deux éléments qui fait intervenir un savoir-faire formalisé pour réaliser une tâche donnée. Un lien peut être exploité pour réaliser une tâche directement au moyen du savoir-faire formalisé par ce lien. La contrainte décrit concrètement et précisément un type de dépendance entre deux entités. Elle est établie entre des entités de bas niveau (lignes, plans, etc.). Par exemple, une contrainte de parallélisme peut être appliquée entre deux droites. Une contrainte se situe donc au niveau des opérations à réaliser, alors qu'un lien se situe au niveau d'une tâche. Le niveau d'abstraction d'une contrainte est plus faible que celui d'un lien. Un lien constitue une agrégation organisée de contraintes. Par exemple, on peut se référer à l'application orientée métier de Giguère [1] qui utilise le lien de dérivation pour concevoir un voyage. Dans ce cas, le lien de dérivation est une agrégation de contraintes.

Nous avons également tenté de caractériser les associations et les objets reliés. Les concepts avancés nous ont mené à proposer un modèle générique pour les applications orientées métiers (GAPOM). Pour vérifier la pertinence du modèle en pratique, le modèle a été validé sur trois applications orientées métiers bien documentées. Les résultats sont clairs : le modèle fournit une approche viable permettant d'organiser les associations et les objets composant chacune de ces applications orientées métiers.

Afin de réfléchir à la validité des concepts et du modèle sur un processus d'une complexité supérieure à celle des trois applications orientées métiers considérées, une cartographie du processus de gestion des modifications de Bombardier Aéronautique a été réalisée. Pour y parvenir, le processus de gestion des modifications a d'abord été documenté. Ensuite, une cartographie des associations exploitées par ce processus a été esquissée. Une observation majeure relative à cette cartographie est qu'il devient rapidement difficile de représenter la totalité des associations exploitées par le processus dès que le niveau d'abstraction porte sur les liens entre les caractéristiques composant les documents, cela en raison de notre capacité limitée à maîtriser tous les savoir-faire impliqués. Cependant, la décomposition des relations en liens, et des liens en contraintes, proposée par le modèle constitue une démarche valable permettant d'appréhender graduellement des processus industriels complexes tel que celui de gestion des modifications, ce au moyen d'un nombre limité de types d'association.

RECOMMANDATIONS

Ce projet de maîtrise se veut un pas vers une solution qui permettrait de faire la gestion des modifications de façon automatique. Malgré les efforts consentis, il reste énormément de travail et de pistes à explorer avant de parvenir à prendre en charge les modifications depuis la requête de changement jusqu'à la propagation de la modification dans les documents techniques.

Voici les principales recommandations que nous pouvons formuler, suite à nos travaux :

- a. Lors de la réalisation de la cartographie du processus de gestion des modifications, nous avons observé la nécessité de doter le modèle d'un mécanisme de contrôle capable de gérer le passage d'une étape à l'autre, notamment lorsque toutes les approbations ont été obtenues. Nous ne sommes actuellement pas en mesure de prévoir de quelle façon ce mécanisme pourrait être intégré à un lien spécifique devant être établi entre les étapes du processus.
- b. La cartographie dressée pour le processus de gestion des modifications demeure assez sommaire et implique beaucoup de relations. Décomposer ces relations en liens requiert d'améliorer notre compréhension du processus considéré afin de le maîtriser davantage, ce qui demande un travail important.
- c. Suite à la réalisation d'une cartographie plus détaillée (à un niveau d'abstraction plus détaillé), il serait captivant de mener une analyse afin d'identifier et de dénombrer les associations impliquées. La connaissance de ces résultats favoriserait la compréhension de l'étendu du problème de gestion automatique des modifications.
- d. D'après le résultat actuel, on note que la majorité du processus est constitué de liens éphémères. Une solution pour parvenir à la propagation automatique des changements pourrait être de construire un réseau de liens persistants. La portion Gestion

du processus cartographié pourrait faire l'objet d'un tel exercice en remplaçant le support papier par un support numérique.

e. Le processus de gestion des modifications qui a été étudié ne concerne que les évolutions apportées à des données validées et libérées. La gestion des évolutions apportées à des données en cours de conception constitue une autre problématique à laquelle il serait intéressant de confronter le modèle proposé.

f. Le modèle GAPOM n'est pas fondamentalement orienté géométrie, mais les applications étudiées le sont. Il serait intéressant d'étudier avec autant de détails d'autres cas non géométriques.

ANNEXE 1

Définitions des documents officiels chez Bombardier Aéronautique

Drawing* : il est le dessin d'un composant unique ou d'un assemblage. Un drawing vient toujours avec une liste des composants et un EDRN.

