



Intégration des savoir-faire métier produit-process pour une amélioration de la productivité en développement de produits de style

Jean-Bernard Bluntzer

► To cite this version:

Jean-Bernard Bluntzer. Intégration des savoir-faire métier produit-process pour une amélioration de la productivité en développement de produits de style. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009. Français. NNT : 2009BELF0120 . tel-00603633

HAL Id: tel-00603633

<https://theses.hal.science/tel-00603633>

Submitted on 1 Oct 2011

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

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

Université de Technologie de Belfort - Montbéliard
Université de Franche Comté

Ecole doctorale n°37 : Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

THESE
pour obtenir le
GRADE de DOCTEUR

Spécialité : Sciences pour l'Ingénieur (Génie Mécanique)

**Intégration des savoir-faire métier produit-process pour une amélioration
de la productivité en développement de produits de style**

par :

Jean-Bernard BLUNTZER

Présentée et soutenue publiquement le 20 novembre 2009 devant le jury composé de :

| | | |
|--------------|--|-----------------------|
| A. AOUSSAT | Professeur, Arts et Métiers ParisTech, Paris | Examineur |
| E. CAILLAUD | Professeur, ULP, Strasbourg | Président, Rapporteur |
| S. GOMES | Professeur, UTBM, Belfort | Co-directeur de thèse |
| E. PINARD | Responsable R&D, FAURECIA XSPG ETD, Audincourt | Invité |
| L. ROUCOULES | Professeur, Arts et Métiers ParisTech, Aix-en-Provence | Rapporteur |
| J.C. SAGOT | Professeur, UTBM, Belfort | Directeur de thèse |

Rapport préparé au sein du laboratoire Systèmes et Transports (SeT – E.A. 3317)
dans l'équipe "ERgonomie et COncption des Systèmes" de l'Université de
Technologie de Belfort-Montbéliard

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord à remercier les professeurs Emmanuel Caillaud de l'ULP (Strasbourg) et Lionel Roucoules de l'ENSAM (Aix en Provence) qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de mon travail de thèse.

Je suis reconnaissant au professeur Ameziane Aoussat de l'ENSAM (Paris) pour son implication dans l'évaluation de mon travail en tant que membre du jury.

Je souhaite également exprimer mes profonds remerciements à Jean-Claude Sagot qui a encadré ces travaux de recherche, pour son soutien et sa confiance ainsi qu'à Samuel Gomes, codirecteur de cette thèse, pour m'avoir encouragé à initier ces travaux et pour ses nombreux conseils avisés.

Un grand merci à Eric Pinard et Pascal Renoit pour avoir été à l'initiative de ce projet au sein de Faurecia, pour leur encadrement ainsi que pour les très bonnes conditions de travail qu'ils m'ont offertes.

Je suis sensible à l'accueil qui m'a été réservé par les équipes Faurecia au lancement du projet et durant toute sa durée.

Merci à Claude Grangirard et Béatrice Jaskulski pour leur collaboration active à mes travaux de thèse.

J'ai aussi une pensée toute particulière pour Patrice Zanchetta qui m'a conseillé et orienté à chaque fois qu'il le pouvait.

J'apprécie également à sa juste valeur l'accueil qui m'a été réservé par mes collègues du bureau d'études : Christian, Christophe, David, Didier, Dominique, Frédéric, Hervé, Jean-Marc, les Jérôme, Julien, Laurent, les Michel, les Stéphane, Thierry et Xavier.

Je tiens aussi à remercier mes différents stagiaires et apprentis qui ont participé à ce projet : Anthony, Dorian, Gaël, Gang, Romain et Yves.

Je remercie chaleureusement Mary et Didier pour leur sympathie et leur philosophie. Ils ont su me faire évoluer.

Je suis tout particulièrement reconnaissant du temps que Sébastien Chevriau du laboratoire SeT de l'équipe ERCOS m'a consacré tout au long de ces trois années. Son aide m'a été très précieuse et m'a permis de mener à bien ces travaux.

J'associe également à ces remerciement tous les membres des équipes de recherche et pédagogique de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard ainsi que tous les élèves ingénieurs qui ont pu être impliqués de près ou de loin à ces travaux.

Je tiens à remercier également Sylvie pour tous ses conseils professionnels et personnels ainsi que pour sa fidèle amitié.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à Brigitte, Baudoin, Granilou et Lucien pour leurs encouragements, pour avoir su me guider dans mes choix et pour leur amitié sincère.

Un grand merci à Bernard, mon père, pour qui je n'ai pas de mots pour exprimer mon immense gratitude. Aucune phrase ne serait suffisante pour exprimer mes sentiments à son égard.

Un grand merci également à Lili qui m'a encouragé et supporté pendant toutes ces années comme son propre fils.

Et enfin, un merci infini à Flo qui à tous moments, qu'ils aient été difficiles ou non, a su me guider, m'aider, répondre à mes inquiétudes ou encore simplement me rassurer. Il faudrait autant de pages qu'il y a de lignes dans ce document pour exprimer tous les sentiments que je ressens. Et encore, ce nombre de pages ne suffirait certainement pas.

A Annick

"Toutes les choses de la vie qui ont existé une fois tendent à se recréer."
Marcel Proust, A la recherche du temps perdu

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| CHAPITRE 1 : CONTEXTE INDUSTRIEL ET CADRE DE RECHERCHE | 7 |
| 1.1 CADRE DU TRAVAIL DE RECHERCHE | 7 |
| 1.1.1 <i>La société partenaire : FAURECIA</i> | 7 |
| 1.1.2 <i>Le laboratoire d'accueil : le SeT de l'UTBM</i> | 10 |
| 1.2 LE PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT DANS LE CENTRE DE R&D | 10 |
| 1.2.1 <i>Cycle de vie d'un véhicule automobile</i> | 11 |
| 1.2.2 <i>L'activité de conception d'un produit de style</i> | 12 |
| 1.2.3 <i>Délimitation de notre champ d'investigation</i> | 13 |
| 1.2.4 <i>Le positionnement de nos travaux : le besoin initial de FAURECIA</i> | 16 |
| 1.3 CONCLUSION | 17 |
| CHAPITRE 2 : D'UNE CONCEPTION TRADITIONNELLE A UNE INGENIERIE FONCTIONNELLE A BASE DE CONNAISSANCES | 19 |
| 2.1 LE PROCESSUS DE CONCEPTION : UNE APPROCHE MULTI-METIERS COMPLEXE ET COLLABORATIVE | 20 |
| 2.1.1 <i>Les modèles de conception</i> | 20 |
| 2.1.2 <i>Principes proposés en conception collaborative</i> | 24 |
| 2.1.3 <i>Les modèles de structuration de données en conception de produits</i> | 28 |
| 2.1.4 <i>Les outils de conception intégrée et collaborative</i> | 30 |
| 2.2 APPLICATION DE L'INGENIERIE DES CONNAISSANCES DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION | 33 |
| 2.2.1 <i>Les modèles de connaissances</i> | 34 |
| 2.2.2 <i>Exploitation des connaissances en conception</i> | 36 |
| 2.2.3 <i>Les méthodes et outils d'ingénierie des connaissances existants</i> | 43 |
| 2.3 VERS UNE CONCEPTION FONCTIONNELLE DE PRODUITS | 45 |
| 2.3.1 <i>Les modèles de conception fonctionnelle</i> | 45 |
| 2.3.2 <i>Les outils de conception fonctionnelle</i> | 46 |
| 2.4 LES SYSTEMES D'AIDE A LA CONCEPTION | 49 |
| 2.4.1 <i>La conception assistée par ordinateur</i> | 49 |
| 2.4.2 <i>Typologie des modèles numériques</i> | 52 |
| 2.4.3 <i>Les méthodologies de modélisation</i> | 55 |
| 2.5 PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES DE RECHERCHE | 57 |
| 2.5.1 <i>Problématique de recherche</i> | 57 |
| 2.5.2 <i>Enoncé des hypothèses</i> | 58 |
| 2.6 CONCLUSION | 59 |

CHAPITRE 3 : OBSERVATIONS ACADEMIQUES, VERS UNE PROPOSITION DE METHODES ET MODELES 61

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | EXPERIMENTATION : CONCEPTION DANS UN CONTEXTE ACADEMIQUE D'UN VEHICULE DE COMPETITION DESTINE AU CHALLENGE SIA | 61 |
| 3.1.1 | <i>Présentation du modèle collaboratif appliqué</i> | 63 |
| 3.1.2 | <i>Application du modèle présenté</i> | 64 |
| 3.1.3 | <i>Résultats de l'expérimentation</i> | 69 |
| 3.1.4 | <i>Limites de la méthodologie</i> | 71 |
| 3.2 | FONDEMENTAUX DE L'APPROCHE PROPOSEE : DU CdCF A LA GEOMETRIE DU MODELE NUMERIQUE..... | 72 |
| 3.2.1 | <i>Typologie des paramètres et des règles</i> | 73 |
| 3.2.2 | <i>Etape 1 : Le cahier des charges fonctionnel, la fondation du modèle</i> | 75 |
| 3.2.3 | <i>Etape 2 : L'architecture produit, du besoin fonctionnel aux différents principes de solution</i> | 78 |
| 3.2.4 | <i>Etape 3 : Propagation des paramètres spécifiques</i> | 79 |
| 3.3 | EXTRACTION ET VALIDATION DES CONNAISSANCES METIER | 79 |
| 3.3.1 | <i>Principes d'extraction des connaissances métier retenues</i> | 80 |
| 3.3.2 | <i>Processus de validation des connaissances métier retenues</i> | 81 |
| 3.4 | STRUCTURATION DES DEFINITIONS NUMERIQUES..... | 84 |
| 3.4.1 | <i>Méthodologie de modélisation collaborative multi-sites</i> | 84 |
| 3.4.2 | <i>Décomposition orientée métier de la définition numérique de la pièce géométrique</i> | 87 |
| 3.4.3 | <i>Intégration et exploitation des connaissances métier dans la définition numérique du produit</i> | 96 |
| 3.5 | SYSTEME D'INFORMATION ET METHODOLOGIE PROPOSEES | 102 |
| 3.6 | DISCUSSION..... | 104 |

CHAPITRE 4 : MISE A L'EPREUVE DE L'OUTIL DE RECHERCHE DEVELOPPE EN MILIEU INDUSTRIEL 107

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | INTEGRATION DES OUTILS DANS UNE VISION COLLABORATIVE | 108 |
| 4.1.1 | <i>Outil expérimental d'ingénierie collaborative : ACSP</i> | 108 |
| 4.1.2 | <i>Outils dédiés à la conception paramétrique</i> | 116 |
| 4.1.3 | <i>Génération des architectures produits</i> | 118 |
| 4.2 | APPROCHE EXPERIMENTALE | 124 |
| 4.2.1 | <i>Expérimentation industrielle des concepts proposés à travers le développement d'une interface technique pour véhicules automobiles</i> | 125 |
| 4.2.2 | <i>Expérimentation complémentaire : intégration des principes de solution et application à un support capteur</i> | 131 |
| 4.3 | VERS UN PARADIGME D'AIDE A LA DECISION FONDE SUR LES CAS PRECEDENTS..... | 140 |
| 4.4 | PROPOSITION D'UN NOUVEAU MODELE METHODOLOGIQUE..... | 141 |
| 4.4.1 | <i>Présentation du modèle méthodologique fondé sur du CBR</i> | 141 |
| 4.4.2 | <i>Notre modèle de représentation des connaissances</i> | 143 |
| 4.4.3 | <i>Notre méthode de recherche</i> | 145 |
| 4.4.4 | <i>La méthode de réutilisation proposée</i> | 146 |
| 4.4.5 | <i>La méthode de révision proposée</i> | 147 |
| 4.4.6 | <i>Notre méthode de capitalisation</i> | 147 |
| 4.5 | DISCUSSION..... | 150 |

| | |
|--|--|
| CHAPITRE 5 : VALIDATION DU MODELE FGBR AU CONTEXTE INDUSTRIEL | |
| AUTOMOBILE FAURECIA | 154 |
| 5.1 | 3 ^{EME} EXPERIMENTATION : APPLICATION INDUSTRIELLE DU MODELE FGBR A UNE GAMME DE PARE-CHOCS DE VEHICULES..... 154 |
| 5.2 | 1 ^{ERE} ETAPE EXPERIMENTALE : CONCEPTION DU PC1 : 155 |
| 5.2.1 | <i>Etape 1 : Définition du besoin..... 155</i> |
| 5.2.2 | <i>Etape 2 : Génération des ressources géométriques 156</i> |
| 5.2.3 | <i>Etape 3 : Définition de l'architecture produit..... 156</i> |
| 5.2.4 | <i>Etape 4 : Génération des ressources géométriques 157</i> |
| 5.2.5 | <i>Etape 5 : Modélisation tridimensionnelle..... 157</i> |
| 5.2.6 | <i>Etape 6 : Modification du modèle numérique 158</i> |
| 5.2.7 | <i>Etape 7 : Validation du modèle numérique 158</i> |
| 5.2.8 | <i>Etape 8 : Exploitation du modèle numérique pour capitalisation 159</i> |
| 5.3 | 2 ^{ERE} ETAPE EXPERIMENTALE : CONCEPTION PC2 : 159 |
| 5.3.1 | <i>Etape 1 : Définition du besoin..... 159</i> |
| 5.3.2 | <i>Etape 2 : Recherche des If candidates 160</i> |
| 5.3.3 | <i>Etape 3 : Définition de l'architecture produit..... 160</i> |
| 5.3.4 | <i>Etape 4 : Génération des ressources géométriques 162</i> |
| 5.3.5 | <i>Etape 5 : Modélisation tridimensionnelle..... 162</i> |
| 5.3.6 | <i>Etape 6 : Modification du modèle numérique 162</i> |
| 5.3.7 | <i>Etape 7 : Validation du modèle numérique 162</i> |
| 5.3.8 | <i>Etape 8 : Exploitation du modèle numérique pour capitalisation 163</i> |
| 5.4 | RESULTATS ET BILAN DE L'EXPERIMENTATION 163 |
| 5.5 | DISCUSSION..... 164 |
| DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE..... | 166 |
| BIBLIOGRAPHIE | 174 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Avant véhicule présentant des pièces d'aspects et des pièces techniques | 9 |
| Figure 2 : Cycle de vie d'un véhicule automobile chez PSA Peugeot Citroën d'après PSA [2009] | 11 |
| Figure 3 : Processus de conception simplifié d'un produit de style..... | 12 |
| Figure 4 : Représentation d'un produit par activité de conception | 13 |
| Figure 5: Graphiques représentant les interactions Conception - Innovation | 17 |
| Figure 6 : Modèle de conception issu des travaux du laboratoire SeT | 22 |
| Figure 7 : Description d'un processus de conception et de fabrication d'un produit selon Zeid [1991] | 23 |
| Figure 8 : Illustration des quatre modes de coopération et les communications respectives en accord avec Tarpin-Bernard et David [1996] | 25 |
| Figure 9 : Exemple d'organisation d'une société en Back Office et Front Office en accord avec Safizadeh et al. [2003] | 27 |
| Figure 10 : Modèle de données systémique "Multi-Domaines et Multi-Vues" (MD-MV) en accord avec Gomes et Sagot [2002]..... | 29 |
| Figure 11 : Définition des sept éléments clés du PLM selon Schuh et al. [2008] | 32 |
| Figure 12 : Cycle de vie de la connaissance inspiré de Millard et al. [2006]..... | 36 |
| Figure 13 : Architecture d'un système expert en accord avec Karkan et Tjoen [1993]..... | 37 |
| Figure 14 : Ontologie simple pour des descripteurs de pare-chocs (relation "sorte-de")..... | 39 |
| Figure 15 : Cycle de raisonnement à partir de cas (CBR) selon Aamodt et Plaza [1994] | 42 |
| Figure 16 : Représentation d'une conception en Axiomatic Design selon Suh [1990] | 46 |
| Figure 17 : Structure d'un diagramme FAST selon Brissard et al. [2003]..... | 48 |
| Figure 18 : Processus de création d'un volume dans un modèleur géométrique. | 53 |
| Figure 19 : Représentation de processus de création de rayons..... | 56 |
| Figure 20 : Exemple de réducteur coaxial à courroie crantée..... | 62 |
| Figure 21 : Modèle méthodologique appliqué au cours du projet SIA | 63 |
| Figure 22 : Exemple d'AFE du réducteur pour la situation de vie Utilisation | 64 |
| Figure 23 : Proposition du panel des architectures produit disponibles..... | 65 |
| Figure 24 : Architecture choisie | 66 |
| Figure 25 : Extrait d'une conversion Excel – Script CAO pour un paramètre diamètre | 67 |
| Figure 26 : Interface de génération du palier | 68 |
| Figure 27 : Représentation tridimensionnelle du concept généré..... | 69 |
| Figure 28 : Comparatif de la première et de la seconde modélisation | 70 |
| Figure 29 : Méthodologie de couplage CdCF - Géométrie | 72 |
| Figure 30 : Produit Carrosserie du véhicule de compétition du challenge SIA | 73 |
| Figure 31 : Extrait de l'analyse fonctionnelle externe du produit et la matrice correspondante (Matrice R-Fu) | 76 |

| | |
|--|-----|
| Figure 32 : Extrait de l'analyse fonctionnelle interne du produit et la matrice correspondante (Matrice Fu-P) | 77 |
| Figure 33 : Extrait du diagramme des solutions du produit et la matrice correspondante (Matrice P-T) | 78 |
| Figure 34 : Représentation vectorielle des paramètres spécifiques et fonctionnels. | 79 |
| Figure 35 : Cycle d'extraction d'une règle métier. | 80 |
| Figure 36 : Logigramme représentant le processus de validation des règles métier..... | 81 |
| Figure 37 : Flux des informations dans le processus de conception et de développement de produits mécaniques | 85 |
| Figure 38 : Exemple de décomposition du produit "véhicule de compétition" | 89 |
| Figure 39 : Exemple simplifié de modélisation avec entrée/sortie | 90 |
| Figure 40 : Dichotomie de la pièce rotule en interface fonctionnelle et zone fonctionnelle | 91 |
| Figure 41 : G_i représentant les zones et les interfaces fonctionnelles composant la rotule ... | 93 |
| Figure 42 : Equations de la rotule..... | 94 |
| Figure 43 : Représentations théorique et pratique de l'architecture produit | 94 |
| Figure 44 : Réseau sémantique de l'architecture système utilisant la représentation UML ... | 95 |
| Figure 45 : Exemple d'un modèle générique issu du véhicule de compétition du challenge SIA et ses paramètres figés remplissant une fonction standard | 97 |
| Figure 46 : Modèle générique remplissant une fonction adaptative..... | 97 |
| Figure 47 : Modèle générique remplissant une fonction de contrôle et de correction. | 98 |
| Figure 48 : Cycle de vie d'un modèle générique | 99 |
| Figure 49 : Exemple simplifié de système entrée-génération d'un modèle générique | 100 |
| Figure 50 : Evolution du modèle méthodologique | 103 |
| Figure 51 : Architecture client serveur via Internet mise en œuvre pour l'ACSP d'après Gomes [2008] | 109 |
| Figure 52 : Extrait du graphe UML relatif au "domaine du projet" d'après GOMES [2008] .. | 110 |
| Figure 53 : Extrait du graphe UML relatif au "domaine du produit" d'après GOMES [2008] | 111 |
| Figure 54 : Interface associée au domaine de "Conception du projet" du véhicule de compétition SIA d'après Gomes [2008]..... | 114 |
| Figure 55 : Interface associée au domaine de "Conception du produit" du véhicule de compétition SIA | 115 |
| Figure 56 : Présentation du modèle géométrique vis paramétrée et réglée par désignation | 118 |
| Figure 57 : Principe méthodologique de migration des données du PLM vers la CAO | 119 |
| Figure 58 : Extrait d'un fichier XML représentant un produit et une pièce | 120 |
| Figure 59 : Extrait d'un fichier XML représentant un paramètre fonctionnel | 120 |
| Figure 60 : Fonctionnement du prototype de migration..... | 121 |
| Figure 61 : Commande Cv5 permettant de créer un produit ou sous-produit..... | 122 |
| Figure 62 : Commande Cv5 permettant de créer un paramètre | 122 |
| Figure 63 : Interface de récupération du script sous l'ACSP | 123 |
| Figure 64 : Exemple d'architecture produit et pièce dans le modeleur après déclenchement du Script Cv5 depuis le PLM ACSP | 124 |
| Figure 65 : Section du produit expérimenté représentant la pièce étudiée ainsi que son environnement direct..... | 125 |
| Figure 66 : Représentation de la situation de vie "Assemblage" de notre produit | 126 |
| Figure 67 : Extrait de l'architecture produit paramétrée au sein du PLM ACSP | 127 |
| Figure 68 : Extrait de l'architecture produit paramétrée au sein du modeleur géométrique . | 128 |

| | |
|---|-----|
| Figure 69 : Représentation de l'environnement du support antibrouillard ainsi que l'extraction de ces éléments de référence..... | 129 |
| Figure 70 : Représentation de support antibrouillard implémenté au sein de son nouvel environnement. | 130 |
| Figure 71 : Environnement de l'interface support capteur | 131 |
| Figure 72 : Diagramme FAST de la fonction technique "Interfacer la peau de PC avec le Capteur". | 132 |
| Figure 73 : Exemple de types d'architecture d'assemblage..... | 133 |
| Figure 74 : Exemple de l'architecture produit et de la bibliothèque de modèles génériques dans Cv5. | 135 |
| Figure 75 : Résultat graphique des deux supports générés dans les deux configurations... | 136 |
| Figure 76 : Extrait de l'indicateur de suivi pour le mois d'avril 2007. | 138 |
| Figure 77 : Statistique de suivi des utilisations des modèles génériques pour la période septembre 2007 à septembre 2008 au sein du bureau d'études ETD. | 139 |
| Figure 78 : Modèle méthodologique appelé FGBR fondé sur le paradigme de raisonnement à partir de cas et s'appuyant sur les travaux de Aamodt et Plaza [1994]..... | 142 |
| Figure 79 : Exemple de deux K_f mettant en lien le concepteur, le besoin et la géométrie fonctionnelle | 144 |
| Figure 80 : Modèle du FAST incluant les Géométries Fonctionnelles | 145 |
| Figure 81 : Processus de capitalisation de K_f | 147 |
| Figure 82 : Maquette de l'interface utilisateur pour le processus de Check-In | 148 |
| Figure 83 : Structure des fichiers avant et après le script de traitement. | 149 |
| Figure 84 : Maquette de l'interface utilisateur de l'ACSP pour le processus de téléchargement. | 149 |
| Figure 85 : Plans de forme du PC 1 et du PC 2 correspondants aux surfaces (plan de forme) fournies par le style | 155 |
| Figure 86 : Vue éclatée du produit PC 1 composé de 12 pièces une fois le travail réalisé .. | 156 |
| Figure 87 : Représentation de l'architecture produit générée au sein du modèleur géométrique ainsi qu'une pièce | 157 |
| Figure 88 : Représentation du principe de solution clippage et de ses révisions issu d'un système de fixation d'anti-brouillard. | 158 |
| Figure 89 : Arbre FAST correspondant à la fonction technique 1 de la peau de pare-chocs | 161 |
| Figure 90 : Modèle de données systémique "Multi-Domains et Multi-Vues" (MD-MV) en accord avec Gomes et Sagot [2002]..... | 171 |

Liste des tableaux :

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Typologie des innovations selon Markides et Geroski [2004]..... | 15 |
| Tableau 2 : Exemples de primitives simples ou à contour | 54 |
| Tableau 3 : Les trois opérateurs booléens fondamentaux utilisés en CAO | 56 |
| Tableau 4 : Exemple de paramètres issus du Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF) | 64 |
| Tableau 5 : Paramètres et règles pilotant l'architecture produit poulie / courroie | 66 |
| Tableau 6 : Comparaison des temps de conception dans le cadre de l'expérimentation conduite | 70 |
| Tableau 7 : Exemple de paramètres issus du Cahier des Charges Fonctionnel | 76 |
| Tableau 8 : Liste exhaustive des experts métier en plasturgie | 83 |
| Tableau 9 : Liste exhaustive des acteurs intervenant dans le processus de conception | 85 |
| Tableau 10 : Table dimensionnelle pour le solide de la vis..... | 117 |
| Tableau 11 : Alternatives de conception fondées sur le FAST | 146 |
| Tableau 12 : Comparatif des temps de modélisation des modèles des deux produits pare- chocs | 163 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les industriels sont aujourd'hui confrontés à une concurrence accrue, ce qui les pousse à renouveler sans cesse leurs produits et à proposer des coûts toujours plus compétitifs. Actuellement le processus de conception est souvent rationalisé [Suh, 1999] [McMahon et al., 2002] au détriment de la constitution d'un capital de connaissances, d'un échange de savoir-faire et d'un partage du patrimoine technologique de l'entreprise. Dans ce contexte, la dynamique des connaissances industrielles est ainsi complexe et difficilement maîtrisable.

Les objectifs de performance fixés par les donneurs d'ordre en termes de Qualité-Coûts-Délais étant toujours plus exigeants, en raison de la montée en puissance d'une concurrence en provenance de pays à bas coûts, on peut ainsi constater au sein de la filière automobile, en accord avec Moatti [2008], une baisse de compétitivité des sous-traitants français. De plus, ces derniers doivent également s'adapter à une nouvelle dynamique de marché qui se caractérise par une hyper-segmentation couplée à la baisse des volumes de chaque série de produits. Tous ces facteurs engendrent une diminution de leurs marges opérationnelles.

Par ailleurs, et en accord avec la littérature, tout pousse à penser que le processus d'ingénierie qualifié de "reconception" [Pahl et Beitz, 1992] représente dans les bureaux d'études environ 80% du temps, les 20% du temps restant étant dédiés à l'innovation [Prasad, 1996], processus hautement stratégique pour assurer la pérennité de l'entreprise. En effet, la conception de produits nouveaux est au cœur des problématiques industrielles, dans la mesure où les entreprises qui innover réalisent, en moyenne, environ 80% de leurs bénéfices à partir de produits ayant moins de 3 ans. Le renouvellement continu de leurs gammes de produits et l'innovation deviennent indispensables.

Cependant, pour ces industriels tiraillés entre l'efficacité des routines d'ingénierie métier formalisées et les évolutions nécessaires des processus projet porteurs d'innovation, il n'est pas simple de combiner ingénierie standardisée et ingénierie innovante au sein des services de Recherche et de Développement [Bluntzer et al., 2006]. Pour ce faire, les différents acteurs impliqués dans ces services, par exemple les concepteurs, sont aujourd'hui aidés par différents outils, qu'ils soient méthodologiques ou informatiques. Nous pouvons, par exemple, citer l'avènement de la conception fonctionnelle qui a permis aux différents acteurs d'appréhender un problème de conception de produits dans son ensemble et non plus seulement de son unique point de vue. Ce nouveau type de conception a engendré de nouvelles interactions entre les différents acteurs générant ainsi des nouvelles collaborations et créant un nouveau domaine de compétences et de recherches qu'est l'ingénierie collaborative. En parallèle de ces évolutions méthodologiques, les technologies numériques (par exemple Internet) ont subi un développement fulgurant. En effet, les concepteurs sont

ainsi rapidement passés de l'approche planche à dessin – stylo technique à l'approche numérique, en utilisant, en particulier, la conception assistée par ordinateur (CAO) leur permettant ainsi de concevoir interactivement et en trois dimensions leurs nouvelles conceptions. De plus, ces nouveaux systèmes d'information permettent aux différents acteurs de capitaliser les différentes informations qu'ils ont établies au cours de leurs projets, et pouvoir ainsi à nouveau les exploiter par la suite.

Dans ce contexte, il est possible d'identifier une nouvelle problématique de recherche entrant dans le cadre de la conception géométrique et fonctionnelle en lien avec les connaissances métier mises en jeu dans les projets de conception de produits. Dans le cadre de notre travail de recherche, nous nous intéressons ainsi à la problématique d'ingénierie collaborative en entreprise étendue [Sohlenius, 1992] et à l'intégration des connaissances métier (études, calcul, fabrication...) en conception. Ce qui entre dans la problématique de Conception Assurée par les Connaissances du couple Produit-Process en accord avec les travaux de Eynard et Gomes [2004].

Cette problématique du management des connaissances implique de façon inéluctable la prise en compte du facteur humain. En effet, la mise en œuvre d'une démarche de partage des informations et des connaissances induit des freins psychosociologiques, que notre équipe a pu mettre en évidence [Fall et al., 2003] [Gronier et Sagot, 2009], liés aux changements technologique et organisationnel au sein de l'entreprise.

Un des intérêts de cette problématique de recherche est de définir des méthodologies et des outils permettant de capitaliser les connaissances et les règles métier de l'entreprise sous forme de guides de conception pouvant formaliser le savoir-faire d'une industrie. L'étape suivante de réutilisation consiste à développer des méthodologies de conception et d'optimisation numérique [Bluntzer et al., 2008]. Ces dernières, couplées aux systèmes de CAO, permettent non plus la simple représentation géométrique, mais la génération semi-automatique de modèles numériques 3D optimisés et conformes aux guides de conception [Gomes et al., 2006] [Gomes et al., 2009].

De plus, pour optimiser le couplage "guide de conception – systèmes CAO", il convient également d'intégrer les contraintes liées au process (injection, peinture, assemblage, faisabilité outillage) afin de pouvoir traiter les problèmes posés par les pièces de style comprenant des surfaces complexes hautement évolutives (plan de formes).

En traitant cette problématique uniquement du point de vue de la géométrie, il apparaît clairement que les systèmes de CAO classiques (ex : CATIA v4) ont atteint depuis longtemps leur objectif premier de représentation 3D interactive de produits industriels. Cependant, une nouvelle génération d'outils d'aide à la conception émerge dans le but d'accélérer le processus routinier d'ingénierie (ex : CATIA v5 de DASSAULT SYSTEMES, PRO ENGINEER de PTC, NX 6 de SIEMENS, etc.). Dans le cadre des travaux de recherche que nous nous proposons de conduire, l'objectif est d'analyser les différentes possibilités offertes par de tels outils ainsi que les gains de performance en termes de productivité en conception.

Cette nouvelle génération d'outils permet de passer de la conception individuelle assistée par ordinateur (CAO) à une conception collaborative assurée par les connaissances (au sens de l'assurance qualité) en utilisant, par exemple, des plateformes de type PLM (Product Lifecycle Management) [Liu et Xu, 2001] couplées à des "modèles génériques" dans un cadre de conception routinière ou innovante. En effet, un "modèle 3D générique" est un objet CAO prédéfini qui encapsule des règles de conception métier du bureau d'études ou des éléments de réglementation. Grâce à ces modèles, il devient possible :

- d'agir sur des variables de conception prédéfinies,
- de faciliter la réutilisation d'une étude pour des modifications et des variantes ultérieures,
- de préserver et diffuser une méthodologie venant d'un expert,
- de s'assurer de la conformité aux règles de conception internes ou externes.

Ces "modèles 3D génériques" sont le résultat d'une méthodologie rigoureuse de management des connaissances nécessitant, le repérage, l'actualisation, la valorisation et la préservation des connaissances collectives et individuelles (tacites et explicites) [Grundstein, 2002].

Des travaux de recherche sont actuellement en cours au sein du laboratoire SeT de l'UTBM dans le domaine de l'ingénierie collaborative, de l'ingénierie des connaissances et du couplage entre système d'information technique (PLM) et système à base de connaissances. L'objectif recherché est d'accélérer les processus d'extraction/réutilisation semi-automatique des connaissances métier à partir des informations issues de précédents projets. Ces travaux à caractère informatique, car basés sur l'utilisation de systèmes multi-agents, ont déjà fait l'objet d'une autre thèse de doctorat [Monticolo., 2008].

Concernant les apports plus spécifiques de nos travaux de recherche, nous les positionnons dans le domaine des méthodologies de reconception permettant d'intégrer les différents domaines liés à un projet. Cette approche, fondée sur le modèle multi-domaines et multi-vues [Gomes et Sagot, 2002], proche des travaux autour de l'Axiomatic Design [Suh, 1998] et du modèle produit multi-vues préconisé par Tichkiewitch [1996], permet de définir une première méthodologie expérimentale en intégrant les différents métiers dans ce processus de reconception.

Cette première approche méthodologique a été expérimentée dans le cadre de plusieurs projets académiques et industriels qui ont permis de valider sa robustesse, sa pertinence et son applicabilité aux problématiques industrielles.

Sur la base de ce qui vient d'être évoqué, il devient nécessaire de définir la structure de notre document de recherche qui reflète le déroulement de l'ensemble des travaux que nous avons conduit sur le sujet.

Dans un premier chapitre, nous définirons les différents contextes dans lesquels nos travaux de recherches ont été réalisés. En effet, notre thèse de doctorat a été conduite dans le cadre d'une convention CIFRE, ces travaux de recherches ont ainsi été dirigés conjointement entre industrie et université, ce qui a permis, dans un premier temps, d'expérimenter les premiers modèles proposés dans un cadre académique. Dans un second temps, ces modèles ont pu être mis à l'épreuve dans un contexte industriel afin de déterminer leurs viabilités et faisabilités sous des contraintes plus sévères en termes de qualité, de coûts et de délais. Ainsi, nous présentons dans ce premier chapitre le partenaire industriel et le laboratoire de recherche universitaire ayant accueilli ce travail de recherche. Ces deux entités distinctes, mais intimement liées par leurs axes de travail communs, nous amènent à définir l'objet de l'étude qu'est le processus de développement de produit mécanique dans un centre de recherche et développement d'un équipementier automobile important. En étudiant cette activité, nous pourrions délimiter notre champ d'investigation afin de pouvoir positionner nos travaux par rapport aux besoins et attentes de cette entreprise partenaire.

Dans le second chapitre, nous proposons de détailler les différentes approches permettant de formaliser scientifiquement les différents besoins identifiés dans le premier chapitre afin de nous diriger, à la demande de l'entreprise, vers notre problématique de recherche : l'ingénierie fonctionnelle à base de connaissances.

En effet, il convient de mentionner que nous pouvons définir les besoins de deux points de vue différents. Le premier est organisationnel, c'est celui du manager. Ce point de vue pousse à diriger notre recherche vers l'intégration des connaissances dans le processus de conception. Ces processus de conception, aujourd'hui multi-sites, mais aussi multiculturels de part la mondialisation des activités de développement [United Nations, 2005], nécessitent en effet une exploitation systématique des connaissances métier entre les différents acteurs multi-métiers pour pouvoir répondre à cette nouvelle approche qualifiée d'ingénierie concourante. L'objectif de ce nouveau type d'ingénierie, défini par Sohlenius [1992], est de prendre en compte les contraintes de tous les métiers tout au long du processus de conception et de développement du produit et qui doit se traduire par une coordination des différentes équipes autour d'un même objectif. De ce fait, nous évoquerons les différents principes proposés en conception intégrée et collaborative afin de détailler les différents modèles de structuration de données que l'on peut rencontrer en conception de produits. Ces différents modèles et principes nous amèneront à détailler l'ingénierie des connaissances afin de pouvoir définir les interactions possible entre ces deux axes.

Le second point de vue, plus opérationnel, est celui du concepteur. En effet, le besoin du concepteur est différent de celui du manager. Etant confronté directement à la conception du produit, cet acteur n'a pas la même vision que l'organisateur. C'est pourquoi nous proposons de réaliser une étude sur les différentes approches opérationnelles en conception que l'on peut aujourd'hui rencontrer dans le monde de l'industrie automobile. Notamment les approches de conception fonctionnelle qui servent aujourd'hui de processus de conception dans ce milieu. En effet, le concepteur d'aujourd'hui reçoit, en données d'entrée, des besoins

fonctionnels. Il doit, en utilisant des systèmes d'aide à la conception, transformer ces contraintes initiales en un produit industrialisable.

L'interaction entre ces différentes approches nous permettra dès lors de déterminer la problématique de recherche et ainsi d'énoncer nos hypothèses de travail afin de proposer dans le chapitre qui suit, différents modèles et méthodes qui nous permettront d'y répondre.

A travers une première démarche méthodologique proposée qui résulte de la synthèse du second chapitre, une première expérimentation a pu être effectuée et est présentée dans le troisième chapitre. Cette première expérimentation, réalisée dans un cadre universitaire et utilisant des prototypes d'outils dédiés à l'ingénierie collaborative et à la conception intégrée, nous a permis d'observer "en environnement contrôlé" un processus de conception afin d'établir un premier bilan de nos premières hypothèses de recherche.

Cette expérimentation nous a conduit à définir un modèle de conception fonctionnelle fondé sur les connaissances afin de les intégrer à tous les niveaux du processus de conception. On se propose de définir les fondamentaux de notre approche méthodologique de conception à base de connaissances métier ainsi que le principe d'extraction de ces connaissances qui a été retenu. De plus, pour nous permettre d'exploiter cette nouvelle approche, il est nécessaire de définir les éléments sur lesquels elle s'appuie. Le concepteur étant en constante interaction avec les systèmes de conception assistés par ordinateurs, ces derniers deviennent le vecteur idéal d'exploitation de ces connaissances. En effet, en structurant les modèles numériques utilisés, il devient possible de les exploiter en tant que connaissances. Dans ce contexte, nous présentons une méthodologie spécifique de numérisation répondant aux contraintes initiales, c'est-à-dire multi-sites et orientée métier, afin de pouvoir les exploiter et déterminer un principe qui permette de coupler le cahier des charges fonctionnel à la géométrie qualifiée de ce fait, de géométrie fonctionnelle.

Le quatrième chapitre expose l'application de ce dernier modèle dans une seconde expérimentation à caractère industriel. Cette nouvelle expérimentation démontre les différentes limites de cette méthodologie dans le cadre d'une exploitation en milieu industriel. Une discussion autour de ces limites nous a amené à faire évoluer notre première méthodologie vers une seconde méthodologie exploitable dans beaucoup de circonstances. Dès lors, nous présentons le détail de ce nouveau modèle fondé sur les points forts et sur les limites évoquées précédemment. En effet, un système d'aide à la conception se fondant sur les précédents produits (i.e. précédents "cas") étudiés en milieu industriel semble se révéler plus pertinent. Pour y parvenir, nous définissons notre principe de représentation des connaissances, qui servira de base dans ce modèle, ainsi que la méthode pour pouvoir les rechercher. De plus, en définissant les principes retenus afin de réutiliser, réviser et capitaliser ces connaissances, nous proposons de formaliser le modèle proposé sous forme d'une approche de type Case Based Reasoning (CBR).

Afin de valider les hypothèses nous ayant permis de développer ce nouveau modèle proposé, une troisième expérimentation réalisée en milieu industriel, a été conduite. Le

cinquième chapitre nous permet ainsi d'expérimenter ce modèle sur la conception de boucliers avant pour véhicule automobile afin d'avoir, via la conception du premier bouclier, une base de cas pour la conception du second.

Les résultats de la dernière expérimentation nous permettent enfin de conclure sur les travaux de recherche. Les limites rencontrées lors de cette étude nous conduisent ainsi à envisager des perspectives afin de proposer différentes pistes pour une poursuite des travaux de recherche engagés.

CHAPITRE 1 :

CONTEXTE INDUSTRIEL ET CADRE DE

RECHERCHE

Comme évoqué précédemment, nos travaux de recherche sont menés dans le cadre d'une thèse de doctorat en convention CIFRE. Cette section a pour but de présenter le contexte industriel qui a encouragé la société FAURECIA à initier ces travaux de recherche en partenariat avec le laboratoire Systèmes et Transports (SeT) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM). Ainsi, suite à la présentation des deux structures organisationnelles accueillant les travaux de recherche, nous proposons d'étudier l'activité de développement de ce secteur industriel en spécifiant le processus de conception d'une pièce de style. Une typologie de la conception ainsi qu'une typologie de l'innovation complètent cette première approche afin de délimiter notre champ d'investigation et nous permet de nous positionner face au besoin initial de l'industriel partenaire : l'équipementier automobile FAURECIA.

1.1 Cadre du travail de recherche

Ce paragraphe présente dans un premier temps la société FAURECIA qui a initié ces travaux de recherche et plus spécifiquement la division EXTERIOR TRIM qui les a accueillis. Dans un deuxième temps, nous présentons l'équipe ERCOS du laboratoire de recherche SeT qui a dirigé en partenariat avec cet industriel ces mêmes travaux.

1.1.1 La société partenaire : FAURECIA

Nous présentons dans ce paragraphe le groupe FAURECIA et plus particulièrement la division EXTERIOR TRIM (EXTERIOR TRIM DIVISION – ETD) du groupe de produit système d'extérieur (EXTERIOR SYSTEMS PRODUCT GROUP – XSPG) qui a supporté ces travaux de recherche. Afin de définir notre champ d'investigation autour du processus de développement en plasturgie et appliqué à l'intégration des savoir-faire métier produit-process pour une amélioration de la productivité en développement de produits de style, nous présenterons les produits de cette division.

1.1.1.1 FAURECIA : Equipementier automobile de niveau mondial

FAURECIA est un groupe international d'ingénierie et de production d'équipements automobiles. A travers ses quatre métiers clés que sont les sièges, les systèmes d'intérieur, d'extérieur et d'échappement, FAURECIA équipe de très nombreux véhicules dans le monde pour la majorité des constructeurs automobiles. Nous pouvons citer par exemple le véhicule

automobile C5 de la marque Citroën pour lequel FAURECIA fournit les sièges, la partie chaude du système d'échappement, le pare-choc avant, le groupe moto ventilateur du système de refroidissement ou encore certains modules acoustiques. De plus, avec ses 58000 collaborateurs répartis dans 29 pays (190 sites de production et 28 centres de recherche et développement), le dispositif global proposé par FAURECIA permet de proposer des usines de composants ou des usines en juste-à-temps aux constructeurs généralistes (Volkswagen, Peugeot, Renault, etc.) et aux constructeurs spécialistes (Audi, BMW, etc.).

Aussi, nous pouvons citer quelques chiffres clés permettant de situer le groupe FAURECIA au sein de l'industrie automobile mondiale. Le chiffre d'affaires est majoritairement réalisé en Europe avec 25,4% du CA en Allemagne, 22,9% en France et 25,1% dans les autres pays d'Europe. Concernant les clients, la majorité du chiffre d'affaires est réalisé avec des clients européens, comme Volkswagen, à hauteur de 23,9%, ou encore PSA Peugeot Citroën à hauteur de 22,9%.

Concernant plus spécifiquement les systèmes d'extérieur, division du groupe FAURECIA ayant permis ces travaux de recherche, ils représentent, en 2008, 7,9% du chiffre d'affaires (CA) du groupe. Le domaine d'intervention de cette division concerne plus spécifiquement trois types de produits que sont les pièces extérieurs du véhicule (Pare-chocs avant et arrière, élargisseur d'aile, etc.), les faces avant techniques ainsi que les systèmes de refroidissement moteurs (bloc moto-ventilateurs).

Avant de présenter notre division d'accueil, nous détaillons les quatre axes de progrès qui sont aujourd'hui prioritaires au sein du groupe FAURECIA. Le premier, nommé "l'excellence en qualité", fixe l'amélioration de la qualité des produits du groupe au rang de première priorité. "La maîtrise de la gestion des programmes", qui est le second axe, permet au groupe FAURECIA de mener des développements complexes. En effet, FAURECIA étant autant une entreprise d'ingénierie que de production, tous les produits finis délivrés au client sont spécifiques à une plateforme et même à un modèle de voiture. De ce fait, la capacité du groupe à mener un programme est un fondamental. Le troisième axe, appelé "l'efficacité opérationnelle et la réduction des coûts", permet de maîtriser les coûts industriels et logistiques afin que la localisation et l'efficacité du dispositif industriel permettent d'augmenter la valeur ajoutée et le service apporté aux clients. Le quatrième axe, "le renforcement des capacités de développement et d'innovation", se situe au carrefour de deux tendances de l'automobile, la performance environnementale et la capacité à créer de la valeur pour les clients finaux à travers le confort, la sécurité, la gestion de l'espace intérieur ou encore la qualité perçue.

1.1.1.2 La division Exterior Trim: la division d'accueil des travaux de recherche

La division Exterior Trim (ETD), intégrée au groupe systèmes d'extérieur de la société FAURECIA, intervient sur le périmètre des pièces extérieures du véhicule. Les clients français représentent à eux seuls (pour l'exercice 2008) 95% du chiffre d'affaire, dont 67% pour PSA Peugeot Citroën et de 28% pour Renault Nissan.

Au sein de cette division, le périmètre pièces extérieures se divise en quatre familles de produits :

- l'avant véhicule : pare-chocs avant, les grilles, etc.
- l'arrière véhicule : pare-chocs arrière, support de plaque de police, etc.
- les pièces de structures : poutre d'amortissement, renfort de rigidité, etc.
- le côté véhicule : élargisseur d'aile, élargisseur de caisse, bas de caisse, etc.

De plus, ces produits sont conçus en matériaux plastiques, ce qui dénote l'expertise de la division principalement axée dans le domaine de l'ingénierie des pièces plastiques.

Afin d'illustrer la gamme de produit plastique de la division ETD, la figure 1 propose une vue éclatée d'un avant-véhicule partiel décomposé en deux types de pièces, les pièces d'aspects (peau de pare-chocs, calandre, trappe pour anneau de remorquage, lame et grille) et les pièces techniques (renfort et support antibrouillard).

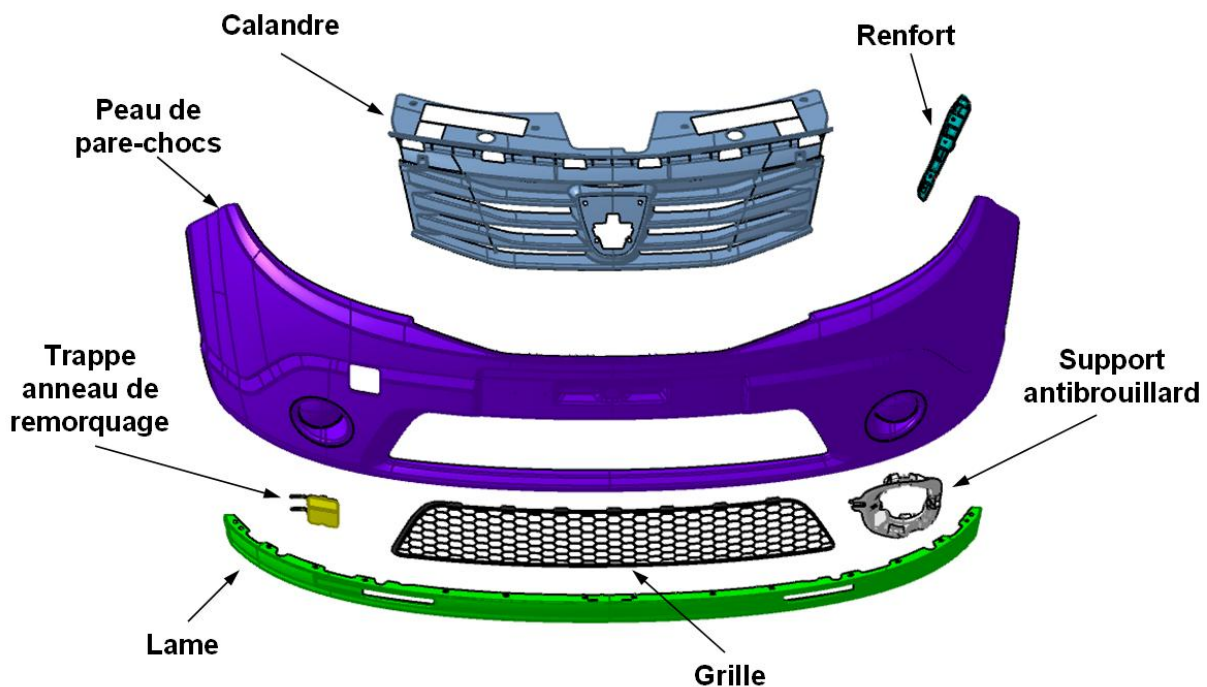


Figure 1 : Avant véhicule présentant des pièces d'aspects et des pièces techniques

En raison des nombreux domaines d'expertises nécessaires au développement de ces produits nécessitant le recours à une approche multi-métiers, la division ETD travaille aujourd'hui sur la thématique d'ingénierie des connaissances afin de pouvoir optimiser ses processus de développement. Dans cette perspective, le bureau d'études de la division ETD a contacté le laboratoire Systèmes et Transports (SeT) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) afin d'initier un travail de recherche autour de cette thématique d'intégration des savoir-faire métier produit-process pour une amélioration de la productivité en développement de produits de style.

1.1.2 Le laboratoire d'accueil : le SeT de l'UTBM

Ayant pour objectifs de promouvoir et d'appliquer des travaux de recherche et des nouvelles méthodologies dans le domaine des transports, des systèmes de production, de la robotique des télécommunications et de la réalité virtuelle appliquée, le laboratoire SeT (EA n°3317 / UTBM) a accueilli ces travaux de recherche en partenariat avec l'industrie. L'équipe de recherche impliquée dans ce partenariat est l'équipe d'Ergonomie et COncception de Systèmes (ERCOS).

En effet, l'activité de recherche de l'équipe ERCOS a pour objet l'intervention de l'ergonomie dans la conception des produits et des systèmes. S'appuyant sur le modèle de l'ingénierie concourante, qui rompt avec le modèle linéaire et séquentiel de conception classique, l'équipe ERCOS propose une ergonomie capable de suivre la conception des produits et des systèmes du début à la fin. L'objectif de cette démarche est d'aider le concepteur à développer des systèmes, des produits, des outils, des dispositifs, qui tiennent compte des caractéristiques, des besoins et des attentes des utilisateurs/opérateurs. En s'appuyant sur les compétences de ces derniers et en voulant toujours les développer, les travaux de recherche visent à augmenter la performance et la fiabilité des modes d'interactions homme-machine et homme-système ainsi qu'à garantir la sécurité, le confort et la santé des personnes. Les recherches, volontairement pluridisciplinaires, conduites au sein de l'ERCOS, associent Sciences pour l'Ingénieur et Sciences Humaines et s'articulent autour de deux axes :

- Axe 1 : Ergonomie de produits, des systèmes et des interactions homme – machine.
- Axe 2 : Conception virtuelle, collaborative et réactive de systèmes mécaniques, à base de connaissances métier.

De plus, à travers ces deux axes, l'ingénierie mécanique constitue le domaine fédérateur de l'équipe ERCOS. Son rôle principal, en complément de la dimension technique permettant de concevoir des produits du besoin au prototype, est de planifier les projets en définissant clairement les tâches et les personnes qui y sont associées, en fonction de leurs domaines de compétence (conception, ergonomie, design). Les différentes méthodologies et outils XAO développés au sein de l'équipe permettent d'accélérer les cycles de conception innovante et d'optimiser les cycles de conception routinière.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse de doctorat en convention CIFRE, l'équipe de recherche ERCOS du laboratoire Set a initié avec la société FAURECIA, et plus précisément le bureau d'études de la division Exterior Trim, un travail de recherche autour de l'intégration des savoir-faire métier produit-process afin d'améliorer la productivité en développement de produits de style.

1.2 Le processus de développement dans le centre de R&D

Après avoir présenté le partenariat entre le centre de recherche et développement de la division Exterior Trim (ETD) et le laboratoire SeT. Nous présentons, dans un premier temps,

le processus de développement dans son intégralité, tel qu'il est actuellement appliqué au sein d'ETD, afin de déterminer les étapes du cycle de vie du produit dans lesquels nous intervenons. Ces étapes du processus de développement nous permettent d'analyser précisément le processus spécifique de conception d'un produit plastique avant la réalisation des étapes du processus de fabrication. Cette analyse nous permet de déterminer la typologie de la conception ainsi que la typologie des innovations et ainsi de délimiter notre champ d'investigation et de se positionner du point de vue universitaire et industriel.

1.2.1 Cycle de vie d'un véhicule automobile

Dans ce paragraphe, nous nous proposons d'étudier l'activité de développement et d'industrialisation d'un produit dans son ensemble. En effet, il est nécessaire de pouvoir identifier à quel niveau du cycle de vie du produit l'on intervient. Si l'on considère qu'une société industrielle intervient dans deux des situations de vie du produit, situations pour lesquelles le produit est physiquement présent au sein de cette société, nous pouvons les identifier en tant que "processus de conception" et "processus de fabrication". Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous faisons le choix de présenter un cycle de vie reconnu industriellement et qui est en adéquation avec le processus établi au sein d'Exterior Trim Division (ETD).

Pour ce faire, nous présentons le cycle de vie d'un véhicule automobile proposé par le groupe PSA Peugeot Citroën [PSA, 2009] (figure 2) par ailleurs cité dans d'autres travaux en tant que contexte industriel [Paillot, 2004]. Nous pouvons ainsi identifier deux situations de vie distinctes :

- Le véhicule en "gestation" : qui correspond aux activités autour du produit immatériel,
- Le véhicule en "circulation" : qui correspond aux activités autour du produit matérialisé.

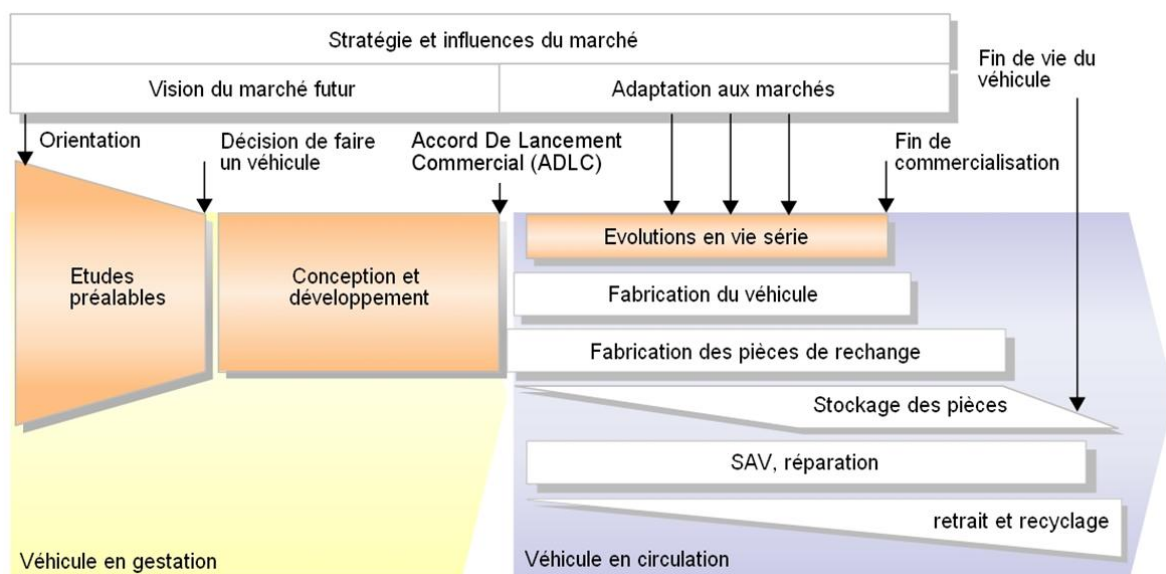


Figure 2 : Cycle de vie d'un véhicule automobile chez PSA Peugeot Citroën d'après PSA [2009]

Etant intégré dans le bureau d'études d'ETD lors de ces travaux de recherche, nous nous positionnons de fait dans le processus de conception qui est représenté sur la figure 2 par les deux étapes "Etudes préalables" et "Conception et développement". Afin de déterminer plus en détail les différents acteurs et services qui gravitent autour des étapes de ce processus, nous proposons, dans le paragraphe suivant, de présenter l'activité de conception d'un produit de style.

1.2.2 L'activité de conception d'un produit de style

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le processus de conception établi au sein d'ETD peut être divisé en deux étapes représentées de manière simplifiée sur la figure ci-dessous.

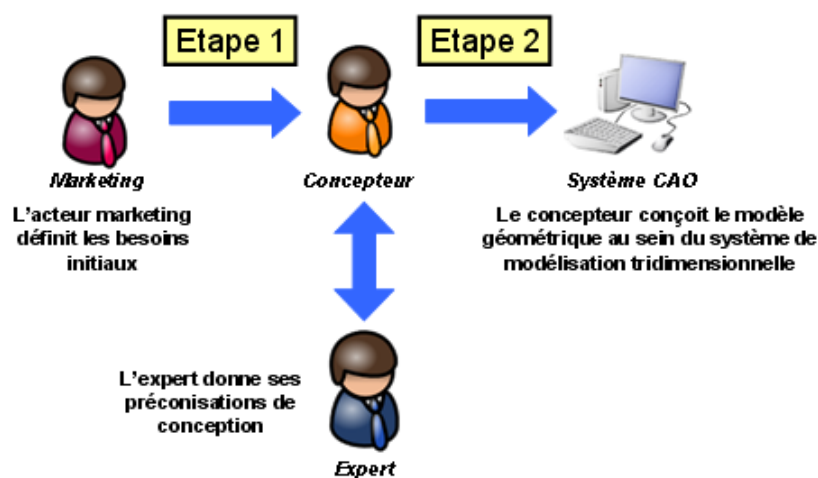


Figure 3 : Processus de conception simplifié d'un produit de style

Dans un premier temps, le concepteur récupère toutes les informations concernant le besoin initial émis par le client auprès de l'acteur marketing. En synthétisant ces informations, il conçoit dans un second temps, un modèle géométrique au sein d'un système de modélisation tridimensionnelle.

Si l'on porte ce processus simplifié au sein de l'organisation d'ETD, la seconde étape du précédent processus fait intervenir trois services majeurs qui sont le service de Réponses à Consultation (RC), le service Bureau d'Etudes (BE) et le service Simulation – Calculs (SC). Autour de ces services gravitent, lors du processus de conception, des services connexes appelés services d'expertise. Comme définis dans le paragraphe précédent, ces services d'expertises mettent à disposition des ressources humaines appelées "experts". Chaque expert intervient ainsi en support aux trois services principaux du processus de conception afin d'intégrer les contraintes métier dès la première étape qu'est l'analyse du besoin.

Afin de déterminer le champ de compétences de ces services lors du processus de conception, il est nécessaire de définir le type de produit qu'ils conçoivent. En effet, Rezayat [2000] définit que dans l'industrie automobile, 40% des composants d'un produit sont une complète réutilisation de pièces existantes issues de projets précédents ou d'un catalogue fournisseur, que 40% sont aussi des pièces existantes issues de projets précédents mais ayant

subi de légères modifications pour être adaptées dans un nouvel environnement, et seulement 20% sont issues d'une nouvelle conception. Pour illustrer cette décomposition, nous proposons l'exemple d'une clé de contact automobile illustrée sur la figure 4.

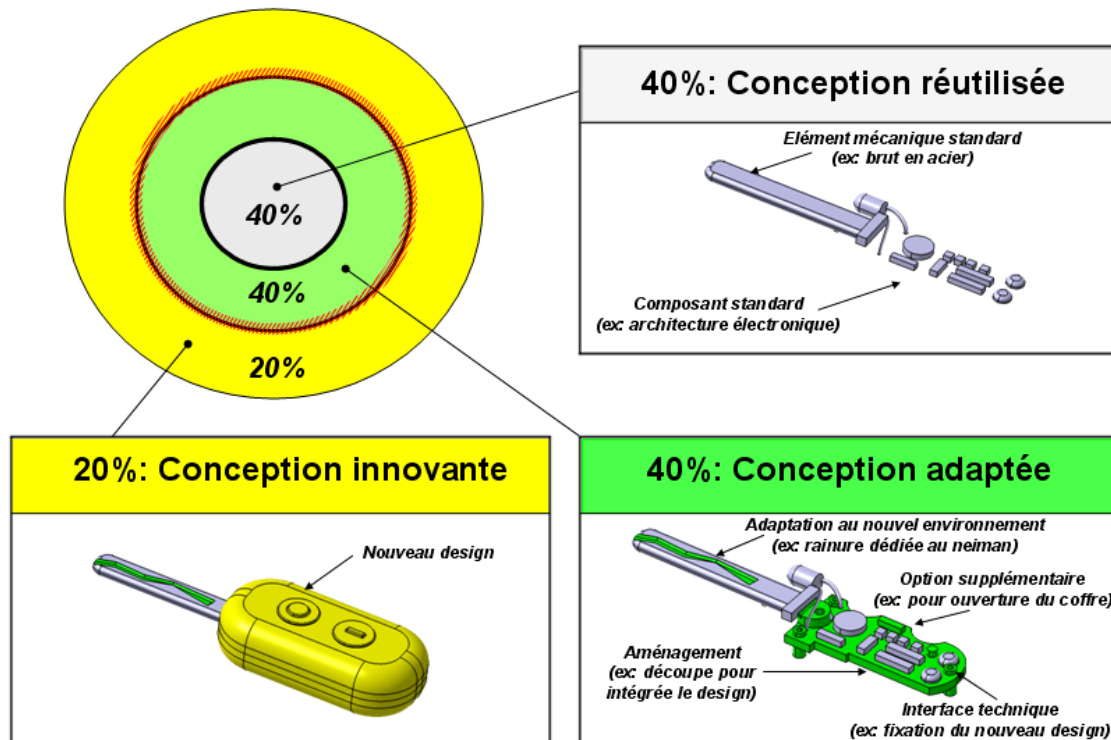


Figure 4 : Représentation d'un produit par activité de conception

Cette illustration simplifiée prouve que le centre d'un produit, par exemple des éléments mécaniques standards ou des composants standards est invariant d'un produit à l'autre. Nous remarquons aussi, que autour de ces invariables, nous rencontrons un autre type de conception qu'est l'adaptation de solutions existantes comme, par exemple, la rainure spécifique de la clé qui doit être adaptée spécifiquement pour chaque serrure. De plus, seul le design du produit est totalement nouveau dans cet exemple.

Résultant de cette dichotomie, les paragraphes suivants nous permettent de déterminer plus précisément une typologie de conception et une typologie des innovations afin de déterminer notre champ d'investigations pour ces travaux de recherche.

1.2.3 Délimitation de notre champ d'investigation

Dans le paragraphe précédent, nous citons le terme "conception" de manière répétée. Avant de le définir scientifiquement, la définition proposée ci-dessous par l'Association Française de NORmalisation (AFNOR) nous permet de délimiter notre champ d'investigations.

[AFNOR, 2002] : "[La conception est une] Activité créatrice qui, partant des besoins exprimés et des connaissances existantes, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable."

Cette définition, qui se veut générique, nous pousse à établir une typologie autour de ce terme "conception" afin de déterminer le type de conception que l'on se propose d'étudier. En effet, nous pouvons ainsi rappeler une typologie de la conception en accord avec les travaux de Durravu [1989] et partagée dans la communauté scientifique [Gero et Maher, 1993] [Serrafero et al., 2006].

1.2.3.1 Typologie de la conception

Il s'agit, dans ce paragraphe, de présenter une typologie de la conception qui propose 4 types de projets de conception fédérés en deux classes de problèmes d'ingénierie. Dans un premier temps, nous définirons la conception initiale qui fédère la conception créative et la conception innovante et, dans un second temps, la reconception, qui fédère la conception routinière et la conception paramétrique.

1.2.3.2 La conception initiale :

Cette démarche consiste à inventer et à concevoir un produit matériel ou immatériel, ou un process nouveau. N'ayant aucune base et aucun retour sur expérience sur un tel produit nouveau, il peut dès lors être considéré comme conception initiale. Au sein de cette famille de conception, nous pouvons distinguer deux types :

- Conception créative : aucun principe physique pouvant expliquer le fonctionnement du produit n'est connu lors de l'initiation de sa conception ce qui fait d'elle une conception très risquée (exemple : machine à transformer le plomb en or, etc.) [Vargas, 1995], [Dieter, 2000]
- Conception innovante : des principes physique sont connues, mais sont pour la première fois mis en commun au sein d'une même architecture produit pour pouvoir générer un nouveau produit (ex : intégration de la technologie nucléaire au sein d'un sous-marin, etc.) [Culversouse, 1995].

1.2.3.3 La reconception :

Cette démarche consiste à améliorer et optimiser une architecture produit déjà existante, par exemple optimisation de la masse, des coûts, des temps de fabrication, des performances, etc. De plus, ce produit se place sur le marché avec une forte concurrence et avec un fort retour sur expériences. Nous pouvons citer par exemple la reconception des GSM pour les produits électroniques, des souris en informatique, ou encore des rétroviseurs dans le secteur automobile. De plus, au sein de cette famille de conception, nous pouvons distinguer deux types :

- Conception routinière : l'architecture du futur produit est connue, mais la configuration des différents éléments entre eux est inconnue et doit s'adapter à son environnement (ex : commodos, aérateurs, supports de feux anti-brouillard, etc.) [Dorville et al., 1996],
- Conception paramétrique : l'architecture et la configuration sont connus initialement, mais il s'agit de redimensionner les éléments entre eux en jouant sur des paramètres

(ex : écrou pince, pompes lave-projecteurs, etc.). En règle générale, l'organe paramétrique est déjà standardisé. Dans ce cadre, le concepteur choisit la bonne version de l'organe souhaité et les autres organes s'adaptent par rapport à lui.

Ainsi, la conception des produits et des process industriels sont un amalgame des deux familles présentées précédemment. La conception d'une nouvelle automobile relève principalement de la conception routinière (principes physiques et architecture produit connus initialement). Cependant, de nouveaux systèmes embarqués peuvent être considérés individuellement en tant que conceptions innovantes (ex : rétroviseur automatique, etc.).

De ce fait, il nous semble nécessaire de définir une typologie des innovations afin de déterminer lequel de ces types intervient lors du processus de conception. Ainsi, nous pouvons retenir la classification des innovations reconnue internationalement [OCDE, 2005] selon quatre types : l'innovation incrémentale, l'innovation stratégique, l'innovation majeure et l'innovation radicale. L'objectif principal de cette typologie est de permettre la mise en relation entre les types de conceptions et les types d'innovation afin de pouvoir se positionner.

1.2.3.4 Typologie des innovations

Dans cette section, nous déterminons une typologie des innovations. Mais au préalable, il s'agit de présenter une définition de l'innovation telle qu'elle est actuellement reconnue dans divers travaux scientifiques :

OCDE, 2005 : "Une innovation est la mise en œuvre d'un produit (bien ou service) ou d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures."

A travers cette définition, nous détaillons l'innovation de produit selon Markides et Geroski [2004]. En effet, ils définissent quatre types d'innovation (incrémentale, stratégique, majeure et radicale) en fonction des interactions sur les habitudes de consommation de l'utilisateur final du produit et du positionnement sur le marché.

En effet, les innovations incrémentales et majeures permettent aux entreprises d'améliorer leurs positions sur le marché, c'est-à-dire prendre des parts de marché à leurs concurrents directs. Mais les entreprises qui innovent stratégiquement et radicalement créent un nouveau marché sur lequel elles s'y positionnent au détriment (détérioration) de leurs positions sur le précédent marché. Le tableau 1 présente cette typologie ainsi que ces interactions.

| | Améliore la position des entreprises en place | Détérioré la position des entreprises en place |
|---|--|--|
| Impact mineur sur les habitudes de consommation | Innovation incrémentale (amélioration de l'existant) | Innovation stratégique (technologique) |
| Impact majeur sur les habitudes de consommation | Innovation majeure (comportementale) | Innovation radicale (rupture) |

Tableau 1 : Typologie des innovations selon Markides et Geroski [2004]

1.2.3.5 Innovation incrémentale :

L'innovation incrémentale est établie quand il n'y a pas ou peu d'impact sur les habitudes et les comportements des utilisateurs finaux, et lorsque l'innovation s'appuie sur les compétences des acteurs de la société.

Nous pouvons entre autre citer l'exemple de l'ESP (Electronic Stability Program) dans le monde de l'automobile.

1.2.3.6 Innovation stratégique :

L'innovation stratégique met en danger les compétences et les actifs de la société mais les modifications des habitudes des consommateurs sont peu modifiées. Nous pouvons entre autre citer dans le monde automobile le déploiement progressif des compteurs numériques au détriment des compteurs à aiguilles. En effet, si un société produisant des compteurs à aiguilles n'intègre pas le développement de compteurs numérique, cette société sera rapidement évincée.

1.2.3.7 Innovation majeure :

L'innovation majeure est caractérisée par un impact fort sur les habitudes d'utilisation de l'utilisateur final sans pour autant détériorer la position sur le marché de la société productrice. Nous pouvons entre autre citer l'intégration d'Internet au sein des véhicules automobiles qui ne détériore pas la position des entreprises qui vendent des systèmes embarqués, mais qui change l'utilisation des systèmes, comme par exemple l'accès en temps réel des données du trafic par le GPS pour optimiser le parcours.

1.2.3.8 Innovation radicale :

L'innovation radicale change les habitudes de l'utilisateur final et met en danger la société précédemment en place sur le marché. En effet, nous pouvons par exemple citer l'arrivée des dvd qui a mis à mal l'industrie du magnétoscope.

Cette typologie permet ainsi aux industries de déterminer l'état actuel de leurs produit et de déterminer également les futures stratégies de développement qui devront adopter afin de pouvoir conserver et évoluer leur position sur un marché aujourd'hui hautement concurrentiel.

1.2.4 Le positionnement de nos travaux : le besoin initial de FAURECIA

Nous venons de détailler dans les sections précédentes la typologie de la conception ainsi que la typologie de l'innovation. Afin de déterminer le positionnement de nos travaux, nous pouvons synthétiser ces deux typologies au sein d'un même graphique, illustré sur la figure 5 ci-après. Ce graphique résulte d'une analyse non explicite effectuée sur différents produits de l'entreprise. Cette analyse, fondée sur une base qualitative et non pas statistique, nous permet ainsi de dégager les premières tendances suivantes :

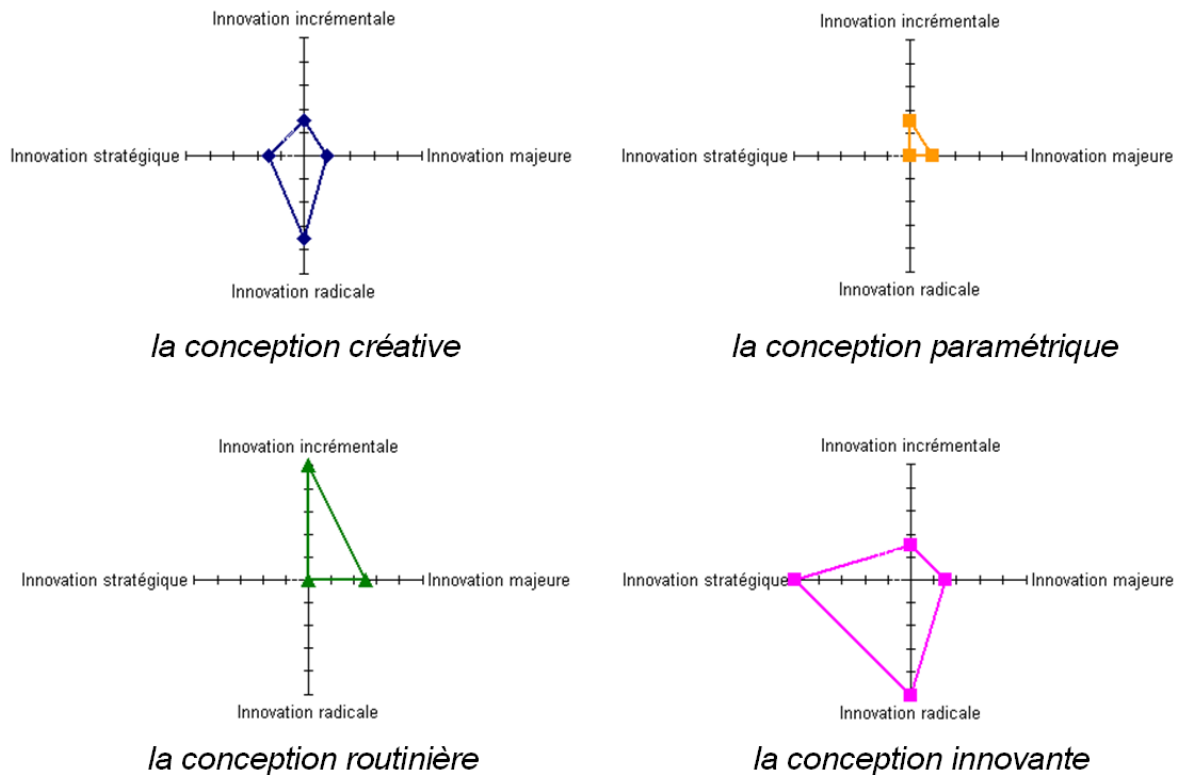


Figure 5: Graphiques représentant les interactions Conception - Innovation

Cette analyse nous pousse à penser que la conception paramétrique engendre très peu d'innovation, que la conception routinière engendre constamment des innovations incrémentales et quelques innovations majeures, que la conception créative permet d'intégrer des innovations radicales et que la conception innovante se fonde sur des innovations stratégiques et radicales.

De ce fait, nous pouvons déduire des définitions précédentes que les conceptions réalisées au sein d'ETD sont du type conception plutôt routinière et qu'elles permettent de réaliser constamment des innovations de types incrémentales et majeures. La conception d'un nouveau produit nécessite deux étapes. La première, qui est une étape de réflexion, permet de déterminer des concepts novateurs pour permettre d'adapter le produit dans un nouvel environnement. Il résulte de cette adaptation des dépôts de brevets. La seconde étape consiste à adapter des concepts précédents et éprouvés au sein de la société qui peuvent être considérés comme innovation incrémentale.

Ainsi, le besoin initial de la société ETD concerne le processus de conception, au niveau du service Bureau d'Etudes. Travailler sur les thématiques de conception routinière en accélérant certaines tâches a pour objectif d'augmenter les innovations de types incrémentales et majeures dans leurs produits.

1.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord défini le cadre de ces travaux de recherche qui sont menés en partenariat entre la société FAURECIA Exterior Trim Division et le laboratoire SeT de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. A travers une

première observation de l'état actuel du processus de développement dans le centre de recherches et développement de l'industrie partenaire, nous avons ainsi pu déterminer la nécessité d'intégrer des connaissances métier dans le processus de conception. En effet, résultant également de cette observation, nous avons déterminé que les acteurs métier impliqués dans ce processus utilisent essentiellement leurs propres connaissances pour réaliser leurs tâches respectives et ne s'appuient pas sur d'autres vecteurs.

De plus, en étudiant le produit développé dans ce type d'industrie, on aperçoit que seulement 20% du produit résultent d'une ingénierie dite d'innovation contre 80% issus de l'ingénierie dite de reconception. De ce fait, nous proposons de travailler plus précisément sur la reconception, qui fédère la conception routinière et la conception paramétrique, afin de pouvoir optimiser les temps dédiés à ce type d'ingénierie et ainsi permettre plus d'innovations de types stratégique et radical. Le positionnement de ces travaux correspond également à la première observation réalisée au sein de l'industrie accueillant ces travaux de recherche. Nous avons identifié que si l'on met à disposition des concepteurs des systèmes d'aides à la conception leur permettant d'aller plus vite dans les phases de reconception, ils attribueront le temps dégagé à la recherche de solutions innovantes.

Comme nous venons de le souligner, les temps gagnés dans les processus de reconception permettront de les réattribuer sur les processus d'innovation. Si on décompose les innovations en différents types, les temps gagnés en reconception seront réattribués essentiellement aux développements d'innovations dites stratégiques et radicales. Or, par intégration des connaissances métiers dans les processus de reconception, il sera aussi possible de réaliser des innovations incrémentales et majeures dans ce processus. En effet, en améliorant les solutions existantes et en intégrant des retours sur expériences, le processus de reconception sera également porteur d'innovations.

Dans le chapitre suivant nous déterminons les méthodes et modèles qui permettent d'atteindre ces objectifs. Dans un premier temps, nous nous positionnons face aux principes et modèles proposés par la communauté scientifique internationale, tant du point de vue managérial que du point de vue du concepteur. Ce positionnement nous permet de définir des méthodes et modèles permettant de répondre aux problématiques résultantes. Dans un second temps, nous expérimentons ces nouveaux modèles afin d'en déterminer les limites et d'en proposer une évolution.

II

CHAPITRE 2 : D'UNE CONCEPTION TRADITIONNELLE A UNE INGENIERIE FONCTIONNELLE A BASE DE CONNAISSANCES

Aujourd'hui, le monde industriel, et plus particulièrement l'industrie automobile, est une organisation complexe et structurée qui fait intervenir de nombreux moyens humains et matériels afin d'établir le cycle de vie d'un produit. De plus, dans un contexte de mondialisation hautement compétitif, l'industrie doit être capable d'intégrer en amont de ce cycle de vie tous les métiers intervenants en aval afin de pouvoir optimiser le triptyque qualité coût délais. En effet, ce même contexte pousse à mettre sur le marché des nouveaux produits très fréquemment et rapidement, ce qui engendre des délais de développement toujours plus courts aux industriels. Les citations des communiqués de presse ci-dessous fournis par le groupe Peugeot SA fin 2007 [PSA, 2007] et par le groupe Volkswagen AG début 2008 [VW, 2008] avant la crise financière de 2009, confirment ces propos.

[PSA, 2007] : *"Au total, mondialement, 53 nouveaux modèles vont être lancés, de 2007 à 2010."*

[VW, 2008] : *"We will launch more than 20 additional new models by the end of 2010. In doing so, we will deploy three levels:*

- *higher productivity and declining costs;*
- *a product rollout that is tailored precisely to the needs of our customers;*
- *and the systematic exploitation of our global market opportunities."*

De notre point de vue, il devient nécessaire d'intégrer toutes les étapes du cycle de vie du produit très tôt dans le processus de conception afin de pouvoir déterminer les spécifications propres à chaque étape. Pour intégrer tous ces aspects, il s'agit de réaliser une conception intégrée [Tollenaere, 1998] et concourante [Sohlenius, 1992], de telle sorte que tous les métiers puissent communiquer entre eux et permettre ainsi la prise en compte de toutes les contraintes dès le démarrage du nouveau projet de conception.

Ce chapitre présente les principes de conception intégrée ainsi que le lien étroit engendré entre cette dernière et la conception collaborative. Ces principes nous poussent à détailler les différents modèles de structuration de données en conception de produits qui en résultent et ainsi présenter les différents outils qui permettent aujourd'hui d'appliquer ce type d'approche. A travers ces principes, nous identifions un axe transversal qui est le transfert de connaissances métier, et qui articule les collaborations entre les différents métiers.

Ce transfert de connaissances nécessite un processus amont qui est l'ingénierie des connaissances et qui permet d'identifier les types de connaissances pouvant être exploités dans ces processus de conception.

Ensuite, nous présentons les outils qui résultent de ce type d'ingénierie et leur intégration au sein d'un processus collaboratif. Pour intégrer toutes ces connaissances métier aux spécifications du produit (par exemple, quel est la longueur minimal de l'alésage accueillant tel ou tel type de vis dans tel ou tel matériau), l'approche fonctionnelle de conception de produits est présentée. Cette approche permet d'intégrer toutes les étapes du cycle de vie du produit lors des étapes de spécification.

Pour transformer ces spécifications fonctionnelles en produit, le concepteur utilise aujourd'hui des systèmes de conception assistés par ordinateurs. C'est pourquoi nous exposons les différentes approches méthodologiques de ce domaine et présentons les différents outils qui sont aujourd'hui proposés.

Ces différentes approches nous permettent ainsi, à la fin de ce chapitre, de déduire une problématique de recherche à travers différents axes directeurs et d'énoncer nos hypothèses de travail qui nous serviront pour la poursuite de ces travaux.

2.1 Le processus de conception : une approche multi-métiers complexe et collaborative

Dans un premier temps, nous présentons dans ce paragraphe les principaux modèles de conception. Afin d'analyser précisément ces différentes approches nous détaillons ensuite les différentes approches de structuration de données en conception de produits avant de conclure sur les différents outils résultant de ces modèles.

2.1.1 Les modèles de conception

Avant de présenter les différents modèles de conception, il est nécessaire de définir scientifiquement le terme "conception". Une première définition proposée par Pahl et Beitz, [1992] dénote le principe séquentiel qui est généralement attribué à ce type de modèle.

[Pahl et Beitz, 1992] : *"La conception d'un produit contient une notion de transformation de l'abstrait au concret, d'une idée à un produit, d'un problème à une solution, du fonctionnel au structurel."*

Afin d'appuyer et compléter cette définition de la conception, nous pouvons citer la définition proposée par Jeantet [1998], qui introduit le principe d'état, qui peut être assimilé à des étapes, en conception.

[Jeantet, 1998]: *"Concevoir un produit c'est passer de l'expression d'un besoin à la définition des caractéristiques d'un objet permettant de le satisfaire et à la détermination de ses modalités de fabrication. Le futur produit passe par une série d'états."*

Fondé sur ces définitions, nous pouvons distinguer deux types d'approches distinctes en conception séquentielle. La première approche assimile la conception à un processus et la seconde, l'assimile à une activité.

2.1.1.1 La conception en tant qu'activité

La conception peut être considérée comme une transformation engendrant un changement d'état du produit. Cette vision considère alors la conception en tant qu'activité. Le principal modèle appliquant cette vision est l'Axiomatic Design de Suh [1990]. Il définit la conception comme la création d'une solution sous la forme de produits, procédés ou systèmes qui satisfont des besoins identifiés, à travers des mappings entre les spécifications fonctionnelles dans le domaine fonctionnel et les paramètres de conception dans le domaine physique, au moyen de la correcte sélection des paramètres de conception qui satisferont les spécifications fonctionnelles. Nous revenons plus en détail sur ce modèle dans la troisième section de ce chapitre.

Nous pouvons par ailleurs citer Ullman [2009] qui considère, comme beaucoup d'auteurs dans la littérature, que la conception est l'évolution technique et sociale de l'information, ponctuée par des prises de décisions. Ainsi, c'est le passage d'un espace abstrait (fonctionnel) à un espace concret en termes de solutions physiques.

2.1.1.2 La conception en tant que processus

La seconde vision considère la conception en tant que processus. Un processus de conception est considéré comme une séquence d'activités de conception qui est nécessaire afin de créer une ou plusieurs représentations du produit [Reymen, 2001].

Les modèles de conception issus de cette vision peuvent être divisés en deux types. Le premier type considère un modèle descriptif, modèle qui décrit le déroulement des travaux à réaliser. La seconde vision, les modèles prescriptifs, propose une procédure de type algorithmique à suivre systématiquement. Nous pouvons citer le principal modèle prescriptif qui est le modèle "Systematic Design" de Pahl et Beitz [1992] qui s'appuie sur les directives VDI de la Société des Ingénieurs Allemands.

2.1.1.3 Modélisation de la démarche de conception

Fondés sur les modèles de conception précédemment cités, de nombreux travaux représentant la modélisation de la démarche de conception ont été ainsi réalisés. Afin de la modéliser, ces travaux se fondent, selon Marsot [2002], sur la notion abstraite de cycle de vie du produit. La première modélisation apparaît en 1970 avec le cycle de vie en cascade qui identifie les principales étapes du développement. Le cycle de vie en cascade avec retour fait son apparition en 1976 afin d'intégrer les vérifications de conformité à chaque étape et ainsi agir sur l'étape précédente permettant ainsi d'éviter les non conformités [Laprie, 1996].

Mais à l'heure actuelle, le modèle le plus connu en Europe reste le cycle en V selon l'AFCIQ [1990]. Dans ce modèle, les activités de vérification et d'évaluation du projet sont

récurives et permettent de relier une à une, sur un axe horizontal, les étapes descendantes de spécification-conception à celles, ascendantes, de la réalisation [Marsot, 2002].

Mais cette vision linéaire de la conception ne permet pas d'intégrer des disciplines transversales, ou selon Aoussat [1996] des disciplines carrefours, telles que l'ergonomie [Sagot et al., 2003], le design ou encore le marketing. De ce fait, il s'agit de choisir un modèle permettant d'intégrer tous les acteurs de la conception à toutes les étapes du processus de conception.

Afin d'exposer une modélisation, nous retenons le modèle coopératif et rétroactif proposé par l'équipe ERCOS du laboratoire SeT [Sagot, 1999] [Gomes, 1999] [Mahdjoub, 2007]. La figure 6 illustre toutes les activités du processus de conception, de l'analyse du besoin à la présérie.

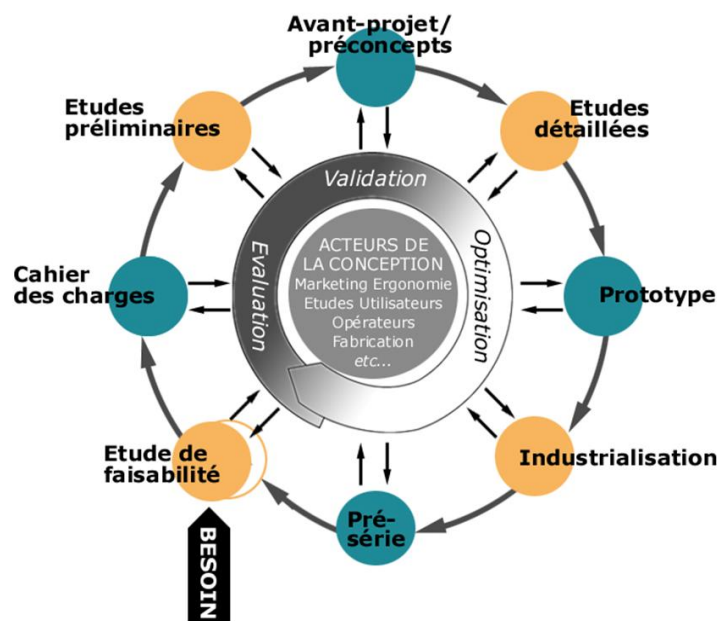


Figure 6 : Modèle de conception issu des travaux du laboratoire SeT

Nous pouvons noter qu'à chaque activité est lié un processus d'évaluation, de validation et d'optimisation mettant en relation tous les acteurs de la conception qui permettent d'être rétroactif.

Nous pouvons par ailleurs étendre la modélisation de la démarche de la conception à la démarche de fabrication. En effet, le produit et le process étant intimement liés, il est intéressant de les représenter au sein d'un même modèle. Il s'agit, dans la suite de ce paragraphe, de présenter un modèle intégrant non seulement le processus de conception, mais aussi le processus de fabrication afin de pouvoir visualiser l'ensemble du cycle de vie du produit au sein d'une société industrielle. Pour ce faire, nous utilisons la représentation de ce cycle de vie d'un produit décrit par Zeid [1991] et illustré sur la figure 7. Nous pouvons déterminer sur cette figure que l'approche que Zeid [1991] a utilisée dans son processus s'inscrit dans une approche séquentielle de la conception. La pertinence de ce modèle par la représentation de toutes les étapes du cycle de vie au sein de deux processus identifiés, le

processus de conception et de fabrication, permet d'identifier les domaines d'intervention des différents métiers. Cette identification permet, par la suite, d'identifier les différentes contraintes métier à intégrer en amont du processus de conception, dès les étapes de définition et de spécification du besoin.

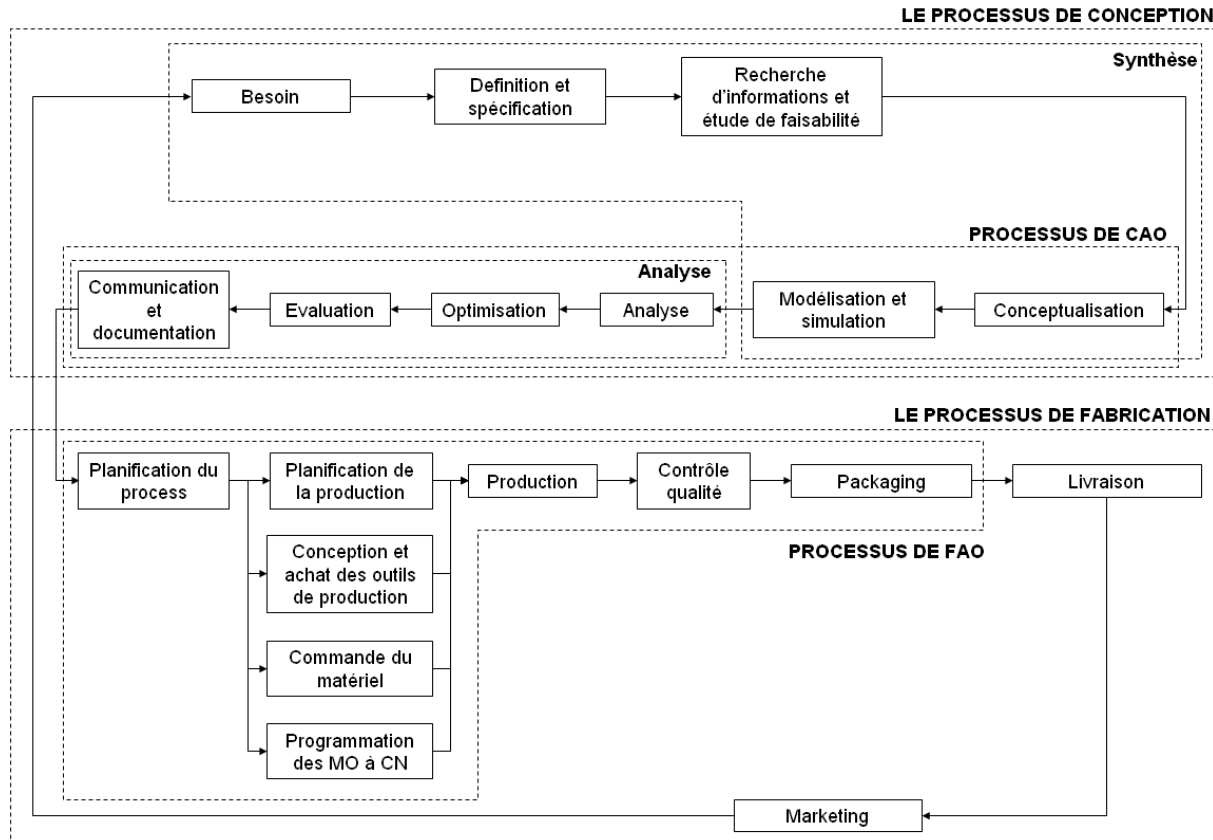


Figure 7 : Description d'un processus de conception et de fabrication d'un produit selon Zeid [1991]

Si nous analysons les étapes du processus de fabrication détaillé par Zeid [1991] en dix étapes, nous pouvons définir tous les métiers qui y sont liés, et ainsi déterminer toutes les expertises process nécessaires lors de la conception d'un produit. Dans notre cas, pour concevoir un produit issu de la plasturgie plusieurs expertises sont nécessaires. Nous pouvons citer un panel non exhaustif d'expertises afin de démontrer la complexité d'une telle conception : outillage pour injection plastique, assemblage, peinture, qualité perçue, logistique, rhéologie, injection, achat, matière et marketing.

De plus, ce modèle permet d'identifier les types d'outils informatiques impliqués pendant ces étapes. Par exemple, on identifie les outils de conception assistée par ordinateur (CAO) utilisés dans le processus de conception, et les outils de fabrication assistée par ordinateur (FAO) utilisés pendant le processus de fabrication.

Ces deux processus ainsi représentés nous poussent à penser qu'ils sont juxtaposés et qu'ils ne communiquent pas (ou peu) ensemble. Il s'agit alors d'identifier les principes collaboratifs retenus afin de pouvoir les exploiter. Nous proposons dans un premier temps de présenter dans le paragraphe suivant les différents principes proposés en conception

collaborative afin de proposer, dans un second temps, les nouveaux outils permettant d'initialiser une approche intégrée de la conception au sein des industries.

2.1.2 Principes proposés en conception collaborative

Nous avons déterminé dans le paragraphe précédent que les modèles de conception sont aujourd'hui multi-métiers. De ce fait, il s'agit, dans un processus de conception, de mettre en relation ces différents acteurs afin qu'ils puissent le mener à bien. En effet, l'industrie étant aujourd'hui multi-sites du point de vue de la production mais aussi du point de vue de la conception [Garro et al., 1995] [Eynard et al., 2004], l'objectif est d'observer comment ces différents acteurs collaborent entre eux. Suite au postulat proposé par Tarpin-Bernard et David [1996] selon lequel la coopération prime sur la collaboration au sein d'un processus de conception, on peut identifier quatre modes de coopération possibles qui sont les modes asynchrone, en session, en réunion et étroite. Ce paragraphe permet ainsi de détailler ces différents modes de coopération et d'identifier le principe organisationnel de "Front Office" et "Back Office" qui devient aujourd'hui prédominant dans l'industrie automobile.

Avant de définir ces différents types de coopération, il s'agit de proposer une définition de la collaboration. Or, aujourd'hui, selon Boutigny [2004] aucun consensus autour d'une définition précise n'a pu être réalisé. Par contre, il est important de distinguer la différence entre collaboration et coopération [Gronier, 2006], mécanismes qui sont aujourd'hui utilisés pour caractériser la conception collaborative [Maranzana et al., 2008]. Pour ce faire, nous retenons les deux définitions suivantes :

[Boutigny, 2004] : *"La coopération est définie comme une organisation collective du travail dans laquelle la tâche à satisfaire est fragmentée en sous-tâches, chacune de ces sous-tâches est ensuite affectée à un acteur, soit selon une distribution parfaitement horizontale dans laquelle tâches et acteurs sont équivalents, soit selon une logique d'attribution en fonction des compétences particulières de chacun."*

[Zaibet, 2006] : *"La collaboration s'entend par une situation de travail collectif dans laquelle tâche et but sont en communs. Tous les acteurs travaillent sur les mêmes points."*

En analysant ces deux définitions, il s'avère que dans le processus de conception aujourd'hui concourant, les différents acteurs travaillent principalement en coopération plutôt qu'en collaboration. Afin d'appuyer cette réflexion, nous pouvons aussi citer Rose [2004] qui souligne le fait que les termes "collaboration" ou "activité collaborative" sont souvent employés à mauvais escient et servent à définir des situations de communication simple, de coordination ou de coopération.

En accord avec le processus de conception détaillé dans le paragraphe précédent, nous pouvons établir qu'à chaque acteur est attribuée une tâche spécifique. Le paragraphe suivant nous permet de différencier les différents types de coopération existants afin de comprendre la complexité des échanges entre les différents métiers de l'industrie.

2.1.2.1 Différents types de coopération

Suivant les travaux de Tarpin-Bernard et David [1996], nous pouvons distinguer quatre types de coopération au sein d'un processus de conception qui sont représentés sur la figure 8. Sur cette figure, nous récapitulons les types de communication qui existent entre les participants et les objets partagés dans chacun des quatre modes de coopération.

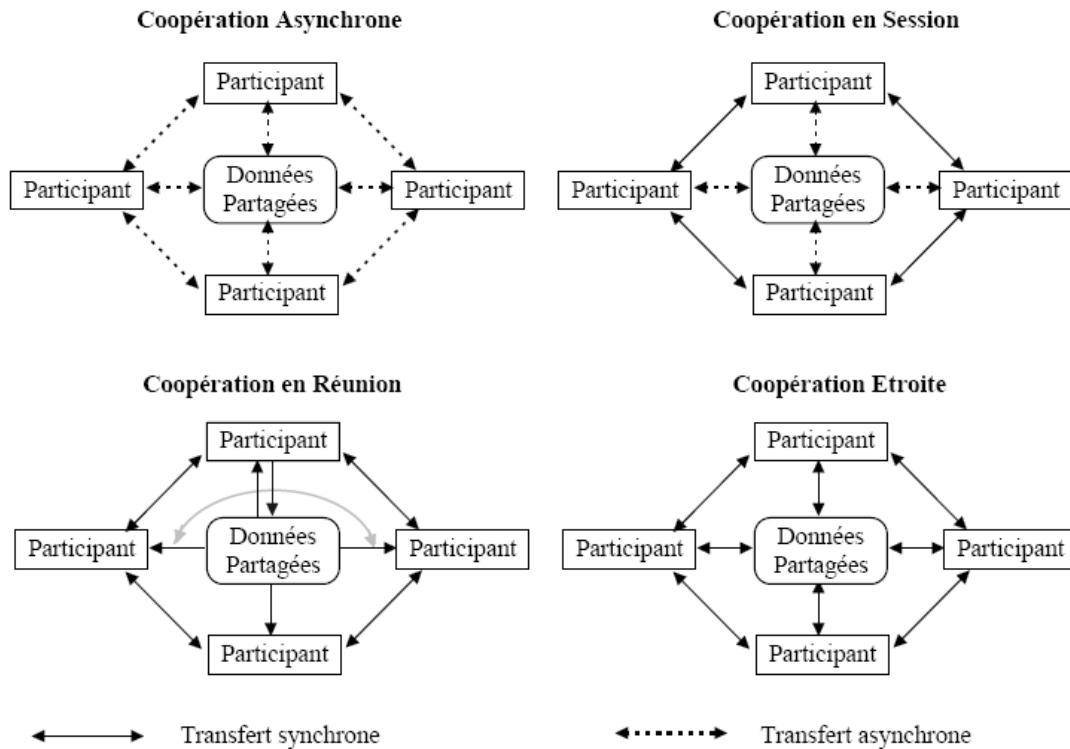


Figure 8 : Illustration des quatre modes de coopération et les communications respectives en accord avec Tarpin-Bernard et David [1996]

- **La coopération asynchrone :**

[Tarpin-Bernard et David, 1996] : "Dans le contexte de l'entreprise, la coopération asynchrone correspond au mode de travail autonome. Chacun travaille de son côté puis soumet des rapports, comptes-rendus, etc. aux interlocuteurs adéquats qui, plus tard, feront part de leurs analyses. Pour ce faire, chacun possède des outils de communication plus ou moins informatisés tels que la messagerie ou l'agenda pour la prise de rendez-vous. L'objectif principal de la coopération asynchrone est de proposer aux membres du projet des outils supportant les éléments de base d'un projet multi-acteurs classique."

- **La coopération en session :**

[Tarpin-Bernard et David, 1996] : "La notion de session introduite dans la coopération en session correspond à l'acte de présence au sein de l'entreprise et peut être rapprochée de la notion d'astreinte. En effet, dans un tel mode, les participants connaissent la liste de leurs interlocuteurs potentiels à un instant donné. Dans le cas de l'astreinte, cette liste est prédéfinie par le chef de projet. Elle se met à jour à partir des agendas individuels. A titre d'exemple, le téléphone peut représenter un outil type de la coopération en session. En effet,

la communication téléphonique ne peut s'établir si les interlocuteurs ne sont pas présents simultanément. Cependant, l'informatique permet d'envisager des outils beaucoup plus puissants que le téléphone et qui permettent d'abolir d'une façon plus nette les barrières spatiales séparant les différents participants d'un projet. L'objectif principal de la coopération en session est de faire diminuer les délais d'interaction entre les membres du projet."

- **La coopération en réunion :**

[Tarpin-Bernard et David, 1996] : "La notion de réunion introduite dans la coopération en réunion correspond exactement à celle qui existe dans le cadre d'un projet. De fait, elle est planifiée et elle définit des rôles spécifiques à chaque participant. De plus, elle porte sur un ensemble d'objets clairement identifié (document, plan, maquette, etc.) qui doivent être partagés par l'ensemble des membres de la réunion. Contrairement à la coopération asynchrone, la coopération en réunion impose la participation active (ex: réponse immédiate aux questions). L'objectif principal de la coopération en réunion est d'accroître la coordination entre les membres du projet."

- **La coopération étroite :**

[Tarpin-Bernard et David, 1996] : "La coopération étroite correspond à une vision plus précise de la coopération. Elle doit permettre une interaction maximale entre les individus dans un monde cohérent simulant la réalité. Cette forme de coopération se rapproche de la notion de travail coopératif à la planche (les concepteurs se retrouvent tous autour de la planche à dessin et interagissent tous simultanément sur le plan). C'est notamment dans ce cadre que l'on peut imaginer de nouvelles formes de coopération non encore exploitées. La puissance de cette coopération réside dans la liberté d'action qu'engendre la possibilité d'agir finement et simultanément sur des objets d'un monde virtuel global. L'objectif principal de la coopération étroite est d'accroître la coproduction des différents membres du projet."

Pour conclure, les communications asynchrones sont uniquement dans le mode coopération asynchrone, et les trois autres modes relèvent de la collaboration en temps réel avec une coopération plus ou moins forte. Ces différents modes de coopération nous permettent ainsi de pouvoir comprendre les différents modes d'organisation présentés dans la suite de ce document de recherche.

2.1.2.2 Identification d'un mode organisationnel

Aujourd'hui, dans le cadre de la sous-traitance automobile et suivant le contexte simultané du processus de conception, un concepteur est amené à coopérer avec ses différents clients et fournisseurs qui sont mondialement dispersés. La multiplication et la diversité des projets auxquels le concepteur est affecté engendrent ainsi des modifications organisationnelles. Afin d'améliorer la coopération entre ces différents acteurs, les sous-

traitants automobile ont aujourd'hui initié une classification des activités afin de pouvoir les répartir géographiquement.

Deux grandes familles ont ainsi pu être identifiées lors de ce découpage. La première concerne les travaux qui nécessitent une collaboration étroite avec la clientèle (signatures de contrats, définition du besoin, etc.). La seconde famille concerne les activités qui ne nécessitent aucun contact avec les clients. De ce fait, et emprunté aux principes organisationnels des systèmes financiers [Safizadeh et al., 2003] dans lesquels la collaboration étroite avec une clientèle très importante en termes de nombre et diversité, le principe de "Front Office" et "Back Office" est aujourd'hui porté aux domaines de la conception de produits. Ce type d'organisation dissocie les contacts frontaux avec la clientèle et le fonctionnement propre de la société.

- **Le principe du "Front office" :**

La traduction littérale de ce terme anglophone en français est "boutique". Utilisant cette traduction, le "Front Office" (FO) peut être défini comme la partie frontale de l'entreprise en contact direct avec le client. Nous pouvons définir que c'est le Front Office qui travaille avec le client, notamment les services commerciaux qui définissent les besoins initiaux.

- **Le principe du "Back Office" :**

"Arrière-boutique" est la traduction du terme anglais "Back Office". A l'inverse de la définition précédente, le "Back Office" (BO) concerne tous les processus internes de la société, c'est-à-dire non visible par le client. Dans le domaine de l'ingénierie, nous pouvons définir par exemple les processus d'achat, de gestion ou de logistique interne comme activités "Back Office". De plus, on considère que le BO possède les connaissances et compétences de conception du produit.

La figure 9 représente graphiquement l'organisation d'une entreprise en "Front Office" et "Back Office".

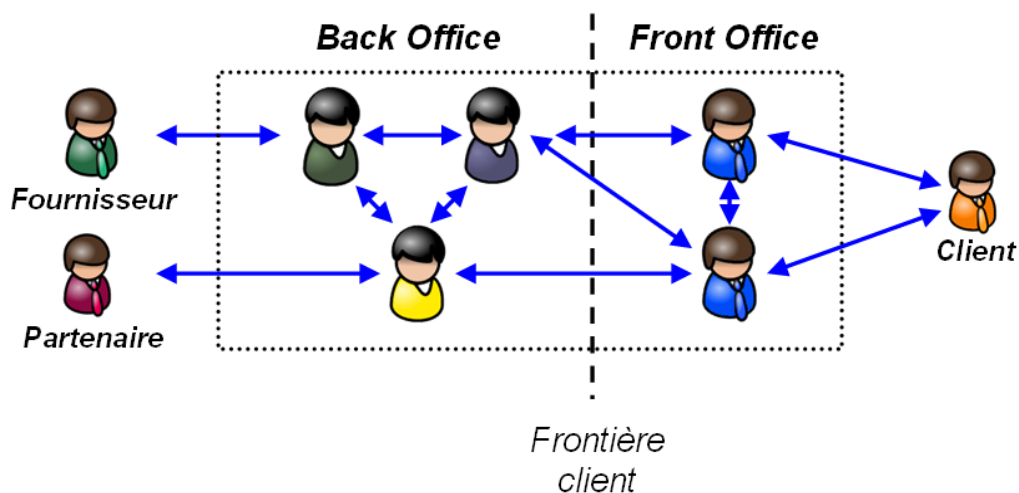


Figure 9 : Exemple d'organisation d'une société en Back Office et Front Office en accord avec Safizadeh et al. [2003]

La figure 9 montre l'exemple d'une société utilisant le principe organisationnel de "Front Office" et "Back Office". Nous apercevons que nous sommes en présence d'une frontière qui divise la société en deux parties. La première partie, celle de droite, est en contact direct avec le client et est caractérisée de FO. Elle coopère avec le BO, partie de gauche, afin que les acteurs métier puissent répondre aux besoins du client. C'est le BO qui est en coopération avec les partenaires et fournisseurs de la société. Ces derniers interlocuteurs ne sont jamais en contact avec le client.

Cette dernière figure montre les différents échanges entre tous les acteurs. Le nombre important d'informations circulant dans ce type d'organisation nous amène à imposer un modèle de structuration des données et des informations rigoureux afin de ne pas en perdre. De plus, ce modèle permet aux acteurs de retrouver facilement et rapidement les données et informations dont ils ont besoin. Le paragraphe suivant détaille certains de ces modèles.

2.1.3 Les modèles de structuration de données en conception de produits

Nous avons établi dans le début de cette section que la conception, qu'elle soit activité ou processus, engendre de nombreux échanges d'informations entre les différents acteurs impliqués [Gronier, 2006]. Afin de pouvoir optimiser les nombreuses itérations qui en résultent, de nombreux travaux de recherches universitaires cherchent à définir des modèles et des procédures pour pouvoir structurer et gérer ces informations. De plus, nous avons déterminé que dans un cycle de conception, la conception du produit ainsi que celle du process sont intimement liées. De ce fait, nous proposons dans ce paragraphe d'exposer différents modèles de structuration de données en conception de produits.

Comme évoqué dans les travaux de Roucoules [2007], Débarbouillé [1994] et Tichkiewitch [1996] sont les premiers auteurs à avoir initié des travaux sur les modèles produit. Il s'agissait de mettre en commun et de gérer l'ensemble des données définissant le produit. L'objectif de cette modélisation était de mettre en commun l'ensemble des données produit et de formaliser les différentes relations existantes entre elles. Afin de définir les modélisations de produits, nous pouvons ainsi retenir la synthèse proposée par Roucoules [2007] :

- **Composant** : représente tout objet utilisé pour décrire tout ou partie du produit. La description pouvait être de niveaux granulaires très hétérogènes.
- **Lien** : définit une partie d'un composant qui permet alors à ce dernier d'être mis en relation avec un autre composant.
- **Relation** : formalise la relation entre au moins deux composants par l'intermédiaire des liens.

- **Mécanisme de décomposition** : permet de décomposer un composant en sous-composants. Ceci permettait de garder la trace de la modélisation entre les différents niveaux granulaires de représentation.
- **Mécanisme de substitution** : permet de remplacer une Relation par un ensemble de Composants, Liens, Relations.

Fondés sur ces premiers concepts, de nombreux travaux ont été initiés afin de les compléter et de les adapter à différents contextes [Eynard, 1999] [Bernard, 2000] [Yan, 2001]. Nous pouvons citer le modèle FBS (Function, Behavior, Structure), développé par John Gero [1987] [1990] et qui, selon Hu et al.[2000], permet la représentation de manière explicite des fonctions du produit (le problème), de la structure du produit (la solution) et des comportements internes du produit. Nous pouvons aussi retenir une évolution de ce modèle, le modèle FBS-PPRE [Labrousse, 2004] [Labrousse et Bernard, 2008] qui permet d'intégrer les notions de processus, de produit, de ressources ainsi que les effets extérieurs.

Contrairement au modèle FBS qui ne s'intéresse qu'aux situations de vie du produit au sein de l'industrie [Coulbaly, 2008], un autre modèle, le modèle Multi-Domaines et Multi-Vues (modèle MD-MV), représenté sur la figure 10, proposé dans les travaux de Gomes et Sagot [2002], intègre les situations de vie d'usage.

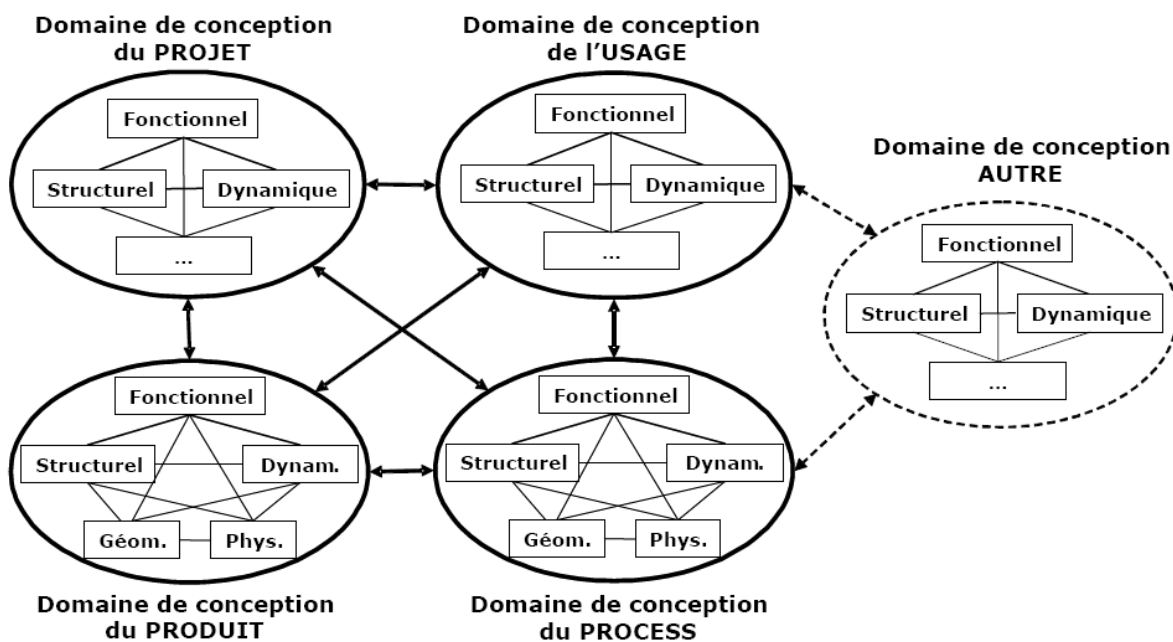


Figure 10 : Modèle de données systémique "Multi-Domaines et Multi-Vues" (MD-MV) en accord avec Gomes et Sagot [2002]

Ce modèle combine la vision transversale du modèle de la conception découpée en mondes et en domaines, à la vision générique et globale préconisée par le triangle systémique [Le Moigne, 1977]. Ce modèle considère la conception comme un réseau de domaines de conception en interaction touchant par exemple les domaines suivants : le Projet, le Produit, le

Process, les Usages associés (par exemple : fonction d'usage du produit, activités de fabrication, de maintenance, etc.).

De manière similaire au modèle "produit multi-vues" proposé par Tichkiewitch, chacun de ces domaines de conception, en tant que système à part entière, peut être observé selon au moins trois points de vue (ou aspects) en interaction :

- le premier point de vue est dit "Structurel". Il est perçu comme un ensemble d'objets agencés, comme "étant quelque chose", c'est le point de vue "de l'être" du système,
- le second point de vue est dit "Fonctionnel". Il est perçu comme agissant, comme "faisant quelque chose", c'est le point de vue "du faire" du système,
- troisième point de vue, dit "Dynamique", considère le système dans son évolution temporelle. Il est perçu comme "se modifiant au cours du temps", c'est le point de vue "du devenir" du système.

D'autres points de vue spécifiques peuvent également être considérés, tels que le point de vue géométrique (caractéristiques et positionnement spatial du système) ou le point de vue physique (lois de comportement du système), et ceci, dans des domaines de conception bien spécifiques. En effet, de tels points de vue peuvent être envisagés dans le domaine de conception du produit, voire du process, comme le propose déjà le "modèle produit multi-vues de conception intégrée" présenté précédemment.

L'autre intérêt apporté par le modèle MD-MV est de contribuer, lorsqu'il est décliné dans un environnement collaboratif, à mieux cartographier les connaissances métier mises en jeu lors de la conception, et ceci à partir des informations structurées contenues dans le système d'information technique de l'entreprise. Dès lors, des processus d'extraction, de formalisation, de capitalisation et de réutilisation des connaissances métier, à partir des informations projets contenues dans le système d'information, peuvent être envisagés [Gomes, 2008].

Ainsi, dans le cœur de ces travaux de thèse, nous avons souhaité retenir ce dernier modèle. En effet, ce modèle fédérant les domaines projet – produit – process – usage en y intégrant les différentes vues telles que les vues fonctionnelle, structurelle ou dynamique, offre une certaine flexibilité permettant de l'adapter à nos futurs besoins telle que l'intégration du point de vue géométrique. Le prochain paragraphe a donc pour objet de présenter les outils existants permettant d'intégrer le modèle MD-MV.

2.1.4 Les outils de conception intégrée et collaborative

Nous avons exposé dans les précédents paragraphes que le processus moderne en conception implique un niveau de connaissance et d'expertise élevé afin de pouvoir répondre aux exigences toujours plus sophistiquées du marché. Afin de pouvoir diminuer les temps de conception d'un produit, d'en réduire les coûts et d'assurer la qualité, nous avons établi la nécessité de renforcer la collaboration entre les acteurs métier pluridisciplinaires participant au processus de conception qui, de plus, est aujourd'hui distribué. Nous avons par ailleurs

énoncé, à travers la présentation de différents modèles produits, qu'aujourd'hui la forte intégration des connaissances métier lors du processus de conception nécessite d'allouer un cadre qui permet de capturer, de représenter, d'extraire et de réutiliser ces dites connaissances.

Afin de répondre à cette demande, nous présentons dans la suite de ce paragraphe la notion de Product Lifecycle Management (PLM) qui correspond à une stratégie d'entreprise créant un environnement de développement centré sur le produit. La présentation de cette solution s'appuie sur les travaux de Ameri et Dutta [2005] qui concernent l'intégration de la gestion des connaissances dans ces systèmes.

Avec l'avènement des systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) dans les années 1980, l'ingénierie en conception de produits est entrée dans une nouvelle ère. En effet, les systèmes de CAO permettent depuis cette époque de créer une représentation graphique tridimensionnelle du produit afin de le rendre manipulable et utilisable par le concepteur. De plus, l'intégration de la dimension simulation de fabrication (FAO – Fabrication Assistée par Ordinateur) et des calculs mécaniques (IAO – Ingénierie Assistée par Ordinateur) à ces solutions permet de simuler le produit numériquement à chaque situation de vie. En parallèle de ces systèmes, les Systèmes de Gestion de Données Techniques (SGDT, ou PDM en anglais – Product Data Management) sont apparus afin de contrôler et gérer toutes les informations du produit générées par ces premiers systèmes. Le besoin d'avoir un accès rapide, facile et sécurisé, à des données validées lors du processus de conception fut la principale raison du développement de ces systèmes. La fonctionnalité principale des premiers PDM était de fournir la donnée requise par l'utilisateur et de lui assurer son intégrité par une mise à jour continue lors des modifications ou nouvelles créations réalisées par les autres utilisateurs [Obank et al, 1995] [CIMDATA, 1998].

De nombreuses évolutions ont ainsi été intégrées, par la suite, dans le PDM, comme l'intégration des fonctionnalités de gestion du versionnement, de gestion des documents ou encore de workflow afin de proposer aux entreprises un outil permettant de pratiquer l'ingénierie concourante. Mais la première version des PDM ne correspondait pas aux attentes des métiers hors ingénierie tels que les achats, le marketing ou encore la logistique. Les deux causes principales de cette non utilisation étaient la gestion limitée des types de données (seulement la géométrie, les nomenclatures et les modèles de calcul) ainsi que la complexité d'utilisation du système qui nécessitait une solide formation technique.

Dans les années 1990, les sociétés développant ce type d'outils les ont intégrés à des systèmes utilisant des technologies Internet. Développé selon cette approche, le PDM devenait accessible de partout dans le monde. Mais encore, le cœur du PDM restait orienté sur une gestion des documents d'ingénierie [Lee, 1999]. De ce fait, il était toujours impossible de gérer toutes les données du produit liées à l'ensemble de son cycle de vie.

En parallèle, une première génération d'outils spécifiques à la gestion des ressources d'entreprise fut introduite. Nous pouvons citer par exemple les logiciels de PGI (Progiciel de Gestion Intégré, ou en anglais ERP - Enterprise Resource Planning) [Bowman, 1997], de

GRC (Gestion de la Relation Client, ou en anglais CRM – Customer Relationship Management) [Markus et Tanis, 2000] ou encore de GCL (Gestion de la Chaîne Logistique, ou en anglais SCM – Supply Chain Management) [Archibald et al., 1999]. L'objectif de ces outils était de fournir aux sociétés une solution permettant d'améliorer leurs pratiques industrielles. Nous étions alors en présence de systèmes distincts, régissant chacun une situation de vie spécifique du produit, mais tous dépendant de données similaires, relatives au produit.

Afin de fédérer l'ensemble de ces outils, le concept de PLM est apparu un peu plus tard à la fin des années 90. L'objectif principal du PLM était de se dégager des seuls aspects des données issues de l'ingénierie d'un produit, en fournissant une plateforme partagée pour la création, l'organisation et la distribution de toutes les informations concernant le produit à travers une entreprise étendue. Le PLM s'efforce de faire évoluer le principe du PDM vers les autres métiers tels que le marketing, la vente ou encore les services d'après-vente. En d'autres termes, alors que le PDM ne faisait que gérer les données produites par des logiciels tiers, le PLM contient lui-même ces logiciels [Saaksvuori et Immonen, 2004] afin de réduire la scission existante entre le process commercial et le process de conception de produits au sein d'une même entreprise.