Part List* : la Parts List contient la liste des composants d'une pièce (suppose un assemblage). De plus, il contient l'historique de l'évolution de chacun des composants de la pièce.

MODSUM (Modification summary) *** : le MODSUM est un document autorisant un changement. Il contient une description du changement et l'effectivité de la pièce (de tel numéro de série à tel numéro de série). De plus, il documente le passage d'une version de pièce à une autre version de pièce.

ECS (Engineering configuration statement) *** : le ECS est un document de production certifié qui permet à l'avion de voler. Il est nécessaire d'avoir un ECS pour chaque unité produite. L'ECS documente tous les changements effectués par rapport à la définition de l'avion (base line) (contient l'ensemble des MODSUMs). Ensuite, il est utilisé pour certifier l'avion.

EDRN (Engineering data release notice)** : le EDRN permet de décrire en détail le changement et de saisir la signature des responsables. La création d'un EDRN accompagne la libération d'un dessin.

EO (Engineering Order) *** : le EO est un document qui permet de décrire un changement de façon simplifiée comparativement au EDRN. Le EO décrit de façon textuelle le changement qui n'est alors pas représenté sur le dessin. On assigne le EO au dessin. Il est donc nécessaire de consulter les EO attachés à un dessin pour obtenir toute l'information s'y rattachant puisque le dessin ne représente plus à lui seul toute la réalité. Au maximum, cinq EO peuvent être attachés à un dessin.

NIEO (Non Incorporated Engineering Order) *** : le NIEO est un document qui permet de faire des changements temporaires.

* Documents *constituant un « Engineering Design Dataset »*

** Documents *décrivant le changement et constituant un « Engineering Design Dataset »*

*** Documents *décrivant le changement*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HOLDING, J. (2002). *Séminaire sur le Partage des données électroniques sur les produits : Solution client-fournisseur*: Institut des matériaux industriels du CRNC, Ministère de l'Industrie Québec.
- [2] Giguère, F. (2002). *Application des liens multi-modèles à la conception mécanique*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- [3] Michaud, M. (2004). *Méthodologie de modélisation unifiée pièce-outillage en cao aéronautique : application aux tôles et gabarits de découpe*. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal.
- [4] Giguère, F., Rivest, L., Desrochers, A., & Maranzana, R. (2001a). Les caractéristiques contextuelles : une solution pour accroître la productivité en CAO. *Revue Internationale de CFAO et d'Informatique Graphique*, 17(1-2), 105-117.
- [5] Burden, R. (2003). *PDM - Product Data Management*. Eau Claire, WI Resource Publishing.
- [6] LaCourse, D. (2004). PDM Manages MCAD Data. *Cadalyst*, 21(2), 28-31.
- [7] CIMdata. (2002). *PDM business appraisal guide*. Retrieved November, 2004, from www.CIMdata.com/homepage/articles/articlemisc.htm
- [8] Jacobs, T. M. (1998). *An automated framework for managing design complexity*. Thèse, University of Utah, Logan.
- [9] Eustache, J., Maranzana, R., Lanuel, Y., & Gardan, Y. *Product model evolution in a collaborative environment : Towards Handle on modifications propagations*. Mecatronics, 5e congrès Franco-Japonais, 3e congrès Europe-Asie, Besançon, France, 8-11 oct. 2001.
- [10] Eustache, J., Maranzana, R., Lanuel, Y., & Gardan, Y. (2001). *Managing complexity in a CAD environment*. Paper presented at the Change Management and the New Industrial Revolution (IEMC'01), Oct 7-9 2001, Albany, NY.

- [11] Eustache, J. (2002). *Contribution à une meilleure gestion de la cohérence des données du produit au cours de son cycle de vie*. Thèse, IFTS, Université de Reims-Champagne-Ardenne, Reims-Champagne-Ardenne.
- [12] Schuh, G., & Eversheim, W. (2004). Release-engineering - An approach to control rising system-complexity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1), 167-170.
- [13] Maurino, M. (1993). *La gestion des données techniques : technologie du concurrent engineering*. Paris: Masson.
- [14] De Kraker, K. J., Dohmen, M., & Bronsvort, W. F. (1995). *Multiple-way feature conversion to support concurrent engineering*. Paper presented at the Proceedings of the 3rd Symposium on Solid Modeling and Applications, May 17-19 1995, Salt Lake City, UT, USA.
- [15] De Kraker, K. J., Dohmen, M., & Bronsvort, W. F. (1997). *Maintaining multiple views in feature modeling*. Paper presented at the Proceedings of the 1997 4th Symposium on Solid Modeling and Applications, May 14-16 1997, Atlanta, GA, USA.
- [16] Mukherjee, A., & Liu, C. R. (1995). Representation of function-form relationship for the conceptual design of stamped metal parts. *Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering*, 7(4), 253-269.
- [17] Zimmermann, J. U., Haasis, S., & Van Houten, F. J. A. M. (2002). ULEO - Universal linking of engineering objects. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1), 99-102.
- [18] Yassine, A., Whitney, D., Daleiden, S., & Lavine, J. (2003). Connectivity maps : modeling and analysing relationships in product development processes. *Journal of Engineering Design*, 14(3), 377-394.
- [19] Lee, K., & Gossard, D. C. (1985). Hierarchical Data Structure For Representing Assemblies: Part 1. *Computer Aided Design*, 17(1), 15-19.
- [20] Shah, J. J., & Mäntylä, M. (1995). *Parametric and feature-based CAD/CAM : concepts, techniques, and applications*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.