Afin de compléter la définition proposée ci-dessus, les travaux de Schuh et al. [2008] proposent une description du PLM définie en sept éléments clés. La figure 11 décrit ces différents éléments.

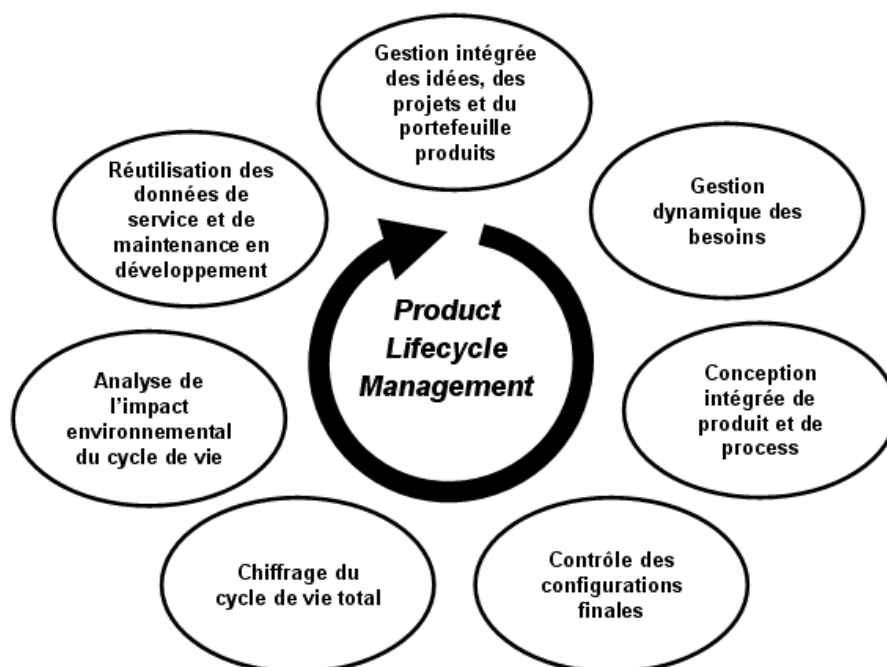


Figure 11 : Définition des sept éléments clés du PLM selon Schuh et al. [2008]

Le premier élément, "gestion intégrée des idées, des projets et du portefeuille produit", permet de réaliser l'analyse de faisabilité de la nouvelle idée en considérant les ressources

disponibles pour conduire le futur développement et pour qu'elle soit en accord avec les autres produits de la société [Clark et al., 1993].

La "gestion dynamique des besoins", le second élément, permet de prendre en compte toutes les évolutions du besoin en cours de développement afin de pouvoir adapter le produit en conséquence.

Le troisième élément permet d'établir l'ingénierie concourante afin d'anticiper les contraintes process très tôt dans le processus de conception. Cet élément est nommé "Conception intégrée de produit et de process".

Le "Contrôle des configurations finales" est l'élément suivant proposé dans cette illustration. Il permet d'identifier, contrôler, comptabiliser et auditer les caractéristiques fonctionnelles et physiques des composants du produit.

Le cinquième élément permet de considérer les coûts impliqués pendant le cycle de vie du produit, c'est le "Chiffrage du cycle de vie total".

L'avant dernier élément concerne la prise en compte de tous les impacts environnementaux engendrés par le produit durant toutes les étapes de son cycle de vie, c'est l'"Analyse de l'impact environnemental du cycle de vie".

La dernière étape, la "Réutilisation des données de service et maintenance en développement", permet de prendre en compte les contraintes des produits en situation de vie d'utilisation et de maintenance.

A travers ces sept éléments clés, nous avons déterminé que le concept du PLM permet une gestion intégrée de toutes les informations relatives au produit à travers tout son cycle de vie. De ce fait, le PLM contient intrinsèquement la possibilité de gérer les connaissances par l'intégration d'un processus qui capture, organise et réutilise toutes les informations liées au produit durant tout son cycle de vie. Nous proposons donc de définir, dans la section suivante, l'approche de l'intégration de l'ingénierie des connaissances dans le processus de conception.

2.2 Application de l'ingénierie des connaissances dans le processus de conception

Dans les paragraphes précédents, nous utilisons fréquemment le terme "Connaissance" qui est issu d'une discipline appelée "ingénierie des connaissances" [Dieng et al., 1998] qui regroupe, selon Blondel et al. [2006], la gestion des connaissances (en anglais Knowledge Management – KM) et la démarche d'intelligence économique. Cette nouvelle discipline devient aujourd'hui prédominante dans les industries [Shadbolt et Milton, 1999] par le fait qu'elles sont confrontées à un nombre incalculable d'informations métier [Heath et al., 2000]. L'objectif principal de cette discipline est de permettre à l'organisation d'informer les futures discussions, décisions et activités afin d'augmenter la productivité dans ces étapes [Wong et al., 2006].

La définition donnée par Blondel et al. [2006] pour ce type d'ingénierie correspond aux principes qui sont aujourd'hui appliqués en entreprise.

[Blondel et al., 2006] : *"L'ingénierie des connaissances met à disposition des moyens matériels et humains permettant de produire, partager, entretenir, rafraîchir et protéger les connaissances issues de l'environnement externe et de l'environnement interne."*

Cette définition recense les deux différentes provenances des connaissances au sein de l'entreprise : l'environnement interne et externe. Ainsi, BLONDEL et al. nous proposent les deux définitions suivantes :

[Blondel et al., 2006] : *"La démarche d'intelligence économique regroupe l'ensemble des pratiques de veille (technologique, stratégique), des pratiques de diffusion et de protection de la connaissance externe en interne, voire sa manipulation vis-à-vis d'un tiers. [...] La démarche de gestion de connaissances (Knowledge Management) vise à la cohérence et à la disponibilité de la connaissance produite en interne, à sa capitalisation et diffusion à l'ensemble des membres de l'organisation."*

Afin de comprendre le principe de fonctionnement de ce type de démarche, nous définissons dans le paragraphe suivant les différents termes employés dans ces travaux de recherche.

2.2.1 Les modèles de connaissances

Pour permettre de différencier les données, les informations et les connaissances, nous retenons les définitions de la donnée et de l'information établies par Davenport et Prusak [1998]. Ces définitions dénotent une approche plus gestionnaire que technique (dite d'ingénierie).

[Davenport et Prusak., 1998] : *"Une donnée est un assemblage de faits objectifs et discrets relatifs à un événement qui sont usuellement stockés dans certain système d'informations. [...] Une information est un ensemble de données dans un contexte spécifié et ayant subi une réflexion."*

Cette définition de la connaissance n'est aujourd'hui pas unanime au sein de la communauté scientifique. Nous rencontrons ainsi deux approches distinctes.

La première approche consiste à distinguer deux types de connaissances. Nonaka et Takeuchi [1995] définissent deux types de connaissances : que sont les connaissances tacites et explicites. Cette notion a été à mainte fois reprise et adaptée à différents contextes, comme Grundstein [2002] qui a introduit deux autres concepts, en l'occurrence que le savoir désigne la connaissance explicite et le savoir-faire désigne la connaissance tacite. A partir de cette

dernière définition, on peut ainsi définir plus précisément ces deux types de connaissances dans les domaines de la conception. Nous retenons les définitions données par Baizet [2004].

[Baizet, 2004] : *"Les connaissances tacites sont les connaissances qui appartiennent au monde des objets mentaux, des représentations mentales. Elles regroupent les compétences innées ou acquises, le savoir-faire et l'expérience. Elles sont généralement difficiles à "formaliser" par opposition aux connaissances explicites. [...] Les connaissances explicites, par opposition aux connaissances tacites, sont les connaissances clairement articulées au niveau d'un document écrit, ou d'un système informatique. Ces connaissances sont transférables physiquement, car elles apparaissent sous une forme tangible (dossier papier ou électronique)."*

La seconde approche consiste à donner une seule définition à la connaissance. En effet, selon la définition de l'information citée plus haut, il s'avère que les connaissances explicites de Baizet corrélaient avec la définition des informations de Davenport et Prusak [1998]. Dans ce cadre, Davenport définit la connaissance comme suit :

[Davenport et Prusak, 1998] : *"Une connaissance est le résultat d'un mélange homogène d'expériences, de valeurs, d'informations contextuelles, réalisé par un expert qui fournit un cadre pour évaluer et intégrer de nouvelles expériences et informations. Elle naît et est appliquée dans l'esprit du porteur de cette connaissance."*

Cette définition est aujourd'hui aussi reprise dans plusieurs travaux scientifiques, notamment dans les travaux de Millard et al. [2006] ou de Wong et al. [2006], qui rappellent que la connaissance est une information pertinente fournie au bon moment et dans le bon contexte.

En réalisant la synthèse de ces dernières définitions, nous pouvons avancer qu'il n'existe pas de connaissance en dehors de l'homme. Ainsi, selon Mach [1995], la connaissance peut ainsi être obtenue selon l'équation suivante:

$$\text{Connaissance} = \text{Information} + \text{Interprétation Humaine}$$

Dans ce document de recherche, nous retenons les définitions de "connaissance" et "information" données par Davenport et Prusak [1998].

Indépendamment de la définition des connaissances et suivant la définition de ce type de démarche citée dans le paragraphe précédent, il s'agit d'intégrer ces connaissances dans un processus de gestion, appelé "Gestion de la Connaissance". Afin de déployer cette gestion, le cycle de vie d'une connaissance doit être exposé. Pour ce faire, le cycle de vie proposé [Millard et al., 2006] est représenté sur la figure ci-après.

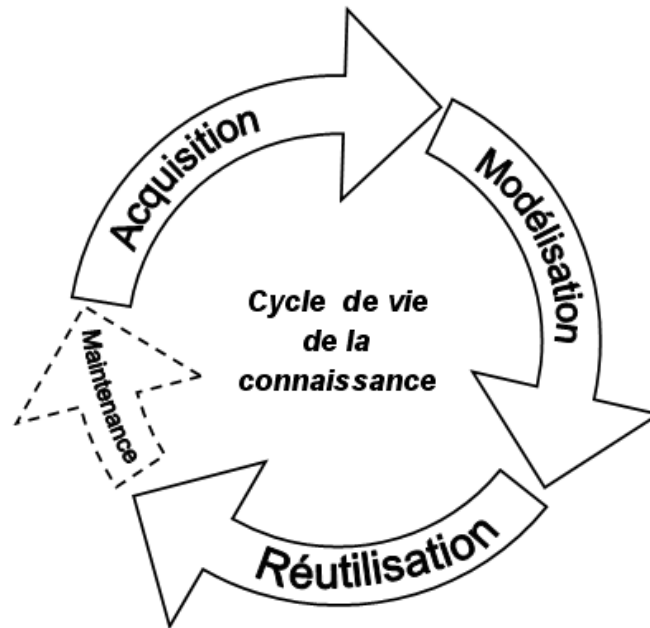


Figure 12 : Cycle de vie de la connaissance inspiré de Millard et al. [2006]

Ce cycle de vie propose quatre situations de vie dans lesquelles la connaissance évolue. La première situation consiste à capturer la connaissance dans son environnement, c'est la situation d'acquisition. La seconde permet de formaliser sous différentes formes cette connaissance acquise, c'est la situation de modélisation. La situation de réutilisation, la troisième, permet d'exploiter cette connaissance dans un nouvel environnement. La dernière situation est l'étape de maintenance. Cette étape consiste à mettre à jour la connaissance, et pour ce faire, nécessite d'en capturer des nouvelles.

Dans la suite de ce paragraphe, nous exposons ainsi les différents moyens et méthodes d'acquisition, de modélisation et de réutilisation qui sont aujourd'hui appliqués en industrie.

2.2.2 Exploitation des connaissances en conception

Afin d'exploiter des connaissances au sein d'un processus de conception, il faut déterminer les possibilités qui sont offertes. En effet, plusieurs possibilités ont été identifiées et on se propose de présenter, dans ce paragraphe, les plus pertinentes dans le cadre de nos travaux de recherche. Ainsi, nous choisissons de définir dans un premier temps le mémoire de connaissances, qui fut longtemps le premier vecteur de transmission des connaissances. Suite à l'avènement des systèmes d'information, on choisit d'exposer, dans un second temps, les systèmes experts puis les ontologies qui sont aujourd'hui représentatifs des possibilités applicables en industrie. Dans un troisième temps, nous exposons le modèle de raisonnement à partir de cas qui est une approche issue du domaine de l'intelligence artificielle et qui nous semble pertinente dans le processus de conception.

D'autres possibilités offertes afin de répondre à notre besoin, telles que la technologie de groupe [Mutel, 1988] ou l'approche par propagation de contraintes [Waltz, 1972], ne sont pas traitées dans ces travaux de recherche.

2.2.2.1 Le mémoire de connaissances

Le mémoire de connaissances est représenté sous forme de document papier afin de pouvoir transmettre les connaissances d'un individu à l'autre. Depuis que l'homme a considéré nécessaire de pouvoir transmettre des connaissances d'une génération à la suivante, la notion de mémoire de connaissance a été établie. La plus connue reste simplement le livre, qui aujourd'hui est le vecteur de connaissance le plus établi au sein de notre civilisation. Comme par exemple ce document qui reste un mémoire de connaissances expérimentales.

Cependant, depuis le déploiement des systèmes d'information, dès la seconde guerre mondiale, la transmission de connaissances a été révolutionnée. En effet, avec l'arrivée plus récente de l'Internet, l'accès à la connaissance devient plus aisé et de nouvelles formes de vecteurs de connaissance ont ainsi pu voir le jour et sont présenté dans le paragraphe suivant.

2.2.2.2 Système Expert

Un système expert est un système d'information qui permet de traiter un problème en se fondant sur des règles métier issues du domaine d'appartenance du dit problème [Piechowiak 2003]. Du domaine de l'Intelligence Artificielle, les premiers systèmes experts sont apparus très tôt dans l'histoire des systèmes d'information, dès les 1960, permettant d'aider les techniciens dans leurs décisions et dans leurs diagnostics. Ces outils sont généralement destinés à l'aide à la décision et au diagnostic. Ainsi, comme souvent représenté dans la littérature, l'architecture d'un système expert est composé d'une base de connaissances en association avec à un moteur d'inférence (figure 13) [Karkan et Tjoen, 1993].

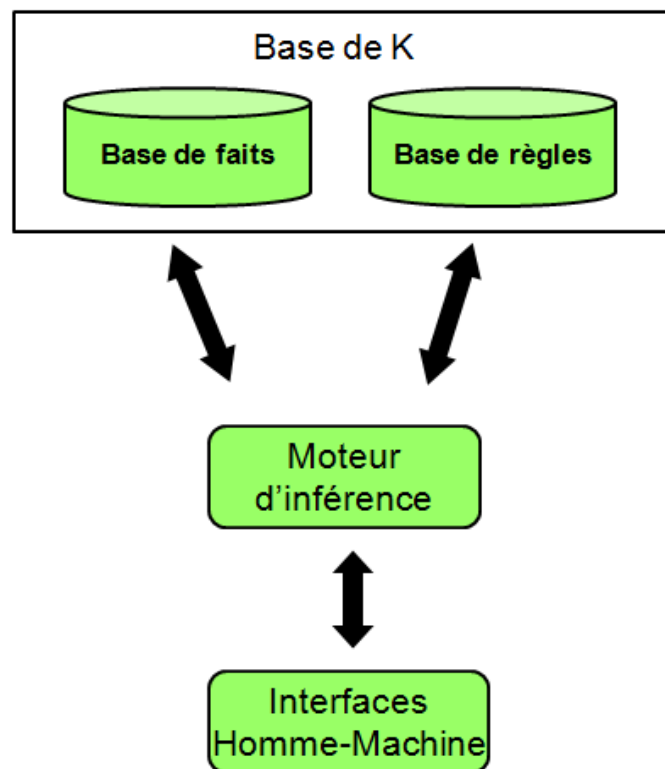


Figure 13 : Architecture d'un système expert en accord avec Karkan et Tjoen [1993]

Nous pouvons distinguer sur ce schéma qu'une base de connaissance est formée d'une base de faits, qui contient les données initiales et une base de règles qui permet de calculer les résultats associés au problème d'entrée. Les règles sont généralement sous la forme d'algorithmes conventionnels, par exemple, une boucle de type If – Then.

Lors de la résolution du problème, un moteur d'inférences traite les données précédemment citées afin de pouvoir en tirer les conclusions. Le principe du moteur d'inférences réside sur le chaînage des données. En effet, avec un moteur de calcul conventionnel, nous donnons des données d'entrées, et le moteur nous propose les résultats, ce processus est appelé le chaînage avant. Le moteur d'inférence, quant à lui, permet de pouvoir approcher le problème de n'importe quelle manière. En effet, nous pouvons partir des conclusions pour pouvoir déterminer les données d'entrées (chaînage arrière) ou vise versa, ce processus est appelé le chaînage mixte.

Cependant, la difficulté majeure dans ce type de système est la mise en place des règles dans la base de connaissances. Dans certains domaines d'application, il est plus aisé de formaliser ces règles. Dans le domaine de la conception de produit, il devient dès lors très difficile de pouvoir formaliser certaine règle, ou encore de formaliser sous forme de données ce domaine d'application.

Ainsi, afin de pouvoir structurer les données impliquées dans ce processus, il s'agit d'établir un modèle de données. Le paragraphe suivant détaille un moyen d'y parvenir par l'intermédiaire des ontologies.

2.2.2.3 Ontologie

Deux définitions reconnues de l'ontologie, celle de Gruber [1993]. et celle de Borst [1997], permettent à Studer et al. [1998] de la définir sous la forme suivante :

[Studer et al., 1998]: *"Une ontologie est une spécification explicite et formelle d'une conceptualisation partagée."*

Ainsi, il s'agit de pouvoir formaliser l'ensemble des données dans un domaine particulier, en l'occurrence des connaissances, afin de pouvoir les exploiter et les transmettre. Pour pouvoir lier les données entre elles dans ce domaine, il s'agit de les représenter sous forme de graphe, exposant ainsi toutes les données, et de pouvoir les contraindre entre elle au moyen de différentes relations.

Nous pouvons dès lors distinguer deux types de relations au sein d'un graphe représentant une ontologie :

- La relation de subsomption
- La relation sémantique

Sur la figure suivante, nous sommes en présence d'une ontologie simple composé d'un seul type de relation de subsomption, la relation sorte-de. La figure 14 illustre une ontologie simple de pare-chocs pour ce lien.

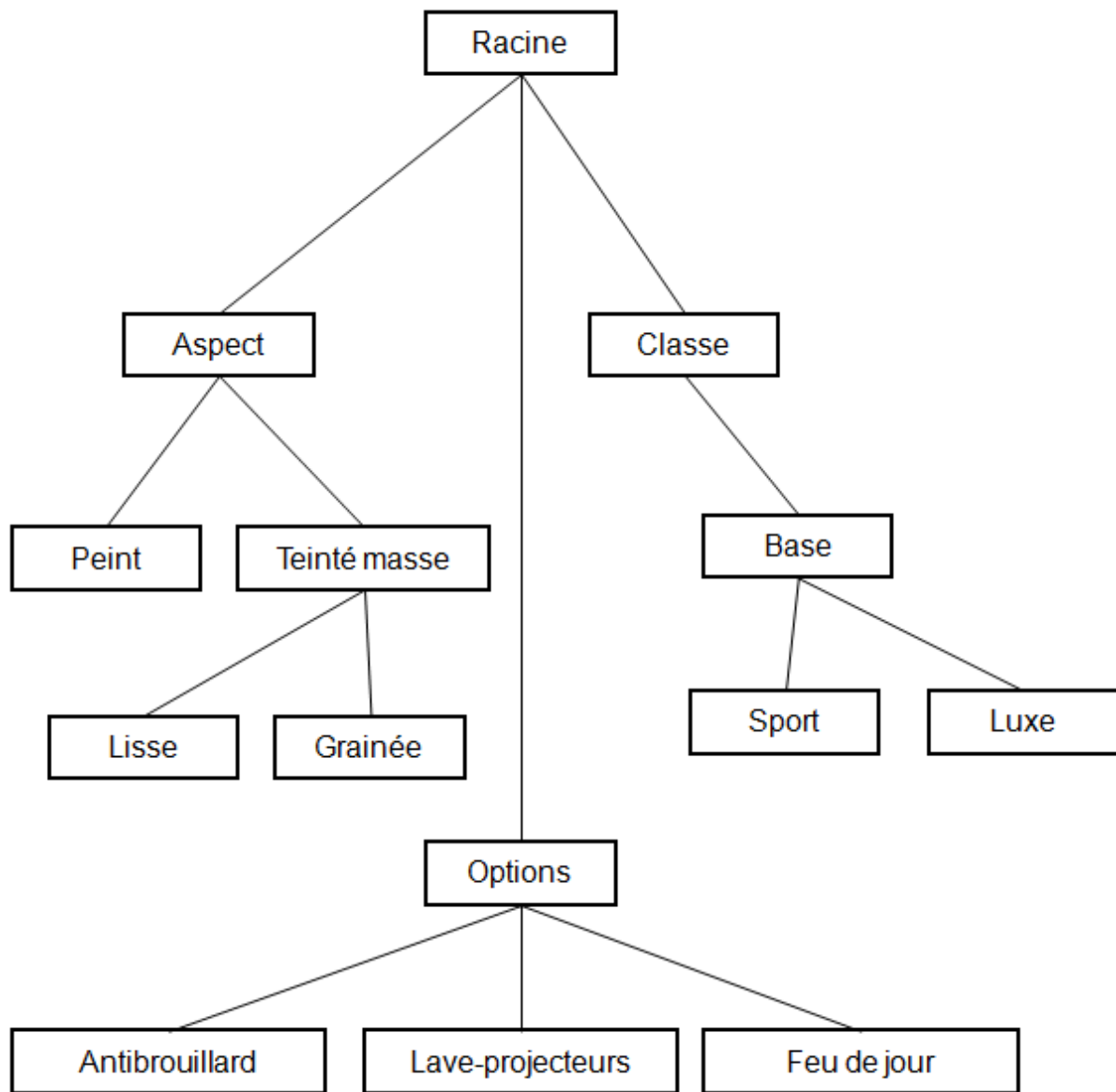


Figure 14 : Ontologie simple pour des descripteurs de pare-chocs (relation "sorte-de")

Par exemple, nous pouvons ainsi lire sur ce graphe qu'un pare-chocs peut avoir plusieurs aspects, dont un aspect peint ou en teinte masse dont ce dernier peut être lissé ou grainée.

Cependant, et comme le système expert présenté précédemment, nous pouvons mettre en exergue la difficulté d'exploitation de cette approche au sein d'un processus de conception de produits nouveaux. En effet, ce domaine étant en constante évolution, il semble toujours difficile de pouvoir en permanence exercer un processus de veille interne à la société afin de pouvoir mettre à jour constamment les ontologies.

En effet, pour pouvoir réaliser cette veille, il s'agit de constamment de pouvoir rencontrer les experts métiers du domaine afin de pouvoir extraire les nouvelles connaissances. Cependant, il s'avère très difficile opérationnellement de réaliser cette action puisque les experts métiers sont des acteurs de la société et ne peuvent affecter un temps important à cette action.

Pour cette raison, il s'agit de pouvoir proposer un paradigme permettant de pouvoir mettre à jour instantanément et sans perte de temps pour les acteurs métiers les différentes connaissances.

Le paragraphe suivant propose un nouveau paradigme permettant d'intégrer cette notion de mise à jour.

2.2.2.4 Raisonnement à partir de cas

Le raisonnement à partir de cas (Case Based Reasoning - CBR) est un paradigme de résolution de problèmes que l'on peut considérer comme fondamentalement différent des autres grandes approches de l'intelligence artificielle [Aamodt et Plaza., 1994] dont la définition a débuté au début des années 80 avec les travaux de Schank [1982] sur les thématiques de mémoire dynamique. En effet, au lieu d'exploiter uniquement les connaissances générales d'un domaine, le CBR est capable d'exploiter les connaissances issues de situations problématiques concrètes appelées cas. Un nouveau problème est alors résolu en recherchant un cas similaire passé et en le réutilisant dans la nouvelle situation du problème. La seconde différence majeure est l'approche d'apprentissage incrémentale. Quand le nouveau cas traité est résolu, celui-ci devient immédiatement un cas similaire passé et peut alors être directement exploité dans un nouveau problème.

De manière simplifiée, le raisonnement à partir de cas peut être défini de la façon suivante :

[Aamodt et Plaza., 1994] : *"Résoudre un nouveau problème en se rappelant d'une situation précédente similaire et en réutilisant les informations et les connaissances de cette dernière."*

Pour illustrer cette définition, nous pouvons citer les deux exemples issus de la vie courante ci-dessous :

- Le cas du médecin : Après avoir examiné un patient, il se rappelle un autre patient qu'il avait traité quelques semaines avant. En supposant qu'il s'en soit souvenu par une similitude importante de symptômes, le médecin utilise le diagnostic du patient précédent afin de déterminer la maladie et le traitement du patient qu'il a en face de lui.
- Le cas du consultant financier : Lors de l'examen d'une demande de crédit difficile, il se rappelle alors un cas précédent dans lequel une société similaire rencontrait le

même type de problèmes. Dans cette situation, son directeur avait alors refusé le crédit. Il recommande alors la même décision.

Comme le montrent les exemples cités ci-dessus, le raisonnement à partir de cas fait complètement partie de la nature humaine. Ce modèle est aussi utilisé dans des recherches en psychologie cognitive. En effet, de nombreuses études dans le domaine ont mis en évidence l'intérêt primordial de l'utilisation des situations expérimentées précédemment (que l'on appelle cas) pour résoudre des problèmes chez les humains [Kolodner, 1992] [Ross, 1989] [Schank, 1982].

Ce modèle cognitif peut être décrit par un cycle de CBR selon les quatre étapes suivantes :

- **RETROUVER :**

Il s'agit dans cette étape de retrouver les cas les plus similaires au nouveau cas présenté.

- **REUTILISER :**

Il s'agit de réutiliser les informations et les connaissances de ce(s) cas pour résoudre le nouveau problème.

- **REVISER :**

Il s'agit d'adapter la solution proposée au nouveau contexte.

- **RETENIR :**

Il s'agit d'extraire de cette nouvelle expérience les informations et les connaissances qui pourront être réutilisées dans un futur cas.

La figure 15 illustre le processus décrit ci-dessus ainsi que les étapes plus spécifiques qu'ils induisent sous forme d'un cycle, appelé cycle de CBR.

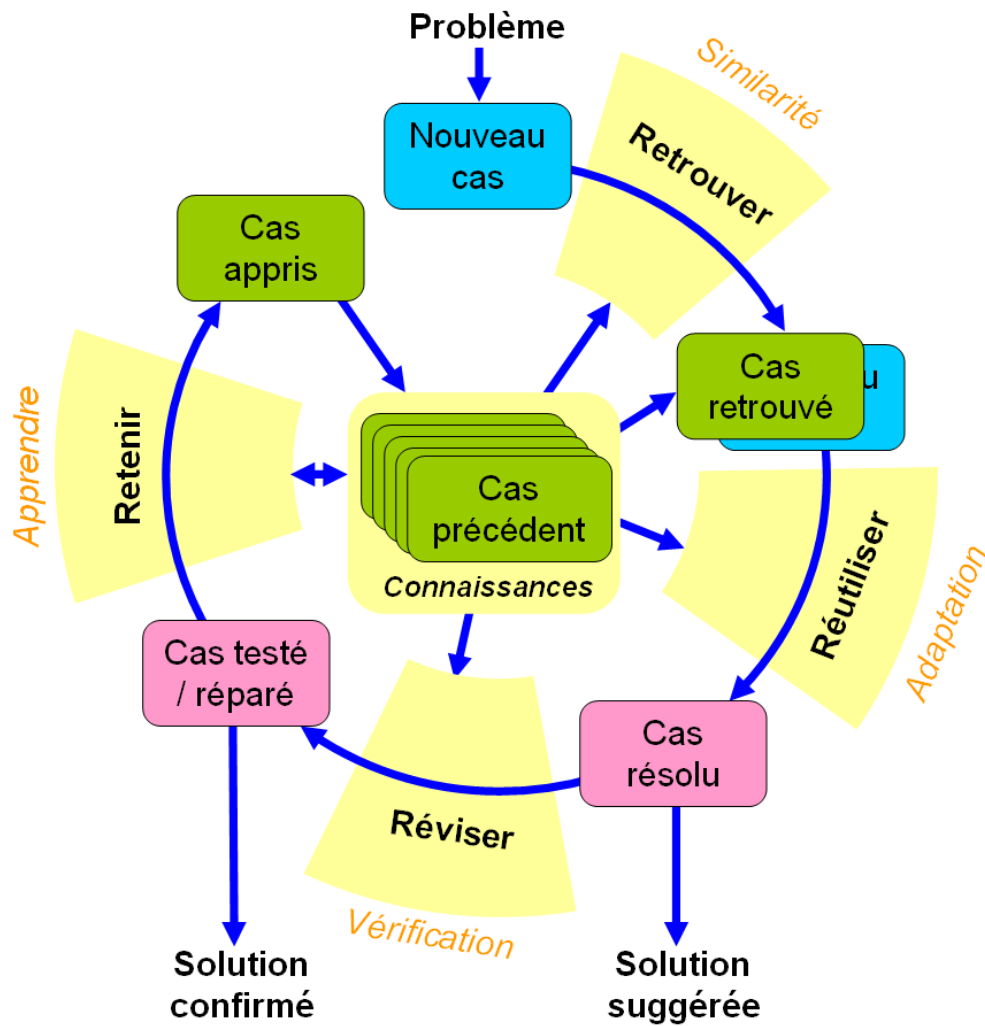


Figure 15 : Cycle de raisonnement à partir de cas (CBR) selon Aamodt et Plaza [1994]

Ce cycle de CBR a par ailleurs fait l'objet de nombreuses évolutions dans de nombreux domaines afin de s'adapter à de nouveaux contextes, tels que l'Exemplar-based reasoning [Karlsson et al, 2008], l'Instance-based reasoning [Fdez-Riverola et al., 2007], le Memory-based reasoning [Olson, 2008] ou encore l'Analogy-based reasoning [Wojna, 2005]. La multitude de divergences que l'on peut alors observer dans toutes ces approches nous permet de déduire qu'il n'y a pas de cycle de CBR universel pour répondre à tous les domaines d'application. C'est pourquoi, lors de la définition d'un cycle de CBR, il faut trouver un ensemble de solutions cohérentes et appropriées aux problèmes suivants :

- Représentation des connaissances
- Méthode de recherche
- Méthode de réutilisation
- Méthode de révision
- Méthode de capitalisation

Nous pouvons identifier au sein d'un cycle de Case Based Reasoning deux principales difficultés, qui sont généralement soulevées dans la littérature :

- La création des cas un certain nombre de cycle est nécessaire afin de pouvoir déterminer une base de cas conséquente.
- Comment adapter les cas au nouveau contexte ? En effet, toute la puissance de ce paradigme réside dans cette question. Cependant, très peu de travaux traite aujourd'hui de cet aspect.

2.2.2.5 Synthèse sur l'exploitation des connaissances en conception

Les différents modèles d'exploitation des connaissances présentés dans les précédents paragraphes nous permettent de déterminer une limite fondamentale qui est la difficulté de remettre à jour les différents systèmes (systèmes experts ou ontologies) ou de mettre à disposition une quantité significative de cas (Case-Based Reasoning). En amont, il faut mettre à disposition de ces systèmes les connaissances qui permettent de les initialiser. Le paragraphe suivant propose certains outils d'ingénierie des connaissances afin de pouvoir formaliser ces connaissances.

2.2.3 Les méthodes et outils d'ingénierie des connaissances existants

De nombreux outils et méthodes sont mis à disposition pour exploiter une approche d'ingénierie des connaissances. Afin de pouvoir appliquer cette démarche, il s'agit de dissocier ces méthodes en trois types distincts. Le premier type concerne les méthodes de capitalisation des connaissances qui sont les plus appropriées à ces travaux de recherche, le second la modélisation des connaissances et le troisième la cartographie de ces dernières. Dans un premier temps, nous détaillons principalement les méthodes de capitalisation, et dans un second temps, nous citons les principales méthodes de modélisation et de cartographie qui concernent plus spécifiquement les systèmes d'information.

2.2.3.1 Les méthodes de capitalisation

Lors de ces travaux de recherche, nous avons pu identifier trois méthodes principales de capitalisation des connaissances. Ces méthodes visent à formaliser les connaissances en fournissant une approche permettant dans un premier temps de les identifier, puis dans un second temps, de les formaliser. Le livrable de ces méthodes est sous forme d'un écrit.

La première concerne la méthodologie KNOVA-SIGMA [Serrafero, 2006], récente innovation de la méthode CYGMA (Cycle de vie et. Gestion des Métiers et des Applications) développée dans les années 90 [Serrafero, 2000]. Liée au cycle de vie d'un produit, cette méthode établit un bréviaire de connaissances métier. A travers une approche par entretien avec les différents acteurs métier de la société, le bréviaire est constitué principalement des quatre sections suivantes :

- Le processus métier : Cette section établit les activités métier issues du processus de conception qui sont divisées en stratégies de conception, scripts de conception, scénarii de conception et sessions de conception.

- L'expertise métier : Cette section recueille les règles métier selon trois axes qui sont les contraintes de conception, les conseils de conception et les choix de conception.
- Le vocabulaire métier : cette section définit le périmètre et les termes utilisés dans ledit métier. Ces différents termes sont ainsi structurés sous la forme d'un réseau sémantique [Sowa, 1976] [Mel'cuk, 1988].
- L'expérience métier : cette section recueille des cas de référence de l'organisation, qu'ils soient réussis ou ratés.

La démarche proposée consiste à initialiser la méthode à partir des besoins des équipes métier de l'organisation pour construire un référentiel qui permette le transfert des connaissances ainsi établies.

La seconde méthode de capitalisation des connaissances identifiée concerne la méthode REX (Retour d'Expérience). Cette méthode, développée par le Conseil de l'Energie Atomique (CEA) [Malvache et al., 1994], propose de rendre pérennes les connaissances acquises lors du processus de conception. Appliquée au cycle de vie du produit, l'objectif principal est d'éviter de refaire des erreurs de conception, de réutiliser et de comprendre les choix réalisés en gardant une trace des motifs de décisions. La représentation utilisée pour formaliser les connaissances ainsi acquises est sous forme de fiches d'expérience.

La méthode MEREX (Mise En Règle de l'Expérience) est la troisième méthode de capitalisation des connaissances exposée dans ce paragraphe. Cette méthode, établie par Corbel [1997] au sein de la société RENAULT, a pour objectif d'améliorer le processus de conception et de proposer des solutions préventives. Les supports de formalisme des connaissances sont représentés sous forme de fiches d'expérience liées à des check-lists. Chaque check-list regroupe les titres des fiches afin de pouvoir établir directement une visualisation des connaissances formalisées. Ces check-lists sont par exemple utilisées lors des réunions de conception faisant intervenir tous les acteurs métier du projet concerné.

2.2.3.2 Les méthodes de modélisation

Les méthodes de modélisation des systèmes de connaissance ont pour objectif la création d'un processus qui rend visible les interactions entre les différents éléments issus de la connaissance. Ces méthodes sont la base des systèmes experts.

Nous pouvons citer trois méthodes de modélisation des connaissances qui sont la méthode CommonKADS [Brooking et al, 1985] [Schreiber et al., 1999], la méthode KOD ainsi que la méthode MKSM [Ermine et al., 1996]. Cette dernière a subi de nombreuses évolutions, notamment vers la méthode MASK [Ermine, 2001] [Matta et Ermine, 2001].

2.2.3.3 Les méthodes de cartographie

Il s'agit dans cette méthode de juxtaposer sous forme de carte les différentes connaissances qui composent l'organisation. Cela permet de pouvoir identifier au sein de l'organisation qui est compétent pour une ou l'autre action. Les deux principales méthodes sont les arbres de connaissance [Authier et Levy, 1992] et la méthode KALAM [Prax, 2000].

Ces méthodes de cartographie des connaissances sont aujourd'hui utilisées par les ressources humaines des sociétés afin de pouvoir appliquer les démarches de GPEC (Gestion Prévisionnelle des Emplois et des Compétences).

2.3 Vers une conception fonctionnelle de produits

Comme présenté dans la première section de ce chapitre, le processus de conception évolue afin de transformer les exigences fonctionnelles en paramètres de conception. Pour pouvoir identifier un outil permettant d'établir ce lien, il s'agit de proposer dans un premier temps un modèle de conception fonctionnelle. Dans un second temps, un outil de conception fonctionnelle, en l'occurrence l'analyse fonctionnelle, est présentée. Cet outil permet d'initier la conception par l'identification de ces fonctions jusqu'à pouvoir obtenir les conditions géométriques.

2.3.1 Les modèles de conception fonctionnelle

Comme évoqué dans la première section de ce chapitre, l'Axiomatic Design proposée par Suh [1990] propose un modèle de conception fonctionnelle permettant de transformer les attentes du consommateur en exigences fonctionnelles, paramètres de conception et variables du procédé de fabrication. On se propose dans ce paragraphe de détailler ce modèle afin de pouvoir en exploiter les principes dans la suite de ce travail de recherche.

Selon SUH, il existe quatre domaines distincts au sein d'un processus de conception de produits :

- Le domaine Consommateur : contient les besoins et attentes du consommateur.
- Le domaine Fonctionnel : contient les exigences fonctionnelles et les contraintes.
- Le domaine Physique : contient les paramètres de conception. Ces paramètres doivent être pris au sens large car ils peuvent représenter des principes de solution des pièces mais aussi des matériaux ou des tolérances.
- Le domaine Procédé : contient les variables du procédé de fabrication.

Si on prend l'exemple des relations entre le domaine fonctionnel et le domaine physique, la théorie de l'Axiomatic Design est centrée autour du concept de besoin fonctionnel (Functional Requirements – FR), des paramètres de conception (Design Parameters – DP) et de leurs interrelations quantitatives et qualitatives représentées par une matrice de conception (Design Matrix – DM). Les besoins fonctionnels {FR} sont les livrables fonctionnels de l'artefact conçu et les paramètres de conception {DP} sont les moyens mis en œuvre pour les satisfaire. Ensuite, il s'agit de modéliser leurs relations dans la matrice de conception [DM]. De ces relations découle une conception mettant ainsi en interaction le domaine fonctionnel (domaine FR) et le domaine physique (domaine DP) sous la forme d'une hiérarchie de {FR}, {DP} et [DM] comme illustré sur la figure 16.

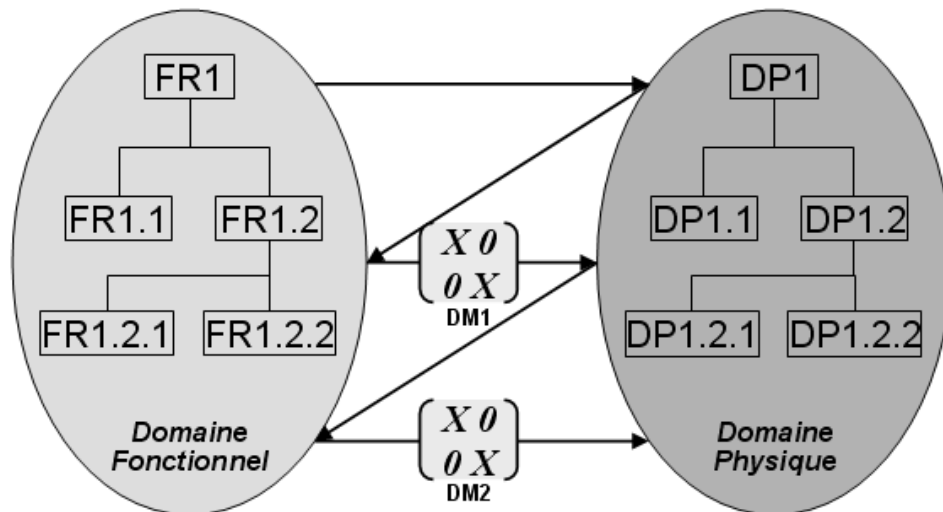


Figure 16 : Représentation d'une conception en Axiomatic Design selon Suh [1990]

Nous distinguons ainsi à travers cette représentation la nature hiérarchique de cette théorie. Selon Man [1999], cette nature hiérarchique est le concept le plus important de l'Axiomatic Design. Notons que cette théorie a intégré de nombreuses évolutions afin de s'adapter, comme les autres modèles de conception, à différents contextes. Nous pouvons citer l'adaptation de cette théorie au modèle TRIZ [Altshuller, 1998] par Man ou encore l'introduction par Campatelli et Citti [2009] d'un nouveau domaine, le domaine des ressources, permettant d'optimiser les procédés de fabrication (définition des coûts pour chaque activité et chaque service qui en découlent).

Nous retenons la décomposition en quatre domaines réalisée par Suh [1999] dans la suite de ces travaux de recherche. Afin de pouvoir déterminer les différents composants de cette théorie, on propose, dans le prochain paragraphe, d'exposer les différents outils permettant de répondre à notre besoin.

2.3.2 Les outils de conception fonctionnelle

Nous venons de présenter dans le paragraphe précédent un modèle fonctionnel. Afin de pouvoir déterminer les différents éléments qui composent cette approche, nous proposons d'utiliser les outils de conception fonctionnelle tels que l'analyse fonctionnelle ou d'analyse de la valeur. Ces outils, utilisés dans de nombreux travaux de recherche autour du processus de conception, offrent une démarche permettant d'obtenir, à partir du besoin, les conditions géométriques. Ces méthodes sont aujourd'hui appliquées en industrie. En effet, afin de formaliser les différents aspects de leurs projets, les acteurs métier se fondent sur ce type de méthodes [Bachelet, 2009].

Nous pouvons citer à titre d'exemple une première méthode répondant à cette problématique. Développée à la fin des années 1980 [Gero, 1987] [Gero, 1990] et pendant les années 1990 [Umeda et al., 1990] [Umeda et al., 1996], la méthode de conception de produits FBS (Function-Behavior-Structure).

Par ailleurs, nous pouvons citer la méthode APTE [2006] qui associe simultanément analyse de la valeur et analyse fonctionnelle.

Afin de détailler plus spécifiquement l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur, nous nous fondons sur le "Guide de la compétitivité industrielle" [Brissard et al., 2003] qui décompose cette analyse en plusieurs étapes. Les premières étapes principales sont au nombre de quatre : l'expression du besoin, l'analyse fonctionnelle du besoin, la recherche des principes de fonctionnement du système et l'analyse fonctionnelle technique. On propose de définir ces étapes correspondantes au besoin de nos travaux de recherche dans la suite de ce paragraphe.

2.3.2.1 L'expression du besoin

Il s'agit de délimiter dans cette étape le périmètre de l'étude. En effet, si le périmètre est trop large, le concepteur peut facilement s'égarer et si le périmètre est trop restreint, la créativité du concepteur peut être limitée. De ce fait, il est nécessaire de définir précisément l'environnement et les fonctions du produit dans son ensemble, de comprendre sur quel élément il agit et à qui il rend service.

En posant traditionnellement trois questions (A qui ou à quoi le système rend-t-il service ? – Sur qui ou sur quoi le système agit ? – Dans quel but ?), le concepteur est à même d'énoncer et de valider le besoin. L'outil graphique utilisé pour pouvoir représenter cette analyse est communément appelé "bête à cornes".

Cette étape permet de répondre au besoin du domaine client de l'Axiomatic design énoncé dans le paragraphe précédent.

2.3.2.2 L'analyse fonctionnelle du besoin

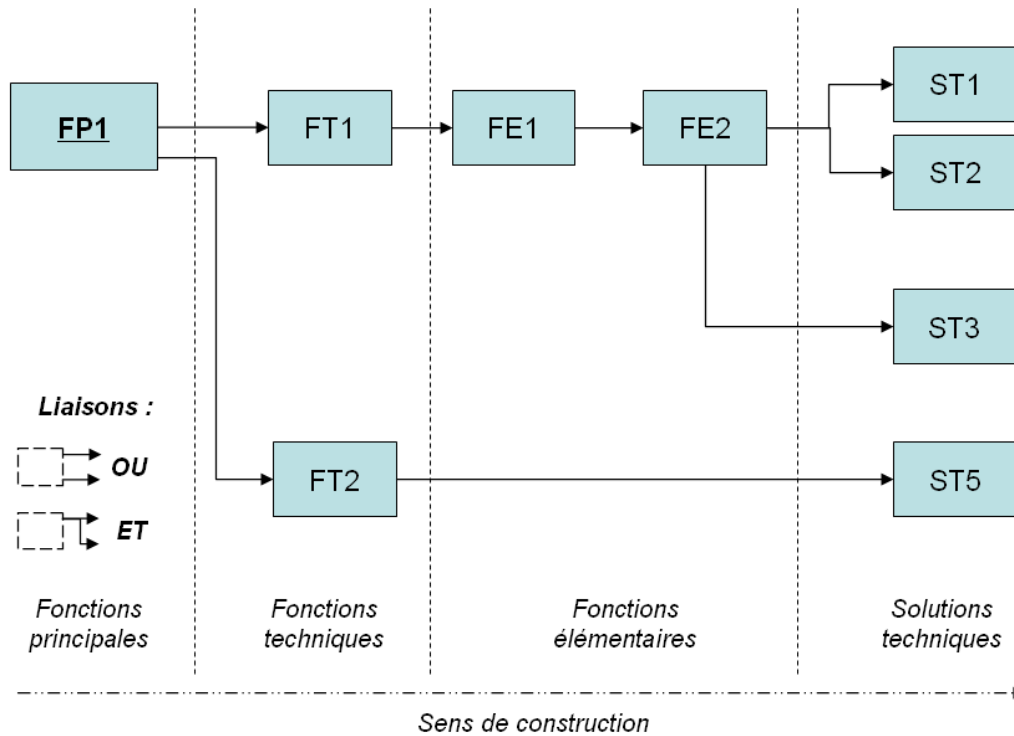
L'étape d'analyse fonctionnelle du besoin (ou analyse fonctionnelle externe) a pour finalité de rédiger le Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF). Dans ce but, le concepteur doit établir, dans un premier temps, le profil de vie du produit en définissant toutes les situations qu'il rencontre. Pour chacune de ces situations, il doit établir la liste des éléments qui constituent son environnement. Après les avoir disposés graphiquement sous forme d'un diagramme "pieuvre", il est à même de pouvoir identifier les fonctions principales et secondaires en établissant les liens entre éléments environnementaux et produits. Après avoir validé ces fonctions, il doit pouvoir les caractériser. En établissant pour chaque fonction les critères de valeurs, il peut rédiger le CdCF. Il est alors à même de pouvoir envisager les solutions techniques correspondantes. A travers cette étape d'analyse fonctionnelle du besoin, on peut déterminer les exigences fonctionnelles du domaine fonctionnel de l'Axiomatic Design.

2.3.2.3 La recherche des principes de fonctionnement du système

A l'issue de la précédente étape, le concepteur est face à une liste de fonctions. Cette étape consiste alors à déterminer une solution technique pour chacune de ces fonctions. La

démarche consiste à rechercher, sélectionner et représenter graphiquement le maximum de solutions.

Afin de pouvoir les représenter graphiquement, le concepteur utilise le diagramme FAST afin de pouvoir critiquer la pertinence de la solution par rapport au contexte. Nous illustrons sur la figure 17 un diagramme FAST mettant en relation une fonction principale (FP1) avec quatre solutions techniques.



Avec la symbolique suivante :



Figure 17 : Structure d'un diagramme FAST selon Brissard et al. [2003]

Le choix des solutions techniques au sein de cette étape permet de procéder à une analyse plus poussée des composants du système dans la prochaine étape.

2.3.2.4 L'analyse fonctionnelle technique

L'analyse fonctionnelle technique (ou l'analyse fonctionnelle interne) consiste à décrire précisément le fonctionnement du système. En réalisant un graphe des contacts, le concepteur est à même de définir les fonctions techniques résultant des fonctions principales et secondaires.

A travers ces deux dernières étapes, nous amenons ainsi le moyen de déterminer les contraintes de conception du domaine physique de l'Axiomatic design. Afin de pouvoir exploiter cette méthodologie, il s'agit de présenter les systèmes d'aide à la conception dont le

concepteur dispose tout au long du processus de conception du produit. La section suivante présente ces différents systèmes.

2.4 Les systèmes d'aide à la conception

Nous avons détaillé dans les paragraphes précédents les différents modèles et processus de conception appliqués au sein de l'industrie automobile. De plus, nous avons présenté les approches de conception fonctionnelle utilisées dans ce domaine. Mais ces différents principes ne peuvent être appliqués qu'au niveau organisationnel. En effet, si le processus de conception de l'organisation n'est pas fondé sur ce type d'approche, en aucun cas l'acteur métier ne pourra l'appliquer. L'application de ces modèles nécessite donc de modifier les principes organisationnels de l'organisation.

De ce fait, il semble important de définir le contexte au niveau de l'acteur métier, indépendamment de l'organisation du processus de conception dans son intégralité. De par l'intégration de nos travaux de recherche au niveau du concepteur, nous définissons dans cette section les systèmes d'aide à la conception que cet acteur métier rencontre au quotidien. En l'occurrence, il s'agit des systèmes de conception assistés par ordinateur qui résultent du développement fulgurant des technologies numériques dans les années 90. Nous présentons tout d'abord dans cette section ce type de système, puis les méthodologies spécifiques qui y sont liées et enfin nous détaillons les nouvelles évolutions qu'ils intègrent.

2.4.1 La conception assistée par ordinateur

Dans ce paragraphe, nous définissons dans un premier temps, en utilisant une approche historique fondée sur les travaux de Tisseau et Nedelec [2003], la conception assistée par ordinateur (CAO) afin de délimiter son domaine d'application. Dans un second temps, nous identifions les deux types de modèles que nous sommes amenés à rencontrer au cours de ces travaux de recherche et dans le domaine de la plasturgie automobile.

2.4.1.1 De la planche à dessin à la représentation tridimensionnelle interactive

Avec l'avènement des systèmes d'information dans les années 1950, l'introduction des représentations graphiques a débutée par l'introduction des composants en deux dimensions. L'informatique graphique débute ainsi sous une forme appelée modeleur 2D. Ainsi, les premiers travaux de ce domaine concernent les représentations des segments de droite [Bresenham, 1965] ainsi que leurs comportements (par exemple les lignes cachées) [Jones, 1971], les déterminations des intersections [Bentley, 1979] ou encore, plus tardivement, les principes de la triangulation [Hertel et Mehlhorn, 1983].

De l'intérêt des bureaux d'études automobiles et aéronautiques pour ce type de techniques dites d'infographie, la conception assistée par ordinateur (CAO) naquit en introduisant très rapidement des courbes et des surfaces paramétriques afin de répondre à ces nouveaux besoins [Bézier, 1977]. Ces différents travaux ont ainsi intégré une nouvelle dimension afin d'évoluer vers des modeleurs filaires tridimensionnels, puis rapidement vers des modeleurs surfaciques. De nombreuses évolutions ont été développées pour répondre au

besoin d'intégration de contraintes géométriques et physiques fortes, telle que l'intégration de surfaces implicites [Blinn, 1982]. Mais les incohérences topologiques dans les modèles surfaciques étant nombreuses, il s'avéra nécessaire d'évoluer vers des modélisations volumiques. Deux types de représentations majeures [Krishnan et Manocha, 1996] sont alors développés en modélisation volumique afin d'obtenir des solides : la représentation par frontière et la représentation volumique.

Le premier type, la représentation par frontière, est traditionnellement appelé représentation B-Rep (Boundary Representation). Ce type de représentation prend en compte les relations d'adjacence entre les faces, les arêtes et les sommets, ce qui nécessite la prise en compte de la topologie du modèle. Nous pouvons citer le premier modèle proposé, définissant la topologie au niveau de l'arête, appelé "Winged-Edge" [Baumgart, 1975].

Le second type, la représentation volumique, est appelé CSG (Constructive Solid Modeling). Cette représentation consiste à décrire un objet par un modèle fondé sur la construction d'un ensemble de points [Requicha et Rossignac, 1991] ou sur la description d'une énumération spatiale [Samet, 1984] et du partitionnement dans l'espace [Fuchs, 1980]. De ce fait, un volume utilisant la représentation CSG est construit à partir d'une combinaison d'opérations booléennes [Mantyla, 1986] constituées de solides primitifs dont les dimensions, la position et l'orientation doivent être contrôlées par l'utilisateur [Van Emmerik et al., 1993].

Ainsi, à partir de ces deux représentations structurées, les modelleurs géométriques tridimensionnels reposant soit sur l'une de ces représentations soit sur l'autre ont évolué vers des modelleurs hybrides [Lesage, 2002] fondés sur des composants métier empruntés au domaine de la mécanique traditionnelle, comme des extrusions ou des révolutions [Fan et Bermell-Garcia, 2003]. Ces modelleurs définissent le solide en utilisant une approche B-Rep, mais pour des questions de performance, l'arbre CSG est adapté.

2.4.1.2 Evolution des niveaux d'abstraction : l'approche déclarative

Ces nouveaux modelleurs hybrides intègrent la mise à jour des modèles après avoir opéré une modification d'une partie de l'objet et essayent d'intégrer les intentions du concepteur. Selon Maculet et Daniel [2003], la conception d'un produit est un raffinement continu, c'est une boucle de conception / reconception. Afin de répondre à ces besoins, différentes approches sont utilisées au sein des modelleurs. Sous le terme fédérateur de "Parametric Design" [Roller, 1991] [Lee et Kim, 1996], nous distinguons d'un côté l'approche "paramétrique" ainsi que l'approche "variationnelle" et de l'autre l'approche par "features". Une quatrième approche, nommée "déclarative", fait aussi son apparition au sein de récentes publications scientifiques. Afin de pouvoir présenter ces différentes approches, Maculet et Daniel définissent quatre niveaux (0 à 3) fondés sur le niveau d'abstraction.

Le niveau 0 permet de résoudre les problèmes de contraintes en travaillant sur les variables (ou paramètres) et le niveau 1 permet de manipuler les objets géométriques élémentaires de la géométrie. Nous pouvons ainsi placer les modelleurs paramétriques et variationnels dans le niveau 1. D'un côté, les modelleurs paramétriques permettent de

décomposer un problème en un sous-ensemble de sous-problèmes de telle sorte que ces sous-problèmes puissent être résolus les uns après les autres de façon séquentielle [Hoffman et Joan-Arinyo, 2001]. De l'autre côté, les modeleurs variationnels sont apparus pour dépasser les limites des modeleurs paramétriques. En effet, dans ce type de modeleur, le problème doit être impérativement bien-contraint. Or, en conception, nous sommes souvent face à des problèmes soit sous-contraints soit sur-contraints. De ce fait, le modeleur variationnel décompose un problème en sous-problèmes pouvant être résolus simultanément [Hoffman et Joan-Arinyo, 2001]. Mais face à la complexité de résolution des contraintes et au temps de réponse machine important dans cette configuration, ce type de modeleur est resté au niveau bidimensionnel. Nous rencontrons aujourd'hui ce type de modeleurs au sein des modeleurs tridimensionnels industriels sous forme d'atelier 2D appelé communément "Sketcher".

L'approche de modélisation par "Features" [Shah, 1986] [Marks, 1987] est identifiée comme le niveau 2 d'abstraction. En intégrant au modèle de base précédemment cité des entités permettant de tenir compte du processus de fabrication, ce type de modélisation associe les informations fonctionnelles et d'ingénierie aux informations géométriques et de forme dans les modèles produits [Maculet et Daniel, 2003]. Nous sommes aujourd'hui, dans les modeleurs tridimensionnels industriels, majoritairement en présence de ce type de modélisation qui est par le fait procédural et dépendant de l'ordre de création des "Features". Ces modeleurs, qui se fondent majoritairement sur la représentation B-Rep, comme évoqué précédemment, sont aussi appelés "History-Based".

Nous venons de détailler l'approche paramétrique et variationnelle qui se place au niveau des objets géométriques élémentaires (niveau 1) et l'approche par "features" qui consiste à prendre en compte des objets géométriques plus complexes (niveau 2). L'approche déclarative [Lucas et al., 1989], que l'on peut considérer de niveau 3, prend en compte un modèle conceptuel ou sémantique. L'objectif de cette modélisation est de modéliser l'objet physique en donnant simplement un ensemble de propriétés. Nous pouvons ainsi retenir la première définition donnée par Lucas en 1989 et appliquée au domaine des formes.

[Lucas et al., 1989] : *"L'objectif de la modélisation déclarative de formes est de permettre d'engendrer des formes (ou des ensembles de formes) par la simple donnée d'un ensemble de propriétés ou de caractéristiques. L'ordinateur est chargé d'explorer l'univers des formes potentielles afin de sélectionner celles correspondant à la définition donnée. Le concepteur n'a plus qu'à choisir."*

Ces nouveaux modeleurs répondent ainsi à un nouveau processus de conception divisé en trois étapes selon Lucas et Desmontils [1995] et sont repris par différents auteurs [Colin et al., 1997]:

- Description de la scène : description de haut niveau proche des besoins de l'utilisateur. Plusieurs modes de représentation peuvent être utilisés tels que des textes sous formes de langage naturel, d'images ou encore en utilisant des représentations en réalité virtuelle ou augmentée [La Greca, 2005].
- Recherche des solutions : réalisée par un moteur de génération, cette phase permet de mettre à disposition du concepteur toutes les formes répondant aux besoins précédemment identifiés. Soit le système attend d'avoir toutes les contraintes spécifiées pour pouvoir lui proposer une géométrie (implémentation séquentielle), soit le système lui met à disposition des formes candidates dès qu'il y a suffisamment de données (approches concurrentes) [Champciaux, 1997].
- Prise de connaissance de ces solutions : Le système met à disposition du concepteur toutes les formes générées dans la précédente étape avec un système d'aide à la compréhension afin qu'il puisse choisir à bon escient ou alors réintégrer d'autres besoins en amont.

De nombreux travaux de recherche dans le monde de la conception assistée par ordinateur se tournent aujourd'hui vers ce type de modélisation. Nous pouvons citer entre autres les travaux de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse qui a entrepris dès 1993 un projet de recherche, nommé DEM²ONS, qui consiste à mettre à disposition du concepteur un système d'information permettant de créer des environnements virtuels à partir de la prise en compte automatique de propriétés qu'il énonce [Larive, 2008].

Mais pour pouvoir choisir et exploiter ces différents modeleurs au sein d'une entreprise, il faut identifier en amont le type de produit modélisé. On se propose alors de déterminer une typologie des modèles tridimensionnels, appelés modèles numériques dans la suite de ce document.

2.4.2 Typologie des modèles numériques

Aujourd'hui, l'intégration prioritaire des fonctions d'estime dans les produits grand public implique d'intégrer en amont du processus de conception le style (design) en parallèle de l'aspect purement fonctionnel. Nous allons développer dans ce paragraphe une approche dissociative des modèles numériques afin de pouvoir couvrir tous les types de composants pouvant rentrer dans la composition de tous les types de produits.

Mais avant de proposer une typologie, il est important de rappeler que pour pouvoir créer un modèle numérique dans un modelleur hybride, indépendamment des représentations utilisées, il faut lui fournir des données d'entrée afin qu'il puisse être numérisé. La distinction qui est réalisée dans notre approche se fonde sur la différence qui réside entre ces différentes entrées. La figure 18 propose le cycle simplifié de création d'un volume. Dans ce cycle, les données d'entrée pour modéliser un cylindre sont un cercle et un axe dans un plan perpendiculaire au plan du cercle. Cet exemple se fonde sur la représentation CSG, qui pour

construire un cylindre, nécessite un contour de base (Elément n : cercle) et une opération (Traitement : Opérateur), qui, dans ce cas, est l'extrusion d'un profil (le contour de base) selon une direction (Elément 1 : axe).

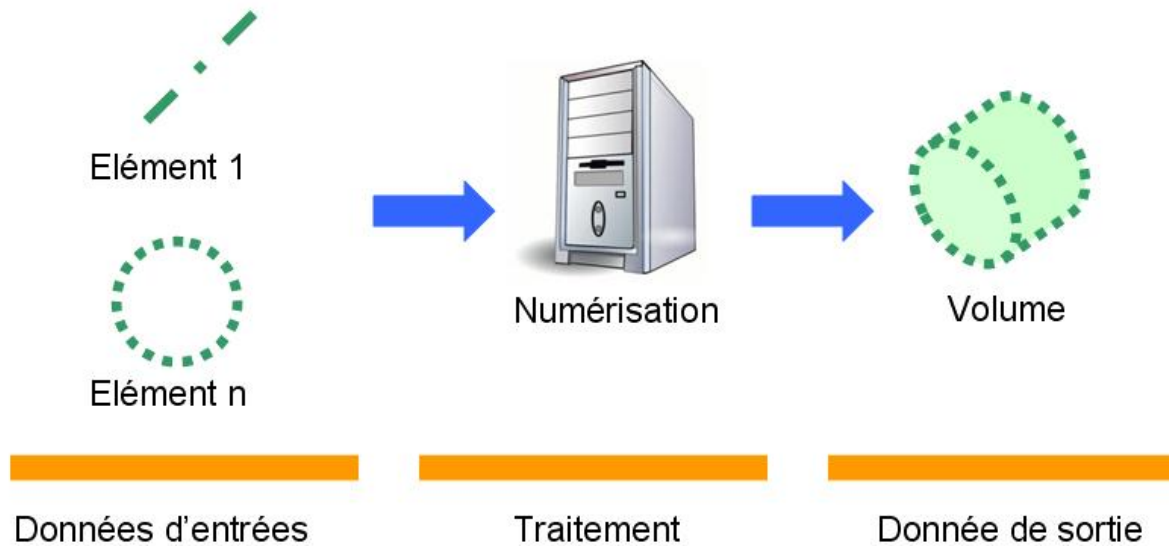


Figure 18 : Processus de création d'un volume dans un modeler géométrique.

En traitant les éléments d'entrée, nous pouvons les classer en deux types. En effet, d'un côté, nous avons des données d'entrée simples (lignes, point, cercles, etc.), qui sont considérés comme des données filaires, et de l'autre, les surfaces de formes libres (Free Form Surfaces) qui en règle générale sont issues des plans de formes dans le domaine de l'industrie automobile.

Les données d'entrée simples permettent de modéliser des primitives simples ou à contour. Les primitives simples sont composées de formes élémentaires telles que les parallélépipèdes, les cylindres, les sphères et les tores. Les primitives à contour sont les prismes, les solides de révolution, les tuyaux et les pyramides. Ces primitives sont ainsi composées d'éléments qui peuvent être simplement représentés mathématiquement. De plus, selon Requicha et Rossignac [1991], ces primitives initient la majorité des surfaces qui composent aujourd'hui une pièce usinée mécaniquement. Le tableau 2 propose une représentation des primitives simples ainsi que leurs définitions. Ces définitions nous permettent de traiter, dans le chapitre suivant, un modèle de modélisation générique.

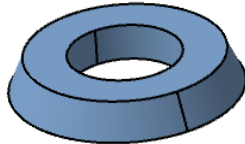

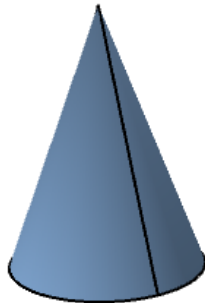
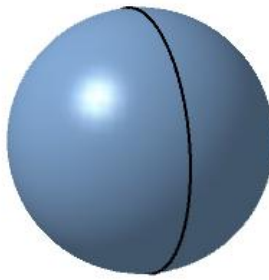
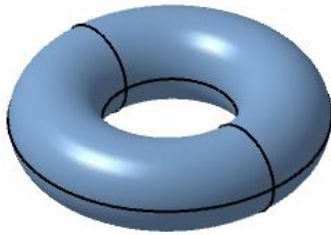
| Type | Définition | Représentation |
|-------------|--|---|
| Révolution | Une "surface de révolution" est une surface obtenue en faisant tourner une courbe plane autour d'un axe. |  |
| Cylindrique | Une surface cylindrique est une surface dans l'espace définie par une droite, appelée génératrice, passant par un point variable décrivant une courbe plane fermée, appelée courbe directrice et gardant une direction fixe |  |
| Conique | Un cône est une surface réglée définie par une droite, passant par un point fixe S appelé sommet et un point variable décrivant une courbe plane fermée, appelée courbe directrice. L'on peut rencontrer trois types de cônes : révolution, pyramidal et quelconque |  |
| Sphérique | Une sphère est une surface à deux dimensions, plongée dans l'espace à trois dimensions, dont tous les points sont situés à une même distance d'un point appelé centre. La valeur de cette distance commune au centre est appelée le rayon de la sphère. Elle n'inclut donc pas les points situés à une distance inférieure au rayon, au contraire de la boule. Concrètement, on peut voir une sphère comme une coquille vide infiniment mince. |  |
| Torique | Un tore désigne le volume de l'espace euclidien engendré par la rotation d'un cercle de rayon r autour d'une droite affine située dans son plan à une distance R de son centre. Trois types de tores peuvent ainsi être identifiés : Tore croisé, à collier nul et ouvert. |  |

Tableau 2 : Exemples de primitives simples ou à contour

Une surface de forme libre, contrairement à une donnée d'entrée simple, est considérée comme plus intuitive que formelle dans sa définition [Requicha et Rossignac, 1991]. Plusieurs termes sont employés dans la littérature pour pouvoir les identifier. On parle de surfaces sculptées, de surfaces complexes ou encore de surfaces libres. Généralement, ce type de surface est considéré comme un objet qui n'est pas reconnu facilement dans une classe, comme par exemple un plan ou/et une surface quadratique naturelle. De ce fait, de nombreux produits sont considérés dans la littérature comme étant des exemples typiques de formes libres comme les sculptures, les carrosseries automobiles ou encore les coques de navires [Besl, 1990] [Dorai et Jain, 1997] [Stein et Medioni, 1992].

Ainsi, afin de classifier les modèles, nous utilisons la distinction réalisée au niveau des données d'entrée. D'un côté, nous avons des modèles volumiques qui se fondent sur des éléments simples et qui peuvent être usinés mécaniquement, nous le classifions de type mécanique. De l'autre côté, nous avons des modèles volumiques qui se fondent sur des surfaces complexes, que nous qualifions de type complexe.

Dans le paragraphe suivant, nous exposerons différentes méthodologies de modélisation fondées sur ces deux types de modèles.

2.4.3 Les méthodologies de modélisation

Afin de modéliser des volumes au sein des modeleurs actuels, indépendamment du type modélisé, il s'agit d'exposer la méthodologie utilisée. Différents travaux de recherche cherchent à modéliser des méthodologies de construction. Etant donné qu'il n'existe pas de méthodologie universelle adaptée à tous types de produits, nous rencontrons des méthodologies dédiées aux différents métiers. Nous pouvons citer par exemple les méthodologies orientées tolérancement [Ballu et al., 2006], qui permettent d'intégrer la cotation fonctionnelle aux modèles, ou encore les conjonctures fabrication, qui permettent d'intégrer les contraintes d'usinages. Nous pouvons aussi citer les travaux sur les grammaires CAO [Ostrosi et al., 2008], notamment sur les familles de pièces qui permettent de formaliser des composants standards.

Nous pouvons souligner que la majorité de ces méthodologies repose sur une fondation commune qui est l'utilisation d'opérations booléennes. De plus, les opérateurs booléens, issus de la représentation CSG détaillée dans le paragraphe précédent, intègrent les modeleurs industriels afin de combiner les modèles mécaniques et les modèles complexes.

Avant de présenter la différence de méthodologie de modélisation entre un modèle mécanique et un modèle complexe, il s'agit de rappeler les trois opérateurs booléens de base. En effet, toutes les opérations booléennes que l'on peut rencontrer aujourd'hui (au nombre de 16) résultent de la combinaison des trois opérateurs de base qui sont l'union, la différence et l'intersection. Le tableau 3 présente les trois opérateurs de base.

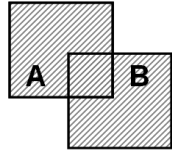
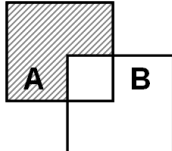
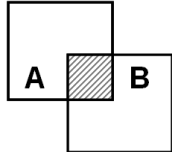
| Type | Définition | Représentation |
|--------------|---|---|
| Union | Le résultat est l'assemblage des deux objets. Il y a parfois la possibilité de réaliser cette opération sur plus de deux objets. <i>Exemple : $A+B$</i> |  |
| Différence | Le résultat est le premier objet moins la partie commune avec le second. <i>Exemple : $A-B$</i> |  |
| Intersection | Le résultat est la partie commune aux deux objets <i>Exemple : AB</i> |  |

Tableau 3 : Les trois opérateurs booléens fondamentaux utilisés en CAO

Suivant la représentation d'un arbre CSG fondé sur les opérateurs booléens, nous présentons la différence entre un modèle mécanique et un modèle complexe. Pour illustrer cette différence, nous nous intéressons à la génération d'un rayon sur un cube. La figure 19 propose à gauche la création d'un rayon mécanique, et à droite, la création d'un rayon de style. Nous distinguons sur cette figure les données d'entrée initiales qui sont encadrées en pointillés.

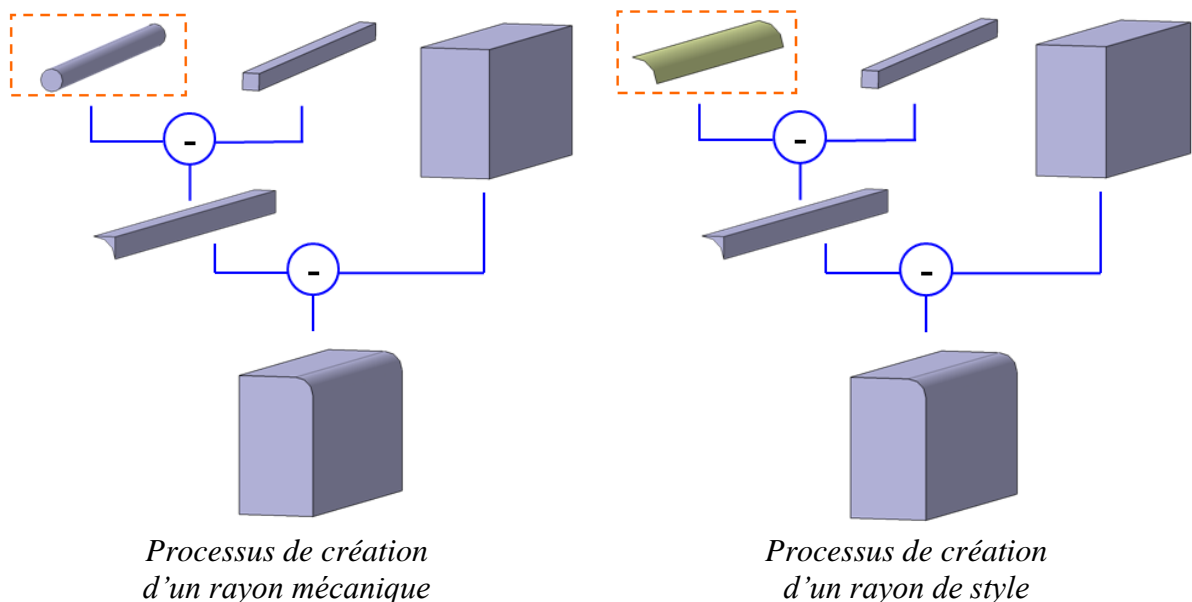


Figure 19 : Représentation de processus de création de rayons

Nous identifions sur cette modélisation la différence principale entre ces deux modèles. Le premier modèle fonde son rayon sur une donnée d'entrée qu'est un cylindre. Ce cylindre a une représentation mathématique simple et permet d'assurer le raccordement entre les deux surfaces perpendiculaires du solide final par une continuité en tangence. Or, pour

assurer une continuité en courbure, la seconde modélisation présente une donnée d'entrée différente de la précédente. En effet, cette donnée est une surface complexe issue du plan de forme provenant du style initial. La représentation mathématique de cette surface peut devenir rapidement complexe.

Nous venons de déterminer dans les précédents paragraphes les nouveaux modèles tridimensionnels, qui sont aujourd'hui de type hybride, ainsi qu'une typologie des modèles nous permettant ainsi de distinguer les modèles mécaniques des modèles complexes. La méthodologie de modélisation précédemment détaillée nous permet d'établir dans le prochain paragraphe certaines hypothèses de recherche permettant ainsi de débiter notre travail de recherche.

2.5 Problématique et hypothèses de recherche

A travers ce paragraphe, on propose dans un premier temps de définir la problématique de ce travail de recherche. Dans un second temps, afin de répondre scientifiquement à notre problématique, nous exposons les différentes hypothèses de recherche sur lesquelles nous pouvons nous appuyer pour pouvoir initier ces travaux. Nous terminons ce paragraphe sur l'exposé des axes directeurs de notre travail.

2.5.1 Problématique de recherche

Nous avons établi dans ce chapitre que le monde de l'industrie, et notamment l'industrie automobile, est devenu aujourd'hui hautement compétitif. Face à la mondialisation, les constructeurs automobiles doivent constamment innover afin de répondre précisément aux différents besoins des consommateurs. De plus, l'évolution rapide de ces besoins pousse à la réduction des temps de conception et d'industrialisation des produits afin de pouvoir les distribuer très rapidement. En parallèle, cette mondialisation engendre un accroissement de la concurrence, ce qui offre davantage de possibilités aux constructeurs quant au choix de leurs sous-traitants. De ce fait, la sous-traitance automobile, indépendamment du rang qu'elle occupe face au constructeur, se retrouve dans une situation similaire. Ils doivent pouvoir se différencier de la concurrence en répondant rapidement à leurs clients tout en améliorant la qualité de leurs produits ainsi que leurs coûts et en intégrant de nombreuses innovations.

Cette synthèse nous permet de pouvoir établir une problématique de recherche permettant d'initialiser ces travaux de recherche.

Problématique de recherche : *"Afin de pouvoir se différencier face à une concurrence mondiale et ainsi pouvoir continuer à évoluer, le monde de l'automobile doit aujourd'hui constamment innover. Dans ce but, ce type d'industrie doit pouvoir allouer plus de ressources et de temps à ce type d'ingénierie. Or, il s'avère aujourd'hui qu'un produit contient très peu d'innovation malgré la mise à disposition de nombreuses méthodes d'aide qui sont issues de la recherche scientifique. Quand et comment intervenir au niveau du processus de conception pour promouvoir l'innovation au niveau produit ?"*

Cette problématique soulève de nombreuses interrogations. Afin de formaliser ces dernières et y répondre, le paragraphe suivant annonce les hypothèses de recherche émises.

2.5.2 Enoncé des hypothèses

Afin de répondre à la problématique précédemment énoncée, nous pouvons établir certaines hypothèses de départ. Nous avons établi dans la première section de ce chapitre qu'un produit contient seulement 20% d'innovation contre 80% de reconception. De ce fait, nous pouvons présenter la première hypothèse de recherche.

Hypothèse 1 : *"L'accélération du processus de conception de produits peut être obtenue en réduisant les temps qui sont dédiés à la reconception."*

A travers les divers travaux de recherche exposés dans ce chapitre, la nécessité d'intégrer une vision collaborative à ce processus a été mise en évidence. La complexité du processus nécessite l'implication de nombreux acteurs issus de différents domaines, mais aussi de différentes cultures. En effet, le processus de conception étant aujourd'hui multi-métiers (par exemple les produits mécatroniques) et multi-sites (au niveau national et international), il s'agit aujourd'hui de fournir au concepteur une nouvelle méthodologie de conception permettant de prendre en considération ces nouvelles contraintes. Suite aux travaux de recherche autour de l'intégration du processus de conception dans une vision collaborative, nous avons exposé les principaux outils aujourd'hui proposés pour répondre à ce nouveau besoin. Nous avons identifié les outils de PLM comme étant alors une voie possible. Nous pouvons ainsi formuler notre seconde hypothèse de recherche.

Hypothèse 2 : *"Le processus de conception étant collaboratif, il peut fédérer les acteurs métier autour d'un seul et même outil."*

De la description des systèmes d'aide à la conception il ressort que le modèleur géométrique tridimensionnel est aujourd'hui le principal système exploité par le concepteur. Les nombreuses évolutions récentes de ce système permettent désormais d'intégrer des informations métier au sein des modèles géométriques. Le concepteur peut alors intégrer en amont de la conception tous les critères de conception liés à toutes les situations de vie du produit. La troisième hypothèse de recherche est alors la suivante.

Hypothèse 3 : *"Le lien entre besoin fonctionnel et géométrie peut être établi au sein des modèleurs géométriques tridimensionnels permettant ainsi une plus grande réactivité dans les phases de reconception de produits."*

Ayant identifié précédemment que le système d'aide à la conception est majoritairement le modelleur géométrique tridimensionnel, l'hypothèse quatre peut alors être exposée.

Hypothèse 4 : *"La capitalisation et l'exploitation des informations métier par les concepteurs peuvent être réalisées au sein des modelleurs géométriques tridimensionnels."*

Parallèlement aux précédentes hypothèses, une autre réalité au sein des entreprises est le "turnover" (ou en français "renouvellement du personnel"). L'intégration d'une approche d'ingénierie des connaissances permet alors de capitaliser les connaissances des acteurs métier et ainsi de conserver leurs connaissances lors de leurs départs de l'organisation. De plus, la formalisation d'informations métier issues de ces connaissances permet que ces dernières soient exploitées par les nouveaux acteurs intégrés à l'organisation en améliorant leur formation (moins d'apprentissage sur le "tas"). Une dernière hypothèse peut alors être émise.

Hypothèse 5 : *"La capitalisation des connaissances au sein d'un modelleur géométrique permet de s'affranchir des pertes de connaissance engendrées par le turnover et d'assurer la pérennité ainsi que la continuité des retours sur expérience."*

Ces différentes hypothèses doivent faire l'objet de validations et d'évolutions à travers ce travail de recherche qui s'appuie sur plusieurs expérimentations. Ces hypothèses permettent ainsi d'initier ces travaux en se fondant sur deux grands axes directeurs de travail, que sont "l'ingénierie de la connaissance" et "l'ingénierie collaborative".

Par ailleurs, ces différentes hypothèses sont aussi utilisées dans le cadre d'un projet de recherche labélisé par le pôle de compétitivité Véhicule du Futur (Alsace-Franche-Comté) appelé Collaborative Design and Knowledge Factory (CoDeKF). Ce projet vise à développer la conception innovante en réduisant les temps dédiés à la conception routinière. Nos travaux de recherche exposés dans ce document s'inscrivent dans ce projet.

2.6 Conclusion

Le processus de conception, exposé dans ce second chapitre, établit son caractère "multi-métiers" et "multi-sites". Aujourd'hui, au sein des entreprises, pour pouvoir intégrer dès les premières étapes de ce processus toutes les contraintes métier au produit, l'ingénierie des connaissances est déployée à travers des outils collaboratifs. Les outils d'aide à la conception, et notamment les modelleurs tridimensionnels géométriques, en sont les principaux vecteurs auprès des concepteurs. Bien que ces vecteurs soient aujourd'hui clairement identifiés au sein des travaux conduits en laboratoire, l'industrie ne semble pas pleinement, voire pas du tout, l'exploiter. En effet, les concepteurs continuent à travailler toujours de la même façon, c'est-à-dire en utilisant leurs seules connaissances personnelles.

Parallèlement, le contexte de mondialisation de ces mêmes entreprises impose à leurs collaborateurs de développer des produits sans cesse de meilleure qualité, à un coût moindre et dans des délais constamment réduits. De plus, pour rester compétitif, ces sociétés doivent intégrer toujours plus d'innovation à ces mêmes produits.

Il en résulte une problématique qui consiste à savoir quand et comment intervenir au niveau du processus de conception pour favoriser l'intégration de plus d'innovations aux produits. Les industriels s'intéressent de plus en plus à cette problématique qui constitue désormais un axe de travail prioritaire. En partant des hypothèses de recherche que nous avons énoncées précédemment, il devient possible de commencer un travail de recherche s'articulant autour de deux axes de travail que sont l'ingénierie des connaissances et l'ingénierie collaborative.

Ce travail de recherche sera d'abord initié à travers une première expérimentation conduite, dans un contexte académique, afin de valider les premières hypothèses de recherche énoncées. Cette première expérimentation, exposée dans le chapitre qui suit, permettra de mettre en valeur le manque de modèles méthodologiques pour pouvoir répondre à la problématique initiale.

III

CHAPITRE 3 : OBSERVATIONS ACADEMIQUES, VERS UNE PROPOSITION DE METHODES ET MODELES

Nous avons présenté, dans les chapitres précédents, les différentes approches utilisées dans le processus de conception, notamment les approches fonctionnelles. Nous avons également montré que les démarches d'ingénierie de la connaissance dans le processus de conception sont aujourd'hui peu voire pas intégrées.

Il s'agit dans le cadre de ce chapitre d'initialiser une première expérimentation permettant d'analyser les interactions entre ces différents modèles. En effet, nous avons mis en évidence, dans le chapitre précédent, qu'il est aujourd'hui possible d'intégrer des informations métier au sein du processus de conception. Nous avons établi l'hypothèse selon laquelle le vecteur de ces informations au sein d'un bureau d'études pouvait être les systèmes de modélisations tridimensionnelles (hypothèse 4). De ce fait, la méthodologie appliquée à cette première expérimentation résulte des modèles et principes exposés précédemment.

Les résultats de cette première expérimentation nous permettront de présenter une première méthodologie de conception fondée sur les informations métier. Les limites de cette méthodologie imposent de déterminer certains modèles spécifiques, notamment les modèles d'extraction des informations métier et la structuration des données numériques, afin d'appliquer le modèle proposé. Le couplage du cahier des charges fonctionnel à la géométrie fonctionnelle finalise la présentation du modèle initial et permet ainsi son intégration dans les premières expérimentations industrielles réalisées par la suite dans le cadre de ce travail.

3.1 Expérimentation : Conception dans un contexte académique d'un véhicule de compétition destiné au challenge SIA

Avant la mise en œuvre de collaborations et d'expérimentations en industrie, il s'agit d'identifier un démonstrateur scientifique au sein de l'université qui accueille ces travaux de recherche : l'UTBM. En effet, l'UTBM participe chaque année au challenge SIA dans le but de faire réaliser un projet complet aux élèves ingénieurs et de permettre aux enseignants chercheurs qui les suivent de leur faire appliquer et expérimenter les nouvelles méthodologies de conception issues de la recherche. Ce projet, qui réunit une équipe d'environ 20 étudiants par an et qui se veut pluridisciplinaire, a pour objectif d'optimiser les temps de développement et d'améliorer la conception collaborative. En effet, face à l'implication d'un tel nombre d'étudiants, de leur répartition géographique et leur appartenance à différents départements d'enseignement distincts, l'utilisation d'outils de collaboration et de nouveaux processus de conception devient une priorité et une nécessité.

La Société des Ingénieurs de l'Automobile (SIA), fondée en 1927, structure le réseau des ingénieurs et de l'ensemble des personnes passionnées et actives, intéressées par l'industrie automobile. Unis par la passion du produit, du progrès de leur industrie et de l'innovation, ils échangent entre eux informations et connaissances pour progresser ensemble dans leurs expertises et leurs efficacités personnelles et collectives. La SIA suscite l'intérêt des étudiants et des enseignants pour l'automobile et son industrie.

C'est dans ce cadre que la SIA organise un challenge chaque année. Ce concours, ouvert à tous les étudiants, futurs techniciens ou ingénieurs a pour objet la conception et la construction, par des équipes pluridisciplinaires, d'un véhicule roulant respectant un règlement spécifique.

Il s'agit dans ce paragraphe d'expérimenter une première méthodologie fondée sur les principes exposés dans les chapitres précédents afin de déterminer un modèle méthodologique approprié à ce type de processus de conception. Le support de cette méthodologie est la conception d'un produit réducteur. La figure 20 représente la photo d'un réducteur coaxial à courroie crantée.

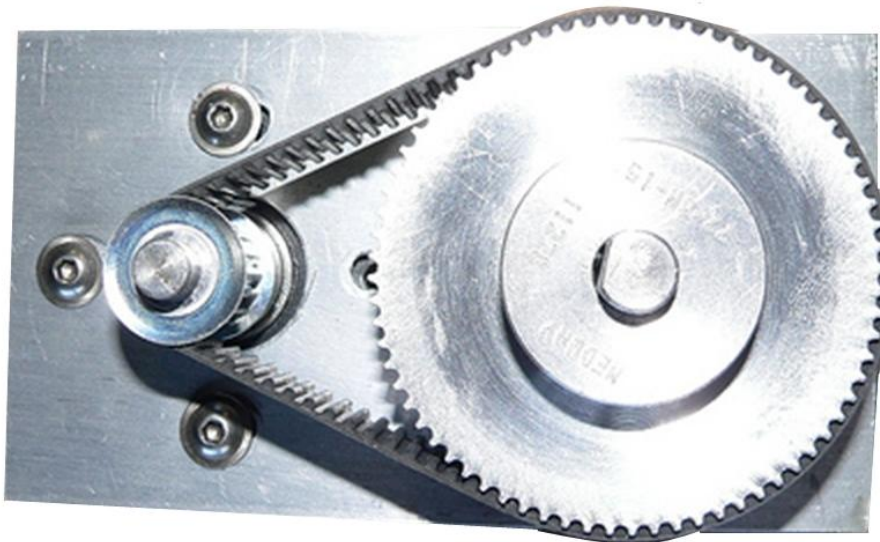


Figure 20 : Exemple de réducteur coaxial à courroie crantée

Ce réducteur doit accoupler l'arbre de sortie du moteur du véhicule au moyeu de la roue. Il doit parallèlement réduire la vitesse de rotation de l'arbre de manière à ce que la roue atteigne la vitesse souhaitée.

Dans un premier temps, nous présentons la méthodologie de conception à appliquer, et dans un second temps, nous exposerons la première expérimentation fondée sur ce modèle ainsi que les résultats qui en découlent. Enfin, nous proposons de conclure sur les différentes limites de la méthodologie mise en place.

3.1.1 Présentation du modèle collaboratif appliqué

Le modèle proposé sur la figure 21 décrit le processus de conception mis à l'épreuve par cette expérimentation. Il utilise l'approche fonctionnelle décrite dans le chapitre précédent. Ce modèle, divisé en cinq étapes, fait intervenir trois acteurs métier différents : l'intervenant marketing (ou l'acteur issu du "Front office"), l'expert métier et le concepteur. De plus, la collaboration entre ces différents acteurs s'articule, dans cette méthodologie, autour de coopérations étroites et en réunion, ce qui nous pousse à penser que l'intégralité du transfert des informations entre ces différents acteurs.

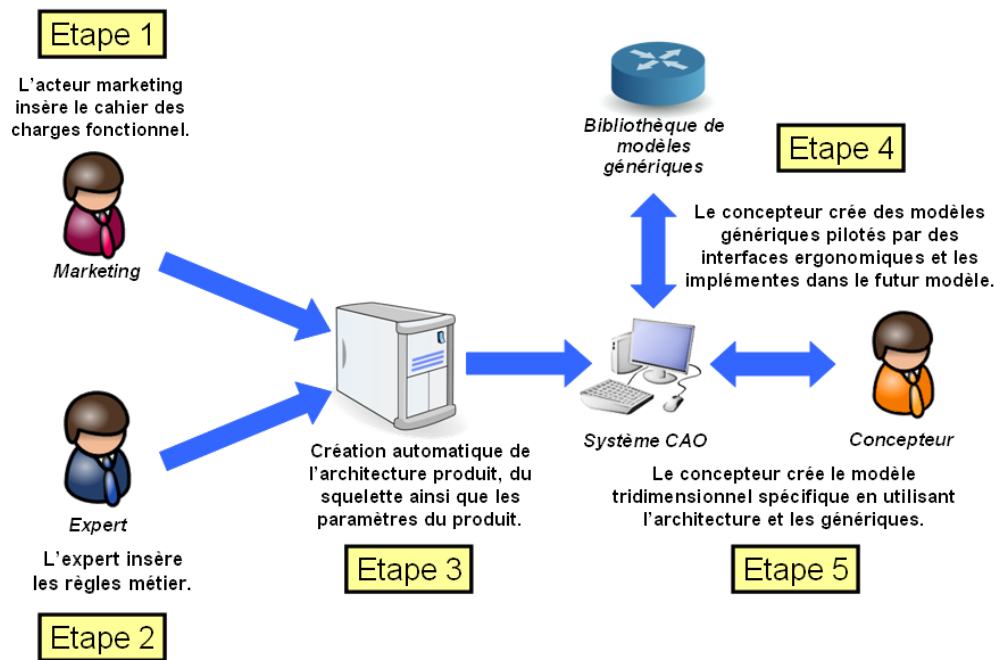


Figure 21 : Modèle méthodologique appliqué au cours du projet SIA

La première étape consiste à formaliser, à travers une analyse fonctionnelle, les besoins fonctionnels. L'outil de formalisation proposé dans cette méthodologie est fondé sur l'analyse de la valeur et plus précisément pour la première étape, l'analyse fonctionnelle externe [NF1, 1990] et interne [NF2, 1991]. La seconde étape permet de formaliser les différentes informations métier, telles que les règles métier ainsi que les paramètres géométriques, mettant ainsi en lien les paramètres issus du cahier des charges fonctionnel et le modèle géométrique. La troisième étape, réalisée par un logiciel informatique prototypé au sein de l'équipe ERCOS du laboratoire SeT, permet de générer l'architecture produit paramétrée et réglée. Des modèles génériques sont créés lors de la quatrième étape afin "d'alimenter" le concepteur lors de la modélisation de la pièce finale correspondant à la cinquième étape.

Pour réaliser l'expérimentation, détaillée dans le paragraphe qui suit, nous avons mis à disposition des étudiants impliqués dans le projet un outil informatique prototypé en Visual Basic, ainsi que l'outil de modélisation tridimensionnelle CATIA v5 au sein du projet. Afin

de respecter le modèle proposé, chaque étudiant assume au sein du projet un des trois rôles repérés sur la figure 21, à savoir : l'acteur marketing, l'expert métier et le concepteur.

3.1.2 Application du modèle présenté

Nous exposons ainsi dans ce paragraphe les cinq étapes du modèle présenté. A chaque étape sont rattachés un acteur métier et un moyen matériel, ce qui permet à cet acteur d'atteindre son objectif.

- **Etape 1 : Définition du besoin**

Lors des phases de pré-études du projet, l'acteur métier identifié à cette étape doit rédiger le cahier des charges fonctionnel (CdCF). Pour le rédiger, les méthodologies utilisées sont l'analyse fonctionnelle externe et interne. La figure 22 présente l'Analyse Fonctionnelle Externe (AFE) du produit réducteur pour la situation de vie "Utilisation".

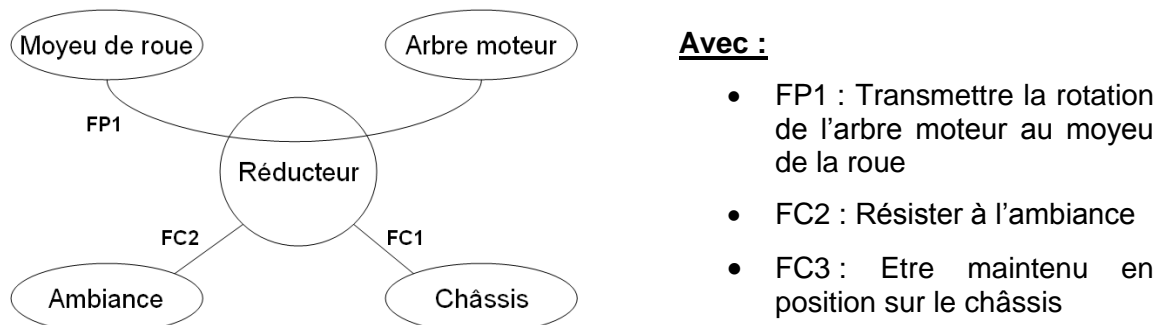


Figure 22 : Exemple d'AFE du réducteur pour la situation de vie Utilisation

Cette AFE nous permet de déterminer différentes fonctions telles que la fonction principale 1 (FP1) : Transmettre la rotation de l'arbre moteur au moyeu de la roue. Nous pouvons également noter la présence de deux fonctions contraintes (FC1 et FC2) dans cette situation de vie. En déterminant ces fonctions, il détermine simultanément les critères de valeurs qui y sont rattachés. Certains de ces critères sont alors quantifiés et peuvent être considérés comme paramètres du Cahier des Charges Fonctionnel. Dans ce cas, un critère est un paramètre. Le tableau 4 propose un set de paramètres issu de la FP1. Dans ce cas d'application, nous sommes en présence du couple d'entrée, d'un rapport de réduction et d'une vitesse d'entrée.

| <i>Paramètre identifié dans le CdCF</i> | <i>Identifiant</i> | <i>Valeurs cibles ou intervalles</i> |
|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Couple d'entrée | Ce | [25 ; 30] Nm |
| Rapport | R | 1/3,6 |
| Vitesse d'entrée | ω_e | 3600 tr/min |

Tableau 4 : Exemple de paramètres issus du Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF)

Quand toutes les fonctions et tous les critères de valeurs issus de toutes les situations de vie du produit sont définis, l'acteur marketing doit choisir le type d'architecture qu'il souhaite. Dans notre cas, il y a différentes configurations possibles. Ces configurations sont définies soit en amont, soit en parallèle de cette étape, dans l'étape 2. Les paramètres du CdCf sont ainsi figés pour une configuration choisie et les paramètres du modèle numérique sont liés à l'architecture produit choisie. Les résultats de cette étape sont collectés sous forme d'un fichier Microsoft Excel.

- **Etape 2 : Capitalisation des informations métier**

Cette étape est réalisée à la fin de chaque projet à partir d'un retour sur expérience. En effet, après chaque projet, il est possible de capitaliser chaque règle métier utilisée, chaque architecture produit utilisée, chaque terme métier employé, etc. Dans cette première expérimentation, la méthodologie KNOVA-SIGMA, en accord avec Serrafero [1998], est appliquée pour l'identification et la capitalisation de ces données.

Dans notre expérimentation, l'expert métier a capitalisé 9 types d'architectures différentes issues d'anciens projets. En effet, nous pouvons définir trois types de familles regroupant ces différentes architectures. La figure 23 représente les trois familles (Architecture Pignon / Pignon, Architecture Poulie / Courroie et les autres architectures) et les 9 configurations d'architectures de réducteur possible [Bluntzer et al., 2006].

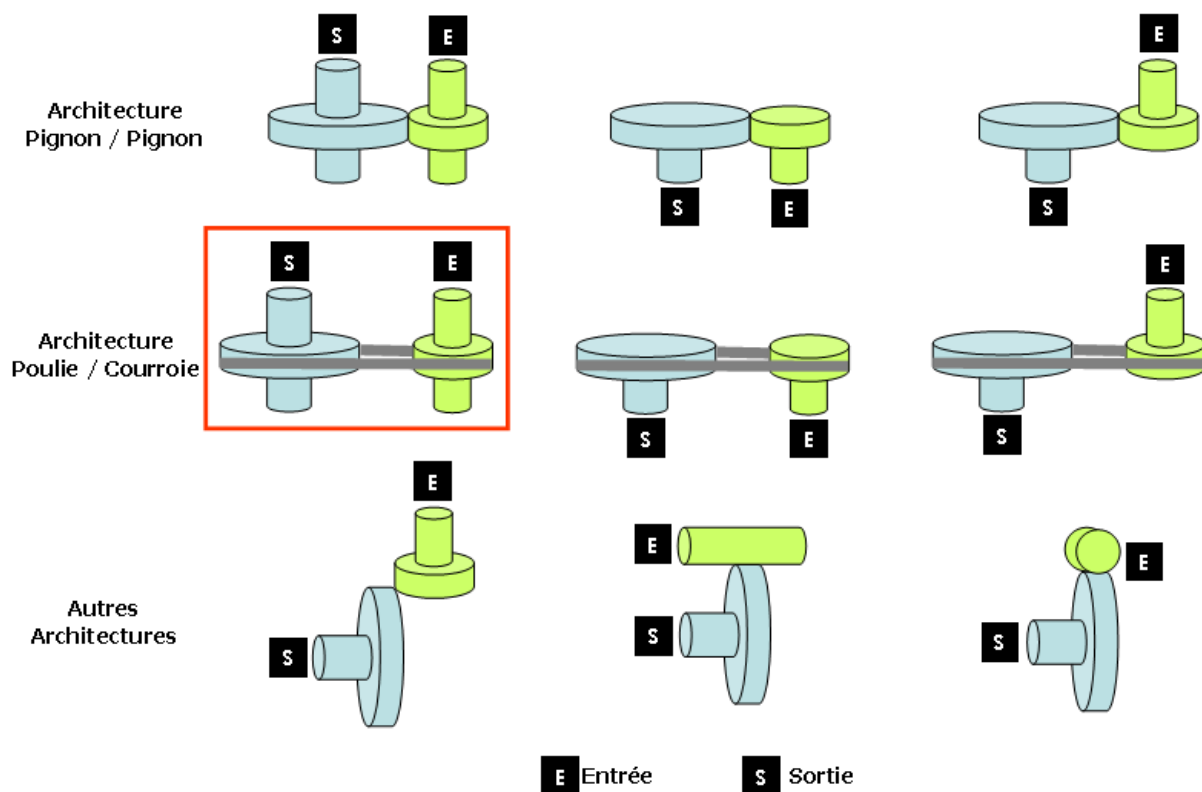


Figure 23 : Proposition du panel des architectures produit disponibles

Ces données sont alors mises à disposition sous forme d'un support papier appelé bréviaire, afin d'être partagées avec la totalité des concepteurs, et les modèles numériques correspondant sont enregistrés sur un serveur partagé. Dans notre expérimentation, l'acteur marketing décide de prendre une architecture Poulie / Courroie. Ce choix est encadré sur la figure 23.

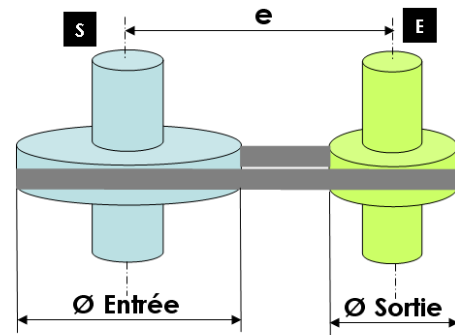


Figure 24 : Architecture choisie

Lors de cette expérimentation, les paramètres du CdCF et les paramètres du modèle numérique ainsi que les différentes règles métier les mettant en relation sont alors formalisés sous forme d'une feuille de tableur informatique, en l'occurrence Microsoft Excel. La figure 24 détaille les différents paramètres du modèle numérique, en particulier les deux diamètres et l'espacement entre les deux poulies. On retrouve dans le tableau 5 l'architecture du produit (issue d'une analyse fonctionnelle interne), les différents paramètres pilotant le modèle numérique ainsi que les règles métier les mettant en relation avec les paramètres du CdCF. Dans ce tableau, R est le rapport de réduction du système et ω représente la vitesse et C le couple.

| <i>Paramètre du modèle numérique</i> | <i>Identifiant</i> |
|---|--------------------|
| Diamètre de la poulie d'entrée | Ø entrée |
| Diamètre de la poulie de sortie | Ø sortie |
| Distance entre les axes des poulies | e |
| <i>Règle métier</i> | |
| Si architecture pignon/pignon Alors $e = (\text{Ø entrée} + \text{Ø sortie})/2$ | |
| Si architecture poulie/courroie Alors $e \geq \text{Ø entrée} + \text{Ø sortie}$ | |
| $R = \text{Ø sortie} / \text{Ø entrée} = \omega \text{ entrée} / \omega \text{ sortie}$ | |

Tableau 5 : Paramètres et règles pilotant l'architecture produit poulie / courroie

Ces différentes données implémentées dans un système d'information (sous forme de fichier Microsoft Excel) permettent d'initialiser l'étape suivante.

- **Etape 3 : Transfert des informations métier vers le concepteur**

Les fichiers Excel issus des étapes 1 et 2 du processus sont concaténés au sein d'un même fichier Excel. En effet, lors du développement du logiciel informatique de migration, l'architecture de développement choisie nécessitait un fichier Excel en donnée d'entrée.

De ce fait, un logiciel de migration BESOIN – ARCHITECTURE → CATIA v5 a été prototypé en Microsoft Visual Basic 6. La technologie utilisée pour permettre de travailler au sein du modèleur est la technologie de Visual Basic Script (VBScript). En effet, CATIAv5 étant développé pour une plateforme Windows, il intègre la possibilité de réaliser des automatisations via la technologie VB nommée VBscript.

Ainsi, ces scripts vont permettre de générer automatiquement l'architecture du produit (car dépourvue de géométrie) ainsi que les différents paramètres fonctionnels et spécifiques définis par l'acteur marketing. De plus, il va aussi intégrer les différentes règles métier qui vont mettre en relation les différents paramètres de telle sorte que les paramètres du CdCF puissent piloter les paramètres du modèle numérique. La figure 25 représente un extrait du fichier Excel pour le paramètre du diamètre de l'arbre moteur et montre le résultat du script après traitement à travers le logiciel de migration. On visualise sur les deux extraits le paramètre appelé "Diamètre_arbre_moteur" ainsi que son unité et sa valeur.

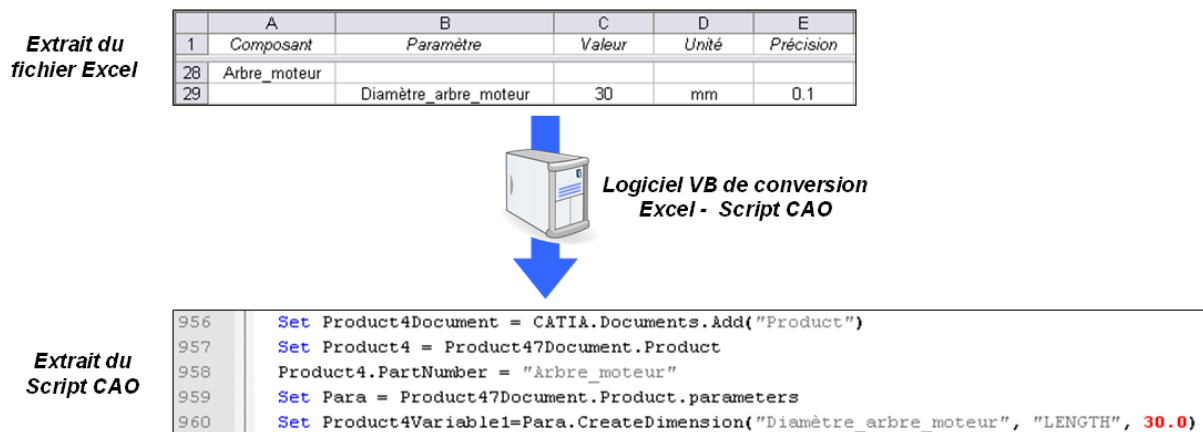


Figure 25 : Extrait d'une conversion Excel – Script CAO pour un paramètre diamètre

• Etape 4 : Modélisation des modèles génériques

Cette étape consiste à modéliser des modèles génériques. Elle ne rentre pas dans le cadre des développements de projet de l'organisation mais constitue une étude transversale. Quand un modèle numérique est candidat, le concepteur le modélise en utilisant une conjoncture "réutilisation", c'est-à-dire le modéliser de manière à pouvoir être réutilisé dans un nouvel environnement. En effet, un modèle générique n'est pas modélisé de la même façon qu'un modèle traditionnel. Il s'agit d'identifier en amont les données initiales susceptibles de changer d'un environnement à un autre et de les utiliser comme données de départ à la modélisation.

Dans notre cas d'application, nous avons trois modèles génériques candidats. En effet, le "pallier lisse", l'axe et la poulie nécessitent chacun plus d'une implémentation dans le modèle final. La modélisation de ces composants est ainsi justifiée par son utilisation multiple. De plus, chaque composant est paramétré via une interface graphique. La figure 26 représente l'interface graphique de paramétrage d'un palier lisse. On peut ainsi déterminer

tous les paramètres géométriques du modèle, par exemple, les différentes hauteurs (collerette et sous-collerette) et les différents diamètres (Collerette, inférieur et extérieur). Cette interface nous permet de générer une infinité de paliers. Ainsi, si nous utilisons le palier directement dans un assemblage, comme dans notre expérimentation à l'étape suivante, il n'est pas nécessaire d'éditer le paramétrage car il y a auto-adaptation dans son nouvel environnement.

Dans cette expérimentation, le temps de modélisation de ces modèles génériques est similaire au temps de modélisation des modèles conventionnels. En effet, la seule différence réside dans la philosophie de modélisation, notamment en choisissant d'autres éléments de références, mais n'engendre aucun impact dans le temps de modélisation global. Les temps de modélisation de ces trois modèles sont alors d'environ deux heures.

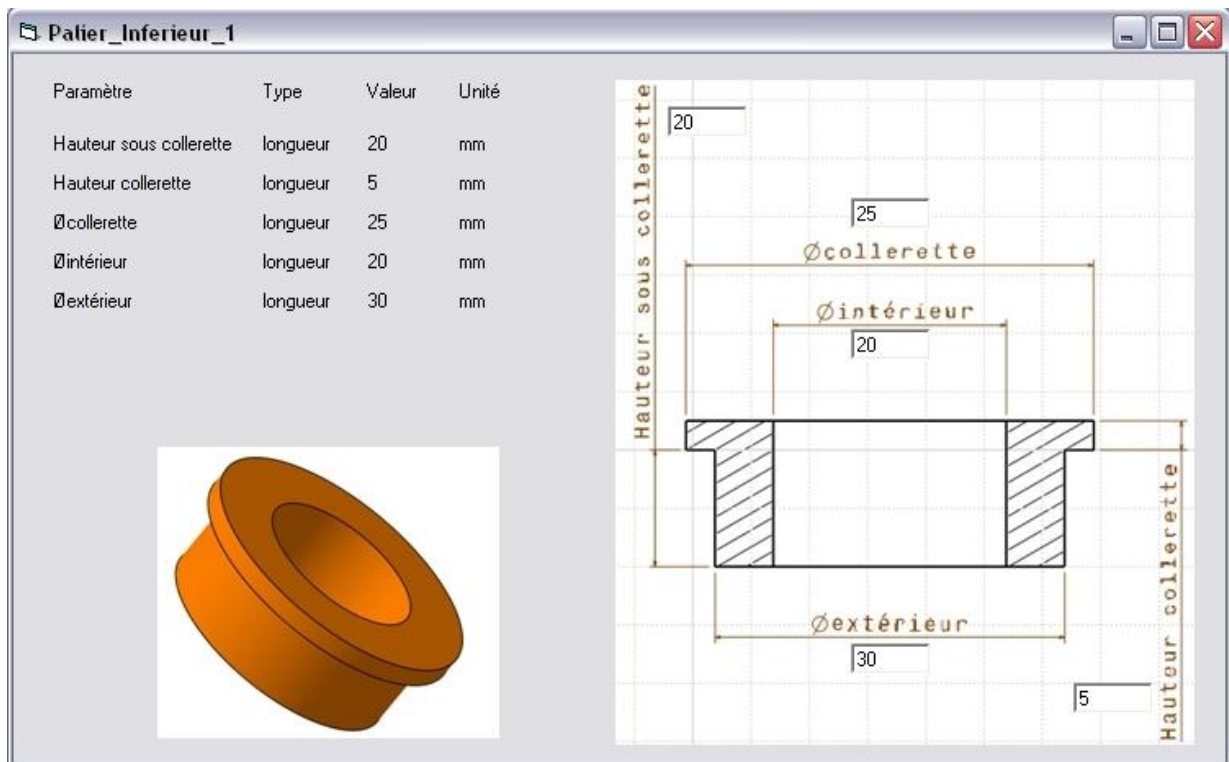


Figure 26 : Interface de génération du palier

Une fois le modèle générique réalisé, le concepteur doit le mettre à disposition dans une base de données accessible à l'ensemble des autres concepteurs.

- **Etape 5 : Exploitation des informations métier pour la conception de nouveaux systèmes**

Après avoir généré le script CAO via le logiciel dédié, le concepteur doit l'exploiter sur sa propre station CAO. Après l'avoir utilisé, il est maintenant en possession de l'architecture de son produit dans son modèleur CAO. Avant de débiter la modélisation des solides, il réalise le squelette de son produit, comme expliqué dans le chapitre précédent. Une fois en possession de son squelette et en réalisant une recherche dans la base de données des modèles génériques, il lui est possible d'implémenter les solutions qu'il a retenues afin

qu'elles s'auto-adaptent dans ce nouvel environnement de manière à générer un nouveau produit conforme aux contraintes initiales issues du cahier des charges fonctionnel.

Si un critère de valeur est amené à être changé en cours de conception, le concepteur peut adapter directement son modèle numérique en modifiant le paramètre issu du CdCF impacté. La modification de ce paramètre va modifier directement les paramètres du modèle numérique mis en relation par les règles métier.

La figure 27 traduit une représentation du modèle numérique générée. Nous pouvons ainsi distinguer les quatre paliers lisses, les deux axes et les deux poulies. Chacun de ces éléments a été implémenté et s'est auto adapté au squelette.

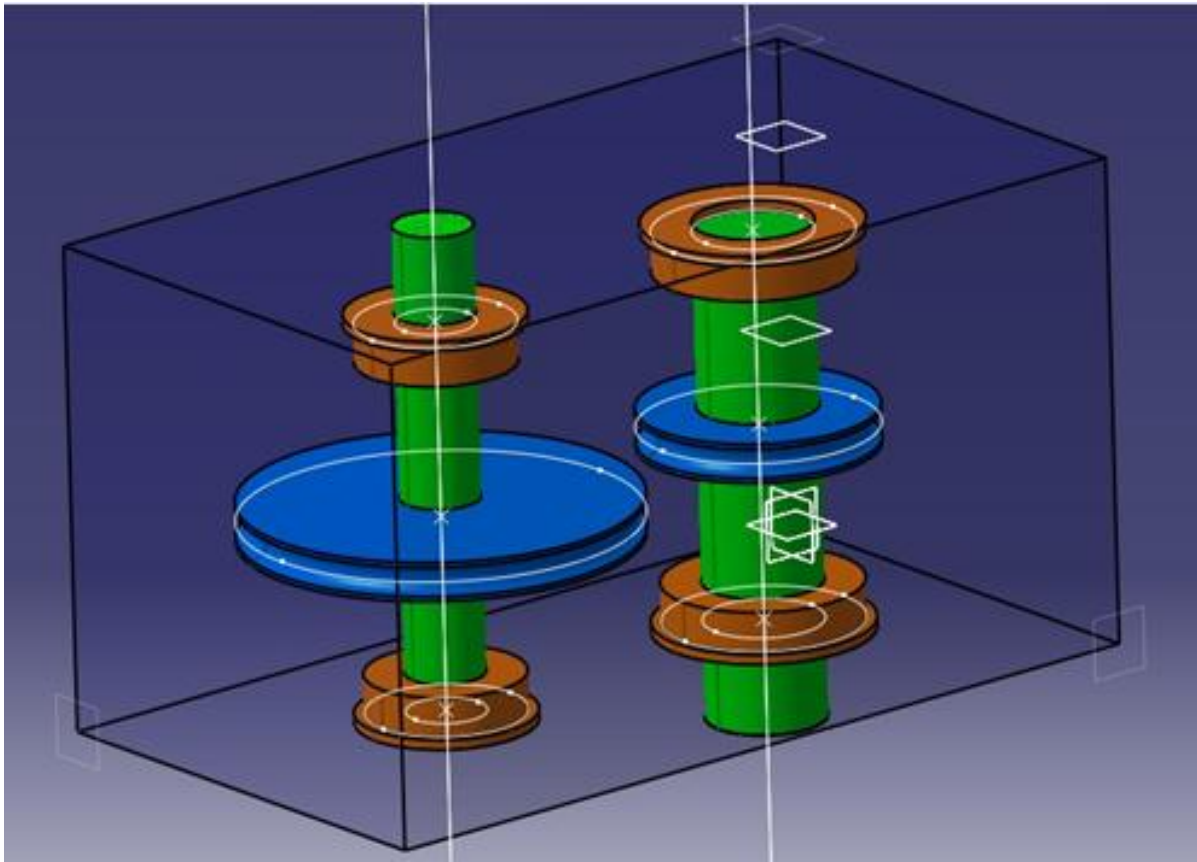


Figure 27 : Représentation tridimensionnelle du concept généré

Le temps de modélisation nécessaire au concepteur pour pouvoir réaliser cette étape est d'environ 15 minutes. En effet, seul le temps de modélisation du squelette est important, car l'implémentation des modèles génériques est très rapide (environ 3 minutes).

3.1.3 Résultats de l'expérimentation

Nous pouvons déterminer que la conception de ce nouveau système est "hautement productive" tout en correspondant aux règles métier de la société (15 minutes de modélisation au lieu de 120 minutes avec la méthode classique). De plus, si une modification du CdCF est réalisée, il y a une modification instantanée du modèle numérique (Temps machine : 30 secondes). La figure 28 nous montre l'impact de la géométrie lors de la modification du paramètre fonctionnel R.

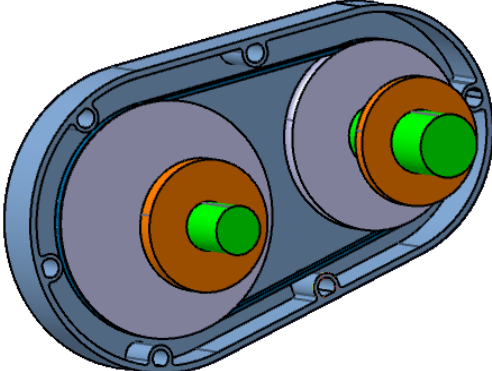
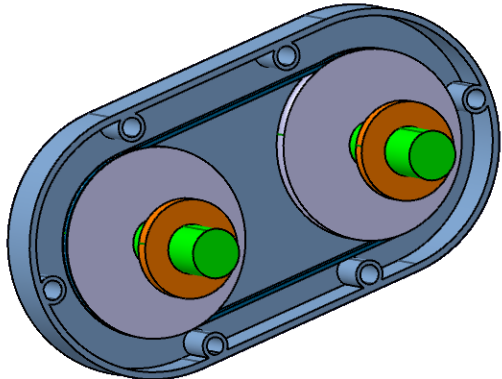
| Paramètres fonctionnels initiaux : | Nouveaux paramètres fonctionnels et géométriques : |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • C entrée = 27 Nm • R = 1/3.6 • ω entrée = 3600 tr/min • ω sortie = $3600 * 1/3,6 = 1000$ tr/min • \varnothing entrée = 60mm • \varnothing sortie = $60/(1/3.6) = 216$mm | <ul style="list-style-type: none"> • R = 1 • ω sortie = $3600 * 1 = 3600$ tr/min • \varnothing sortie = $60/1 = 60$mm |
|  |  |

Figure 28 : Comparatif de la première et de la seconde modélisation

Cette expérimentation a mis en évidence un gain en temps de 40% sur l'ensemble des deux conceptions. Le tableau 6 récapitule les temps de modélisation en comparant le processus de conception conventionnel décrit dans le paragraphe 1.2.2 et la nouvelle méthodologie proposée dans cette section.

| | 1ère conception | | | | 2ème conception | | | | Total |
|---|--|-----------------------------------|--------------|------------------------|--|-----------------------------------|--------------|------------------------|-------------------|
| | Temps de collecte des informations métiers (en heures) | Temps de modélisation (en heures) | | Sous-Total (en heures) | Temps de collecte des informations métiers (en heures) | Temps de modélisation (en heures) | | Sous-Total (en heures) | Total (en heures) |
| | | Modèle générique | Finalisation | | | Modèle générique | Finalisation | | |
| Conception conventionnelle | 1 | 0 | 2 | 3 | 0,5 | 0 | 2 | 2,5 | 5,5 |
| Conception suivant la nouvelle méthodologie | 1 | 2 | 0,25 | 3,25 | 0 | 0 | 0,008 | 0,008 | 3,258 |

Tableau 6 : Comparaison des temps de conception dans le cadre de l'expérimentation conduite

Ces résultats valident en contexte académique grâce à la méthode proposée la première hypothèse de notre travail qui traduit qu'il est possible de réduire les temps qui sont dédiés à la reconception afin d'accélérer le processus de conception et de développement de produit. De plus, l'hypothèse 3 est aussi validée dans ce même contexte. En effet, à travers cette expérimentation, nous établissons le lien entre les besoins initiaux et la géométrie ce qui permet d'être très réactif dans la phase de reconception.

La validation de la quatrième hypothèse, qui consiste à intégrer des informations métier dans les modeleurs, nous permet de l'étendre en proposant une sixième hypothèse plus spécifique.

Hypothèse 6 : *"L'exploitation des solutions validées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels sous forme de modèles génériques, permet d'augmenter la réactivité dans le processus de conception de produits"*

Outre les gains annoncés précédemment dans le cadre de cette expérimentation en contexte académique, certaines limites ont pu être identifiées et sont exposées dans le paragraphe suivant.