- [21] Henderson, M. R., & Taylor, L. E. (1993). A Metal-Model for Mechanical Products Based Upon the Mechanical Design Process. *Research in Engineering Design*, (5), 140-160.
- [22] Mascle, C., Jabbour, T., & Maranzana, R. (1997). *Assembly features for mechanical product data*. Paper presented at the Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, ISATP'97, Aug 7-9 1997, Marina del Ray, CA, USA.
- [23] Fouda, P., Danloy, J., L'Eglise, T., De Lit, P., Rekiek, B., & Delchambre, A. (2001). *A heuristic to generate a precedence graph between components for a product family*. Paper presented at the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001), May 28-29 2001, Fukuoka.
- [24] Salomons, O. W., van Slooten, F., de Koning, G. W. F., van Houten, F. J. A. M., & Kals, H. J. J. (1994). Conceptual graphs in CAD. *CIRP Annals*, 43(1), 125-128.
- [25] Tan, J., & Zhang, Y. (2000). Self-organizing assembly modeling based on relational constraints. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (English Edition), 13(2), 145-152.
- [26] Giguère, F., Rivest, L., & Desrocher, A. (2001). *Improving design productivity and product data consistency - From Design Intent to Solid Models through Technological Links*. Proceeding of the International Conference on Feature Modeling and Advanced Design-For-The-Life-Cycle Systems (FEATS 2001), June 12-14, Valenciennes, France.
- [27] Maranzana, R., Rivest, L., & Chatelain, J-F. (2000). *Systèmes de CAO et ingénierie concourante : Les effets pervers*. Paper presented at the 3-5 Juillet 2000, Université d'été de recherche francophone, Ingénierie Simultanée et Concourante, ISC 2000, Saline Royale d'Arc et Senans (Doubs, France).
- [28] Macabies, L., Maranzana, R., Desrocher, A., & Rivest, L. (1999). *La gestion des composants d'attachement* (Rapport interne - Projet). Montréal: Bombardier/ETS/CRSNG.
- [29] Macabies, L., Desrochers, A., Rivest, L., & Maranzana, R. (2000). *Liens multi-modèles en CAO (Application au rivetage en aéronautique)*. Paper presented at the 3ième CONF. ON Integrated design and manufacturing in mechanical engineering (IDMME), May 16-19, Montreal, Canada.

- [30] Lee, K., & Andrews, G. (1985). Inference Of The Positions Of Components In An Assembly: Part 2. *Computer Aided Design*, 17(1), 20-24.
- [31] Ambler, A. P., & Popplestone, R. J. (1975). Inferring The Positions Of Bodies From Specified Spatial Relationships. *Artificial Intelligence*, 6(2), 157-174.
- [32] Shih, C.-H., & Anderson, B. (1997). *Design/constraint model to capture design intent*. Paper presented at the Proceedings of the 1997 4th Symposium on Solid Modeling and Applications, May 14-16 1997, Atlanta, GA, USA.
- [33] Mortenson, M. E. (1985). *Geometric modeling*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.
- [34] Laakko, T., & Mantyla, M. (1996). *Incremental constraint modelling in a feature modelling system*. Computer Graphics Forum Proceedings of the 1996 17th Annual Conference and Exhibition of the European Association for Computer Graphics, EUROGRAPHICS'96, Aug. 26-30 1996, 15(3), 367-376.
- [35] Bowland, N. W., Gao, J. X., & Sharma, R. (2003). A PDM- and CAD-integrated assembly modelling environment for manufacturing planning. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1-3), 82-88.
- [36] Rosenman, M. A., & Gero, J. S. (1996). Modelling multiple views of design objects in a collaborative CAD environment. *Computer Aided Design*, 28(3), 193-205.
- [37] Mokhtar, A., Bedard, C., & Fazio, P. (1998). Information model for managing design changes in a collaborative environment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(2), 82-92.
- [38] Mokhtar, A., Bedard, C., & Fazio, P. (2000). Collaborative planning and scheduling of interrelated design changes. *Journal of Architectural Engineering*, 6(2), 66-75.
- [39] Soh, C.-K., & Wang, Z. (2000). Parametric coordinator for engineering design. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(4), 233-240.
- [40] Wang, Z., & Soh, C. K. (2001). Managing design changes for multiview models. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(2), 102-111.