3.1.4 Limites de la méthodologie

Cette expérimentation a permis d'accélérer le processus de reconception de solutions approuvées et capitalisées. Il est ainsi possible de générer un nouveau produit pour toutes les évolutions des paramètres issus du CdCF. Cependant, différentes limites ont été identifiées. Afin de pouvoir les lister exhaustivement, nous proposons de les citer par étape.

L'étape 1 a révélé la nécessité d'utiliser un outil informatique afin de formaliser le CdCF toujours de la même manière. En effet, le document Excel est trop flexible et ne permet pas une rigueur suffisante dans le formalisme.

L'étape 2 a permis de déterminer deux limites. D'un côté, l'expert doit mettre à disposition des architectures de produits précédents liées à des règles. Dès lors, il s'agit de déterminer une architecture produit afin que tous les modèles produits soient hiérarchisés de la même manière. De l'autre côté, il s'agit de proposer un cycle de validation des règles métier utilisées afin qu'elles soient utilisables par tous les acteurs de l'organisation.

Nous avons validé le prototype de conversion, développé en VB6, en migrant un fichier de données Excel en un langage exploitable par CATIA v5 à travers l'étape 3. Mais l'utilisation d'un logiciel tiers pour réaliser cette migration montre vite ces limites. La réussite de cette étape dépend fortement de l'implication des acteurs car elle nécessite souvent de nombreuses étapes intermédiaires liées à la non possession ou à la méconnaissance de ce logiciel intermédiaire. Ainsi, l'intégration du processus réalisée par ce logiciel au sein d'une plateforme de PLM est nécessaire afin d'être indépendant d'un logiciel tiers et permettre à chaque acteur de pouvoir l'exploiter sans contraintes supplémentaires.

Durant les deux étapes suivantes, l'acteur concepteur était chargé de réaliser en parallèle les modèles génériques et la modélisation du produit final. Or, nous avons établi que les compétences nécessaires lors de ces étapes ne sont pas similaires. En effet, lors de l'étape 4, l'acteur métier modélisant génériquement doit gérer des entités informatiques nécessitant des compétences en algorithmie, programmation objet, etc. Cette compétence relève très rarement de l'acteur métier concepteur de produits mécaniques. De plus, il s'agit de proposer

une typologie des modèles génériques afin de pouvoir les traiter différemment les uns des autres. En effet, certains modèles génériques permettent de réaliser des actions de contrôle et d'autres des actions de conception. De ce fait, avant de déployer ce modèle méthodologique au sein d'une organisation industrielle, nous proposons une évolution afin d'intégrer un nouvel acteur appelé "Expert CAO" en charge de l'étape 4.

Si on traite globalement le modèle méthodologique proposé dans cette expérimentation, il s'agit de formaliser la mise en relation des besoins fonctionnels directement avec la définition géométrique et numérique du produit à travers une typologie des paramètres et des règles utilisés.

Avant de proposer un modèle méthodologique intégrant toutes ces propositions d'évolution, nous traitons dans la suite de ce chapitre tous les modèles qui sont nécessaires à sa réalisation.

3.2 Fondamentaux de l'approche proposée : du CdCF à la géométrie du modèle numérique

Afin de déterminer les fondamentaux du modèle que l'on présente à la fin de ce chapitre, on propose de déterminer, dans ce paragraphe, notre proposition de couplage du Cahier des Charges Fonctionnel à la géométrie du modèle numérique du produit. Pour ce faire, nous développons, dans un premier temps, une approche permettant de lier l'analyse fonctionnelle avec la géométrie en utilisant les paramètres et les règles. Dans un second temps, nous proposons un modèle de validation de ces règles afin de pouvoir les exploiter.

La méthodologie appliquée pour obtenir la création des paramètres est décrite dans la figure 29. Elle est réalisée en trois étapes et fait intervenir trois acteurs métier : l'acteur marketing, intégrant les besoins et attentes du client, l'architecte produit définissant les différentes configurations possibles du système ainsi qu'un expert métier détaillant les règles de conception.

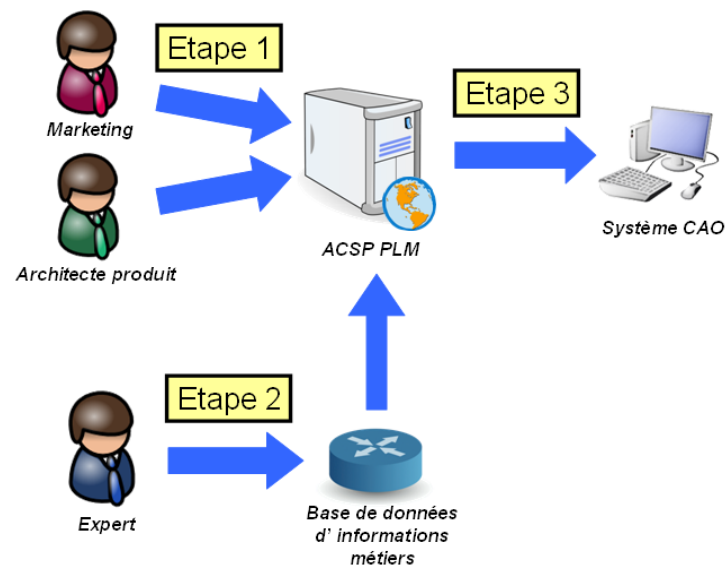


Figure 29 : Méthodologie de couplage CdCF - Géométrie

Nous pouvons relever qu'un nouvel acteur métier qui est l'architecte est introduit dans notre démarche. Il s'avère que suite à la première expérimentation, l'expert métier ne pouvait pas assumer les choix de l'architecture. En effet, l'expert métier étant multi-projets, il n'était pas à même de connaître le contexte du projet auquel l'acteur marketing est rattaché. De plus l'acteur marketing n'est pas à même de décider de l'architecture du produit en raison du fait qu'il n'est pas issu d'une formation technique. Il en résulte la nécessité de créer un nouveau métier, celui d'architecte produit, qui existe déjà dans certaines organisations impliquées dans la conception de systèmes complexes.

De surcroît, la méthodologie utilise une approche matricielle afin d'être utilisable et capitalisable dans le système d'information. En effet, l'étape réalisée par l'expert métier n'est nécessaire que dans le cas d'une nouvelle proposition de configuration du système par l'architecte produit. Si l'architecte fait le choix d'en utiliser une ancienne, l'étape d'expertise n'est pas à réaliser car les données sont déjà présentes dans le système.

Pour illustrer cette méthodologie, le produit "carrosserie", représenté sur la figure 30, issu du véhicule de compétition du challenge SIA est utilisé. Ce produit peut être réalisé en un composant ou être divisé en deux sous-produits, la carrosserie nue et l'aileron, nécessitant une opération d'assemblage. Nous reviendrons par la suite sur la définition du produit dans le paragraphe 3.4.2.

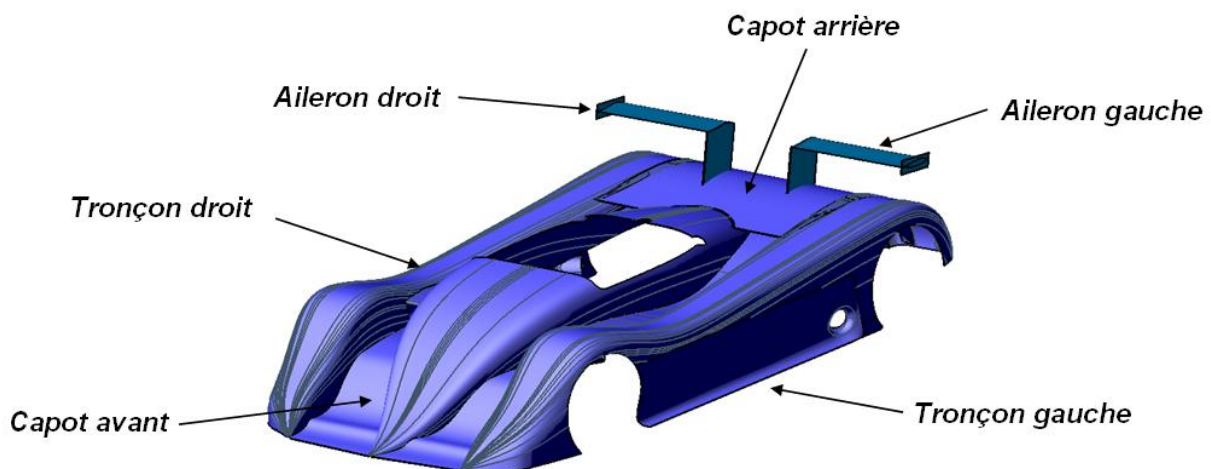


Figure 30 : Produit Carrosserie du véhicule de compétition du challenge SIA

Avant de détailler les différentes étapes de la méthodologie, il est nécessaire de définir certains termes nécessaires à sa compréhension et notamment une typologie des paramètres et des règles.

3.2.1 Typologie des paramètres et des règles

Nous avons employé le terme paramètre à plusieurs reprises lors de l'expérimentation précédente. Nous avons déterminé des paramètres issus du CdCF et des paramètres pilotant la géométrie du modèle numérique. Nous nous proposons de déterminer dans ce paragraphe une typologie de ces paramètres et de la propagation aux règles. De ce fait nous déterminons que les paramètres et les règles peuvent être fonctionnels, s'ils sont issus des critères de valeur, ou

spécifiques, s'ils sont modifiés ou nouvellement créés. Nous détaillons la définition de ces deux types ci-dessous.

- **Paramètres et règles fonctionnels :**

Les paramètres fonctionnels et règles fonctionnelles sont issus du Cahier des Charges Fonctionnel sous forme de critères de valeur. De ce fait, les paramètres fonctionnels ont un impact direct sur le produit, et ce quelque soit le principe de solution retenu.

Nous pouvons, par exemple, citer les paramètres fonctionnels de la carrosserie de notre exemple. Le "poids de la carrosserie" (P_c), le "poids de l'aileron" (P_a), la "Boîte englobante" (BB) (mesures maximum du produit en x, y et z) et le plan de forme pilotent directement la carrosserie indépendamment des solutions retenues.

En ce qui concerne les règles fonctionnelles, elles impliquent uniquement les paramètres fonctionnels du produit. Par exemple, le paramètre "Poids total maximum de l'habillage véhicule" (P_t) est lié aux paramètres fonctionnels le "poids de la carrosserie", le "poids de l'aileron" par la règle fonctionnelle

Avec :

$$P_t = P_a + P_c$$

- P_t : Poids total de maximum de l'habillage véhicule
- P_a : poids de l'aileron
- P_c : poids de la carrosserie

Nous pouvons ainsi établir deux autres règles fonctionnelles permettant de lier le "poids de la carrosserie" avec le poids de ses sous-composants ainsi que le "poids de l'aileron" avec les siens. Ces deux règles fonctionnelles sont présentées ci-dessous.

Avec :

$$P_a = P_{ad} + P_{ag}$$

- P_a : poids de l'aileron
- P_{ad} : poids de l'aileron droit
- P_{ag} : poids de l'aileron gauche

Avec :

$$P_c = P_{cav} + P_{car} + P_{td} + P_{tg}$$

- P_c : poids de la carrosserie
- P_{cav} : Poids du capot avant
- P_{car} : poids du capot arrière
- P_{td} : poids du tronçon droit
- P_{tg} : poids du tronçon gauche

- **Paramètres et règles spécifiques :**

Les paramètres et règles spécifiques sont issus des connaissances métier du domaine et du retour d'expérience issus des précédents projets. Une fois validés par l'expert métier, ils impactent la structure produit de manière spécifique et sont dépendants de la solution retenue.

Par exemple, pour le sous-ensemble "Aileron", nous pouvons citer le paramètre spécifique "Epaisseur" qui pilote l'épaisseur constante de l'aileron, règle experte de la conception en plasturgie. Les règles spécifiques liées aux paramètres spécifiques sont dépendantes de la solution choisie.

Suite à la présentation de la typologie des paramètres et des règles, nous pouvons désormais détailler l'approche méthodologique permettant de lier le CdCF au modèle numérique.

3.2.2 Etape 1 : Le cahier des charges fonctionnel, la fondation du modèle

Nous avons déterminé, au sein de l'expérimentation précédente, qu'il est possible d'établir un lien entre le CdCF et la géométrie du modèle numérique. De ce fait, nous proposons dans ce paragraphe une méthodologie permettant de créer la liaison entre le besoin du client et la maquette numérique du produit. Après la définition du besoin auprès du client, l'application des méthodologies d'Analyse de la valeur est effectuée. Via l'analyse fonctionnelle externe, un cahier des charges fonctionnel est rédigé et les fonctions principales et contraintes sont identifiées. Via l'analyse fonctionnelle interne, ces fonctions sont propagées au sein du produit. Il est alors possible d'identifier les paramètres et règles fonctionnels et spécifiques relatifs au produit étudié.

3.2.2.1 Analyse fonctionnelle externe :

L'étape 1 de la méthodologie proposée est divisée en deux parties séquencées. La première est fondée sur l'analyse fonctionnelle externe et est réalisée par l'acteur marketing. Il s'agit, tout comme dans la première expérimentation, de l'identification du besoin et de la formalisation des fonctions et critères de valeurs. La seconde nécessite une ou plusieurs analyses fonctionnelles internes et est réalisée par l'architecte produit.

La figure 31 illustre une partie de la première matrice de notre méthodologie appliquée aux fonctions de la carrosserie. L'objectif de cette matrice est de conserver les choix de conception réalisés. Les fonctions utilisées dans cette matrice sont définies ci-après. A chaque besoin est associé un ou plusieurs paramètres fonctionnels sous la forme RX, X étant un numéro d'identification.

Cette première partie de l'étape est réalisée par l'acteur marketing. En effet, étant en contact avec le client, cet acteur métier est le plus à même de pouvoir définir fonctionnellement le besoin. Les fonctions déterminées utiliseront le formalisme FuX, X représentant le numéro de la fonction.

Le tableau 7 recense les paramètres fonctionnels issus des critères de valeur pour chaque fonction de l'analyse fonctionnelle externe.

| <i>Identifiants des fonctions</i> | <i>Fonctions</i> | <i>Paramètres fonctionnels</i> | <i>Identifiants des paramètres</i> |
|---|--|------------------------------------|--|
| Fu1 | Protéger le châssis de l'environnement | Plan de formes | R3 |
| Fu2 | Assurer la stabilité du châssis dans l'environnement en utilisant le vent | Poids total | R1 |
| | | Boite englobante | R2 |

Tableau 7 : Exemple de paramètres issus du Cahier des Charges Fonctionnel

A partir de cet extrait du CdCF, une matrice correspondante est établie sur la base de l'analyse fonctionnelle externe réalisée. La figure 31 illustre la matrice ainsi que le graphique représentant l'analyse fonctionnelle externe du produit étudié.

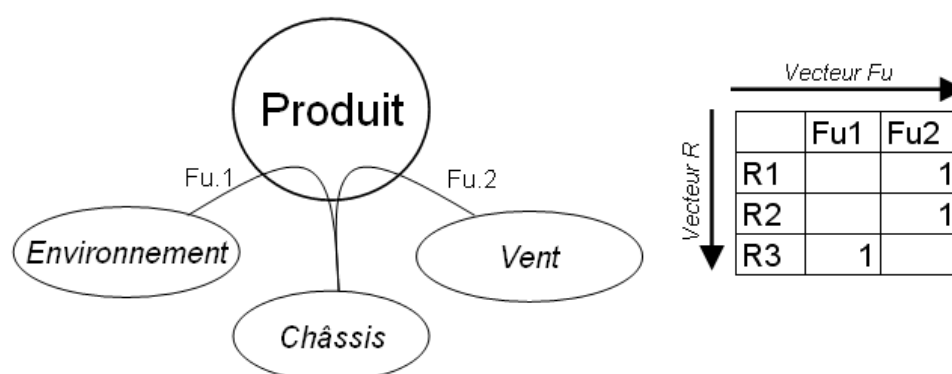


Figure 31 : Extrait de l'analyse fonctionnelle externe du produit et la matrice correspondante (Matrice R-Fu)

Dans l'exemple précédent, nous identifions deux fonctions distinctes : Fu1 et Fu2 (détaillées dans le tableau). Or, on peut s'apercevoir que l'un des paramètres fonctionnels, en l'occurrence celui résultant de Fu1, n'est pas un paramètre scalaire, mais une surface complexe. En effet, nous pouvons considérer n'importe quel élément d'entrée en paramètre fonctionnel.

Suivant la méthodologie d'analyse fonctionnelle, nous pouvons à ce stade débiter l'analyse fonctionnelle interne.

3.2.2.2 Analyse fonctionnelle interne :

Cette seconde partie est formalisée par l'architecte produit. Cet acteur métier, étant proche de la technique et de la culture de l'entreprise, peut déterminer quelles configurations de solutions potentielles peuvent être utilisées pour répondre aux besoins identifiés précédemment.

Dans l'exemple de la carrosserie, deux solutions distinctes peuvent répondre à ce besoin. Premièrement, la carrosserie est réalisée en une seule pièce. Deuxièmement, le produit carrosserie est en différents sous-produits, la carrosserie nue et ses composants ainsi que l'aileron avec ses composants.

Dans la suite de cet exemple, nous utiliserons la seconde possibilité qui nécessite un second niveau de propagation qui est plus appropriée. Une nouvelle matrice mettant en relation les pièces et les fonctions est définie par l'intermédiaire d'une analyse fonctionnelle interne afin d'optimiser la conception et de réduire les coûts.

La figure 32 illustre une partie de la seconde matrice de notre méthodologie en croisant les fonctions avec les sous-produits et / ou les pièces de la carrosserie.

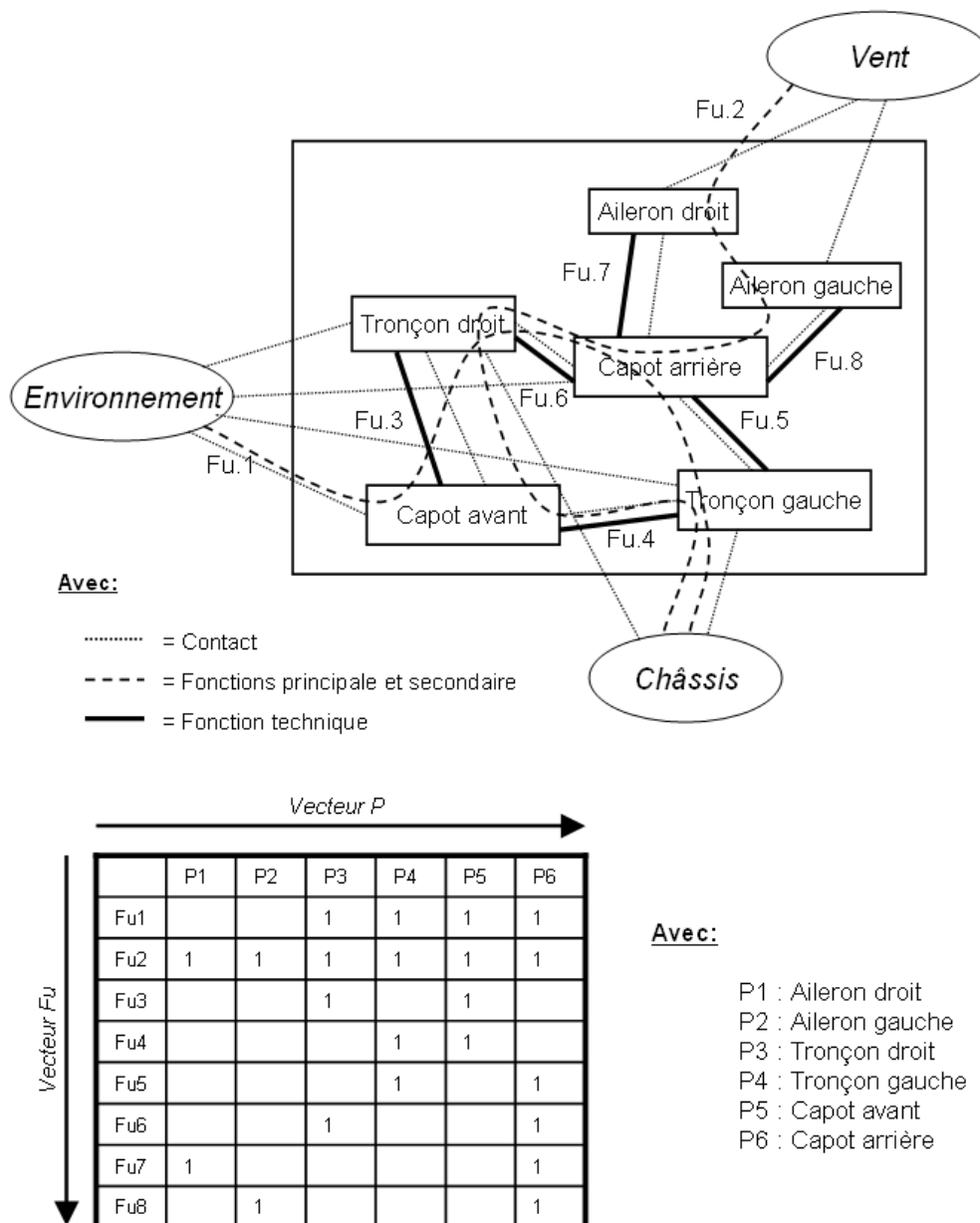


Figure 32 : Extrait de l'analyse fonctionnelle interne du produit et la matrice correspondante (Matrice Fu-P)

Nous retrouvons sur l'illustration les fonctions Fu1 reliant l'environnement au châssis en passant par les composants de la carrosserie, ainsi que Fu2 reliant l'air au châssis en passant par tous les composants de la carrosserie et de l'aileron. Cette analyse permet de définir des besoins fonctionnels qui dépendent de la solution choisie. Dans notre cas, nous devons interfacier les différents composants en eux. Nous sommes ainsi en présence de six nouvelles fonctions (aussi appelées fonctions techniques) listées ci-dessous :

- Fu3 : Interfacier le tronçon droit avec le capot avant
- Fu4 : Interfacier le capot avant avec le tronçon gauche
- Fu5 : Interfacier le tronçon gauche avec le capot arrière
- Fu6 : Interfacier le tronçon droit avec le capot arrière
- Fu7 : Interfacier le capot arrière avec l'aileron droit
- Fu8 : Interfacier le capot arrière avec l'aileron gauche

Une fois les besoins et paramètres fonctionnels définis, des principes de solution correspondants peuvent être établis.

3.2.3 Etape 2 : L'architecture produit, du besoin fonctionnel aux différents principes de solution

Cette étape est réalisée par un expert métier. Selon les différents métiers intervenant dans le cycle de vie du produit, plusieurs experts métier peuvent être à même d'intervenir durant cette étape.

Nous devons alors définir les paramètres spécifiques qui piloteront chaque composant du produit afin de déterminer la matrice P – T (Pièces – Paramètre spécifiques). Comme illustré dans la figure 33, la matrice P – T peut être remplie afin de déterminer les liens entre paramètres spécifiques et pièces. Dans notre exemple, nous réduisons notre cas à trois paramètres spécifiques afin de ne pas le surcharger : l'épaisseur des ailerons (T1), le diamètre du téton qui sert de Poka-Yoké (T2) et l'épaisseur du capot arrière (T3).

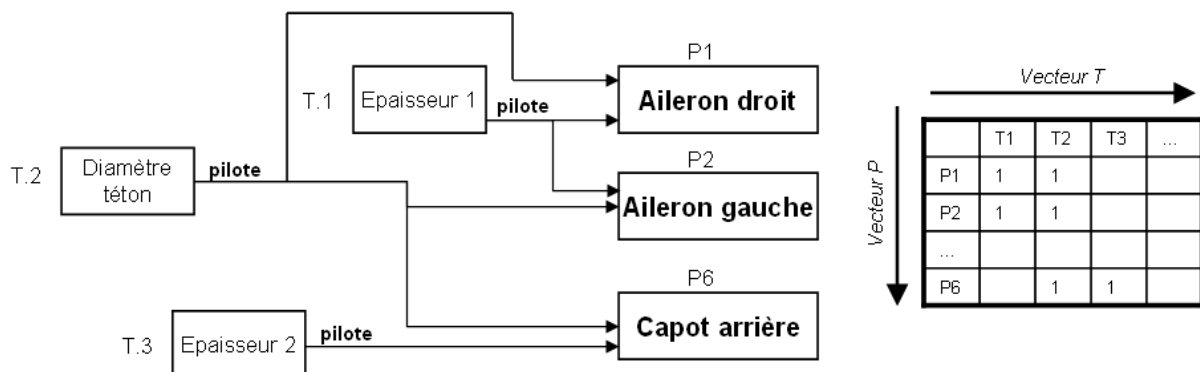


Figure 33 : Extrait du diagramme des solutions du produit et la matrice correspondante (Matrice P-T)

Cette étape n'est à réaliser que lors d'une nouvelle proposition de configuration. En effet, si une ancienne configuration est utilisée, il nous est possible de réutiliser l'expertise réalisée sur le projet précédent. A chaque création d'une nouvelle expertise, cette dernière est capitalisée et devient transversale à tous les projets.

Les paramètres spécifiques établis vont ensuite pouvoir être appliqués aux nouveaux projets.

3.2.4 Etape 3 : Propagation des paramètres spécifiques

L'étape suivante consiste à identifier les paramètres spécifiques du produit liés à chaque composant afin de déterminer le vecteur X résultant de la concaténation du vecteur R (paramètres fonctionnels) et du vecteur T (paramètres spécifiques).

La figure 34 propose une représentation vectorielle des différents paramètres spécifiques en relation avec les différents paramètres fonctionnels issus de la carrosserie.

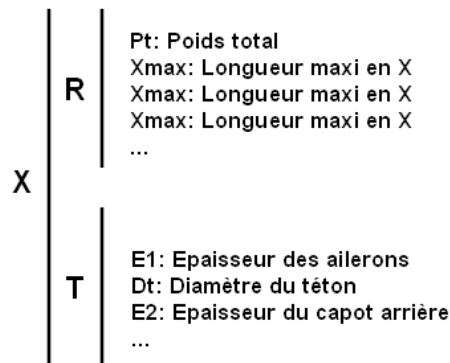


Figure 34 : Représentation vectorielle des paramètres spécifiques et fonctionnels.

Nous avons établi dans ce paragraphe le lien entre le Cahier des Charges Fonctionnel et la géométrie du modèle numérique. Par l'intermédiaire des règles métier, il nous est possible de piloter les paramètres spécifiques impactant la géométrie en modifiant les paramètres fonctionnels. De plus, l'approche matricielle utilisée nous permet de capitaliser tous les liens établis pour pouvoir les remettre à disposition lors des prochains projets réalisés par la même société. Mais avant de proposer un modèle global intégrant ce nouveau lien, il s'agit de proposer un principe d'extraction des connaissances métier qui vont nous permettre d'établir ce lien.

Le paragraphe suivant décrit dans un premier temps le processus retenu afin de capter les informations métier de l'organisation, et dans un second temps, de valider ces règles au sein de la société pour offrir une transversalité lors du processus de conception.

3.3 Extraction et validation des connaissances métier

A travers l'état de l'art réalisé dans la seconde section du chapitre 2, nous avons identifié plusieurs principes et modèles d'extraction des connaissances métier dans le processus de conception, hormis les approches de type guide de conception qui restent aujourd'hui prédominantes dans les industries. De ce fait, nous proposons dans un premier

temps d'utiliser les retours sur expérience, décrits dans la seconde section du chapitre 2, afin d'extraire les connaissances métier. Nous proposons ensuite un cycle permettant cette extraction au cours d'un cycle de conception. Dans un second temps, nous proposons un processus de validation de ces connaissances au sein d'une entreprise concernée. En effet, établir une validation multi-métier permet de faire appliquer ces règles à tous les concepteurs.

3.3.1 Principes d'extraction des connaissances métier retenues

Comme nous l'avons établi dans le chapitre 2, les retours sur expérience sont aujourd'hui un vecteur permettant de capter les informations métier de la société. Lors d'un processus de conception, nous sommes en présence de nombreuses modifications, notamment dans les phases de conception détaillées, qui nous permettent d'extraire des règles métier.

Afin de pouvoir capitaliser ces règles métier, nous proposons un cycle composé de trois étapes distinctes représenté sur la figure 35.

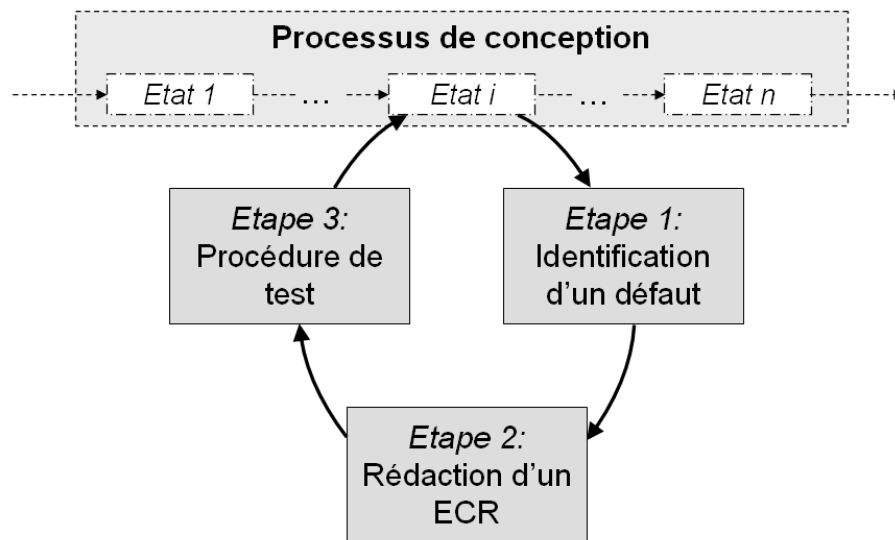


Figure 35 : Cycle d'extraction d'une règle métier.

La première étape consiste à identifier un défaut. En effet, à n'importe quel moment du processus de conception, le concepteur peut identifier un défaut et initier un cycle d'extraction. Quand le défaut est identifié, la deuxième étape démarre. Cette étape consiste à formaliser le défaut sous la forme d'un document appelé ECR ("Engineering Change Request" – en français "Demande de Modification d'Ingénierie"). Ce document permet de proposer une solution afin de résorber ce défaut. En règle générale, cette correction est établie grâce à des règles métier qui sont elles-mêmes identifiées, extraites et capitalisées à partir des ECR précédents. La dernière étape consiste à tester la correction de ce défaut afin d'approuver cette nouvelle solution.

Mais cette validation seule ne peut pas promulguer cette règle à l'état de générique. En effet, cette règle est validée au sein d'un projet, par les experts travaillant sur le projet. De ce fait, cette validation est contextualisée et n'est pas multi-projets. Afin de pouvoir la valider

pour qu'elle puisse être appliquée à tous les projets, il faut la faire valider par tous les experts métier.

Le paragraphe suivant propose un processus de validation de ces règles qui répond à ce besoin.

3.3.2 Processus de validation des connaissances métier retenues

Ce paragraphe propose un cycle de validation des règles métier. En effet, lors du processus de conception, tous les métiers de l'entreprise sont en contact avec le produit étudié. Par analogie avec la génération d'un concept de produit, quand le concepteur le réalise, ce concept doit être validé par tous les métiers. Nous pouvons ainsi raisonner de la même manière sur les règles métier.

Le processus de validation des règles métier, décrit dans ce paragraphe, consiste à faire valider une règle métier par tous les acteurs métier avant d'être diffusée auprès des concepteurs pour une application sur tous les prochains projets. De plus, si cette procédure est respectée, le concept développé par l'intermédiaire de ces règles ne nécessitera plus de validation spécifique lors des revues de conception. Un gain de temps est dans ce cas réalisé.

Le processus de validation des connaissances métier que nous proposons s'appelle ERV (Expert Rule Validation, en français Validation de Règle Métier). Il est divisé en six étapes majeures et peut être interrompu à tout moment. La représentation de l'ERV en figure 36 utilise le formalisme ISO du logigramme [ISO, 1985] afin de représenter un cycle de vie sous une forme simplifiée.

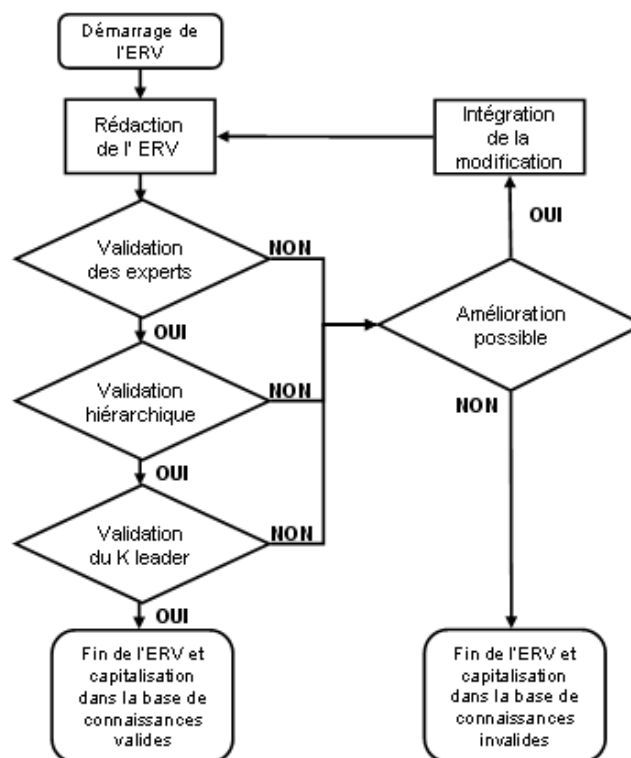


Figure 36 : Logigramme représentant le processus de validation des règles métier

Afin de comprendre ce processus, nous proposons de détailler les six étapes dans la suite de ce paragraphe.

- **Etape 1 : Initialisation et rédaction de la règle métier**

Il s'agit dans cette étape d'initialiser le processus d'ERV. Tous les acteurs métier de l'organisation ont cette possibilité. Pour ce faire, l'acteur métier doit rédiger les règles métier dans un formalisme prédéfini contenant les différents champs suivants :

- Références personnelles de l'émetteur : Ce champ permet d'identifier l'émetteur afin de pouvoir le contacter par la suite et ainsi offrir à chaque utilisateur de la règle un seul référent.
- Référence de l'émission : Cette référence permet la gestion des émissions.
- Origine de la règle : Il référence l'émetteur initial du besoin du point de vue interne (service) ou du point de vue externe (Client ou Fournisseur).
- Définition : Ce champ donne le nom final de la règle métier.
- Domaine concerné : ce champ définit le type de produit impacté dans l'entreprise.
- Zone fonctionnelle : ce champ définit la zone fonctionnelle impactée.
- Description de la règle métier : le corps de la règle est explicité dans ce champ. Une description concise et précise est préconisée pour que la règle soit comprise par tous les métiers.

Lors de la mise en application de ce processus de validation, une feuille standard établie sous MS Excel est définie.

- **Etape 2 : Validation de la règle métier par les experts**

Il s'agit dans cette étape de faire valider la règle par tous les métiers impliqués lors des processus de conception et fabrication du produit. En effet, une règle peut être valide pour un métier et non applicable par un autre. Nous pouvons citer un exemple générique extrait du véhicule de compétition SIA. Le concepteur de la carrosserie décide d'établir une règle qui stipule que "la carrosserie et l'aileron doivent être monobloc". Si cette règle n'est pas validée par l'intégralité des métiers, nous risquons de rencontrer un problème en situation de vie "fabrication". Or, il est impossible de fabriquer ce composant en un seul bloc. Le refus de cette règle métier par l'expert en fabrication aurait permis de la rendre obsolète et donc non applicable immédiatement.

De ce fait, il est important que le concepteur reçoive une validation de tous les métiers afin de pouvoir utiliser cette règle dans le futur produit.

Lors de la conception d'une pièce plastique, nous pouvons faire valider la règle par différents experts. Le tableau 8 présente la liste exhaustive des experts métier nécessaires pour valider une règle en plasturgie.

| <i>Experts</i> | <i>Rôles</i> |
|----------------|--|
| Concepteur | Il s'assure que la règle soit applicable sur le produit au niveau du concept. |
| Assemblage | Il s'assure que la règle n'interfère pas lors du processus d'assemblage du produit |
| Injection | Il s'assure que la règle ne nuise pas au process d'injection du produit |
| Qualité perçue | Il s'assure que la règle n'implique pas de défauts d'aspect sur la pièce finale. |
| Peinture | Il s'assure que la règle ne nuise pas au process peinture du produit |
| Achat | Il s'assure que le coût qu'induit l'utilisation de la règle soit optimal. |
| Usine | Il s'assure que la règle n'interfère pas sur les activités des usines lors de son implantation sur le produit. |
| Calcul | Il s'assure que la règle soit applicable sur le produit sans impact négatif sur la simulation numérique. |

Tableau 8 : Liste exhaustive des experts métier en plasturgie

- **Etape 3 : Validation de la règle par la hiérarchie**

Cette étape permet de faire valider la règle par les différents responsables. Effectivement, l'utilisation d'une règle métier est liée à un coût. La règle doit être validée par la hiérarchie afin d'assurer la proposition des experts. De plus, les responsables hiérarchiques de chaque métier ont aussi une expérience. Il est alors aussi possible d'identifier une incohérence sur la règle ou alors proposer une évolution.

- **Etape 4 : Validation de la règle par l'initiateur**

Cette étape correspond à la validation finale de la règle. L'acteur métier ayant initialisé le processus s'assure de la possibilité d'appliquer la règle dès le départ du processus de conception. Par sa validation, il applique directement la règle à son produit.

- **Etape 5 : Gestion des modifications**

Cette étape concerne l'acteur métier initiateur de la règle. Quand une demande de modification de la règle est réalisée par un expert ou par la hiérarchie, il modifie la règle pour prendre en compte cette modification. Une fois la modification intégrée, il réinitialise le cycle de validation. Cette étape permet de garder l'acteur métier impliqué dans le processus de validation. Effectivement, si aucun suivi n'est assuré, il se peut que le processus soit bloqué à une des étapes de validation.

- **Etape 6 : Validation ou refus de la règle**

Si la règle n'est pas effective pour tous les métiers, elle devient obsolète. Cette règle est tout de même capitalisée afin de pouvoir à nouveau être étudiée dans le futur. En effet, il

faut prendre en compte la possible évolution du métier qui a refusé la règle afin de lui soumettre à nouveau.

Si la règle s'avère effective, elle doit être diffusée à tous les concepteurs. De plus, elle peut être directement utilisée dans la définition de l'architecture produit définie dans le paragraphe suivant.

Ce processus permet de réaliser la validation des règles métier au sein de l'entreprise. En effet, sans ce processus de validation, il est impossible de valider le bon fonctionnement des règles métier dans toutes les situations de vie du produit. Une fois cette validation effectuée, la règle peut être utilisée dans l'architecture produit afin d'être directement exploitable par le concepteur. De ce fait, chaque règle impacte directement, à différents niveaux, l'architecture produit.

Le paragraphe suivant propose une structure aux définitions numériques afin de pouvoir y intégrer les règles métier de la société.

3.4 Structuration des définitions numériques

Nous avons établi dans les premiers paragraphes de ce chapitre un modèle méthodologique permettant de lier les besoins fonctionnels du CdCF à la géométrie du modèle numérique via les règles métier de l'organisation. Afin de pouvoir appliquer ce modèle au sein d'une organisation industrielle, il s'agit de déterminer une méthodologie de travail correspondant aux besoins actuels. A travers le second chapitre de ce travail, nous avons montré que le processus de conception au sein d'un bureau d'études industriel est aujourd'hui multi-sites et international. Dans un premier temps, nous proposons donc une méthodologie de modélisation collaborative multi-sites permettant de répondre à ces nouveaux critères. Dans un second temps, nous exposons le principe de décomposition d'un modèle numérique afin de pouvoir y intégrer des connaissances métier, point qui est abordé dans un troisième temps.

3.4.1 Méthodologie de modélisation collaborative multi-sites

Afin d'illustrer ces différentes collaborations et cette nouvelle organisation, nous proposons de modéliser un processus de conception, au sein du bureau d'études ETD (Exterior Trim Division), entre les acteurs métier concepteurs (qui établissent les nouveaux concepts et les schémas de principe) et projeteurs (qui modélisent uniquement les schémas de principe sans concevoir). Cette modélisation permet d'identifier les différents acteurs qui sont cités et identifiés dans la suite de ces travaux de recherche.

Nous partons de l'observation que la conception est attribuée au bureau d'études du Front Office et que la modélisation CAO est réalisée en Back Office. Pour permettre une collaboration entre ces deux entités, nous avons défini trois étapes. La première consiste en la préparation des travaux par le Front Office (FO) et le transfert vers le Back Office (BO). La seconde étape décrit le processus de réalisation des travaux dans le BO ainsi que les

collaborations effectuées avec le FO. La dernière étape assure la réception des travaux ainsi que la validation.

La figure 37 illustre ce processus. Les flèches en pointillés larges représentent le flux d'information lors de la première étape, les flèches en trait plein les flux durant l'étape 2 et durant l'étape 3, les flux sont représentés par des flèches en pointillés courts.

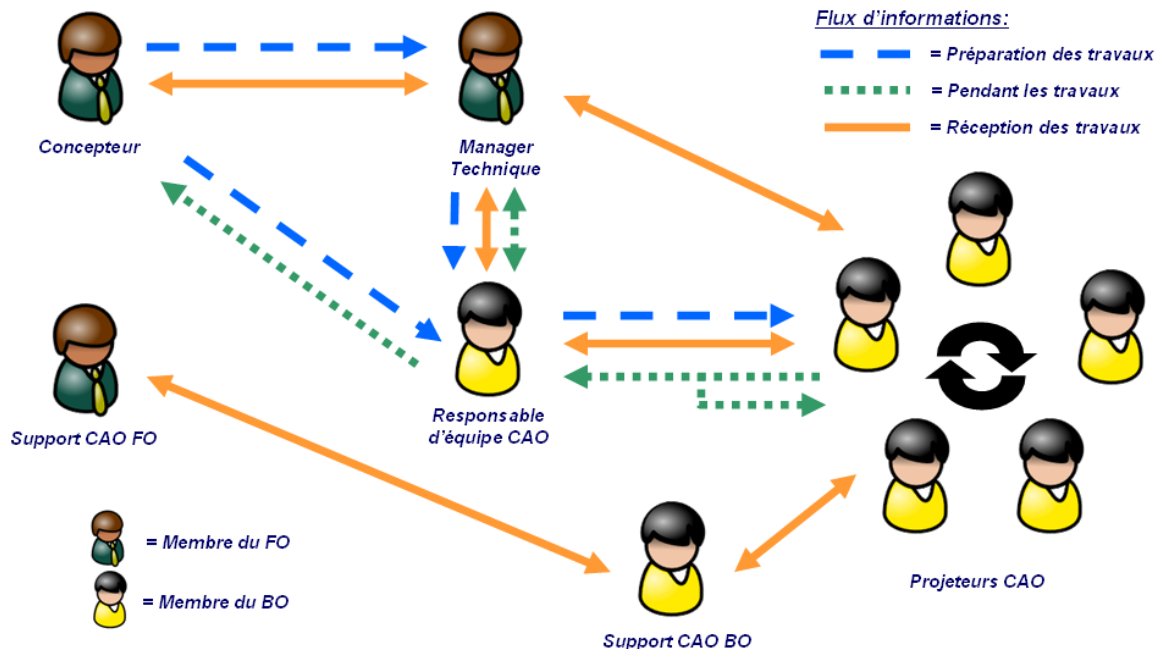


Figure 37 : Flux des informations dans le processus de conception et de développement de produits mécaniques

Le tableau 9 décrit les cinq acteurs métier différents que l'on rencontre à travers ces trois étapes ainsi que leurs rôles dans ce processus.

| Acteurs métier : | Rôles : |
|--------------------------|--|
| Concepteur | Membre du Front Office, son rôle est de définir les concepts et il est responsable de l'innovation incrémentale. Il est en charge des demandes de travaux qui doivent être réalisés par le Back Office |
| Manager technique | Membre du FO localisé physiquement au BO, il est en charge des relations entre BO et FO. Il est le support technique de l'équipe du BO. |
| Responsable d'équipe CAO | Membre du BO, il est en charge de réceptionner les demandes du concepteur. Il est le responsable de l'équipe CAO et distribue les travaux à l'équipe. |
| Projeteur CAO | Membre du Back Office, il est en charge de modéliser numériquement en CAO les concepts du concepteur. |
| Support CAO Back Office | Membre du Back Office, il est en charge de transférer les méthodologies CAO à l'équipe du Back Office. |
| Support CAO Front Office | Membre du Front Office, il est en charge de transférer les méthodologies de modélisation CAO au support CAO du BO. |

Tableau 9 : Liste exhaustive des acteurs intervenant dans le processus de conception

Chaque étape de ce processus de conception et de développement de produits est décrite précisément dans la suite de ce paragraphe.

- ***Etape 1 : Préparation des travaux***

Le concepteur réalise sa demande de travaux. Après validation de sa demande, celle-ci est réceptionnée simultanément par le manager technique et par le responsable d'équipe. Si le responsable d'équipe ne comprend pas l'intégralité de la demande ou s'il a besoin de plus de détails, il en réfère au manager technique. Il distribue ensuite les travaux à l'équipe de projeteurs CAO.

- ***Etape 2 : Réalisation des travaux***

Durant la réalisation des travaux par l'équipe de projeteurs CAO et si des informations viennent à manquer, ils en réfèrent au manager technique ou au responsable d'équipe. Si les deux acteurs n'ont pas de réponse, ces derniers contactent directement le concepteur pour obtenir les détails souhaités.

Parallèlement, si les projeteurs ont des besoins au niveau de la méthodologie CAO, ils en réfèrent au support CAO local qui s'informe auprès du support CAO du FO s'il n'a pas l'information.

- ***Etape 3 : Réception des travaux***

Lorsque les travaux sont réalisés, le projeteur CAO réalise les contrôles qualité CAO en vigueur au sein de l'organisation et, si besoin, met à jour la définition numérique. Les travaux sont ensuite vérifiés par le chef d'équipe qui informe le manager technique de la bonne réalisation de la définition. La définition est ensuite envoyée au concepteur pour réception, contrôle et validation.

Nous pouvons nous apercevoir que le processus de conception peut très vite devenir compliqué. En effet, nous ne sommes plus aujourd'hui confrontés à un seul acteur métier concepteur qui va réaliser la conception du produit dans son intégralité, mais bien à une équipe de concepteurs. De plus, la distinction réalisée entre conception et modélisation fait intervenir différents types d'acteurs métier supplémentaires au sein du processus. Du fait de la dimension internationale des équipes projet, nous pouvons aussi souligner le fait que ces différents acteurs n'ont pas toujours la même langue et culture de travail, ce qui engendre de nombreuses difficultés supplémentaires dans les phases de collaboration et de coopération. Dès lors, nous devons définir un langage commun au sein de la CAO pour que tous les acteurs métier soient à même de pouvoir exploiter les données échangées. Le paragraphe suivant décrit un modèle de décomposition orienté métier de la définition numérique de la pièce géométrique afin de pouvoir être exploitable et exploité par tous.

3.4.2 Décomposition orientée métier de la définition numérique de la pièce géométrique

Nous proposons à travers ce paragraphe une décomposition orientée métier de la définition numérique de la pièce géométrique.

Nous présentons premièrement la définition de l'architecture retenue ainsi que la décomposition d'un produit en sous-produits, squelette et pièces.

Deuxièmement, nous proposons un modèle de décomposition d'une pièce en différentes interfaces afin d'intégrer notre proposition de liaison "CdCF – Géométrie".

3.4.2.1 Définition de l'architecture système retenue

L'architecture d'un système telle que nous le concevons peut être assimilée à une architecture produit associée à une architecture pièce. Il s'agit de décrire, dans ce sous-chapitre, la grammaire de décomposition retenue. De plus, il s'agit d'intégrer dans cette architecture une approche multi-vues. En effet, un système peut être décomposé différemment selon le métier impliqué lors de sa définition. Pour cela, les points de vue fonctionnel, assemblage, simulation et fabrication sont intégrés dans cette architecture pour la rendre générique et utilisable dans toutes situations.

Dans un premier temps, nous définissons "l'architecture produit" et dans un second temps, "l'architecture pièce" est détaillée.

Une architecture produit est similaire à une nomenclature produit qui est appelée BOM (Bill Of Material) dans les systèmes d'information. Cette nomenclature représente traditionnellement l'état du produit à chaque étape de son cycle de vie.

Pour représenter une architecture produit, deux types de nomenclatures spécifiques peuvent être cités : l'EBOM (Engineering Bill Of Material) et la MBOM (Manufacturing Bill Of Material).

- **EBOM: Engineering Bill Of Material**

L'EBOM représente la configuration initiale de conception. En effet, lors du processus de conception, plusieurs types de variantes peuvent être envisagés pour un seul et même produit.

De ce fait, l'EBOM peut contenir plusieurs types de systèmes différents. De plus, elle contient les informations nécessaires au bureau des méthodes qui permettent de déterminer les différentes MBOM.

- **MBOM: Manufacturing Bill Of Material**

La MBOM représente un type de configuration de production. En effet, l'EBOM, qui contient différents types de configurations, est figée dans un de ces types et ainsi génère une MBOM. De ce fait, une seule EBOM génère plusieurs MBOM.

Afin de rester le plus générique possible, l'EBOM est retenue comme base de notre architecture produit. De ce fait, nous distinguons quatre entités distinctes pour créer cette architecture. L'entité de premier niveau est un produit, l'entité de second niveau est un sous-produit, l'entité de troisième niveau est un squelette et l'entité de quatrième niveau est une pièce.

3.4.2.2 Définition d'un produit :

Un produit peut être composé d'un ou de plusieurs sous-produits, d'une ou plusieurs pièces et d'un seul squelette. Ces différents éléments sont cinématiquement mobiles les uns par rapport aux autres. Un produit représente le niveau le plus haut d'un système. Il représente toutes les configurations du dit système en intégrant toutes les variantes de conception possibles.

3.4.2.3 Définition d'un sous-produit :

Un sous-produit est composé d'une ou plusieurs pièces ou sous-produits qui sont cinématiquement fixes les uns par rapport aux autres. Il est également composé d'un squelette unique qui permet de mettre en relation les différentes pièces d'un point de vue cinématique, fonctionnel et paramétrique.

3.4.2.4 Définition d'un squelette :

Un squelette est composé de différents éléments surfaciques (axe, plan, point, cercle, etc.) qui permettent par la suite de réaliser les différents solides (analogie à la création de muscle et de peau autour du squelette). Ainsi, le même élément d'un squelette (cercle représentant le diamètre nominal d'un arbre) va servir à construire plusieurs solides (arbre, diamètre intérieur du palier, etc.). Si bien que les modifications d'un même élément squelette impactera plusieurs solides. De la même façon, on se fonde sur les squelettes pour pouvoir réaliser les liaisons cinématiques. Ce squelette permet de ne pas "casser" les liens cinématiques lors des modifications du solide.

3.4.2.5 Définition d'une pièce :

Une pièce représente le dernier niveau de granularité de l'architecture produit. Elle est composée d'éléments solides fondés sur des éléments surfaciques. Ces éléments sont fondés sur le squelette appartenant au même sous-produit qu'il intègre. Il est ainsi piloté fonctionnellement, géométriquement et paramétriquement par ce squelette. De plus, une pièce est le résultat des opérations booléennes intégrant tous les organes fonctionnels

Dans l'exemple qui suit (figure 38), le produit "véhicule de compétition SIA" est utilisé. La liaison au sol est un "sous-produit de premier niveau" du produit et le triangle est un "sous-produit de second niveau" du produit car il est le "sous- produit de premier niveau" de la liaison au sol. La rotule est "une pièce" constitutive du produit, du "sous-produit de premier niveau" ou du "sous-produit de second niveau".



Figure 38 : Exemple de décomposition du produit "véhicule de compétition"

Un autre niveau de granularité architectural est à considérer, cette fois au niveau de la pièce.

3.4.2.6 Architecture pièce :

Chaque pièce peut être modélisée de différentes façons. En effet, les systèmes de modélisation numérique permettent aujourd'hui d'arriver à un résultat similaire en utilisant plusieurs méthodologies différentes. Par exemple pour obtenir une vis, nous pouvons utiliser un opérateur solide de révolution (avec un profil en vue de côté) ou deux opérateurs solides d'extrusion (avec un profil pour la tête de vis et un autre profil pour le corps). A nouveau, une grammaire spécifique peut être identifiée. Cette grammaire reste à la convenance du dessinateur et n'intervient pas dans cette architecture.

Afin d'obtenir une cohérence de structure, une architecture de modélisation générique est détaillée. Cette architecture permet d'être utilisée à chaque nouvelle modélisation afin de diriger le concepteur dans sa modélisation. Elle peut aussi être nommée en entreprise "modèle de départ" et être directement intégrée dans les logiciels de modélisation.

- **Définition d'une zone fonctionnelle :**

Une zone fonctionnelle représente une partie de la pièce. En effet, une pièce est composée de plusieurs zones fonctionnelles. Pour permettre d'en définir une, un principe dichotomique doit être appliqué. Pour répondre à ce besoin, différentes grammaires CAO fondées sur les métiers peuvent être appliquées. Nous pouvons citer, entre autres, les grammaires orientées fabrication (appelée conjoncture fabrication) ou orientées assemblage (appelée conjoncture assemblage) que nous avons évoquées dans le chapitre précédent.

Cependant, l'utilisation de l'une ou de l'autre de ces grammaires impose de rester mono-métier. Le principe dichotomique détaillé ci-après, par l'intermédiaire des différentes références de modélisations (surfaces fonctionnelles, axes de démoulage, etc.), peut être considéré comme multi-métier. En effet, en accord avec le paragraphe 3.2 de ce chapitre, nous avons défini la propagation des différents paramètres fonctionnels et spécifiques au sein de l'architecture. Nous sommes ainsi capables d'identifier quelle pièce est pilotée par un paramètre fonctionnel via les paramètres spécifiques et plus spécifiquement, quelle zone est impactée par ces paramètres. De ce fait, nous pouvons diviser la pièce en différentes entités, appelées zones fonctionnelles.

Les zones fonctionnelles sont identifiées au sein de la définition numérique avec le sigle "F_G" (Functional Geometry).

- **Définition d'une interface fonctionnelle :**

Une interface est représentée par un élément surfacique. Une interface peut être de deux types. Le premier type, appelé interface d'entrée, permet de créer le solide de l'organe fonctionnel en servant de référence de modélisation. Selon le principe dichotomique employé, il peut être amené à évoluer. Dans la suite de ce sous-chapitre, nous allons appeler ce type de référence "interface fonctionnelle". Le second type d'interface est appelé interface de sortie. En effet, ces interfaces sont fondées sur le solide de l'organe fonctionnel et vont servir de référence, soit à une autre pièce, soit à un autre métier. La figure 39 représente une modélisation d'un alésage fondée sur une interface d'entrée (axe). Cette même figure illustre les références de sortie de la zone fonctionnelle.

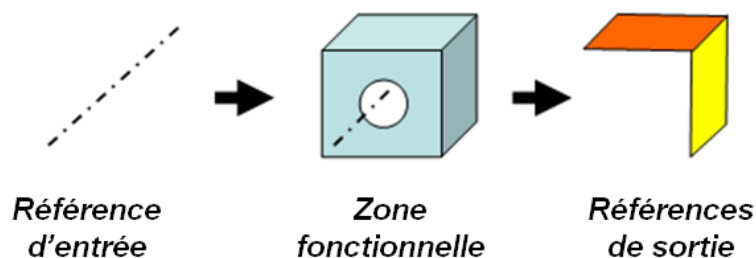


Figure 39 : Exemple simplifié de modélisation avec entrée/sortie

Les références d'entrée sont regroupées dans la définition numérique en tant qu'interfaces fonctionnelles.

- **Références composant les interfaces fonctionnelles :**

Ce sont les données d'entrée permettant la modélisation des solides formant les différents organes fonctionnels. Ces éléments peuvent provenir des éléments internes au système, tels que les éléments des différents squelettes, et peuvent provenir des éléments externes au système, tels que les contraintes de style, et plus particulièrement les différents plans de forme.

Les interfaces fonctionnelles sont identifiées au sein de la définition numérique avec le sigle "FIR" (Functional Interface References, en français Références pour l'Interface Fonctionnelle).

Afin d'illustrer cette définition, la figure 40 illustre la dichotomie de la pièce rotule en interface fonctionnelle et organe fonctionnel. Nous pouvons identifier que les éléments filaires permettant de modéliser le solide appartiennent à la pièce finale au même titre que le solide. A titre d'exemple, pour permettre de modéliser le cylindre plein, une ligne représentant l'axe de révolution de ce solide ainsi que le plan de départ sont représentés graphiquement.

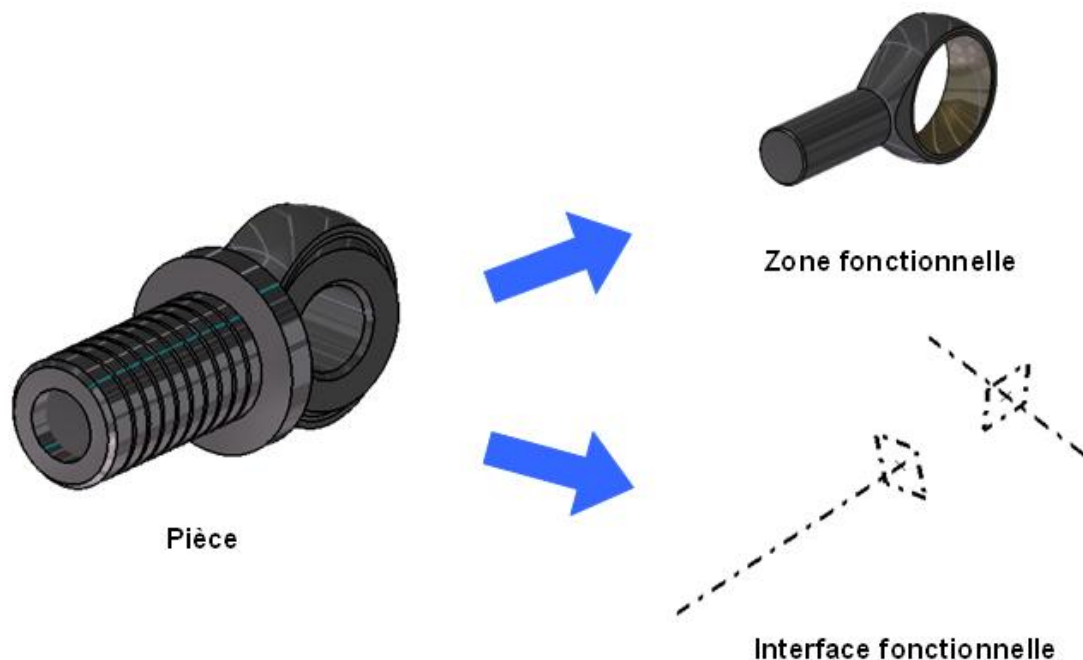


Figure 40 : Dichotomie de la pièce rotule en interface fonctionnelle et zone fonctionnelle

- **Intégration des interfaces de sortie dans la définition numérique**

Il s'agit de choisir les différentes vues à intégrer dans notre définition numérique. Ces vues vont permettre la mise en relation du produit avec le process et les simulations numériques.

Afin de rester générique, nous allons intégrer les références d'assemblage, de simulation et de fabrication, étapes du cycle de vie standard d'un produit, indépendamment de l'organisation industrielle accueillant ces travaux de recherche. En effet, un produit est conçu,

simulé (Méthode des Eléments Finis), fabriqué puis assemblé. La vue logistique n'est pas intégrée et notre hypothèse consiste à l'intégrer dans les références d'assemblage. Les vues recyclage ou régénération ne sont pas détaillées dans la définition numérique en tant que telles. Leur intégration réside dans certains paramètres de la définition des pièces tels que ceux relatifs aux matériaux (module de Young, coefficient de Poisson, Densité, etc.). De plus, ces vues sont intégrées dans les références liées à l'assemblage pour permettre le désassemblage. Le désassemblage permet d'intégrer simultanément la vue maintenance et la vue recyclage.

- **Références pour les interfaces d'assemblage :**

Ce sont les données de sortie servant de références pour les différents assemblages. En effet, ils peuvent servir de références internes au système pour permettre de créer des références aux différents squelettes, et peuvent servir de références externes au système, par exemple, pour permettre de définir le moyen d'assemblage à utiliser. Ces éléments sont les références utilisées lors de la création des gammes d'assemblage.

Les interfaces d'assemblage sont identifiées au sein de la définition numérique par le sigle "AIR" (Assembly Interface References, en français Références pour les Interfaces d'Assemblage).

- **Références pour les interfaces de simulation :**

Ce sont les données de sortie servant de références pour les simulations numériques. En effet, tous les organes de la pièce ne servent pas nécessairement à toutes les simulations. Ces références en question vont permettre de créer les références spécifiques pour chaque simulation.

Les interfaces de simulation sont identifiées au sein de la définition numérique avec le sigle "SR" (Simulation References, en français Références pour les Simulations).

- **Références pour les interfaces de fabrication :**

Ce sont les données de sortie servant de références pour les différents types de fabrication. En effet, ils peuvent servir comme références internes au système pour permettre de créer des références aux différents squelettes et peuvent servir en tant que références externes au système, par exemple, pour permettre de définir le moyen de fabrication à utiliser. Ces éléments sont les références utilisées lors de la création des gammes de fabrication.

Les interfaces de fabrication sont identifiées au sein de la définition numérique avec le sigle "PR" (Process References, en français Références pour le Process).

- **Interaction entre zones fonctionnelles et interfaces fonctionnelles**

Ainsi, lors de la modification de références fonctionnelles, les zones fonctionnelles (solides) sont directement modifiées. De ce fait, il nous est possible de formaliser ces différentes interactions en utilisant les trois équations détaillées ci-après.

$$P = \sum_{1 \leq n \leq \infty} (FO_n + FI_n)$$

$$G_f = FO + FI$$

$$P = \sum_{1 \leq n \leq \infty} G_{f_n}$$

Avec :

- P : Pièce
- FO : Zone fonctionnelle
- FI : Interface fonctionnelle
- G_f : Géométrie fonctionnelle

La première équation montre qu'une pièce est composée de zones fonctionnelles et d'interfaces fonctionnelles. Ainsi, la somme de toutes les zones fonctionnelles et de toutes les interfaces fonctionnelles de la pièce représente cette pièce. La seconde équation représente la géométrie fonctionnelle qui est la somme d'une zone fonctionnelle et d'une interface fonctionnelle.

La figure 41 représente les équations de toutes les G_f composant la rotule.

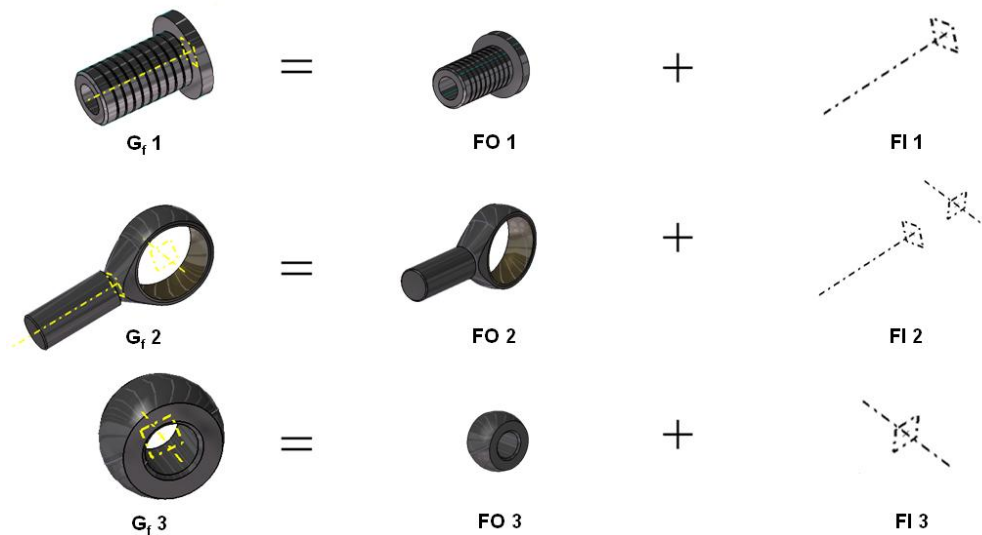


Figure 41 : G_f représentant les zones et les interfaces fonctionnelles composant la rotule

. La première G_f représente l'élément d'assemblage (arbre fileté) et est modélisée au moyen d'un axe et d'un plan. La seconde G_f désigne l'élément fixe de la rotule et est modélisée au moyen de deux axes et deux plans. La troisième, l'élément mobile de la rotule, est modélisée au moyen d'un plan et d'un axe également.

La quatrième équation, représentée graphiquement sur la figure 42 pour la rotule sur la page suivante, concatène les trois premières afin de démontrer qu'une pièce est composée de plusieurs géométries fonctionnelles. Cette équation définit qu'une pièce est la somme de tous les G_f composant une pièce. En l'occurrence pour la rotule, la somme (ou l'assemblage) de l'élément fixe, de l'arbre fileté et de l'élément mobile.

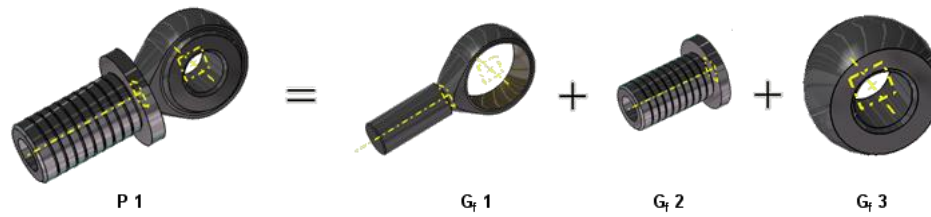
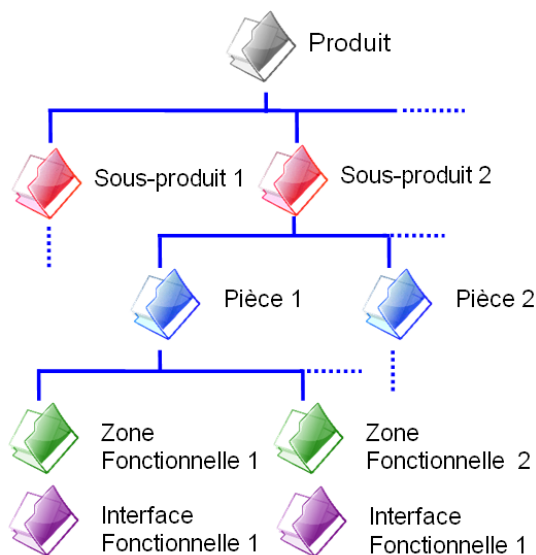


Figure 42 : Equations de la rotule

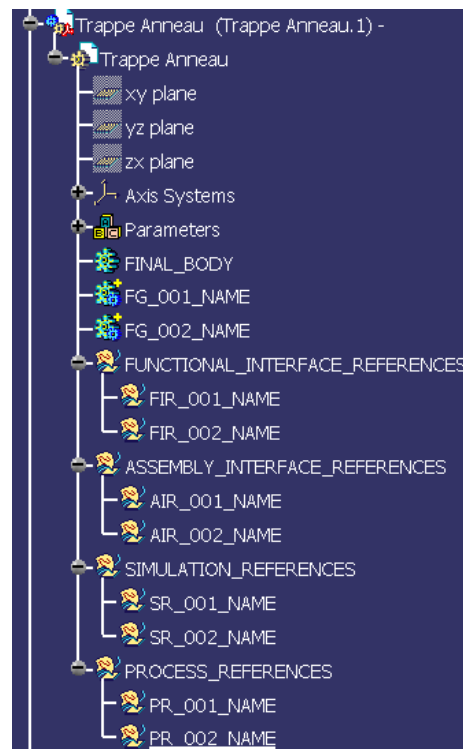
Ces équations servent de fondation aux types de connaissances qui vont être définis dans la suite de ces travaux de recherche. En effet, les géométries fonctionnelles font partie intégrante du processus de création des connaissances.

- **Présentation d'une architecture pièce générique**

Nous avons établi dans ce paragraphe une architecture de produit ainsi que la décomposition d'une pièce. A maintes reprises, nous avons évoqué que chaque élément devait être identifié afin de pouvoir le localiser. Si nous utilisons une analogie avec un système de gestion électronique de document de premier niveau, nous pouvons considérer que la définition numérique est hiérarchisée de la même manière. Ainsi, la partie gauche de la figure 43 représente une classification de type répertoire / sous-répertoire qui permet de comprendre la hiérarchie d'un produit. De plus, dans les modeleurs tridimensionnels actuels utilisant une approche CSG, la même analogie peut être faite. La partie droite de la figure 43 représente une architecture produit au sein d'un modeleur actuel.



Architecture produit théorique



Architecture produit au sein d'un modeleur

Figure 43 : Représentations théorique et pratique de l'architecture produit

Ainsi le niveau de granularité du produit (produit, sous-produit, pièce) et la granularité de la pièce (zone fonctionnelle et interface fonctionnelle) définissent l'architecture produit.

• Synthèse de l'architecture d'un produit

Ainsi, nous pouvons réaliser la synthèse de l'architecture produit au sein d'une représentation formalisée. La représentation la plus appropriée d'une architecture produit est la modélisation d'un réseau UML [Booch et al., 1999]. En effet, cette représentation offre la possibilité de modéliser les liens d'instance ainsi que les liens de dépendance. La figure 44 représente les liens de dépendance et les liens d'instance détaillés précédemment. Par exemple, nous pouvons lire sur cette représentation que le produit est composé de un ou de plusieurs sous-produits et que chaque sous-produit est composé d'une ou plusieurs pièces. De plus, on peut lire que la modification d'une interface fonctionnelle modifie la géométrie fonctionnelle qui en dépend.

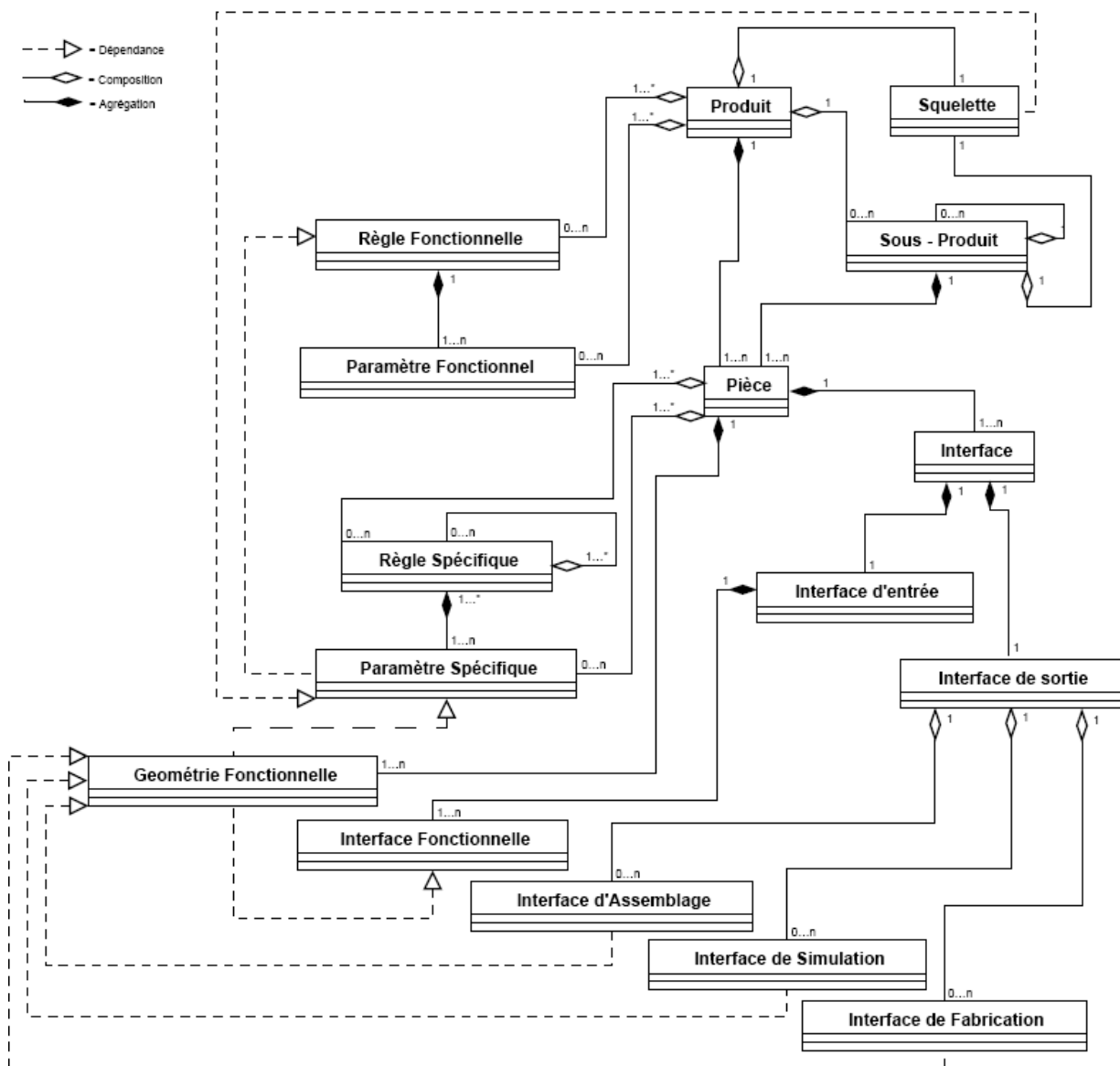


Figure 44 : Réseau sémantique de l'architecture système utilisant la représentation UML

A travers cette architecture, il s'agit aujourd'hui de mettre à disposition, lors de chaque nouvelle conception, une architecture générique au concepteur. En utilisant la méthodologie de propagation des paramètres détaillée au début de ce chapitre, il est maintenant possible de générer l'architecture complète paramétrée.

Mais avant de proposer une méthodologie de conception fondée sur cette architecture produit, nous devons définir au préalable les modèles génériques correspondant. Le paragraphe suivant définit une typologie des modèles génériques.

3.4.3 Intégration et exploitation des connaissances métier dans la définition numérique du produit

Nous avons établi, à travers ce chapitre, une méthodologie permettant de lier le Cahier des Charges Fonctionnel à la géométrie fonctionnelle dans une architecture produit spécifique. L'autre approche utilisée dans la première expérimentation décrite au début de ce chapitre nécessite d'intégrer des modèles génériques dans une des étapes du processus expérimentée. Or, nous avons identifié qu'il était possible de différencier plusieurs types de modèles génériques spécifiques à chaque besoin. Ces modèles ont soit une fonction de conception, c'est-à-dire un élément générique qui s'adapte dans son nouvel environnement, soit une fonction de contrôle. A travers la suite de ce paragraphe, nous nous proposons de développer une typologie autour de ces modèles génériques afin de savoir à quel type de modèle générique nous sommes confrontés au sein de la méthodologie que nous présentons dans la suite de ces travaux.

3.4.3.1 Définition des modèles génériques

Dans les modelleurs numériques actuels, il est possible de créer des modèles génériques. Un modèle numérique générique est autorisé à être appelé dans différents environnements et ainsi s'intègre dans différents environnements. Par intégration, on définit une auto-adaptation du modèle dans le nouvel environnement par concordance avec des règles métier et des paramètres spécifiques encapsulés dans ce dernier. En effet, le modèle générique détecte les différents paramètres du nouvel environnement pour s'auto-adapter.

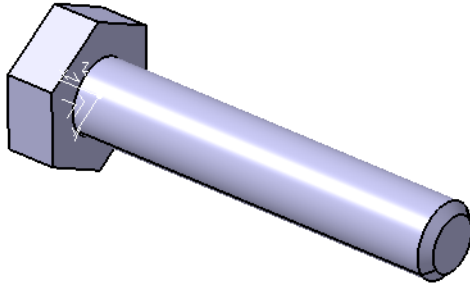
Pour réaliser cette auto-adaptation, il est nécessaire de définir au préalable quel type de fonctions peut être effectué par des éléments génériques. Trois types de fonctions sont ainsi identifiés au sein du bureau d'études de notre partenaire industriel correspondant à trois types d'utilisation différente réalisées par les concepteurs :

- Fonction standard (FS)
- Fonction adaptative (FA)
- Fonction de contrôle et de correction (F2C)

Les différents paragraphes suivants définissent ces trois types de fonctions et déterminent ainsi la complexité des dits modèles génériques.

3.4.3.2 Fonction Standard (FS)

Cette fonction permet d'intégrer dans un produit une pièce dite standard n'ayant aucun impact environnemental. Cet élément standard peut ainsi être considéré comme élément mort. Nous pouvons citer par exemple une vis du véhicule de compétition du challenge SIA et provenant d'un catalogue numérique de pièces standards. La figure 45 représente une vis. Cet élément est bien un élément standard issu d'un catalogue de composants fournisseur.



Exemple de paramètres figés :

- Tête : Hexagonale
- Type : M8
- Longueur sous tête : 50mm
- Hauteur tête : 8mm

Figure 45 : Exemple d'un modèle générique issu du véhicule de compétition du challenge SIA et ses paramètres figés remplissant une fonction standard

3.4.3.3 Fonction Adaptative (FA)

La fonction adaptative est composée de deux types d'éléments dont chacun remplit des fonctions distinctes :

- **Un Élément Adaptatif fonctionnel (Eaf) :** il permet de réaliser une fonction du produit. C'est un élément paramétré évolutif. Par exemple, la réalisation de la fonction assemblage. La solution "clip" peut être adaptée.
- **Un Élément Adaptatif environnemental (EAe) :** il permet de réaliser l'intégration d'un élément standard dans son environnement. C'est un élément paramétré évolutif. Par exemple la réalisation de la fonction assemblage par intégration d'une vis. Le trou de passage doit être créé dans l'environnement d'implantation et doit s'adapter à l'élément standard qu'est la vis.

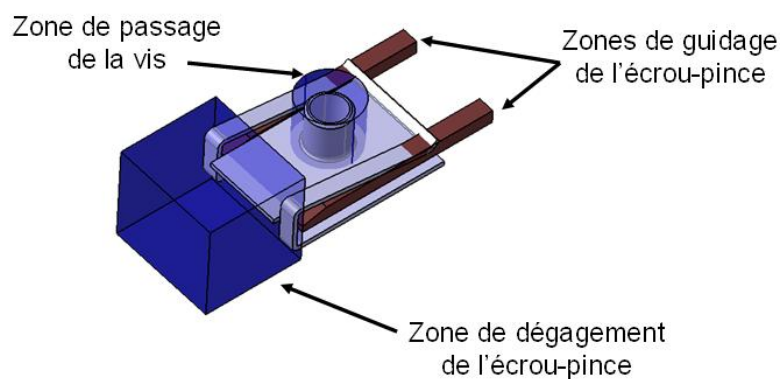


Figure 46 : Modèle générique remplissant une fonction adaptative

La figure 46 représente un élément adaptatif environnemental. Dans cet exemple, un écrou-pince, les zones translucides déterminent les zones de dégagement de l'écrou pince et les zones pleines représentent ses guides d'insertion. De ce fait, si on utilise une approche CSG décrite au chapitre 2, les zones bleues sont booléennement retirées de la pièce d'accueil et les zones brunes sont booléennement additionnées de cette même pièce.

De plus, cet élément générique contient des règles métier. En effet, nous avons déterminé que ces modèles créent de la géométrie. De ce fait, ils doivent s'adapter à leur environnement.

Prenons l'exemple précédent dans lequel le modèle crée les rails de guidage pour l'écrou pince (éléments bruns). Ces éléments qui sont en plastique et qui intègrent une pièce en plastique, doivent s'y adapter. Considérons la règle métier en plasturgie qui consiste à préconiser une épaisseur constante dans la section de la pièce. Si on implémente ce modèle sur une peau de 2mm d'épaisseur, les rails devront aussi être à 2mm. De la même façon, si la pièce est à 3mm, les rails s'adapteront à 3mm. Nous sommes ainsi en présence d'un modèle générique intégrant des règles métier.

3.4.3.4 Fonction de contrôle et de correction (F2C)

La fonction de contrôle et de correction permet de valider la bonne conformité du modèle par rapport aux différentes règles métier et de modifier le modèle au besoin.

Nous pouvons citer par exemple la visseuse utilisée pour mettre en place une vis dans un écrou pince pour vérifier qu'elle ne vient pas en interférence/collision avec l'environnement de ce dernier. La zone de révolution translucide sur la figure 47 représente la visseuse portative utilisée lors du processus d'assemblage de l'écrou-pince.

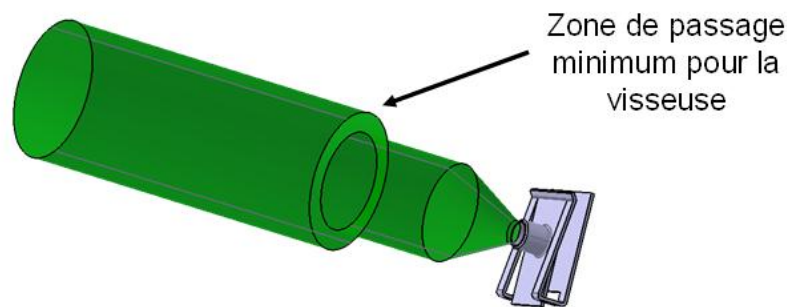


Figure 47 : Modèle générique remplissant une fonction de contrôle et de correction.

Il s'agit de déterminer quel type de fonction doit remplir le modèle générique avant de le modéliser. En effet, la méthode d'instance du modèle est différente selon les fonctions que le modèle doit remplir. De plus, les éléments génériques peuvent intégrer plusieurs fonctions.

Nous pouvons ainsi proposer les éléments qui sont utilisés pour réaliser le type de fonction désiré. Par exemple, si nous souhaitons un modèle générique permettant de réaliser simultanément les fonctions de contrôle et de correction et une fonction adaptative, nous devons modéliser un élément adaptatif environnemental.

Une fois cet élément modélisé, il s'agit de le faire vivre. En effet, par analogie avec les cycles de vie d'un produit, le modèle générique qui est aussi un produit, traverse plusieurs situations de vie. Le paragraphe suivant propose une définition de ce cycle de vie.

3.4.3.5 Définition du cycle de vie d'un élément générique :

Le cycle de vie représenté sur la figure 48 permet de définir toutes les étapes nécessaires à la réalisation, à la maintenance et à la destruction d'un modèle générique. Le formalisme choisi pour décrire ce processus est un GRAFCET. En effet, cette représentation standardisée décrit des processus séquencés [Leparc et Marcé, 1993] et est plus connue et utilisée (par exemple, face à la modélisation UML) au sein du bureau d'études de notre partenaire industriel. La norme internationale IEC:848 est utilisée afin de représenter ce cycle de vie [IEC, 1988].

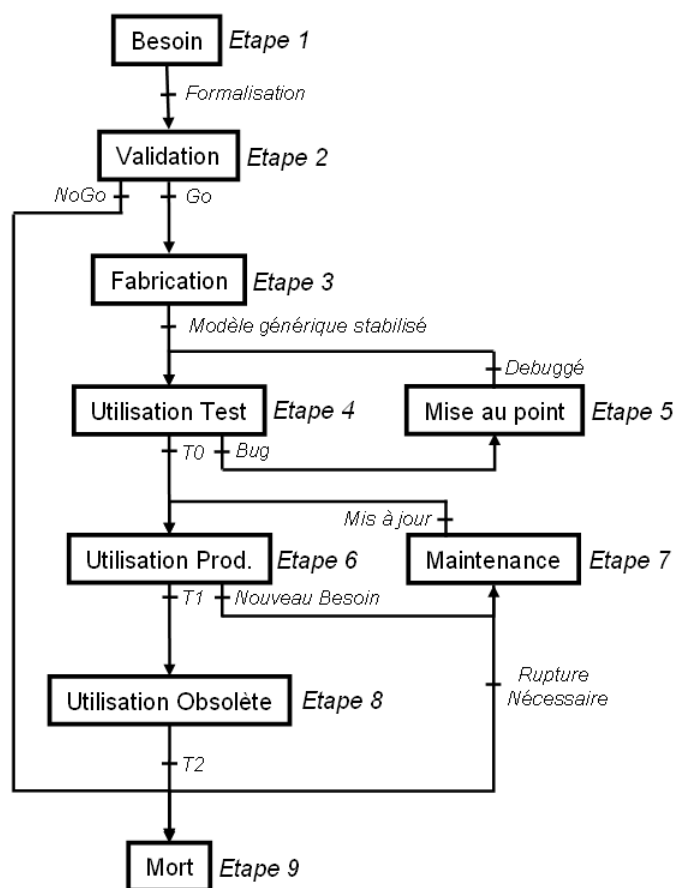


Figure 48 : Cycle de vie d'un modèle générique

Ainsi nous avons identifié neuf étapes distinctes qui décrivent l'intégralité du cycle de vie du modèle générique. Après l'identification du besoin, il s'agit de le valider. Suite à la validation, une première fabrication du modèle générique est réalisée. Après avoir testé ce modèle dans des conditions industrielles, soit il peut être utilisé directement en production, soit il nécessite une phase de mise au point. Durant l'étape de production, le modèle peut être amené à évoluer. Nous considérons alors le modèle en maintenance. Quand l'utilisation du modèle devient obsolète, il peut être considéré comme mort. Chacune de ces situations de vie est décrite dans la suite de ce paragraphe.

- **Etape 1 : Identification du besoin**

Comme tout processus de conception, un besoin initial doit être identifié. Pour ce faire, le besoin peut provenir directement des concepteurs mais cette méthode ne permet pas d'identifier tous les modèles génériques potentiels. Un second moyen permet d'identifier des niches susceptibles de contenir des modèles génériques, il s'agit de processus de retour sur expérience (Rex) détaillés dans le second chapitre de ce document. En effet, lors de ces Rex, il devient possible d'identifier les besoins.

- **Etape 2 : Validation du besoin**

Une fois le besoin identifié, il est nécessaire de le valider. Cette validation nécessite le consortium des concepteurs. Une fois réunis, ils valident ou non le développement du modèle. En effet, si le modèle ne sera pas ou peu utilisé, il n'est pas nécessaire de démarrer son développement.

- **Etape 3 : Construction du modèle générique**

Il s'agit dans cette étape de construire le dit modèle générique. Dépendant du système de modélisation en CAO, le générique doit être modélisé selon une méthodologie dédiée. En effet, par analogie à la construction d'une application informatique, le modèle doit correspondre au standard de l'entreprise en termes de construction pour pouvoir assurer des modifications rapides et permettre une maintenance.

L'autre point de cette étape consiste à déterminer les données d'entrée servant à l'instanciation du modèle générique. Etant dans un environnement CAO fortement personnalisable, les concepteurs peuvent arriver à un résultat similaire en utilisant différents moyens pour y parvenir. Il s'agit ici de déterminer quelles seront les entrées les plus génériques possible afin de satisfaire la majorité des concepteurs pour que le modèle soit utilisé.

L'exemple de la figure 49 représente les données d'entrée nécessaires à la réalisation automatique d'un alésage.

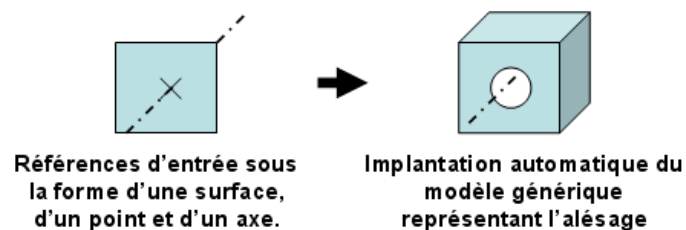


Figure 49 : Exemple simplifié de système entrée-génération d'un modèle générique

- **Etape 4 : Test du modèle générique**

Comme dans un processus de conception standard, une phase de tests doit être réalisée. Ces tests doivent être réalisés par les utilisateurs finaux, c'est-à-dire les concepteurs, afin d'identifier les différentes améliorations possibles.

- **Etape 5 : Mise au point du modèle générique**

Cette étape permet d'intégrer les retours effectués par les utilisateurs test. En relation directe avec les résultats des tests, elle doit être réalisée après chaque étape de test s'avérant négative.

- **Etape 6 : Utilisation en production du modèle générique**

Cette étape est réalisée lors de la validation de l'étape 4. Le modèle générique est diffusé sur une base de données partagée afin d'être à disposition des différents utilisateurs potentiels. L'utilisation de notre PLM ACSP [Gomes, 1999] [Gomes et Sagot, 2002] permet de mettre à disposition le modèle générique lors du processus détaillé dans le chapitre précédent.

- **Etape 7 : Maintenance du modèle générique**

Premièrement, lors de l'utilisation d'un modèle générique en production, par analogie avec un logiciel informatique, le concepteur peut être confronté à une erreur. Il s'agit alors de corriger le modèle afin de le stabiliser.

Deuxièmement, il se peut que les règles de conception contenues dans le modèle générique doivent subir des évolutions. Il s'agit dans ce cas de modifier le générique en conséquence pour permettre d'intégrer les nouvelles règles métier dans les nouveaux développements.

- **Etape 8 : Utilisation obsolète du modèle générique**

La fin de vie d'un modèle générique correspond à sa non utilisation. Il s'agit dans cette étape d'identifier pourquoi le modèle n'est plus utilisé. Deux possibilités doivent être prises en compte. Soit le modèle est dépassé et alors il devient obsolète, il peut alors passer dans l'étape suivante. Soit le modèle est instable, il est alors directement dirigé vers l'étape de maintenance.

Pour valider le taux d'utilisation du modèle générique, il faut lui associer un indicateur d'utilisation. Par exemple, lors de l'utilisation d'un modèle générique dans un modelleur géométrique, il est possible d'implémenter un fichier de suivi.

Il est aussi intéressant d'utiliser cet indicateur pour connaître à quel moment de quel projet il a été utilisé. En effet, si on connaît par avance le moment d'utilisation, il devient alors possible de le proposer directement lors du démarrage de la phase.

- **Etape 9 : Mort du modèle générique**

Le modèle n'est plus à disposition des concepteurs et est archivé. En effet, il se peut que le besoin soit à nouveau identifié, auquel cas, le générique peut être remis à disposition dans l'étape 6.

Nous avons ainsi déterminé à travers ce paragraphe une architecture produit ainsi qu'une typologie des modèles génériques pouvant y être intégrée. Il s'agit maintenant de pouvoir utiliser ces différents modèles dans un cadre industriel. La section suivante propose

une approche d'intégration de ces différents modèles au sein d'un système d'information commun afin de pouvoir proposer une méthodologie.

3.5 Système d'information et méthodologie proposés

Nous avons déterminé tout au long de ce chapitre différents modèles et méthodes à appliquer au sein d'un processus de conception. Cependant ces différents modèles font appel à différents outils. Nous pouvons par exemple citer les outils d'analyse fonctionnelle interne et externe afin de déterminer les différents paramètres. Chacun de ces modèles fait alors appel à un outil informatique leur permettant d'être exploités au sein des bureaux d'études. Nous pouvons citer les documents MS Excel qui permettent de capitaliser les différentes règles métier de la société. De plus, ces outils n'étant pas maîtrisés dans leur intégralité par les concepteurs, l'outil de modélisation tridimensionnelle étant le principal utilisé au sein d'un bureau d'études industriel, nous pouvons être confrontés à un manque de compétences.

Pour remédier à ce manque de compétences, nous proposons alors d'utiliser un seul et même outil qui permette d'appliquer le modèle proposé dans la suite de ce paragraphe. Afin de ne pas démultiplier les outils informatiques utilisés en bureau d'études, nous proposons d'intégrer nos besoins au sein d'un outil déjà utilisé dans ces services, une plateforme de Product LifeCycle Management permettant ainsi de rendre accessible les informations également aux autres acteurs du projet ne possédant pas de CAO. En effet, en intégrant l'approche de liaison CdCf – Géométrie au sein de cette plate-forme, nous garantissons le bon transfert des échanges d'informations entre les différents acteurs. De plus, la génération automatique de l'architecture CAO paramétrée et réglée au sein de ce même outil garantit que le modèle générique sera conforme au besoin initial ainsi qu'aux règles métier de l'organisation.

De ce fait, nous proposons dans le modèle méthodologique, décrit dans la suite de ce paragraphe, d'utiliser une plateforme de PLM au centre du processus de conception.

De plus, en raison des limites du modèle méthodologique appliqué lors de la première expérimentation, nous proposons certaines évolutions. Ces différentes évolutions sont ainsi traitées et présentées tout au long de ce chapitre. Il s'agit d'intégrer le principe de couplage CdCF – Paramètres géométrique ainsi que le modèle d'architecture produit proposé. De plus, ce modèle est présenté avec une plateforme de PLM permettant de faire le lien entre les différents acteurs métier intervenant dans le modèle présenté.

De ce fait, pour permettre d'atteindre nos objectifs, notre méthodologie, fondée sur le modèle de l'expérimentation initiale, est constituée de cinq étapes. La figure 50 représente ce nouveau modèle. Nous pouvons ainsi remarquer l'intégration d'un nouvel acteur métier : l'expert CAO. Cette nécessité d'intégration d'un nouveau type de métier a déjà été évoquée dans le paragraphe 3.4 de ce chapitre.

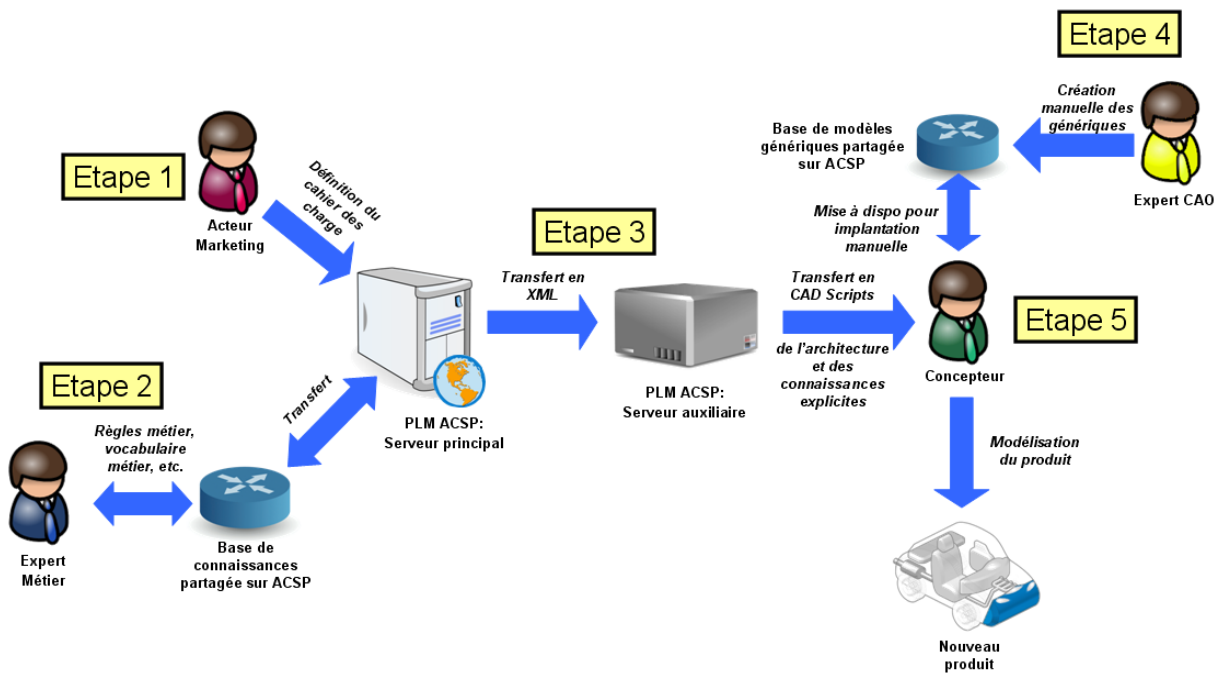


Figure 50 : Evolution du modèle méthodologique

La première étape est réalisée par un acteur marketing ou chef de projet. L'acteur métier doit rentrer les différents éléments du cahier des charges dans le système de PLM pour définir les paramètres fonctionnels. L'Interface Homme Machine (IHM) du PLM intègre les outils d'analyse fonctionnelle interne et externe afin qu'il puisse directement utiliser cette approche.

La seconde étape est prise en charge par un expert métier. Cette étape peut être assurée avant le début d'un nouveau projet. En effet, il doit définir et implémenter dans le PLM toutes les règles expertes de conception, les termes métier, etc. L'IHM du PLM intègre les différents champs de saisie afin de pouvoir les identifier dans la même plateforme que le besoin initial.

La troisième étape, réalisée par un processus interne du PLM, consiste à mettre en relation les bases de données du PLM (besoins et informations métier) et le système CAO. Cette étape est assurée par un système de conversion de données se fondant sur le prototype établi lors de l'expérimentation initiale. De plus, nous pouvons distinguer sur la figure 50 que nous sommes en présence d'un serveur principal et d'un serveur secondaire. En effet, le système de CAO nécessitant des capacités machines importantes, un serveur spécifique lui est dédié afin de ne pas perturber les tâches simultanées du serveur principal.

La quatrième étape, effectuée par l'expert CAO, consiste à construire des modèles CAO génériques et à les mettre à disposition dans la base de données partagée. Cette base est multi-projets et cette étape est indépendante du processus de conception.

La cinquième et dernière étape est réalisée par le concepteur. Il modélise le modèle géométrique final en récupérant les différentes informations et données issues du PLM, en l'occurrence l'architecture produit paramétrée et réglée ainsi que les modèles génériques répondant à son besoin.

3.6 Discussion

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons donc engagé une première expérimentation conduite dans un environnement académique. L'objectif de cette dernière est d'analyser les interactions entre les modèles proposés et détaillés dans le chapitre précédent afin de mettre à l'épreuve les hypothèses établies.

Notre première hypothèse, qui souligne qu'il est possible de réduire les temps dédiés à la reconception afin d'accélérer le processus de conception et de développement de produit, est validée sur la base des résultats obtenus. En effet, il résulte de cette expérimentation, en comparant les temps établis lors de cette conception, que notre nouvelle méthodologie permet un gain de 40% par rapport à une conception conventionnelle, ainsi que nous avons déjà pu l'écrire [Bluntzer et al., 2006].

Cette première expérimentation permet aussi de valider les troisième et quatrième hypothèses, à savoir que le lien entre besoin fonctionnel et géométrie peut être établi au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels permettant ainsi une plus grande réactivité dans les phases de reconception de produits et que la capitalisation et l'exploitation des informations métier par les concepteurs peuvent être réalisées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels. En effet, en réutilisant les modèles géométriques modélisés lors de la première conception, le concepteur est à même de pouvoir les exploiter lors de la seconde conception. Notons qu'en liant le besoin fonctionnel et la géométrie au sein du modeleur géométrique tridimensionnel, la modification d'un paramètre fonctionnel impacte directement la géométrie et ainsi génère la seconde conception quasi instantanément. Ce résultat confirme les travaux de Gomes [Gomes et al., 2006] [Bluntzer et al., 2008], qui ont également montré qu'il était possible de générer des solutions de conception optimisées. Nous pouvons par exemple citer l'optimisation d'une liaison au sol d'un véhicule de compétition, qui, pilotée par des paramètres fonctionnels, a permis de minimiser la masse du système en fonction des efforts et chargements admissibles [Gomes et al., 2009].

En validant ces hypothèses, une nouvelle hypothèse de travail a été proposée. En effet, si le concepteur exploite des solutions validées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels sous forme de modèles génériques, cette exploitation peut lui permettre d'augmenter sa réactivité comme force de proposition dans le processus de conception de produits et alors améliorer la démarche d'innovation en accord avec [Gomes et al., 2006].

Toutefois, à ce stade des travaux, il semble tout de même que cette première méthodologie révèle quelques limites, notamment dans le formalisme utilisé. En effet, d'un côté le formalisme appliqué pour pouvoir lier le cahier de charges fonctionnel et la géométrie est trop flexible (fichiers de type MS Excel) et de l'autre, l'architecture produit n'est pas formalisée (possibilité d'avoir une architecture par architecte produit, soit une multitude d'architectures différentes). Rappelons que si les différents acteurs sont confrontés à différents formalismes pour un même type d'information, il se peut que l'acteur ne voit pas toutes les données, ce qui engendre des risques importants d'erreur.

Une autre limite a été mise en évidence qui est l'utilisation de différents systèmes informatiques. Dans cette expérimentation, chaque acteur en utilise un différent. Pour contrecarrer ce problème et ne pas perdre d'informations, il s'agit de fédérer tous les acteurs autour d'un même système informatique. En accord avec Saaksvuori et Immonen [2004], ce système informatique intégrant tous les outils utilisés par les différents acteurs pourrait être une plateforme de type Product Lifecycle Management (PLM) afin de réduire la scission existante entre les différents domaines de conception.

Enfin, au cours de cette expérimentation, une dernière limite a pu encore être identifiée. En effet, dans le modèle méthodologique proposé, l'acteur concepteur réalise à la fois le modèle numérique final et le modèle générique. Or, il s'avère que pour concevoir un modèle générique, des compétences particulières, notamment de type informatique, sont nécessaires voire indispensables. Ainsi, il s'avère nécessaire d'intégrer un nouvel acteur métier dans le processus. Ce nouvel acteur, appelé "Expert CAO", agit en parallèle du concepteur, et permet à ce dernier de se concentrer uniquement sur la conception du produit. Cette approche confirme celle décrite par Boutigny [2004] qui établit, à travers sa définition de la coopération, que la tâche à satisfaire (dans notre cas, la conception de produits), dans une organisation collective du travail, est fragmentée en sous-tâches (dans notre cas, les cinq étapes de notre processus de conception), chacune de ces sous-tâches étant affectée à un acteur (dans notre cas, les acteurs métier de notre processus de conception).

Sur la base de ces limites, il est devenu nécessaire de faire évoluer notre premier modèle méthodologique autour d'un seul et même outil, la plateforme de PLM évoquée, permettant ainsi de ne pas égarer ou perdre les différentes informations échangées entre les différents acteurs. Par ailleurs, afin de pouvoir fédérer tous ces outils au sein d'une même plateforme de PLM, il s'agit de définir les fondamentaux de l'approche proposée.

Il s'agit donc de proposer un modèle permettant de lier le cahier des charges fonctionnel à la géométrie. Après avoir établi une typologie des paramètres et des règles, il nous est possible d'établir une propagation des paramètres spécifiques via les règles spécifiques au sein d'une architecture produit. Cette architecture produit étant intimement liée à cette propagation, il s'agit de définir une méthodologie de décomposition. Cette proposition de structuration permet d'être toujours confrontée au même type d'architecture, indépendamment de l'architecte produit qui l'a établie. De la même façon, afin d'être confronté à la même architecture pièce, il s'agit de définir sa méthodologie de décomposition. La décomposition d'une pièce, entre autres, en géométries fonctionnelles et interfaces fonctionnelles nous permet de pouvoir les identifier, les extraire et les réutiliser par la suite indépendamment du concepteur qui les a modélisées.

Il s'agit ainsi de définir des principes d'extraction et de validation des connaissances métier. Afin de pouvoir les exploiter au sein d'une architecture produit, ces connaissances doivent être validées par l'ensemble des experts métier de l'organisation. Ce point a déjà été traité par Gardan et al. [1995] qui stipule que les connaissances doivent être validées par

l'ensemble des experts métier dans leurs phases d'acquisition. Cette validation est établie alors que les connaissances métier sont transversales et qu'elles peuvent être exploitées dans le processus de conception.

Sur la base de nos travaux [Bluntzer et al., 2006], ces connaissances peuvent intégrer des modèles génériques. Dès lors, on peut porter le cycle de vie des connaissances proposé par Millard et al. [2006], au cycle de vie du modèle générique afin d'établir son processus. Le cycle de vie intègre alors la réalisation, la maintenance et la destruction d'un modèle générique.

A partir de ces nouvelles méthodes, il nous est alors possible de compléter le processus de conception initial vers un second modèle qui fédère autour d'une seule et même plateforme de type PLM tous les acteurs métier.

Sur cette nouvelle base, une nouvelle expérimentation au sein d'une société industrielle a été déployée afin de valider industriellement ce nouveau processus. Le chapitre suivant décrit les différents outils utilisés, notamment la plateforme de PLM, qui permet d'initialiser la première expérimentation industrielle. Cette expérimentation mettra ainsi à l'épreuve notre seconde hypothèse de recherche qui stipule que le processus de conception étant collaboratif, il peut être fédéré autour d'un seul et même outil permettant de lier les différents acteurs impliqués.

IV

CHAPITRE 4 : MISE A L'EPREUVE DE L'OUTIL DE RECHERCHE DEVELOPPE EN MILIEU INDUSTRIEL

Nous avons établi dans les chapitres précédents à travers l'état de l'art, une première expérimentation et ses évolutions, un modèle méthodologique candidat à une première expérimentation industrielle.

En effet, le modèle présenté dans le dernier paragraphe du chapitre précédent propose un processus de conception fondé sur les informations métier et permettant de mettre en relation le CdCF et le modèle numérique. De plus, ce modèle s'articule autour d'une plateforme de PLM. Le premier paragraphe de ce chapitre décrit comment il est possible d'intégrer les outils décrits dans le chapitre précédent dans une vision collaborative. Pour ce faire, nous présentons la plateforme de PLM permettant cette intégration. Il s'agit d'un outil expérimental d'ingénierie collaborative appelé ACSP. Nous présentons ensuite l'outil de modélisation tridimensionnel majoritairement utilisé par les industriels du secteur automobile et donc choisi pour mener ces travaux de recherche. Nous présentons alors la mise en place du processus de migration des données vers le modèleur CAO au sein de la plateforme.

Après avoir présenté les outils utilisés dans ces travaux de recherche, nous avons initié une première expérimentation industrielle. Dans le cadre du partenariat avec le bureau d'études ETD, l'approche expérimentale a été déployée dans un premier temps sur la conception d'une pièce d'interface technique automobile, en l'occurrence un feu antibrouillard. Dans un second temps, la même méthodologie a été appliquée à un autre type d'interface technique qu'est un support capteur.

Les résultats de cette première expérimentation industrielle nous amènent à les discuter et à être source de propositions sur la base des limites constatées. De plus, des statistiques d'utilisation d'une partie du modèle méthodologique nous permettent d'analyser son utilisation sur une période de deux ans.

Les différentes limites rencontrées nous amènent à faire évoluer notre modèle méthodologique. Il s'agit de l'orienter vers une approche de raisonnement à partir de cas qui semble répondre plus précisément aux besoins du processus de conception rencontrés. En effet, un des objectifs étant l'accélération du processus de conception routinier, fonder les nouvelles conceptions sur des anciens cas peut permettre d'y répondre. Ce nouveau modèle impose de développer un modèle de connaissances pour permettre d'exposer notre méthode de recherche de cas, de réutilisation des cas, de révision ainsi que de capitalisation.

4.1 Intégration des outils dans une vision collaborative

Nous présentons dans ce paragraphe les différents outils utilisés dans ces travaux de recherche. Premièrement, nous présentons la plateforme de PLM ACSP. Deuxièmement, nous exposons le modèleur tridimensionnel choisi et troisièmement l'intégration du processus de migration entre ces deux outils.

4.1.1 Outil expérimental d'ingénierie collaborative : ACSP

Afin d'assurer une meilleure intégration des métiers en conception, nous avons proposé un modèle de données qualifié de "Multi-Domaines et Multi-Vues" au carrefour du "modèle produit multi-vues" [Tichkiewitch, 1996] et de "l'approche axiomatique" [Suh, 1990] [Suh, 1998].

Ainsi, comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, notre modèle considère la conception comme un réseau de domaines de conception en interaction tels que : le domaine du projet, le domaine du produit, le domaine du process, le domaine de l'usage, etc. Chacun de ces domaines de conception, en tant que système à part entière, peut alors être observé selon au moins trois points de vue (ou aspects) eux-mêmes en interaction : aspect structurel, aspect fonctionnel, aspect dynamique, voire même d'autres points de vue spécifiques au domaine du produit ou du process, tels que le point de vue géométrique (caractéristiques et positionnement spatial du système) ou encore le point de vue physique (lois de comportement du système).

Sur cette base, nous avons pu construire le modèle UML servant d'architecture pour la base de données associée à notre plateforme PLM Atelier Coopératif de Suivi de Projet (ACSP). En partant des différents domaines Projet-Produit-Process-Usage, il est possible de présenter, domaine par domaine les différentes données que nous avons considérées pour établir notre modèle.

La figure 52 ci-après présente un extrait du graphe UML détaillant partiellement le domaine Projet du modèle MD-MV proposé. Ce graphe UML retranscrit le découpage du domaine Projet en différents aspects fonctionnel, structurel et dynamique, permettant de cartographier les différentes données du domaine Projet, telles que, par exemple : les phases, les tâches, les ressources humaines, les dépenses réalisées, les rôles, etc. De la même manière, la figure 53 traduit les extraits du graphe UML du domaine Produit.

Fondé sur des technologies Internet, l'environnement Atelier Coopératif de Suivi de Projet (ACSP), que nous avons développé dès 1996 et expérimenté à l'UTBM depuis plus de 10 ans, répond à la problématique du PLM, en appliquant le méta-modèle de données MD-MV, détaillé dans les différents extraits du graphe UML présentés précédemment.

En complément des fonctionnalités traditionnelles de gestion des accès et des rôles, de Gestion Electronique de Documents (GED), de gestion du processus d'ingénierie, de capitalisation des données et informations dans un coffre-fort sécurisé, cet environnement

logiciel de conception coopérative distribuée centralise et permet aux concepteurs de coordonner l'ensemble des données relatives au cycle de vie du produit à travers :

- la conception du "Projet" (tâches, ressources, financements, méthodes, etc.),
- la conception du "Produit" (structure, situations de vie, fonctions, coûts, etc.),
- la conception du "Process" (ressources, fonctions, gammes, etc.),
- la conception de "l'Usage" (populations, activités, etc.).

Positionné dans un contexte d'ingénierie concourante, l'objectif d'un tel outil est de supporter un processus de conception permettant la collaboration entre les différents acteurs de la conception : hommes de marketing, ergonomes, ingénieurs et techniciens études, ingénieurs et techniciens méthodes et production, décideurs, utilisateurs, opérateurs de fabrication, etc.

La spécificité de l'outil de PLM ACSP est qu'il applique notre modèle de données qualifié de "Multi-Domains et Multi-Vues".

D'un point de vue plus technique, l'environnement de PLM ACSP, dédié à l'échange et au partage de données de conception, fonctionne en milieu hétérogène, en mode synchrone et asynchrone. La figure 51 traduit l'architecture logicielle "3 tiers" retenue pour le PLM ACSP ainsi que son interaction avec différentes applications métier, telles que l'application MANERCOS [Gomes et al, 1999], une application concernant un mannequin numérique 3D, pour une conception ergonomique, issue de travaux de recherche de notre laboratoire, via les formats XML et VRML.

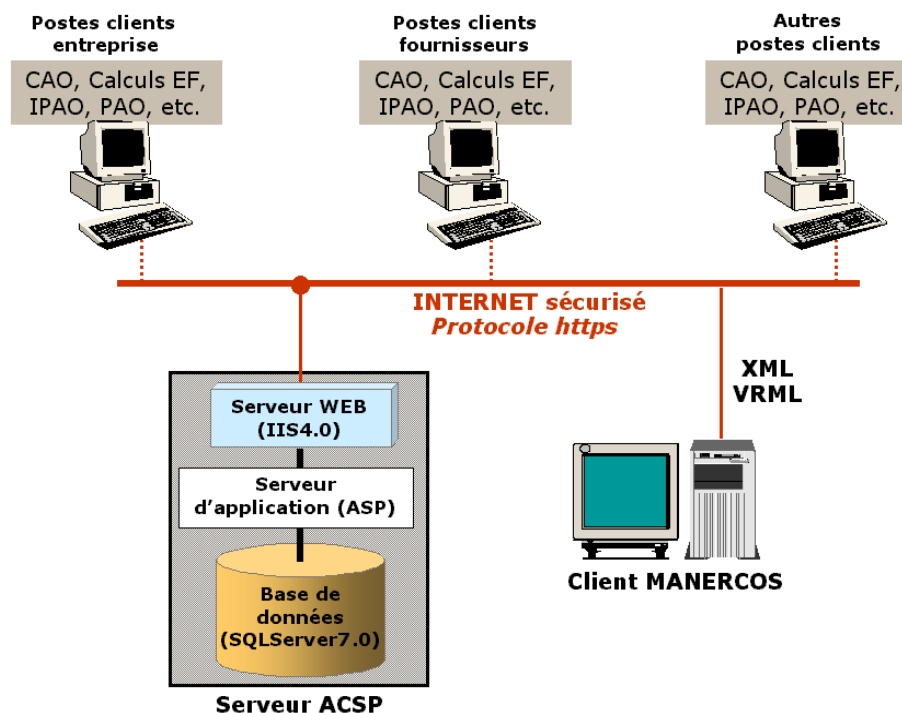


Figure 51 : Architecture client serveur via Internet mise en œuvre pour l'ACSP d'après Gomes [2008]

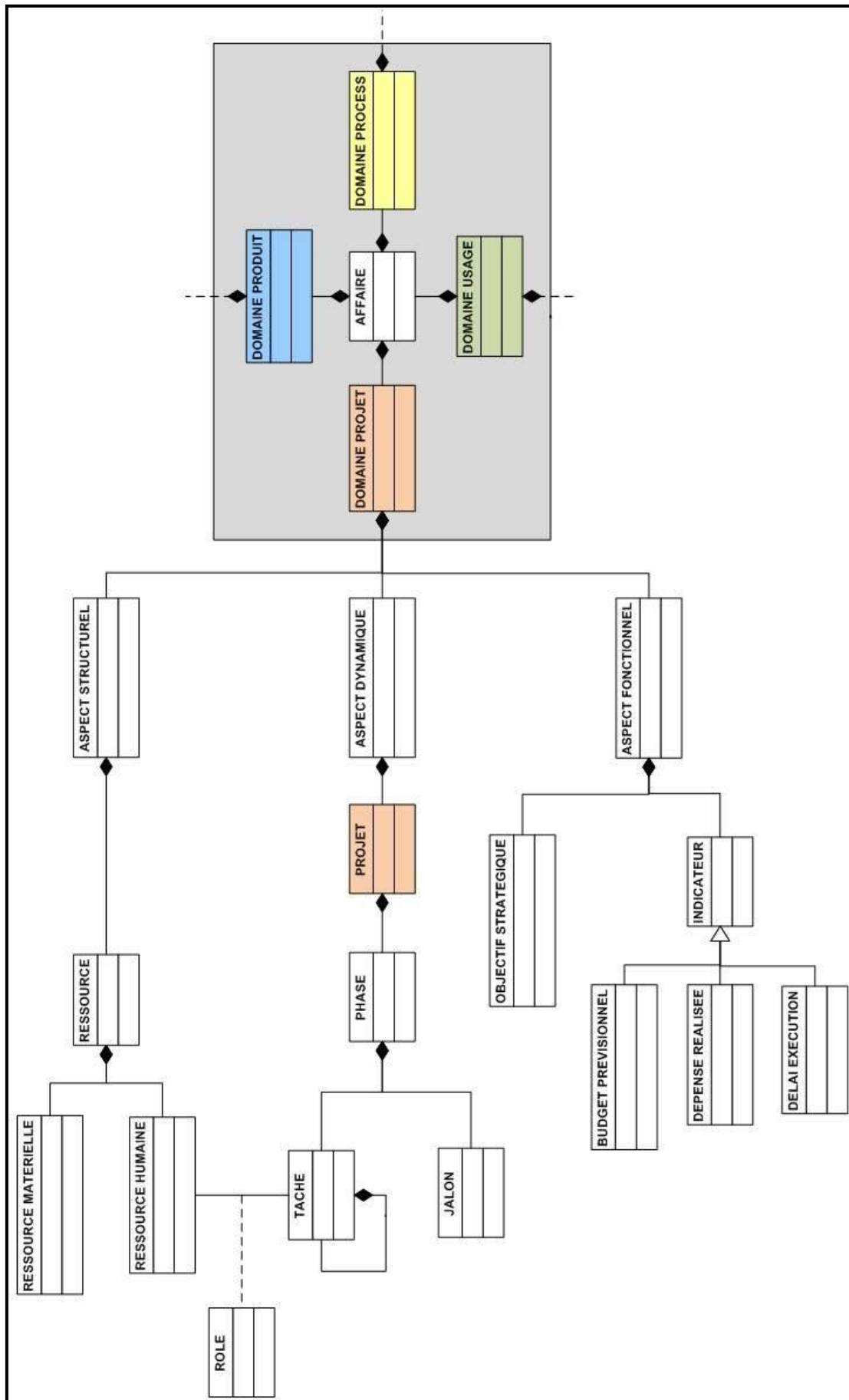


Figure 52 : Extrait du graphe UML relatif au "domaine du projet" d'après GOMES [2008]

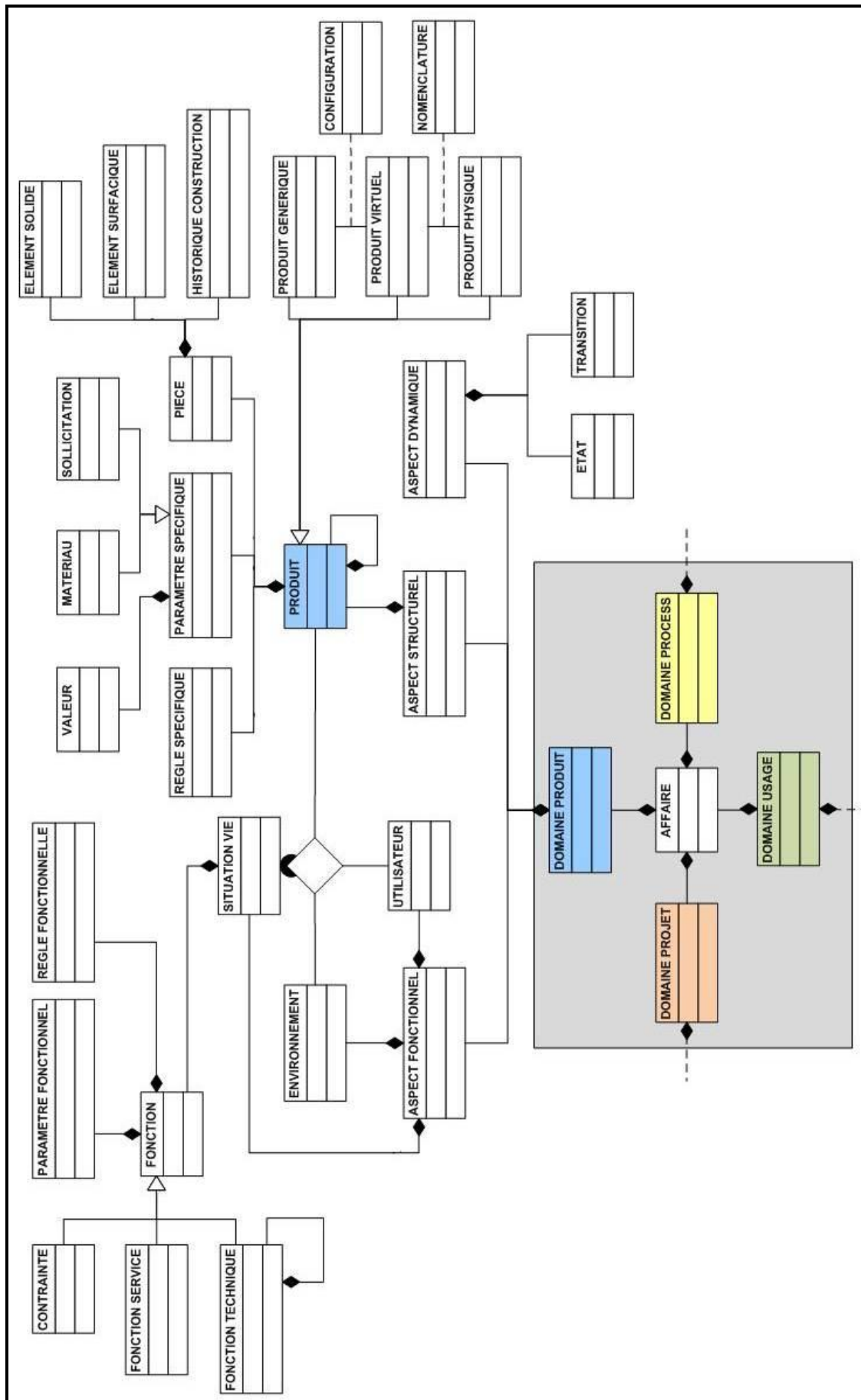


Figure 53 : Extrait du graphe UML relatif au "domaine du produit" d'après GOMES [2008]

L'ACSP présente une architecture "3 tiers" ou "3 niveaux" (niveau présentation – serveur Web, niveau métier – serveur d'application et niveau données – Système de Gestion de Base de Données) de type Client-Serveur léger utilisant des technologies Internet classiques (HTML-Hyper Text Markup Language, ASP – Active Server Pages et Javascript sous protocole HTTPS).