- [41] Randoing, J.-M. (1995). *Les SGDT*. Hermès, Paris.
- [42] Dassault_systems. (2004). Part Design - Glossary.
- [43] Dassault_systems. (2004). Knowlegde Advisor - Glossary.
- [44] Dassault_systems. (2004). CATIA-CADAM Interface - Glossary.
- [45] Dassault_systems. (2004). Assembly design - Glossary.
- [46] Dassault_systems. (2004). Assembly constraints.
- [47] Dassault_systems. (2004). Assembly design - Assembly feature.
- [48] Dassault_systems. (2004). Assembly design - Assembly hole.
- [49] Dassault_systems. (2004). Assembly design - Assembly split.
- [50] Dassault_systems. (2004). *PLM glossary*. Retrieved Décembre, 2004, from <http://www.3ds.com/plm-glossary>
- [51] McMahon, C., & Browne, J. (1998). *CAD CAM Principles, practice and manufacturing management*. Harlow: Addison Wesley.
- [52] Dassault_systems. (2004). Publishing elements.
- [53] Dassault_systems. (2004). To know more about User Features.
- [54] Dassault_systems. (2004). Creating PowerCopy about User Features.
- [55] Solid_Edge. (2004). Glossary.
- [56] Robert, P., Rey, A., & Rey-Debove, J. (2003). *Le nouveau petit Robert*. Paris Dictionnaires Le Robert, 1993.
- [57] Larousse. (2004). *Le Petit Larousse illustré*. Paris, Larousse, 2004.

- [58] Mantyla, M., Lagus, K., & Laakko, T. (1994). Application of constraint propagation in part family modelling. *CIRP Annals*, 43(1), 129-132.
- [59] Tremblay, T. G., Rivest, L., Lamarche, L., Maranzana, R. (2005). *Vers une application généralisée du concept de lien technologique en développement de produits : Terminologie des associations*. Paper presented at the MICAD 2005, Paris.
- [60] Tremblay, T. G., & Rivest, L. (2005). *Le processus de gestion des modifications expliqué et illustré par deux scénarios réalistes*. Montréal : École de technologie supérieure.
- [61] Aero Technical Institute (1958). *Aircraft drafting and detail design*, Los Angeles, Calif. Aero Technical Institute, section 2080, figure 4.
- [62] Bombardier Aerospace (1998). *Change Management*. Montreal.
- [63] Bombardier Aerospace (1998). *Integrated Product Development Team (concurrent Engineering)*. Montreal.
- [64] Bombardier Aerospace (2000). *BES Supplier and Partner Guidelines*. Montreal.
- [65] Bombardier Aerospace (2001). *C2 Deliverable D5 Process Owner Acceptance & Sign-off*. Montreal.
- [66] Bombardier Aerospace (2002). *Understanding BES Process MAPS*. Montreal.
- [67] Bombardier Aerospace (2003). *BES Change Procedure*. Montreal.
- [68] Bombardier Aerospace (2003). *Management of Change authorities in a PDM System*. Montreal.
- [69] Bombardier Aerospace (2003). *Managing an Electronic Change Package - Scenario for a PDM System*. Montreal.
- [70] Bombardier Aerospace (2003). *Differentiate Bombardier Aerospace with a competitive advantage by bringing together product development, operations and customer support processes utilizing SAP and CATIA/ENOVIA*. Montreal.
- [71] Bombardier Aerospace (2003). *Engineering ERP - JDP Result*. Montreal.

- [72] Bombardier Aerospace (2004). *BES Definitions*. Montreal.
- [73] ANSI/EIA-649-1998. (1998). *National Consensus Standard for Configuration Management*, American National Standards Institute/Electronic Industries Alliance.
- [74] ASME-Y14-35M-1997. (1997). *Revision of engineering drawing and associated documents*, Society of Mechanical Engineers.
- [75] F. Giguere, L. Rivest and A. Desrochers, 2002, *Improving design productivity and product data consistency*, Feature Based Product Life-Cycle Modelling, René Soenen and Gustav J. Olling, ed., November 2002, Hardbound, Kluwer Academic Publisher, pp.77-91.