Le niveau "données" fait appel à une Base de Données Relationnelle qui exploite des données et des documents multimédias liés au Projet, au Produit, aux Process et aux Usages associés. Le déploiement du modèle de données systémique "multi-domaines et multi-vues" présenté précédemment (voir figure 52 et figure 53), sous la forme d'un graphe UML, nécessite la mise en œuvre d'une cinquantaine de tables au sein du Système de Gestion de Base de Données de l'ACSP, correspondant aux différents domaines, aux différents points de vue et aux différentes interactions entre eux.

La figure 54 ci-après traduit l'intégration du point de vue projet au sein du PLM ACSP en exposant un planning projet. Nous pouvons voir la représentation du planning sous la forme d'un diagramme de GANT utilisant une représentation de l'état d'avancement des tâches (tâches également représentées sous forme d'arbre à gauche de l'illustration) par couleurs. Ainsi pour chaque tâches, l'utilisateur est capable d'identifier rapidement si la tâche est en cours, à venir, en retard ou achevée. De plus, ce diagramme est interactif pour l'utilisateur. En effet, s'il clique sur une des tâches, il peut alors voir les acteurs qui y sont rattachés, les ressources nécessaires ainsi que les documents qui y sont liés. Cette figure illustre également l'ergonomie du PLM ACSP. L'utilisateur, en cliquant sur les différents types de conception (en-haut à gauche) peut directement naviguer entre les différents domaines proposer par le PLM ACSP tels que les domaines projet, produit, process et usage. Nous pouvons aussi identifier sur cette figure une barre d'icônes (centrée en-haut) permettant à l'utilisateur de paramétrer le PLM ACSP selon ses propres besoins tels que la gestion de ses accès ou encore le paramétrage de la langue de l'interface.

La figure 55 illustre la représentation tridimensionnelle d'un produit dans le domaine conception de produits. Nous pouvons voir à gauche dans cette illustration un arbre de composants. Cet arbre est l'architecture du produit établi au sein du PLM ACSP. Pour chaque pièce, sous-produit ou produit, il est dès lors possible de le visualiser, en cliquant dans un objet de l'arbre, de la visualiser sous forme de fichier de visualisation tridimensionnelle. En effet, si l'utilisateur joint un fichier tridimensionnel natif d'un modeleur CAO, le PLM ACSP en crée, à la volée, le fichier de visualisation. Dans cette figure, le concepteur a joint le fichier CAO du véhicule de compétition et le système PLM ACSP l'a transféré en fichier de visualisation. Dans cet exemple, le fichier natif est un fichier CATIA v5 et la représentation proposée est un fichier 3DXML.

Lors de nos différentes expériences, nous avons pu constater que l'un des principaux obstacles à la mise en place d'une véritable chaîne XAO intégrant l'ensemble des métiers

intervenant dans le cycle de vie du produit, concerne l'interopérabilité entre les différentes données de conception générées par des applications métier hétérogènes. L'autre aspect concerne la gestion de documents numériques qui est source de nombreuses difficultés : compatibilité des différentes versions d'un même logiciel, formats neutres d'échange en CAO, cycles de vie des documents, etc.

L'originalité de l'ACSP par rapport aux autres environnements de PLM existants dans le domaine de la conception, est de mettre à la disposition du groupe projet différentes données inhérentes à la fonction d'usage du produit et de son process. Outre sa vocation de partage et d'échange de données de conception, l'ACSP a aussi pour objectif de générer des mémoires projet ainsi que des documents de synthèse servant à la capitalisation des données du projet : Cahier des Charges Fonctionnel, Cahier des Charges Concepteur, Dossier Produit, Dossier de Fabrication, etc. Nous exposerons ses fonctionnalités dans la suite de ce paragraphe à la section 4.1.3.

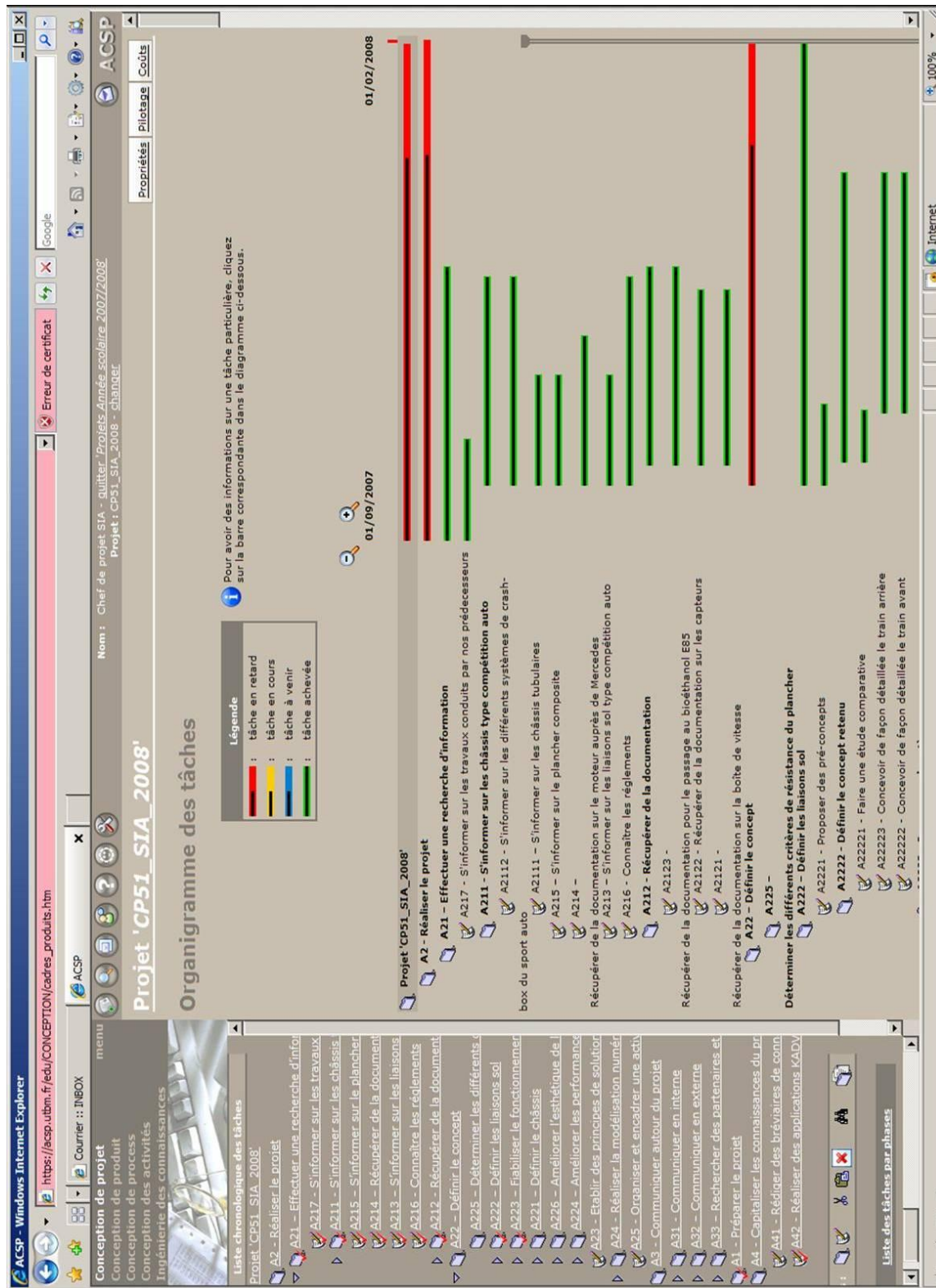


Figure 54 : Interface associée au domaine de "Conception du projet" du véhicule de compétition SIA d'après Gomes [2008]

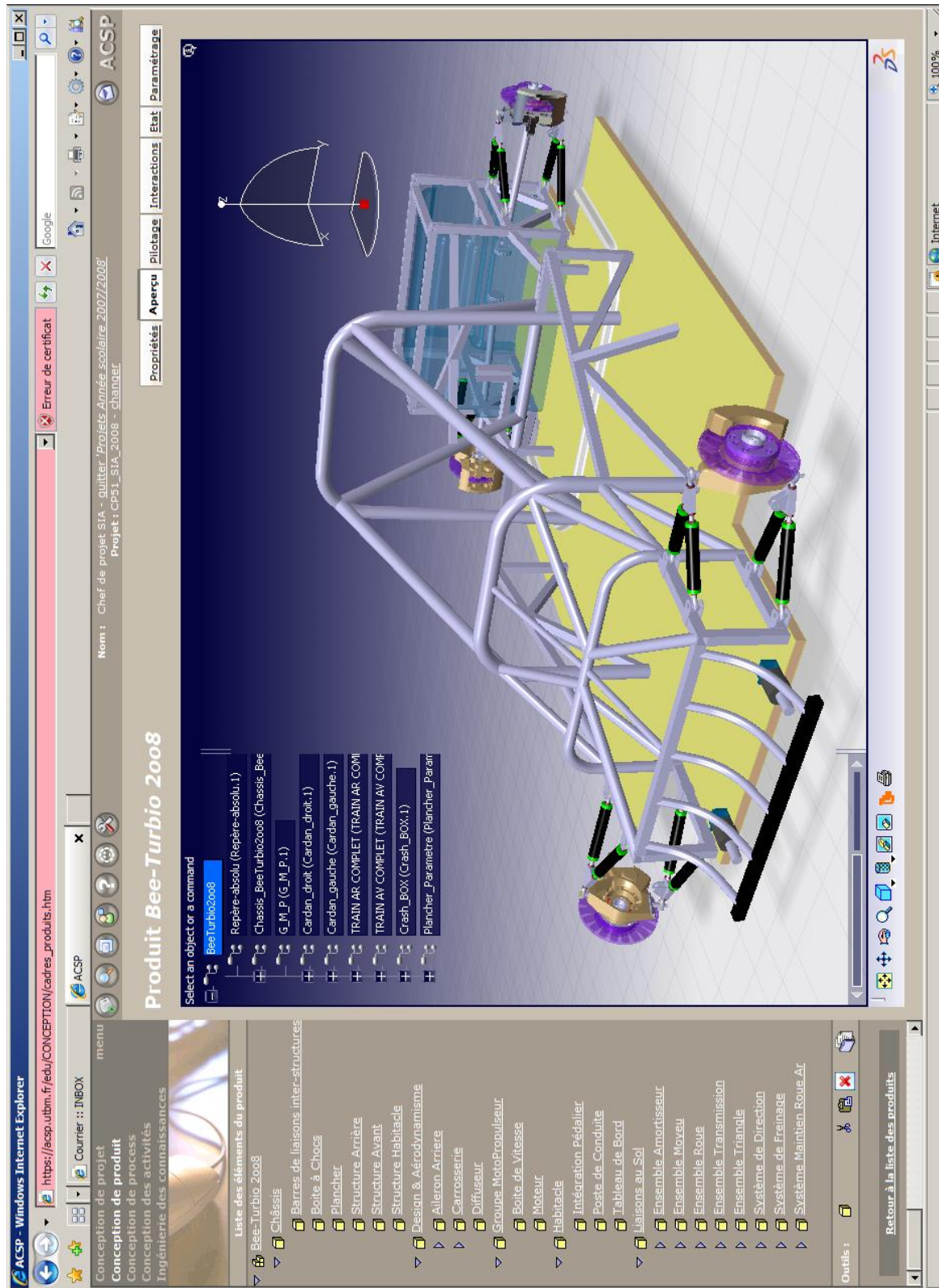


Figure 55 : Interface associée au domaine de "Conception du produit" du véhicule de compétition SIA

4.1.2 Outils dédiés à la conception paramétrique

Il s'agit de présenter dans ce paragraphe l'outil de modélisation tridimensionnelle choisi. Etant en collaboration avec le bureau d'études ETD, les travaux de recherche sont, de ce fait, orientés vers l'industrie automobile. Avec le taux d'utilisation de la solution de conception intégré CATIA v5, de Dassault Systèmes, au sein de l'industrie automobile, nous nous sommes orientés vers cet outil. A titre d'exemple, lors du salon automobile de Détroit en Janvier 2009, près de 80% des véhicules présentés ont été conçus avec la solution CATIA [Dassault, 2009], ce qui consolide notre choix.

Nous proposons à travers ce paragraphe d'exposer brièvement les différentes possibilités offertes par cet outil afin de répondre à nos besoins. Nous exposons, dans un premier temps, les modules de conception standards fournis dans cet outil et, dans un second temps, les modules dédiés à l'intégration des connaissances au sein des définitions numériques.

CATIA, dans sa version 5, met à disposition du concepteur tout un panel de modules (appelés ateliers de travail ou "Workbenches" en anglais) permettant de modéliser un modèle numérique tridimensionnel. Traditionnellement, comme dans tous les modeleurs tridimensionnels industriels, il offre des fonctionnalités surfaciques. L'avantage de ce mode est de permettre de garder un historique de conception, fondé sur l'arborescence CSG détaillée dans le chapitre 2, et de mettre à disposition du concepteur des éléments paramétrés (atelier "Generative Shape Design"). Rappelons que le paramétrage des modèles surfaciques est relativement récent dans ce type de système. De la même manière, CATIA v5 offre la possibilité de modéliser des solides paramétrés tout en conservant l'historique (atelier "Part Design"). Utilisant ces deux modes de modélisation, il offre aussi la possibilité de réaliser des maquettes numériques en utilisant l'atelier d'assemblage (atelier "Assembly Design") et permet ensuite la simulation cinématique de solides multi-corps (atelier "Kinematics"). La possibilité de conserver l'historique de conception ainsi que le paramétrage font de l'outil CATIA v5 un outil qui permet d'appliquer un paramétrage avancé ainsi que d'avoir recours aux règles expertes pour modéliser des définitions numériques géométriques tridimensionnelles.

En effet, l'outil CATIA v5 propose des fonctions dédiées aux connaissances dans sa version de base. Nous pouvons citer les trois plus importantes que sont la création de paramètres, de formules et de règles. Afin d'illustrer ces trois fonctions, nous proposons de prendre l'exemple d'une vis simplifiée.

Premièrement, il s'agit de modéliser la vis par une approche de type "modélisation solide". Traditionnellement, nous réalisons un profil en deux dimensions (esquisse), en l'occurrence un cercle, que nous extrudons sur une certaine longueur. Cette extrusion représente l'arbre fileté de la vis. En bout de cet arbre, nous réalisons à nouveau un profil (Cercle) que nous extrudons à nouveau sur une certaine longueur. Cette extrusion représente la tête de vis. Nous pouvons maintenant mettre en place différents paramètres utilisateur afin

de piloter les différentes cotes caractéristiques de cette géométrie. Nous proposons de créer le paramètre "Lst", qui représente la longueur de l'arbre fileté (Longueur sous tête) et "Lt" qui représente la longueur de la tête. De plus, nous créons parallèlement les deux paramètres pilotant les diamètres de l'arbre fileté et de la tête, respectivement "Dst" et "Dt". Tous ces paramètres sont de type "longueur" dont l'unité est le "mm" et sont mis en relation avec les paramètres de la définition du type de vis (désignation M6 ou M8) par une formule. En effet, afin de pouvoir choisir le type de vis, nous proposons un dernier paramètre appelé "Désignation", dont le type est une "chaîne de caractères" qui comprend deux instances, M6 et M8. Nous pouvons ainsi proposer une table de relation entre la désignation et les paramètres dimensionnels. Le tableau 10 représente la table dimensionnelle utilisée, également qualifiée de table de paramétrage.

| <i>Désignation</i> | <i>Lst</i> | <i>Lt</i> | <i>Dst</i> | <i>Dt</i> |
|--------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| M6 | 30 mm | 6.6 mm | 6 mm | 13 |
| M8 | 40 mm | 8.1 mm | 8 mm | 16 |

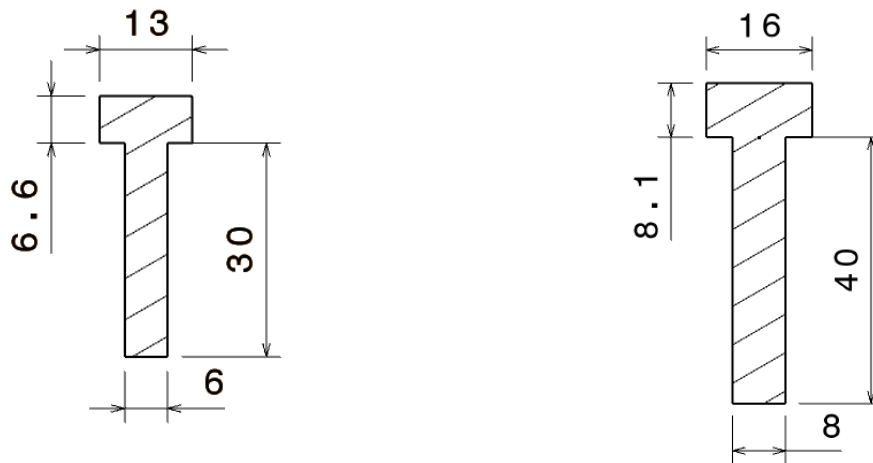
Tableau 10 : Table dimensionnelle pour le solide de la vis

Deuxièmement, il s'agit de régler le comportement du solide. Comme nous l'avons cité plus haut, il est possible d'intégrer des règles dans CATIA v5. Ces règles sont rédigées sous forme d'algorithmes. Par exemple, nous pouvons utiliser l'algorithme suivant pour notre précédent exemple de vis, sachant qu'un comportement équivalent peut être obtenu directement sous CATIA v5 avec la fonctionnalité "Table de paramétrage".

Si Désignation = M6 alors LST = 30 et Lt = 6.6 et Dst = 6 et Dt = 13

Si Désignation = M8 alors LST = 40 et Lt = 8.1 et Dst = 8 et Dt = 16

La figure 56 illustre le résultat de ce paramétrage ainsi que l'action des deux règles précédentes. En effet, la section de gauche propose les dimensions de la vis pour une désignation M6 et la section de droite propose les dimensions pour du M8. Cette modification, qui est réalisée par la seule modification du paramètre "désignation", est instantanée.



*Choix de la désignation **M6***

*Choix de la désignation **M8***

Figure 56 : Présentation du modèle géométrique vis paramétrée et réglée par désignation

Nous venons d'illustrer la possibilité de paramétrage offerte par l'outil de CAO commercial CATIA v5. Une autre possibilité non négligeable proposée par cet outil est l'intégration d'une plateforme de développement informatique. En effet, CATIA v5 étant un logiciel développé pour une plateforme Microsoft WINDOWS, il offre la possibilité de réaliser des programmes spécifiques, sous forme de "macros", sous Microsoft Visual Basic Application (VBA) ou en CATIA Visual Basic Script (CATvbs).

Afin d'automatiser certaines actions dans nos travaux de recherche, nous exploitons cette possibilité dans le paragraphe qui suit afin de générer l'architecture produit paramétrée et réglée.

4.1.3 Génération des architectures produits

Comme exposé lors de la première expérimentation décrite dans le chapitre précédent, nous avons réalisé un prototype de logiciel de migration CdCF-Architecture. Après avoir validé son fonctionnement et défini le principe de création et de propagation des paramètres et règles fonctionnels et spécifiques dans la dernière section du chapitre trois, nous avons déterminé le besoin de l'intégrer directement au sein du PLM.

De ce fait, le PLM ACSP contient l'architecture du système, le paramétrage et les règles fonctionnels et spécifiques. Il s'agit alors, dans ce paragraphe, de détailler le principe retenu pour migrer ces données dans le système de CAO.

La figure 57 représente la méthodologie appliquée pour assurer ce transfert. Cette méthodologie est réalisée en trois étapes. La première consiste à concaténer les données dans l'ACSP pour les préparer à la migration dans le modeleur. La migration des données dans le langage de la plateforme ACSP au langage exploitable par le modeleur géométrique s'effectue dans la seconde étape. La troisième étape consiste à exploiter cette nouvelle migration. Cette étape fait intervenir l'acteur métier concepteur.

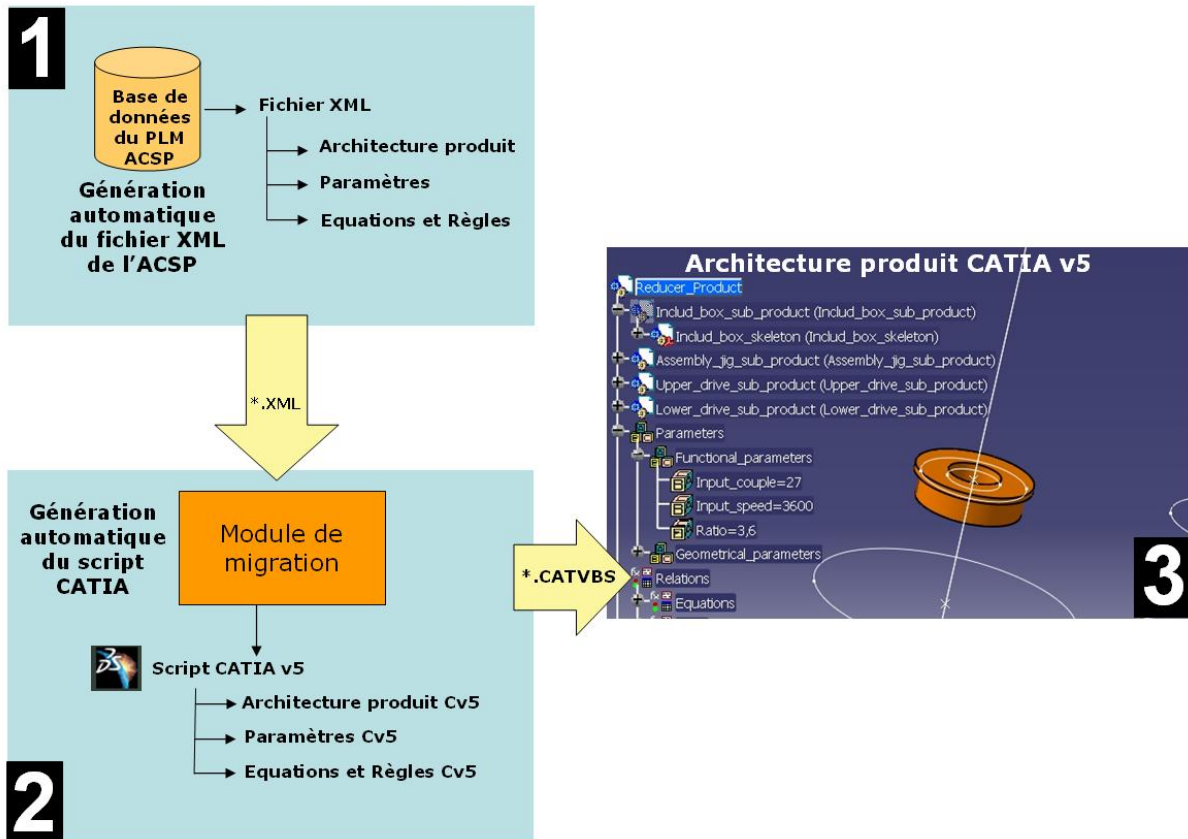


Figure 57 : Principe méthodologique de migration des données du PLM vers la CAO

La suite de ce sous-chapitre détaille toutes les étapes de ce fonctionnement du point de vue technologique.

4.1.3.1 Etape 1 : Concaténation des informations

Il s'agit dans cette étape de concaténer toutes les données situées dans l'ACSP. Selon l'architecture choisie de notre plateforme (détaillée dans le paragraphe 4.1.1), les données à exploiter sont conservées dans différentes tables XML. Chaque donnée à exploiter est ainsi balisée afin d'être identifiable lors de la concaténation.

Les premiers éléments à extraire sont les différents éléments de l'architecture du produit. La table de gauche sur la figure 58 représente un produit à créer et la table de droite représente une pièce. Nous pouvons souligner que les tables sont structurellement similaires. En effet, la seule différence réside dans la balise référençant le numéro du parent ("N_PARENT"). Si l'élément n'a pas de parent, il est considéré comme le produit. Si l'élément a un parent et est référencé en tant que parent par un autre élément, il est considéré comme sous-produit. Et si l'élément a un parent mais n'est pas référencé en tant que parent, c'est une pièce. Cette procédure nous permet ainsi de reconstruire l'architecture produit présenté dans le chapitre précédent.

```

- <table_produit>
- <produit>
  <N_PRODUIT>262</N_PRODUIT>
  <N_ELEMENT>1654</N_ELEMENT>
  <N_ELEMENT_PARENT />
  <NOM_PE>Bouclier avant de
    SANDERO</NOM_PE>
  <EST_RACINE>Vrai</EST_RACINE>
  <ID_ORGANISME />
  <ID_DOC_REPRESENTATION />
  <PRO2_N_PRODUIT />
  <PRO_N_PRODUIT />
  <POS_SCHEMA />
  <COUT_PE />
  <FINISHDATE>26/05/2009</FINISHDATE>
  <ID_PERSONNE>165</ID_PERSONNE>
  <POURCENT>0/0</POURCENT>
  <VALIDE>Faux</VALIDE>
</produit>
</table_produit>

<table_produit_element>
- <produit_element>
  <N_PRODUIT>262</N_PRODUIT>
  <N_ELEMENT>1672</N_ELEMENT>
  <N_ELEMENT_PARENT>1654</N_ELEMENT_PARENT>
  <NOM_PE>Peau</NOM_PE>
  <EST_RACINE>Vrai</EST_RACINE>
  <ID_ORGANISME />
  <ID_DOC_REPRESENTATION />
  <PRO2_N_PRODUIT />
  <PRO_N_PRODUIT />
  <POS_SCHEMA />
  <COUT_PE />
  <FINISHDATE>26/05/2009</FINISHDATE>
  <ID_PERSONNE>165</ID_PERSONNE>
  <POURCENT>0/0</POURCENT>
  <VALIDE>Faux</VALIDE>
</produit_element>
</table_produit_element>

```

Figure 58 : Extrait d'un fichier XML représentant un produit et une pièce

Le second type d'élément à extraire est le paramétrage. Comme détaillé dans le chapitre précédent, nous devons identifier quels sont les paramètres fonctionnels et spécifiques. Pour ce faire, nous nous positionnons dans une approche parent-enfant similaire aux tables précédentes. En effet, si le paramètre est son propre parent au niveau structurel, on peut le considérer comme un paramètre fonctionnel. La figure 59 représente le balisage d'un paramètre dans un fichier XML. A contrario, si le paramètre a un parent différent, il s'agit d'un paramètre spécifique. En effet, si la modification d'un parent agit sur l'enfant, ce paramètre découle d'un lien, donc il est considéré comme spécifique. Nous pouvons relever dans l'illustration que le paramètre "Volume_max" est un paramètre fonctionnel n'ayant pas de parent.

```

- <table_solveur_variables>
- <solveur_variables>
  <ID_VARIABLE>294</ID_VARIABLE>
  <ID_PRODUIT>262</ID_PRODUIT>
  <N_ELEMENT_PARENT />
  <ID_ELEMENT />
  <LOGIN_AUTEUR>JBLUNTZE</LOGIN_AUTEUR>
  <NOM>Volume_max</NOM>
  <PRECI>1</PRECI>
  <BINFEGAL>0</BINFEGAL>
  <BSUPEGAL>3</BSUPEGAL>
  <BINFSTRICT />
  <BSUPSTRICT />
  <SINGLETON />
  <UNITE>m3</UNITE>
  <CHAINE>Volume_max : [ 0;3] (m3) de précision 1</CHAINE>
</solveur_variables>
</table_solveur_variables>

```

Figure 59 : Extrait d'un fichier XML représentant un paramètre fonctionnel

Le troisième type d'éléments est la liaison des paramètres. En effet, aujourd'hui, les paramètres sont liés par l'intermédiaire de formules. Ces formules sont dites fonctionnelles ou spécifiques. Si la formule contient uniquement des paramètres de type fonctionnel, la règle est

fonctionnelle. Si un des paramètres ou tous les paramètres sont spécifiques, il s'agit d'une règle spécifique.

Ainsi, à travers ces différentes tables XML, les composants à intégrer dans le modelleur géométrique sont tous identifiés. Il s'agit maintenant de faire correspondre ces données avec les lignes de commandes VB script exploitables par le modelleur CATIA v5. Le paragraphe suivant présente ces équivalences.

4.1.3.2 Etape 2 : Migration des informations

Cette étape consiste à migrer les données issues du PLM ACSP sous forme de fichiers XML en un fichier exploitable par le modelleur géométrique. Suivant le choix réalisé dans le paragraphe 4.1.2, CATIAv5 (Cv5) est la solution de modélisation retenue et le fichier d'exploitation est un script Visual Basic (VBscript).

Pour valider l'hypothèse selon laquelle il est possible de générer directement un script VB Cv5, une première application, à travers la première expérimentation dans le chapitre précédent, réalisée en Visual Basic 6 est développée. Cette application traite les fichiers XML en données d'entrée pour générer le script VB Cv5 en données de sortie, script directement exploitable par un acteur métier après génération. La figure 60 schématise le principe de fonctionnement du nouveau logiciel de migration. En données d'entrée, nous avons les trois types de tables XML issus du PLM ACSP, en l'occurrence l'architecture produit, les paramètres et les règles. Après traitement du logiciel, un script exploitable dans le modelleur géométrique est généré.

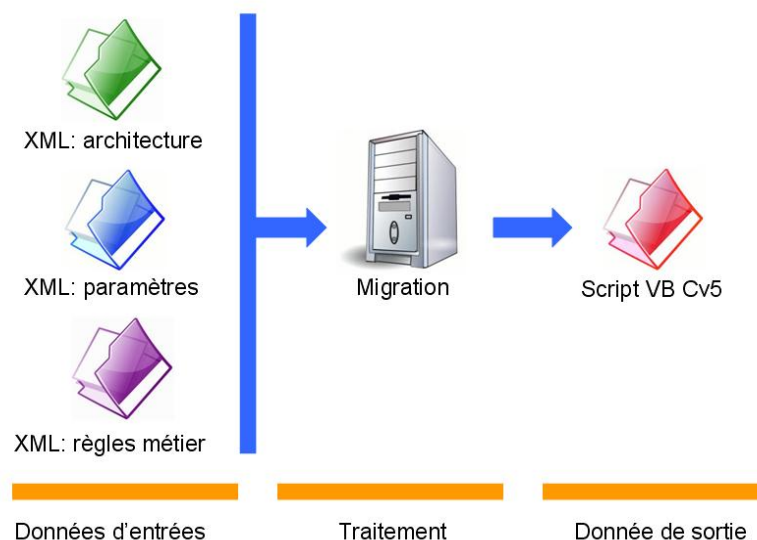


Figure 60 : Fonctionnement du prototype de migration

Pour générer un script VB Cv5 correspondant à ce besoin, il est nécessaire de déterminer les fonctions qui y sont intégrées. Quatre fonctions sont nécessaires pour réaliser le script souhaité.

La première fonction consiste à générer un produit. Suivant l'architecture système retenue dans le chapitre précédent, le script doit pouvoir créer des produits et des sous-produits. La fonction à utiliser dans cette situation est similaire dans les deux cas. La figure 61 représente cette commande. Nous pouvons identifier le produit "Bouclier avant".

```

4      Set Product47Document = CATIA.Documents.Add("Product")
5      Set Product47 = Product47Document.Product
6      Product47.PartNumber = "Bouclier avant"

```

Figure 61 : Commande Cv5 permettant de créer un produit ou sous-produit

La seconde fonction doit générer des pièces. En effet, pour correspondre à la même architecture système, nous devons créer des pièces contenant une architecture pièce spécifique en automatique. La difficulté réside dans la différence entre un produit et une pièce. En effet, dans le fichier XML, un produit et une pièce sont identifiés de façon similaire. Pour différencier les deux éléments, on utilise la logique parent-enfant détaillé dans le paragraphe précédent.

La troisième fonction consiste à générer les paramètres. La principale contrainte consiste à différencier les paramètres spécifiques des paramètres fonctionnels. Selon le principe retenu pour la seconde fonction, les paramètres sont ainsi identifiés. La figure 62 représente la fonction de création d'un paramètre de type Brillance en script Cv5.

```

32      Set Product47Variable354=Product47FunctionalPar
33      ameters.CreateReal("Brillance {lu/m²}", 5.0)
34      Product47Variable354.RangeMin=0.1
35      Product47Variable354.RangeMinValidity=1
36      Product47Variable354.RangeMax=10.0
37      Product47Variable354.RangeMaxValidity=1

```

Figure 62 : Commande Cv5 permettant de créer un paramètre

La quatrième fonction doit implémenter les règles. Suivant le principe retenu précédemment pour les paramètres, les règles sont ajoutées selon la logique parent – enfant.

La cinquième fonction consiste à implémenter le squelette automatiquement. Cette étape est en cours de développement. Aujourd'hui cette fonction peut être intégrée manuellement par l'acteur métier concepteur dans l'étape 3.

Le développement du prototype est effectif et validé lors de la première expérimentation. De plus, la migration des données XML en fichier script VB Cv5 est aussi possible. Le passage en production de ce principe de migration est possible. Pour ce faire, il s'agit d'intégrer cette routine directement dans le PLM ACSP. Les algorithmes sont ainsi portés directement dans le PLM ACSP en utilisant la technologie Internet ".Net" afin de réaliser à la volée la génération du script. La différence majeure réside dans les données d'entrée. En effet, auparavant nous utilisions des fichiers MS Excel. L'intégration directe du processus de migration dans la base du PLM ACSP permet d'utiliser directement les balises des tables XML.

Cette procédure est aujourd'hui fonctionnelle dans notre outil de PLM ACSP. Nous présentons donc dans le paragraphe suivant comment le concepteur peut exploiter cette fonction à travers l'IHM du PLM ACSP.

4.1.3.3 Etape 3 : Exploitation de la migration par l'acteur métier concepteur

Cette étape consiste en la récupération du script VB Cv5 dans le PLM ACSP et son utilisation dans le modeler géométrique. Suite à l'étape de définition de l'architecture système par l'architecte, processus représenté dans le sous-chapitre 4.1.1, le concepteur doit récupérer le script dans l'ACSP. Cette procédure, illustrée à travers la figure 63, s'inscrit dans le domaine produit de l'ACSP. Le concepteur récupère ainsi un fichier script directement exploitable dans le modeler. En cliquant sur un lien permettant de télécharger l'architecture, le navigateur Internet propose directement à l'utilisateur un lien de téléchargement du script VB. Il peut alors l'exécuter directement si l'outil Cv5 est installé sur le même poste.

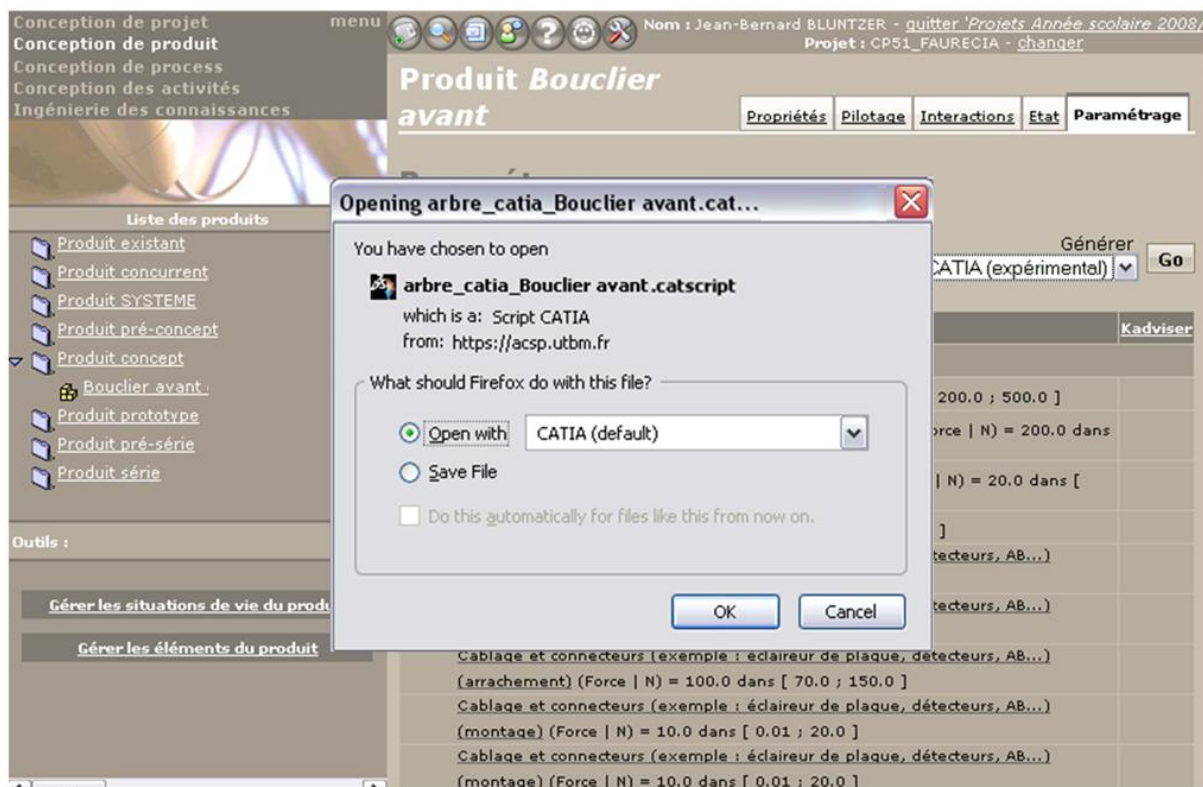


Figure 63 : Interface de récupération du script sous l'ACSP

Après déclenchement du script, le concepteur est à même de pouvoir vérifier la corrélation des données affichées dans le modeler et dans l'ACSP. La figure 64 représente une architecture produit et une architecture pièce paramétrée et réglée dans Cv5.

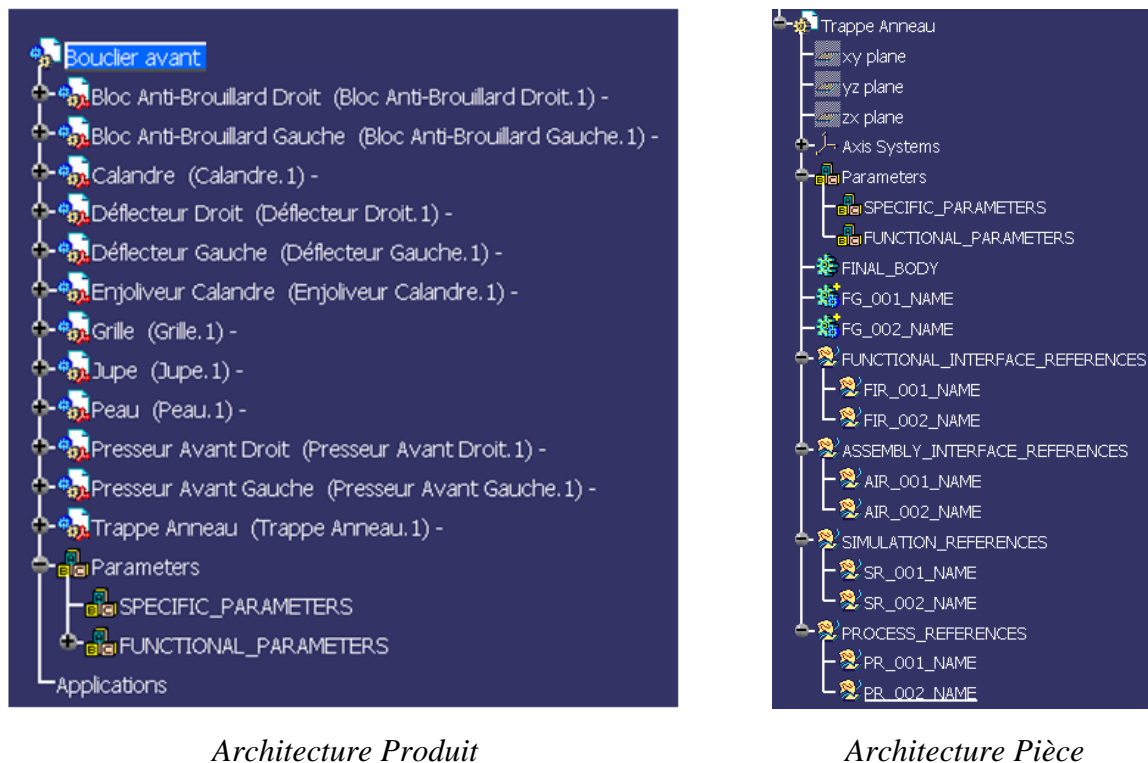


Figure 64 : Exemple d'architecture produit et pièce dans le modeler après déclenchement du Script Cv5 depuis le PLM ACSP

A travers cette procédure, nous venons d'établir le lien entre architecte produit et concepteur. En effet, la migration automatique des informations traduites dans l'ACSP par l'acteur marketing est ainsi mise à la disposition du concepteur directement dans son outil de travail principal, en l'occurrence le modeler CAO.

Après avoir présenté ces deux types d'outils, une première expérimentation industrielle les exploitant est exposée dans la section suivante.

4.2 Approche expérimentale

Ces travaux de recherche ont été conduits conjointement dans un cadre académique (UTBM) et industriel (FAURECIA XSPG ETD). En effet, lors de l'initialisation de ces travaux, la première expérimentation a été conduite au sein de notre structure de recherche afin de valider les premières hypothèses de recherche. La validation de ces hypothèses à travers cette expérimentation nous a permis de trouver des partenaires industriels intéressés et en mesure de déployer ce type de méthodologies au sein de leurs entreprises. Ces nouvelles collaborations nous ont permis de faire évoluer tant nos hypothèses de recherche que nos modèles méthodologiques.

Dans ce cadre, nous présentons une première expérimentation industrielle qui permet de valider l'évolution de notre premier modèle méthodologique. La limite principale relevée lors de cette expérimentation (contexte universitaire) permet de faire évoluer notre modèle. Dès lors, une poursuite de notre expérimentation a été réalisée afin de lever cette limite. Sur la

base de cette expérimentation, nous présentons le taux d'utilisation chez le partenaire industriel sur une période d'une année afin de pouvoir discuter ces résultats.

Par ailleurs, l'évolution du modèle nous a amené à faire évoluer en parallèle nos outils de recherche, notamment les outils de conception collaborative. Ainsi, à travers ces expérimentations, nous présentons l'évolution du modèle méthodologique ainsi que l'évolution des outils utilisés.

4.2.1 Expérimentation industrielle des concepts proposés à travers le développement d'une interface technique pour véhicules automobiles

Suite à la première étude conduite dans un contexte académique, il s'agit maintenant d'appliquer le modèle méthodologique validé à un projet industriel. Dans ce cadre, l'expérimentation porte sur une série de véhicule donnée. Il s'agit de réutiliser (carry over) une pièce d'un véhicule 1, en l'occurrence un support antibrouillard, sur un véhicule 2. Dans ce cadre, seul le plan de forme change. De ce fait, il s'agit de reconduire la même conception ainsi que le même type d'interfaçage avec l'antibrouillard. La figure 65 représente une section en Y, selon le repère véhicule, afin de représenter la disposition des deux éléments composant notre environnement, la peau de bouclier ainsi que le phare antibrouillard, et la pièce à concevoir, le support antibrouillard.

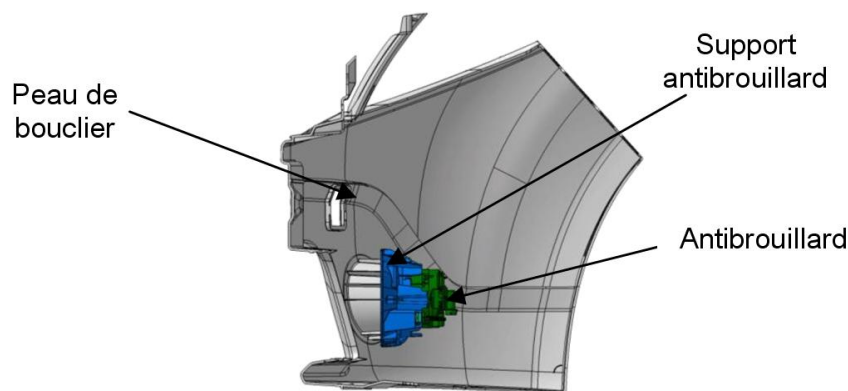


Figure 65 : Section du produit expérimenté représentant la pièce étudiée ainsi que son environnement direct

L'objectif est de concevoir la pièce réalisant le lien entre la peau du bouclier et le phare antibrouillard. Cette pièce sera dénommée "Pièce d'adaptation pour antibrouillard". Il correspond au véhicule 1 (déjà industrialisé aujourd'hui). Nous concluons et confirmons notre modèle en étendant notre travail au véhicule 2.

Afin de réaliser cette expérimentation, nous utilisons le modèle méthodologique et son évolution qui est détaillée dans la section 3.6.

Cette expérimentation est conduite en accord avec le processus décrit à la fin du chapitre précédent. Cette expérimentation, divisée en cinq étapes, est présentée dans les paragraphes qui suivent.

4.2.1.1 Etape 1 : Définition du besoin

Cette étape, réalisée par l'acteur marketing, permet de définir au sein du PLM ACSP le besoin initial. L'analyse fonctionnelle externe (dont un extrait est représenté sur la figure 66) est utilisée afin de déterminer les fonctions principales (FP) et contraintes (FC) de notre système. L'exemple proposé présente le graphique de l'analyse fonctionnelle externe directement généré par le PLM ACSP. Nous pouvons identifier le nombre conséquent (9) des différents éléments extérieurs au système étudié.

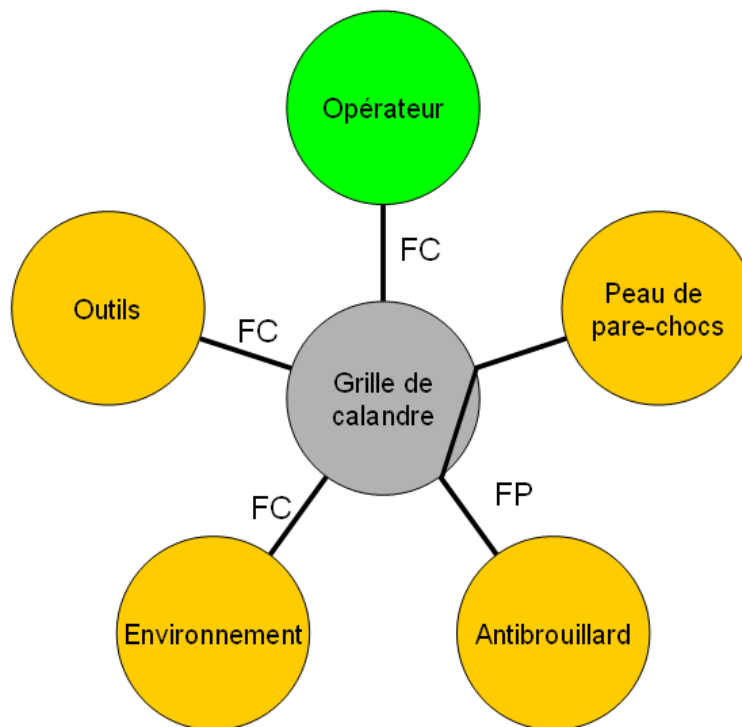


Figure 66 : Représentation de la situation de vie "Assemblage" de notre produit

Lors de cette étape, l'acteur retranscrit les fonctions identifiées au sein du PLM et implémente les paramètres fonctionnels qui lui sont liés. Nous pouvons par exemple citer la fonction principale de notre produit mettant ainsi en relation l'antibrouillard avec la peau de bouclier. Nous pouvons ainsi la formaliser comme suit :

FP n°1 : Permettre l'assemblage de l'antibrouillard avec la peau de bouclier

De plus, comme indiqué dans le modèle méthodologique appliqué, l'acteur marketing doit définir tous les critères de valeur de chaque fonction, qu'elle soit principale ou contrainte. Nous pouvons par exemple citer un critère de valeur qui résulte de la fonction principale décrite précédemment. Il s'agit de la force minimale de non arrachement par fixation. Ce critère de valeur devient alors un paramètre fonctionnel.

Force de non arrachement minimum par fixation = 50 Newton

4.2.1.2 Etape 2 : Capitalisation des informations métier

En parallèle de l'étape 1, l'expert métier doit capitaliser les règles et paramètres spécifiques permettant de piloter chaque principe de solution technologique retenu. Par exemple, dans notre expérimentation, trois principes de solution sont retenus : le clippage, le bouterolage et le vissage. Ainsi pour chaque type de solution, nous sommes en présence de paramètres spécifiques. La figure 67 suivante représente l'interface de synthèse de l'architecture produit incluant les différents paramètres spécifiques au sein du PLM ACSP. Nous pouvons, par exemple, distinguer pour la fixation de clippage les différents angles régissant la géométrie d'un clip.

| | |
|---|---|
| <u>calcul du tps total</u> | |
|  | <u>Peau</u> |
|  | <u>Phare</u> |
|  | <u>Piece_Support</u> |
|  | <u>Centrage_AB_support</u> |
|  | <u>Fixation peau/Support</u> |
| Variables spécifiques | |
| | <u>Fixation_bouterolage</u> (Booléen none_boolean) = true |
| | <u>Fixation_clippage</u> (Booléen none_boolean) = false |
| | <u>Nombre_fixation</u> (Entier none_integer) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Type_de_fixation.1</u> (Entier none_integer) dans] -inf ; +inf [|
|  | <u>Fixation bouterolage</u> |
| Variables spécifiques | |
| | <u>Angle_bouterolage_male</u> (Angle deg) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Epaisseur_extremite_bouterolage</u> (Longueur mm) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Largeur_base_fixation</u> (Longueur mm) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Longueur_effective_bouterolage</u> (Longueur mm) dans] -inf ; +inf [|
|  | <u>Fixation clippage</u> |
| Variables spécifiques | |
| | <u>Angle_depouille_butes_clip</u> (Angle deg) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Angle_tete_clippage</u> (Angle deg) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>coefficient_de_frottement</u> (Réal none_real) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Epaisseur_base_clip</u> (Longueur mm) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Flechissement</u> (Longueur mm) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Force_emboitement</u> (Force N) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Force_flechissement</u> (Force N) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Largeur_base_fixation</u> (Longueur mm) dans] -inf ; +inf [|
| | <u>Longueur_effective_clippage</u> (Longueur mm) dans] -inf ; +inf [|

Figure 67 : Extrait de l'architecture produit paramétrée au sein du PLM ACSP

4.2.1.3 Etape 3 : Migration PLM ACSP vers le modelleur géométrique

Réalisée par le PLM ACSP, cette étape permet de migrer les données de l'architecture produit ainsi que les règles métier au sein du modelleur géométrique. Comme présenté dans la section 4.1.3, l'ACSP propose le fichier VBscript pour Cv5 au concepteur.

La figure 68 représente l'architecture produit générée au sein du modelleur géométrique Cv5 sur la base du lancement du fichier VBScript. Nous pouvons identifier la similarité des éléments générés avec la figure précédente. En effet, nous retrouvons bien tous les composants ainsi que les paramètres spécifiques.

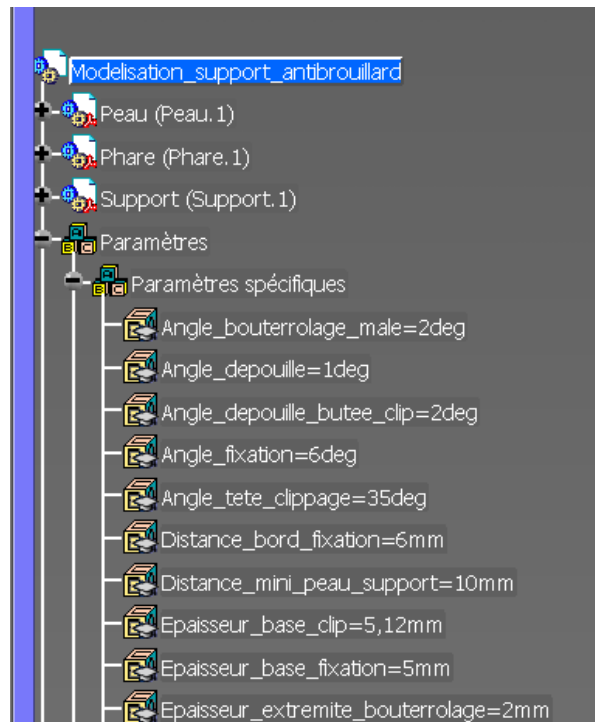


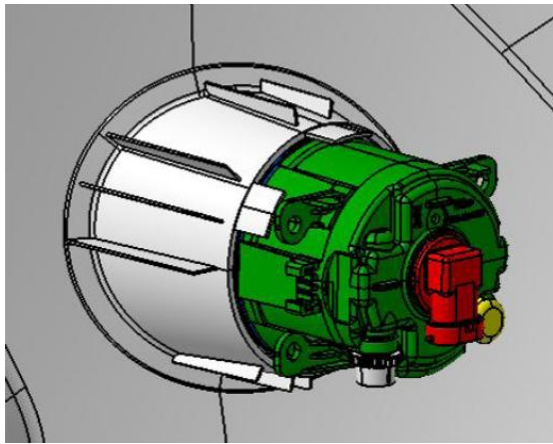
Figure 68 : Extrait de l'architecture produit paramétrée au sein du modelleur géométrique

Lors de cette expérimentation, nous avons identifié 16 paramètres spécifiques définissant une colonnette de bouterrolage.

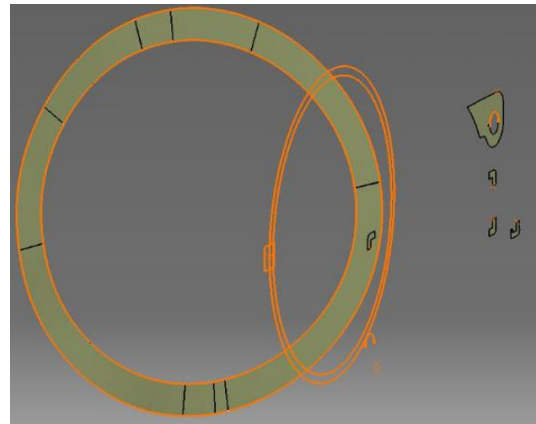
4.2.1.4 Etape 4 : Modélisation du modèle géométrique générique

Afin de correspondre au modèle méthodologique, on se propose de réaliser un modèle générique du support antibrouillard dans son intégralité. La procédure de création d'un modèle générique est divisée en deux parties. Dans un premier temps, il s'agit de sélectionner les éléments de référence de l'environnement qui vont permettre, dans un second temps, la modélisation du solide.

Dans notre expérimentation, l'acteur métier réalisant cette étape est l'expert CAO. Son rôle est d'identifier les différents éléments de l'environnement sur la peau ainsi que sur l'antibrouillard. Nous pouvons identifier sur la figure 69 les différents éléments de références extraits de l'environnement.



Environnement du support



Elément de référence du support

Figure 69 : Représentation de l'environnement du support antibrouillard ainsi que l'extraction de ces éléments de référence.

Les surfaces du plan de forme de la peau permettent de définir le galbe du support ou encore les différents points de fixation et de vissage sur l'antibrouillard. Il est à noter que la composition du plan de forme sur la surface de référence est un assemblage de neuf surfaces distinctes. Cet exemple révèle la complexité des plans de forme dans les pièces de style issues de l'industrie automobile.

Avant la modélisation, il s'agit d'identifier les paramètres spécifiques qui vont piloter la géométrie de la pièce finale. Dans cette expérimentation, les paramètres spécifiques avaient déjà été identifiés dans la seconde étape. De ce fait, les mêmes paramètres ont été appliqués au sein du modèle générique.

Une fois les références ainsi que les paramètres spécifiques identifiés, il s'agit de modéliser le solide du modèle générique. En se fondant intégralement sur les références précédentes, l'expert CAO numérise le solide. La plus grande difficulté dans ce type de modélisation est le fait que seules les références choisies ont le droit d'être utilisées. Il arrive fréquemment que l'expert revienne à la définition initiale des références pour permettre d'en créer des nouvelles. Plus le modèle générique est important et complexe, plus cette itération se reproduit.

La numérisation de ce modèle générique a nécessité plus de 5 heures de modélisation et environ 10 heures de mise au point.

Afin de pouvoir mettre à disposition ce modèle aux autres acteurs métier de l'organisation, l'expert le met à disposition au sein d'un catalogue qui est situé dans un répertoire partagé. Une fois ce catalogue complété, l'étape est finalisée.

4.2.1.5 Etape 5 : Conception de la pièce support antibrouillard

Cette étape, réalisée par le concepteur, consiste dans un premier temps à générer l'architecture paramétrée et réglée du produit. Après avoir généré le script et l'avoir exploité, le concepteur est maintenant en présence de l'architecture produite au sein de son outil CAO. Il est à même de pouvoir débiter la modélisation.

Dans un premier temps, il rapatrie les modèles numériques de son environnement qu'il met en place dans son architecture vierge. Cette opération, normalement liée avec le PDM, a été réalisée avec les définitions sur un serveur de fichiers partagés. Cette différence n'impacte pas le résultat de l'opération

Dans un second temps, il recherche sur la base donnée partagées, le catalogue qui contient le modèle générique mis à disposition dans l'étape précédente. En le sélectionnant, il démarre son implémentation au sein de son architecture produit. Afin que le modèle puisse s'adapter dans son nouvel environnement, le modelleur CAO lui demande de sélectionner les références d'entrée. Ces références sont similaires à celles déterminées à l'étape précédente.

Lors du choix de ces références, le concepteur a dû faire appel à l'expert CAO qui a construit le modèle. En effet, la complexité des références à sélectionner est telle que seule la personne qui a élaboré le modèle générique peut l'utiliser. Dans l'avenir, le recours à des méthodes et outils d'aide à l'utilisation des modèles génériques serait très intéressant pour l'organisation industrielle. La figure 70 représente le support antibrouillard implémenté au sein de son nouvel environnement.

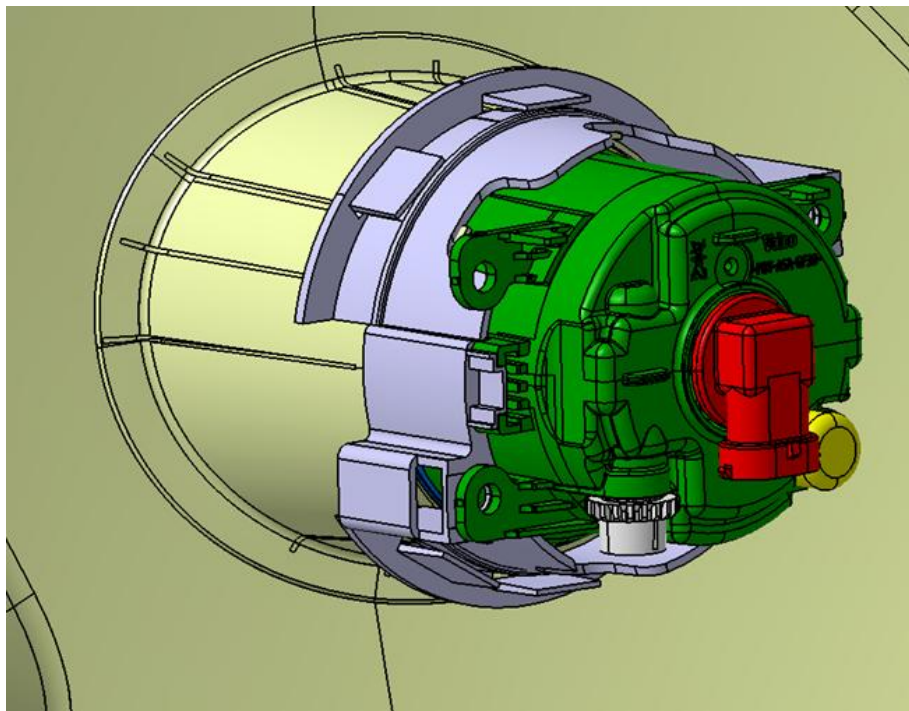


Figure 70 : Représentation de support antibrouillard implémenté au sein de son nouvel environnement.

Cette étape a nécessité environ 5 minutes à l'expert métier contre environ une heure pour le concepteur qui n'a pas réussi à l'implémenter.

4.2.1.6 Résultats de l'expérimentation

A travers cette première expérimentation industrielle, nous pouvons avancer que le modèle proposé est une réelle réussite. En effet, il est possible de débiter la conception en offrant au concepteur une architecture paramétrée et réglée provenant du PLM ACSP. De plus

l'intégration de tous les outils au sein d'une même plateforme de PLM a assuré la pérennité des données et informations lors des phases de coopération.

Par contre, la dernière étape révèle une première limite non négligeable dans ce processus de conception. La complexité d'un tel modèle générique ne lui permet pas d'être réutilisé par l'ensemble des concepteurs. En effet, seul l'expert CAO qui avait réalisé ce modèle a réussi à l'utiliser concrètement. Or le principe d'un modèle générique est bien de pouvoir l'utiliser dans tous les nouveaux environnements, et en l'occurrence par tous les concepteurs.

De ce fait, nous avons déterminé que le modèle générique doit être le moins complexe possible. Afin de déterminer une granulométrie au sein des modèles génériques, nous proposons d'intégrer la notion de principes de solution. Il s'agit de décomposer la pièce en principes de solution et de créer des modèles génériques pour chaque principe à utiliser. En l'occurrence dans le prochain exemple, il s'agit de dissocier le capteur en plusieurs principes de solution pour le guidage, pour le soudage ou encore pour le bouterolage.

Afin d'illustrer ce concept de "principes de solution", on se propose de compléter cette première expérimentation par une nouvelle expérimentation les intégrant. Le paragraphe suivant expose ainsi une expérimentation complémentaire prenant en compte ce nouvel élément mais en s'appuyant toujours sur le même modèle méthodologique.

4.2.2 Expérimentation complémentaire : intégration des principes de solution et application à un support capteur

Dans la continuité de cette première expérimentation et pour illustrer le même modèle méthodologique, une seconde application industrielle est choisie. La pièce retenue, dont l'environnement ainsi que la zone de conception sont représentés sur la figure 71, est une interface technique permettant d'assembler un capteur de proximité avec une peau de pare-chocs.

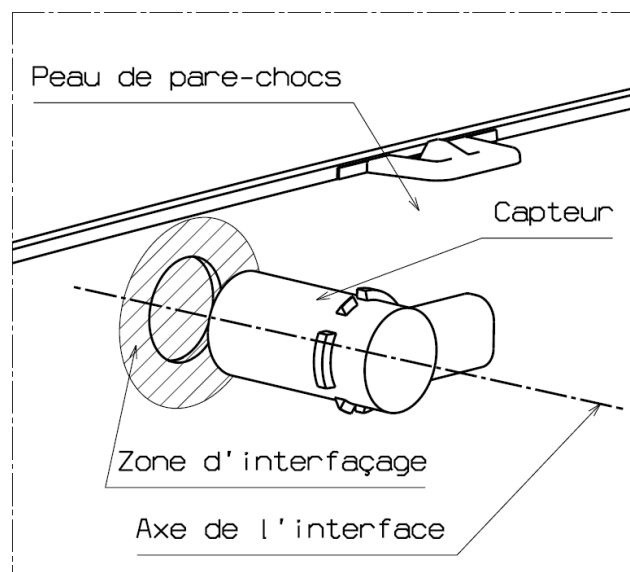


Figure 71 : Environnement de l'interface support capteur

Cette interface est un exemple d'ingénierie dite routinière : l'architecture du produit et les composants sont connus, mais la configuration et les paramètres sont inconnus. Toutes les étapes de notre méthodologie sont à nouveau utilisées dans ce cas d'application et sont détaillées dans les paragraphes suivants.

4.2.2.1 Etape 1 : Définition du besoin

Lors des phases de pré-études du projet, l'acteur marketing doit rédiger les contraintes du cahier des charges fonctionnel. Ces contraintes peuvent être de deux types : des paramètres fonctionnels ou spécifiques. La méthodologie utilisée pour définir ces deux types sont les analyses fonctionnelles externe (AFE) et interne (AFI). Dans notre cas, les paramètres fonctionnels issus de l'AFE sont la tenue à l'arrachement du support par rapport à la peau de pare-chocs (F_a) et l'effort de fixation du capteur dans le support (F_m). Concernant les paramètres spécifiques, nous pouvons citer par exemple le diamètre du capteur (\varnothing_c), le nombre de zones d'interfaçages maximum (N_{max}) et minimum (N_{min}) par rapport à la peau de pare-chocs et l'effort de tenue de la zone d'interfaçage minimum (F_{i_min}) et maximum (F_{i_max}).

Quand les contraintes sont définies, l'acteur marketing doit choisir le type d'architecture qu'il souhaite. Il est ainsi possible de modéliser un diagramme FAST permettant de définir l'architecture choisie et les principes de solution. La figure 72 représente un extrait du diagramme FAST de la fonction technique (FT) "Interfacer la peau de Pare-Chocs avec le capteur" issue de notre cas d'application.

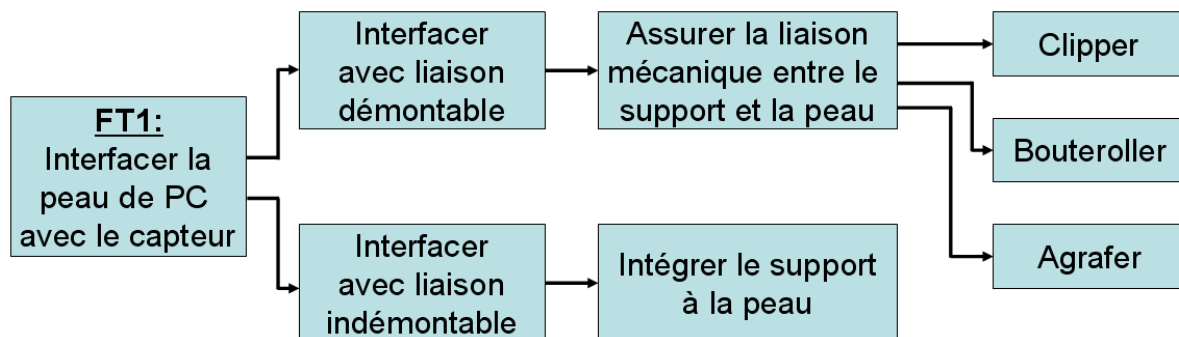


Figure 72 : Diagramme FAST de la fonction technique "Interfacer la peau de PC avec le Capteur".

Ainsi, il y a deux configurations d'architecture possibles, l'intégration du support capteur directement à la peau ou l'ajout d'une pièce permettant cet interfaçage. Nous choisissons l'intégration d'un nouvel élément, ce qui permet de définir une sous-architecture liée aux moyens d'assemblage, comme :

- Architecture avec interface de clippage
- Architecture avec interface de bouterolage
- Architecture avec interface d'agrafage

Ces différentes interfaces sont représentées sur la figure 73.

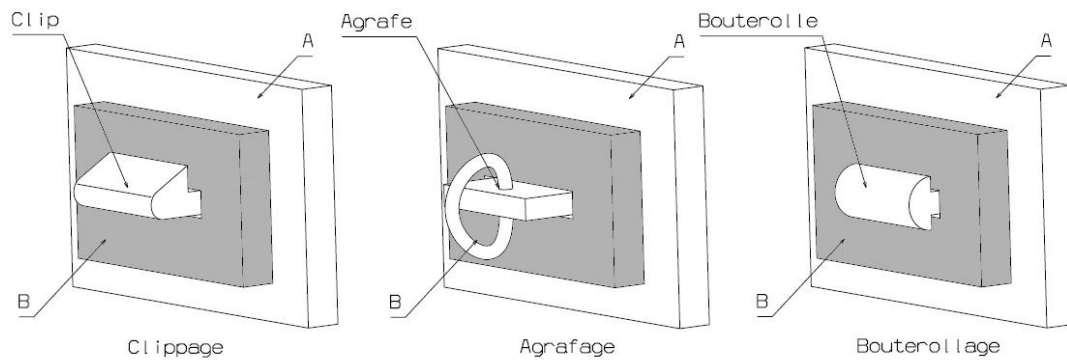


Figure 73 : Exemple de types d'architecture d'assemblage

Les schémas présentés se lisent de la manière suivante : la pièce A est assemblée sur la pièce B (représentée en gris sur la figure) en utilisant une interface de type "moyen". Les paramètres fonctionnels sont ainsi invariables suivant la configuration choisie et les paramètres spécifiques sont liés à cette dernière. Dans notre cas, nous choisissons l'architecture par ajout d'une pièce intermédiaire avec une interface par agrafage.

4.2.2.2 Etape 2 : Capitalisation des informations métier

Cette étape est réalisée à la fin de chaque projet à partir d'un retour sur expérience. En effet, après chaque projet, il est possible de capitaliser chaque règle métier utilisée, chaque architecture spécifique, chaque terme métier, etc. La méthodologie formalisée, en s'appuyant sur la typologie des connaissances KNOVA-SIGMA, est appliquée pour l'identification et la capitalisation de ces données.

Ces données sont alors implémentées dans la base de données de l'ACSP afin d'être partagées avec la totalité des concepteurs.

Dans notre cas, nous pouvons ainsi formaliser trois règles métier qui permet de définir l'architecture avec l'interface par agrafage. Par exemple, ces règles peuvent être représentées sous la forme d'algorithmes (1) ou d'équations (2) (3) (les équations présentées utilisent la fonction mathématique "Entier" symbolisée E).

$$\begin{aligned} & \text{Si architecture par agrafage} \\ & \text{Alors } F_{i_min} = 30N \text{ et } F_{i_max} = 40N \end{aligned} \quad (1)$$

$$N_{max} = E (F_a / F_{i_min}) + 1 \quad (2)$$

$$N_{min} = E (F_a / F_{i_min}) \quad (3)$$

Avec :

E : Fonction mathématique Entier

F_a : Force d'arrachement

F_{i_min} : Effort de tenue de la zone d'interface minimum

F_{i_max} : Effort de tenue de la zone d'interface maximum

N_{max} : Nombre de zones d'interface maximum

N_{min} : Nombre de zones d'interface minimum

Ces différentes spécifications sont insérées dans la base de données du PLM ACSP et peuvent être visualisées par tous les acteurs métier.

4.2.2.3 Etape 3 : Migration PLM ACSP vers le modeleur géométrique

Cette étape, similaire en tous points avec l'étape 3 de la précédente expérimentation, permet de migrer les données intégrées au PLM ACSP pendant les deux premières étapes vers le modeleur géométrique. Cette migration met à disposition du concepteur dans l'étape 4 une architecture produit paramétrée et réglée.

Afin que cette architecture puisse être exploitée dans son intégralité, l'étape suivante permet de mettre à la disposition du concepteur des modèles génériques en adéquation avec les paramètres spécifiques établis dans cette architecture.

4.2.2.4 Etape 4 : Modélisation des modèles géométriques génériques

Cette étape consiste à modéliser des modèles génériques et est réalisée en parallèle de tous les projets de l'organisation. Quand un modèle géométrique est candidat, l'expert CAO le modélise en utilisant une conjonction réutilisation détaillée dans le paragraphe 3.4.3. En effet, un modèle géométrique n'est pas modélisé de la même façon qu'un modèle traditionnel si l'on veut l'utiliser en tant que modèle générique. Il s'agit d'identifier en amont les données initiales susceptibles de changer d'un environnement à un autre et de les utiliser comme données de départ à la modélisation.

La différence majeure avec la précédente expérimentation réside dans l'intégration du concept de principe de solution. En effet, nous avons déterminé que la modélisation d'éléments trop complexes en tant que modèles génériques était une des premières limites rencontrées. De ce fait, il s'agit de ne plus modéliser l'intégralité du support en tant que modèle géométrique, mais de le dissocier en principes de solution. Dans notre cas d'application, nous pouvons diviser un support capteur en trois zones distinctes. La première correspond au corps du support, qui maintient le corps du capteur. La solution de fixation du support avec la peau est considérée comme la seconde zone. Le guidage et le maintien en position du capteur dans son support est la troisième zone. De ce fait, l'expert CAO modélise toutes ces zones en modèles génériques distincts. La différence avec la première expérimentation réside dans les données d'entrée. En effet, étant donné que le modèle générique est plus petit, il nécessite moins de références pour être modélisé. Nous pouvons citer par exemple pour le principe de solution d'agrafe que seul le plan de forme de la peau ainsi que le cercle représentant le diamètre extérieur du capteur sont nécessaires.

Une fois les différents modèles génériques réalisés, l'expert CAO doit les mettre à disposition dans une base de données accessible par l'ensemble des concepteurs. Cette base de données est intégrée dans CATIA v5 sous la forme d'une bibliothèque de modèles génériques.

4.2.2.5 Etape 5 : Conception du support capteur

Après avoir généré le script CAO via l'ACSP, le concepteur doit l'exploiter sur sa propre station CAO. Après l'avoir utilisé, il est maintenant en possession de l'architecture de son produit dans son modèleur CAO. La figure 74 représente un exemple d'architecture produit générée dans CATIA v5 comprenant les différents paramètres ainsi que les règles métier et le squelette.

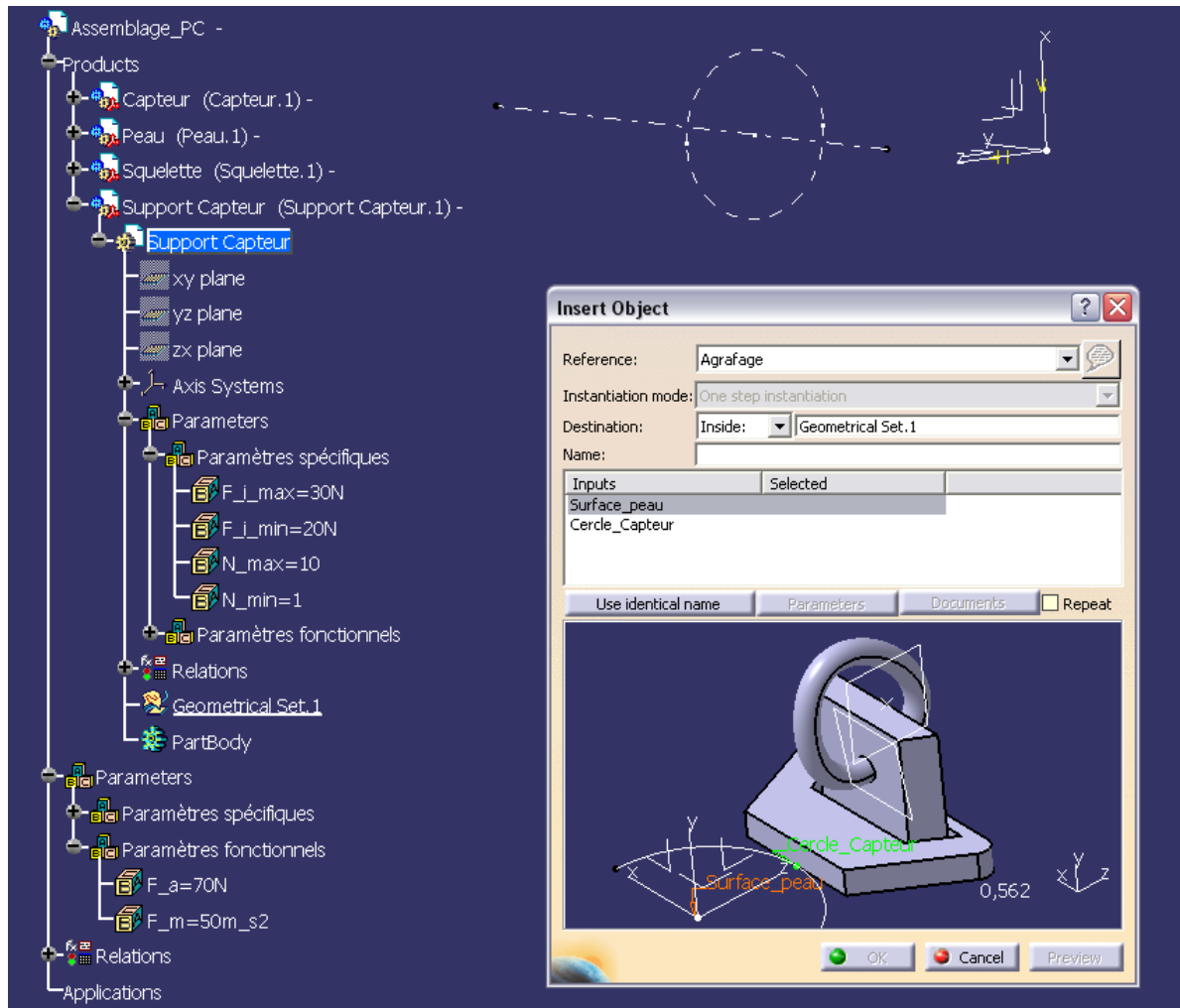


Figure 74 : Exemple de l'architecture produit et de la bibliothèque de modèles génériques dans Cv5.

En réalisant une recherche dans la base de données des modèles génériques, le concepteur peut extraire les solutions qu'il a retenues afin de les implémenter dans ce nouvel environnement, et ainsi générer un nouveau produit conforme aux contraintes du client. Pour permettre l'instanciation de ce modèle, il doit sélectionner différents éléments du produit et en l'occurrence, les éléments filaires du squelette. La fenêtre flottante illustrée en figure 74 représente l'interface contextuelle d'implémentation du principe de solution par agrafage. En effet, ces éléments vont permettre de créer la géométrie afin que le produit nouvellement développé soit en adéquation avec son environnement. De plus, il doit sélectionner interactivement (ou peut utiliser une reconnaissance de paramètres si les noms sont similaires dans l'architecture et le modèle générique) les différents paramètres spécifiques afin que la

géométrie créée s'adapte aux nouvelles contraintes. Dans notre cas d'application, le concepteur doit sélectionner par exemple le cercle représentant le diamètre extérieur du capteur ainsi que son axe afin de déterminer le corps du support, et doit sélectionner la peau de pare-chocs afin d'adapter le principe de solution agrafage au plan de forme. De plus, le concepteur doit sélectionner les paramètres spécifiques déduits du paramètre fonctionnel de l'arrachement du support par rapport à la peau de pare-chocs (F_a) de telle sorte que les différentes instances des modèles génériques s'adaptent à cette nouvelles contrainte.

Ainsi, si une contrainte fonctionnelle est amenée à être changée en cours de conception, le concepteur peut s'adapter directement en modifiant le paramètre fonctionnel impacté. La modification de ce paramètre va modifier les paramètres spécifiques mis en relation par l'intermédiaire des règles métier et impacter l'auto-adaptation des modèles génériques afin de générer une nouvelle adaptation de la géométrie.

Une fois les différents modèles génériques implémentés, le concepteur doit maintenant réaliser le reste du modèle en utilisant les méthodologies traditionnelles de modélisation. Dans notre cas d'application, le concepteur modélise les "finitions" du support pour permettre de finaliser le capteur dans le support. Il s'agit notamment des congés de raccordement entre le corps et la solution d'agrafage. Nous pouvons alors visualiser la solution, représentée à gauche sur la figure 75, et constater la présence de trois oreilles d'agrafage. Le support est représenté en traits gras et la peau de pare-chocs ainsi que le capteur sont représentés en traits fins pour permettre de les différencier.

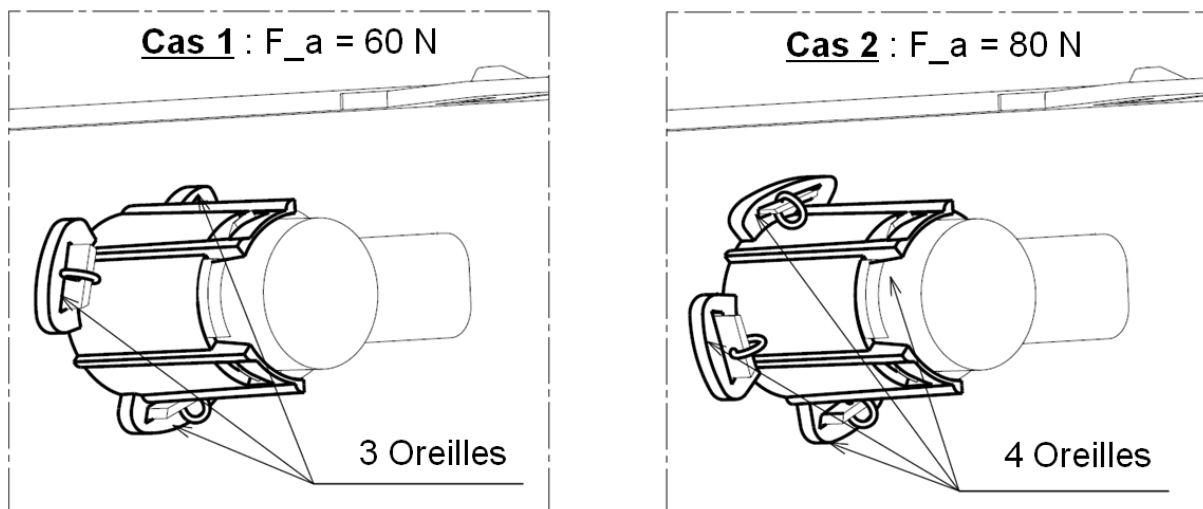


Figure 75 : Résultat graphique des deux supports générés dans les deux configurations.

Il s'agit maintenant d'exploiter les paramétrages de l'architecture. Dans ce but, le concepteur doit modifier un des paramètres fonctionnels. En effet, suite à une modification du cahier des charges fonctionnel, le paramètre fonctionnel de l'arrachement du support par rapport à la peau de pare-chocs (F_a) évolue. La valeur passe de $F_a = 60\text{N}$ à $F_a = 80\text{N}$. La simple modification de ce paramètre dans le modèle CAO modifie directement la géométrie et ce qui génère un nouveau produit conforme aux règles métier de l'entreprise. Nous pouvons

alors constater que le nouveau produit, illustré à droite sur la figure 75, est constitué de quatre oreilles d'agrafage (au lieu de trois) afin d'être en adéquation avec le nouveau paramètre fonctionnel d'arrachement.

4.2.2.6 Résultats obtenus

Dans un premier temps, après avoir réalisé l'ensemble des étapes de notre méthodologie, nous sommes en possession de deux différents produits ayant la même architecture mais ayant des configurations fonctionnelles différentes. En faisant évoluer ces configurations, il est possible de générer une gamme de nouveaux produits de manière quasi instantanée. Le développement initial de l'exemple étudié avait nécessité une durée de modélisation d'environ 2 heures. L'application de la méthodologie de conception et de modélisation proposée implique environ 3 heures pour constituer les modèles génériques, mais moins de 1 minute pour générer n'importe quel nouveau produit de la gamme, tout en respectant l'ensemble des contraintes fonctionnelles.

Dans un deuxième temps, nous avons alimenté la base de données de modèles génériques d'un nouvel élément. En effet, cette méthodologie permet de ne pas oublier de mettre une solution potentielle en tant que modèle générique.

Dans un troisième temps, tous les paramètres en provenance du cahier des charges sont intégrés dans le modèle géométrique. Cette intégration permet de valider la bonne collaboration entre l'acteur marketing, l'expert métier et le concepteur.

Enfin, on peut déduire que l'utilisation du PLM ACSP a été bien perçue par les utilisateurs au regard de la collaboration qu'ils ont pu établir, ne nécessitant pas l'utilisation d'autres systèmes.

De ce fait, nous considérons que la limite établie dans la première expérimentation est ici inexistante. Cette évolution permet d'envisager un passage de la méthodologie à une échelle industrielle. Il s'agit dans le paragraphe suivant de déployer une utilisation à l'échelle du bureau d'études ETD afin d'observer l'exploitation de ce modèle à plus grande échelle.

4.2.2.7 Déploiement de la méthodologie

Suite aux précédentes expérimentations, le déploiement de cette méthodologie a été réalisé au sein du bureau d'études ETD. Début 2007, seules les étapes 4 et 5 de la méthodologie ont été appliquées. En effet, l'utilisation d'une application de PDM industrielle spécifique à l'organisation a empêché de déployer la plateforme de PLM ACSP. Les étapes 4 et 5 peuvent ainsi être appliquées indépendamment des étapes précédentes. En effet, la seule limite que l'on rencontre est l'impossibilité de fournir au concepteur une architecture paramétrée et réglée. Cependant, comme évoqué dans l'étape 4 des précédentes expérimentations, les modèles génériques contiennent des paramètres spécifiques et des règles spécifiques correspondantes aux règles métier de la société. De ce fait, la modification d'un paramètre fonctionnel engendrant une adaptation de la géométrie ne peut pas être suivie par un indicateur.

Deux types de modèles génériques ont directement été mis en application. Correspondant à la typologie des modèles génériques détaillée dans le paragraphe 3.4.3, des modèles génériques répondant à la fonction d'adaptation, en l'occurrence correspondant à la notion de principes de solution développée dans la précédente expérimentation, et remplissant la fonction de contrôle et de correction ont été déployés. Nous les avons alors respectivement nommés les modèles génériques de type spécifique et de type contrôle.

Afin d'étudier leurs comportements, ces modèles génériques ont fait l'objet d'un suivi en termes d'utilisation. Pour chaque modèle, des statistiques d'utilisation anonymes ont été établies. Les informations suivantes ont été capitalisées :

- La date d'utilisation
- Le nom du modèle générique utilisé
- Le nom du projet auquel le générique a été appliqué

Ces statistiques permettent ainsi de suivre l'utilisation du générique et de déterminer à quel moment du projet il est utilisé.

La procédure utilisée pour permettre d'établir ces statistiques est la mise en place d'un algorithme de suivi qui se déploie lors de l'instanciation du modèle générique. Il agit alors sur un fichier texte où il vient écrire les trois informations retenues précédemment. La figure 76 représente un extrait de l'indicateur de suivi pour le mois d'avril 2007. Nous pouvons voir dans la première colonne le nom du modèle générique utilisé, dans la seconde, la date d'utilisation et le projet d'instanciation dans la troisième.

indicateur_2007_4.indv5 - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

| | | |
|-------------|------------|--------|
| Generique_1 | 06/04/2007 | Prj034 |
| Generique_1 | 06/04/2007 | Prj034 |
| Generique_1 | 06/04/2007 | Prj034 |
| Generique_1 | 06/04/2007 | Prj034 |
| Generique_1 | 06/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 06/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 06/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 06/04/2007 | Prj002 |
| Generique_2 | 10/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 10/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 10/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 10/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 11/04/2007 | Prj034 |
| Generique_1 | 11/04/2007 | Prj034 |
| Generique_2 | 11/04/2007 | Prj031 |
| Generique_2 | 11/04/2007 | Prj031 |
| Generique_2 | 11/04/2007 | Prj031 |
| Generique_1 | 12/04/2007 | Prj002 |
| Generique_2 | 12/04/2007 | Prj002 |

Figure 76 : Extrait de l'indicateur de suivi pour le mois d'avril 2007.

Le graphique établi, représenté sur la figure 77, propose le taux d'utilisation sur la période de septembre 2007 à septembre 2008. Nous ne proposons pas les statistiques d'utilisation avant septembre pour cause de non mise à disposition de génériques spécifiques au bureau d'études avant cette période. De la même manière, nous ne présentons pas les taux

d'utilisation après septembre 2008 à cause de la conjoncture industrielle actuelle qui a faussé l'indicateur.

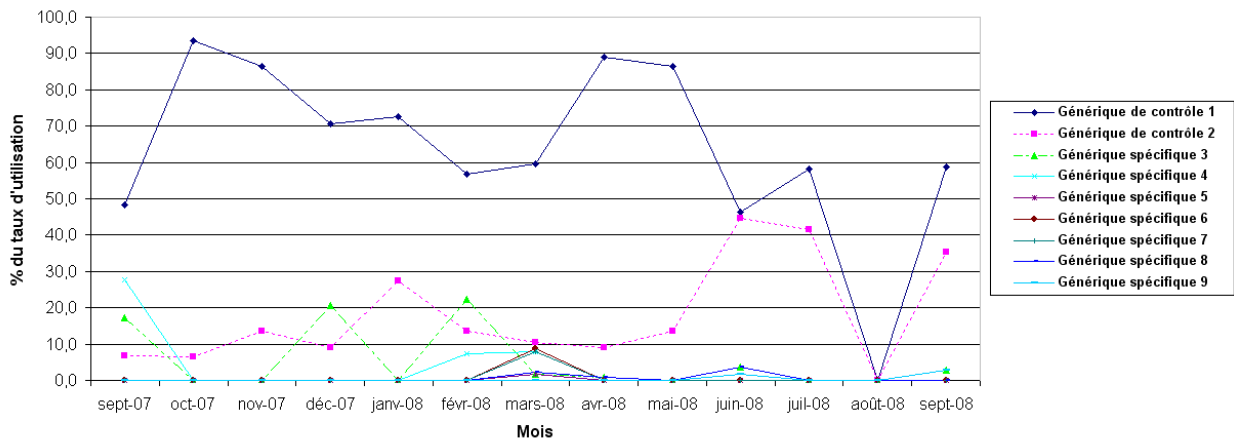


Figure 77 : Statistique de suivi des utilisations des modèles génériques pour la période septembre 2007 à septembre 2008 au sein du bureau d'études ETD.

Nous pouvons observer sur ce graphique le taux d'utilisation en pourcentage en ordonnée et le mois en abscisse. Il s'avère que deux tendances d'utilisation ressortent. Une tendance d'utilisation qualifiée de "continue" et une autre que nous pouvons qualifier de "périodique". Ces tendances semblent corrélées avec le type de générique analysé. Les deux modèles génériques de contrôle ont un taux d'utilisation continu contre un taux d'utilisation périodique pour les modèles de type spécifique.

De ce fait, nous pouvons déterminer deux constats suite à cette expérimentation industrielle :

Le taux d'utilisation des génériques de contrôle est élevé et continu dans le temps.

Le taux d'utilisation des génériques spécifiques est faible et ponctuel.

Suite à ces deux constats, nous devons dresser un bilan afin de comprendre pourquoi les concepteurs n'utilisent pas de la même manière les modèles génériques de contrôle et les modèles génériques spécifiques. Cette réflexion est traitée dans le paragraphe suivant.

4.2.2.8 Bilan de l'expérimentation :

Nous pouvons avancer que la méthodologie proposée dans cette expérimentation fonctionne techniquement. En effet, la méthodologie permet d'être plus réactif dans les phases de conception routinière en utilisant des modèles génériques paramétrés fonctionnellement.

Cependant, selon les statistiques d'utilisation en milieu industriel, cette méthodologie n'est pas ou peu utilisée par les concepteurs. En effet, son principe repose essentiellement sur l'utilisation de modèles génériques spécifiques. Cependant, nous avons établi que l'utilisation de ce type de modèles génériques est faible et ponctuelle. De ce fait, nous devons déterminer les causes de cette non-utilisation.

A travers un entretien personnalisé avec chacun des concepteurs, il en ressort deux tendances distinctes. La première cause identifiée est un manque d'informations et un manque de formation. En effet, dans un premier temps, les concepteurs disent ne pas connaître l'existence des modèles génériques spécifiques. De ce fait, ils ne peuvent pas les utiliser. Dans un second temps, ils stipulent que même si ils connaissent l'existence de quelques modèles spécifiques, ils ne savent pas les utiliser et, de ce fait, ils ne les utilisent pas par crainte de passer trop de temps à comprendre son instanciation. La seconde cause serait le renouvellement rapide des principes techniques retenus et des règles métier associées notamment dans les domaines de la conception plastique. En effet, le retour sur investissement lié à la capitalisation des connaissances sous forme de modèles génériques est difficile à justifier auprès d'eux et de ce fait, n'est pas appliqué.

Le paragraphe suivant nous permet de discuter de ces résultats expérimentaux afin de déterminer les nouvelles orientations méthodologiques envisageables.

4.3 Vers un paradigme d'aide à la décision fondé sur les cas précédents

A travers le chapitre précédent, nous avons établi une méthodologie de conception qui permet au concepteur de définir une définition numérique fonctionnelle. Ce chapitre nous a permis d'avancer, notamment en intégrant le concept de principes de solution, afin de correspondre aux contraintes complexes qui résident dans la conception d'une pièce plastique pour l'industrie automobile.

Bien que la dernière expérimentation permette de valider cette méthodologie du point de vue technique, il s'avère, lors de son utilisation libre en milieu industriel, qu'elle n'est que peu utilisée. La principale raison étant l'évolution rapide des principes techniques retenus et des règles métier associées lors de modélisation des modèles génériques. De ce fait, ces modèles sont alors utilisés principalement lors de leur première mise à disposition et ensuite seulement ponctuellement.

Avant même la première expérimentation qualifiée d'académique, nous avons alors émis l'hypothèse qu'il était possible de capitaliser les règles métier de l'entreprise afin de développer des architectures de produit paramétrées et réglées pouvant ainsi accueillir des modèles génériques (hypothèse 4). En s'appuyant sur ces deux années d'expérimentation de suivi, il s'avère que notre première hypothèse formulée dans un environnement de conception et de développement de produits mécanique n'est pas valide dans le domaine produit de la plasturgie. Or, une pièce issue de la conception mécanique résulte de primitives dites de type canonique. Ces mêmes primitives ont permis de fonder l'approche CSG (détaillée dans le second chapitre). La première expérimentation universitaire réalisée dans le chapitre précédent résulte de cette même hypothèse. En effet, nous étions seulement en présence de cylindres, éléments primitifs de la représentation CSG.

Afin de pouvoir répondre à notre problématique initiale qui consiste à optimiser les temps consacrés à la conception dite routinière, il est alors nécessaire de changer de

paradigme pour fournir au concepteur une aide à la décision efficace. C'est l'objet du prochain paragraphe.

4.4 Proposition d'un nouveau modèle méthodologique

Pour répondre à ce nouveau besoin, il s'agit d'intégrer un nouveau paradigme. En accord avec l'état de l'art réalisé dans le cadre de nos travaux de recherche, le modèle de Case Based Reasoning (CBR), en français raisonnement à partir de cas (RàPC), semble être le plus adapté à notre besoin. En effet, l'approche "bréviaire" (appelé aussi guide de conception) utilisée jusqu'à maintenant afin de capitaliser les règles métier ne permet pas de s'adapter aux contraintes de notre bureau d'études industriel. En outre, le temps de mise à jour des bréviaires ne correspond pas au renouvellement rapide des règles au sein de l'industrie. De ce fait, la mise à jour des modèles génériques nécessitent beaucoup de ressources pour trop peu d'utilisation.

L'approche de raisonnement à partir de cas semble alors plus adéquate. Dans cette approche, le concepteur utilise les cas précédents pour s'orienter dans son processus de décision afin de créer de nouvelles connaissances. La suite de ce paragraphe détaille ce nouveau paradigme et présente ainsi les nouveaux modèles méthodologiques associés.

4.4.1 Présentation du modèle méthodologique fondé sur du CBR

Une approche fondée sur du raisonnement à partir de cas nécessite de répondre aux cinq besoins initiaux exposés dans le second chapitre. Pour ce faire, nous devons définir la représentation des connaissances utilisées lors de notre cycle ainsi que les méthodes de recherche de ces connaissances, de leur réutilisation, de leur révision ainsi que de leur capitalisation.

Le modèle méthodologique proposé en figure 78 permet de répondre à notre besoin. Il est composé de huit étapes (quatre étapes principales et quatre étapes transitoires).

Ce modèle est initialisé par le responsable qui définit le besoin. Ensuite, un processus informatique permet de retrouver les principes de solution afin de les mettre à disposition de l'architecte produit pour qu'il puisse définir l'architecture produit. Dans le cadre des premiers essais, le système informatique établit une recherche syntaxique. Cependant, ce principe reste très difficile à maîtriser. En effet, l'architecte produit utilise ses propres mots clés pour établir la recherche et de ce fait, s'il utilise un terme différent ou réalise une faute d'orthographe, le système ne lui mettra pas à disposition les bons principes de solution. Ce premier constat nous pousse à penser qu'il faut faire évoluer ce principe syntaxique vers un principe sémantique en utilisant des ontologies. Suite à la définition de la nouvelle architecture, un système informatique met à disposition du concepteur les principes de solution pour qu'il puisse les réutiliser et ainsi modéliser la définition numérique. Avant de réaliser la validation numérique finale en présence de toute l'équipe projet, le concepteur se sert du modéleur géométrique afin de réviser sa première modélisation pour s'assurer qu'elle correspond aux contraintes de

conception. Quand le modèle est validé, on retient les évolutions que sa conception a subies durant la révision afin de pouvoir la considérer dans un prochain projet.

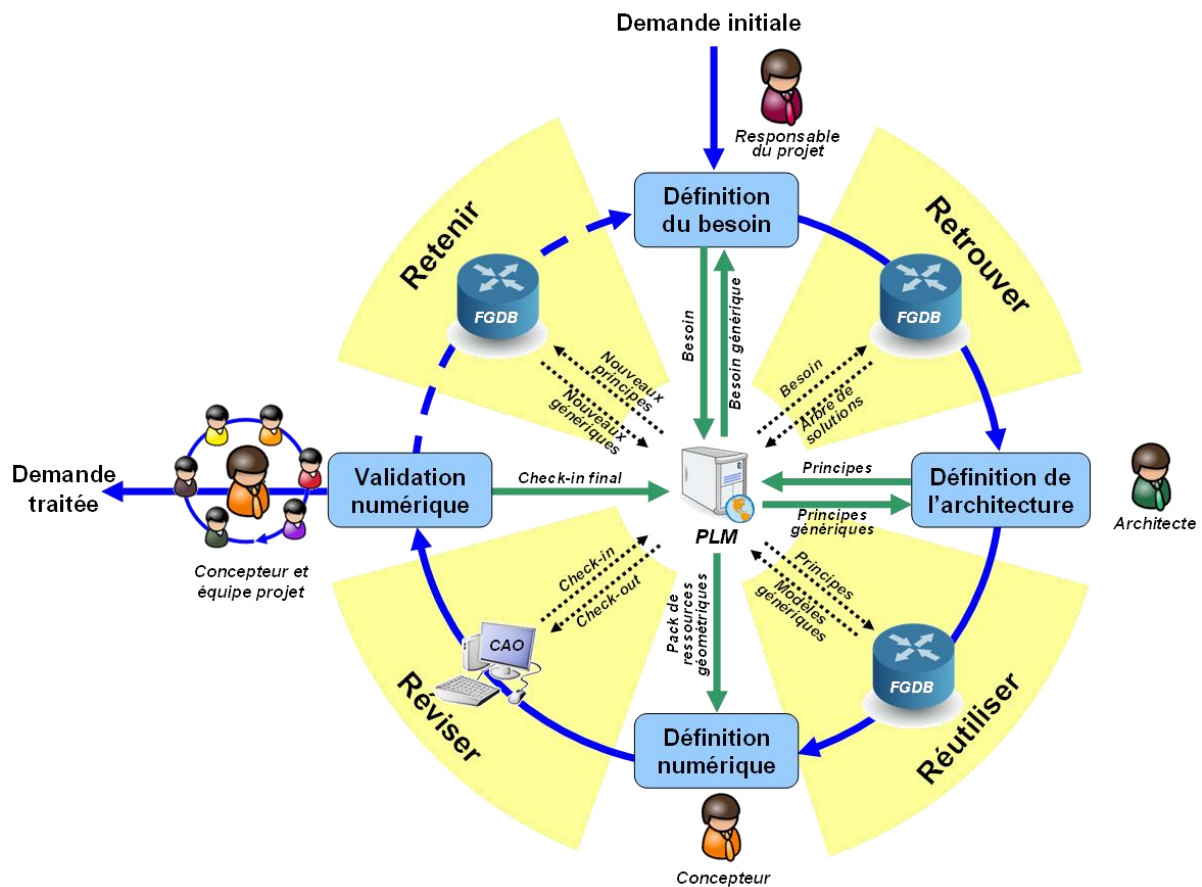


Figure 78 : Modèle méthodologique appelé FGDBR fondé sur le paradigme de raisonnement à partir de cas et s'appuyant sur les travaux de Aamodt et Plaza [1994]

La suite de cette section détaille toutes les étapes de ce processus ainsi que les modèles retenus pour y parvenir. Nous proposons d'utiliser l'acronyme FGDBR correspondant à "Functional Geometry Based Reasoning" qui est la traduction anglaise pour un "système de raisonnement fondé sur les géométries fonctionnelles".

Cet acronyme est réalisé à l'image des travaux fondés sur le paradigme de raisonnement à partir de cas tels que l'EBR (Exemplar-based reasoning [Karlsson et al., 2008]), l'IBR (Instance-based reasoning [Fdez-Riverola et al., 2007]) ou encore l'ABR (Analogy-based reasoning [Wojna, 2005]).

4.4.2 Notre modèle de représentation des connaissances

Dans la méthodologie établie dans le chapitre précédent, nous avons détaillé comment obtenir deux données en relation :

- *Le besoin fonctionnel* : représenté par le vecteur R
- *Une géométrie fonctionnelle* : appelée G_f , composée d'une zone fonctionnelle et d'une interface fonctionnelle.

En utilisant la définition précédente de l'information et ayant comme objectif d'en définir un nouveau type, l'algèbre la plus appropriée pour formaliser ce type de lien est un opérateur logique de type union, et peut être écrit de la façon suivante :

Avec :

$$I_f = R \cup G_f$$

I_f : Interface fonctionnelle
 G_f : Géométrie fonctionnelle
 R : Besoin fonctionnel

- **Identification des connaissances fonctionnelles :**

Selon la définition de Tom Davenport et Larry Prusak détaillée dans le second chapitre, une connaissance est productible lorsqu'une information est soumise à l'étude d'une personne. Une voie possible de diffusion de cette information peut être le PLM. En effet, les concepteurs, susceptibles de créer des connaissances si on leur met à disposition une information, on définit ainsi le potentiel pour créer une connaissance. De cette façon, nous avons mis à disposition, pour les prochaines expérimentations, au sein de notre PLM ACSP la possibilité de visualiser ces informations fonctionnelles (I_f).

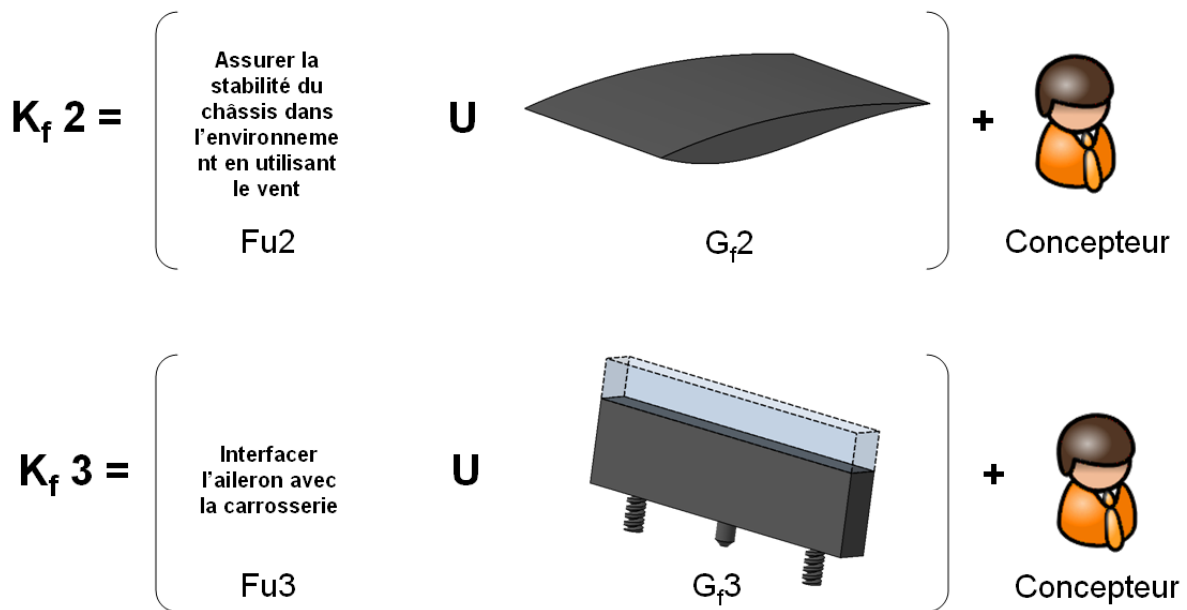
Afin de formaliser cette réflexion, l'opérateur d'addition est utilisé. Avec ce lien, nous pouvons connecter l' I_f et le concepteur (appelé H dans la formule) afin de déterminer l'équation d'une connaissance fonctionnelle (K_f).

Avec :

$$K_f = I_f + H$$

H : Homme
 I_f : Interface fonctionnelle
 K_f : Connaissance fonctionnelle

Si nous reprenons l'exemple de la carrosserie du véhicule de compétition du challenge S.I.A., nous avons identifié deux contraintes dans le chapitre 3. Grâce à la propagation et à la définition d'une I_f , il est possible de connecter cette dernière à la G_f . La figure 79 reprend les deux fonctions ainsi que les G_f correspondantes afin de définir deux nouvelles K_f .



Avec :

Fu : Fonction
 Gf : Géométrie fonctionnelle
 Kf : Connaissance fonctionnelle

Figure 79 : Exemple de deux K_f mettant en lien le concepteur, le besoin et la géométrie fonctionnelle

• **Utilisation d'une K_f**

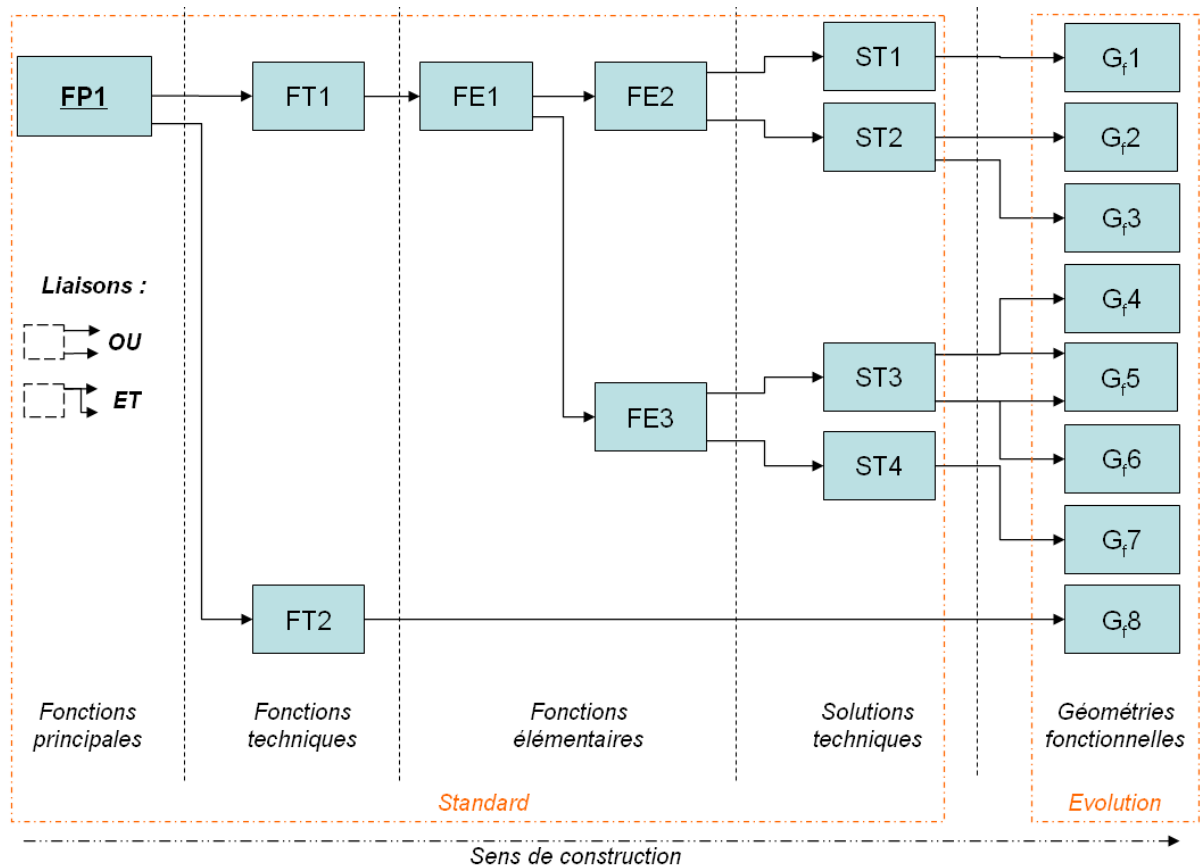
Le point le plus important à retenir est que l'on est maintenant capable de gérer ce nouveau type de connaissance avec la méthodologie traditionnelle de gestion des connaissances. Nous pouvons déterminer, en s'appuyant sur le cycle de vie de la connaissance proposé par Millard et al. [2006], cette gestion comme suit :

- **Partager** : A travers le PLM ACSP, le concepteur a la possibilité d'utiliser les K_f à chaque étape du cycle de vie du produit. En effet, la K_f n'étant liée à aucune vue spécifique du système, elle est exploitable en toutes circonstances et est de plus multi-métiers.
- **Maintenir** : La connaissance est mise en relation avec différents indicateurs. Ces indicateurs vont déterminer la robustesse de la connaissance. Nous pouvons ainsi retrouver des indicateurs de coût ou de qualité. Ces indicateurs peuvent être implémentés dans le PLM ACSP via les processus de Rex réalisés en développement comme en production
- **Protéger** : La connaissance est directement intégrée dans le PLM ACSP. De ce fait, elle utilise les mêmes principes sécuritaires que ce système.
- **Mettre à jour** : la connaissance est aussi visible par les différents experts. S'il y a une modification de la G_f ou du vecteur R, la K_f est directement mise à jour.

4.4.3 Notre méthode de recherche

Il s'agit d'utiliser l'approche empruntée par la méthodologie FAST afin de déterminer la méthode de recherche à appliquer. En effet, la méthode FAST permet de déterminer, à partir d'une fonction technique, les principes de solution qui y sont rattachés. Dans ce cadre, nous pouvons rattacher une G_f à chaque solution technique (ST) envisagée afin de pouvoir la proposer.

La figure 80 définit la méthodologie FAST ainsi que l'évolution proposée. La partie gauche du modèle représente la méthodologie FAST standard [NF EN 1325-1, 1996] et la partie droite, l'évolution du modèle. Cette évolution permet de disposer, dans le modèle du FAST, les géométries fonctionnelles correspondantes aux solutions techniques.



Avec la symbolique suivante :

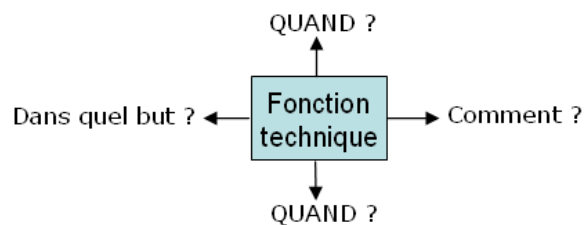
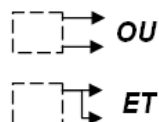


Figure 80 : Modèle du FAST incluant les Géométries Fonctionnelles

Dans cette représentation, les liaisons OU nous permettent de déterminer les alternatives de conception possibles, et les liaisons ET le principe de solution à retenir.

Ainsi, le tableau 11 nous propose les six alternatives de conception établies dans le FAST précédemment exposé :

| Besoin initial | Principes de solution |
|----------------|---|
| FP1 | FT1 + FE1 + FE2 + ST1 + G _f 1 |
| FP1 | FT1 + FE1 + FE2 + ST2 + G _f 2 |
| FP1 | FT1 + FE1 + FE2 + ST2 + G _f 3 |
| FP1 | FT1 + FE1 + FE3 + ST3 + G _f 4 + G _f 5 |
| FP1 | FT1 + FE1 + FE3 + ST3 + G _f 5 + G _f 6 |
| FP1 | FT1 + FE1 + FE3 + ST4 + G _f 7 |
| FP1 | FT2 + G _f 8 |

Tableau 11 : Alternatives de conception fondées sur le FAST

Ainsi nous sommes à même de pouvoir proposer tous les principes de solution répondant à un besoin initial identifié.

Dès lors, l'architecte produit choisit dans cette étape les principes de solution retenus en les sélectionnant via le FAST proposé par le PLM ACSP. Etant donné que les solutions génériques sont rattachées à des modèles génériques correspondants, le PLM ACSP est à même de pouvoir générer l'architecture produit paramétrée et réglée suivant le principe énoncé dans le précédent modèle méthodologique proposé. De plus, il met alors à disposition les modèles génériques correspondant à cette architecture.

4.4.4 La méthode de réutilisation proposée

Le principe de réutilisation retenu est l'utilisation des modèles génériques au sein des modeleurs géométriques. Comme nous l'avons détaillé dans les expérimentations précédentes, nous avons établi les possibilités d'adaptation du modèle générique dans son nouvel environnement. On propose dans cette méthode de générer pour chaque géométrie fonctionnelle un modèle générique.

Ainsi, quand le concepteur a besoin de réutiliser une géométrie fonctionnelle sélectionnée par l'architecte lors de l'étape précédente, il utilise le modèle générique correspondant. Par la sélection interactive des éléments de référence au sein du modelleur géométrique, le modèle générique s'adapte aux références et génère ainsi une nouvelle géométrie. De cette manière, la géométrie fonctionnelle est réutilisée dans le nouveau cas d'étude.

De ce fait, lors du démarrage de l'étape, le PLM ACSP met à disposition du concepteur l'ensemble de l'architecture produit paramétrée et réglée ainsi que les modèles génériques correspondants. Nous appelons alors cet ensemble le "Pack de ressources Géométriques".

4.4.5 La méthode de révision proposée

Cette étape du cycle de CBR (Case Based Reasoning) est celle qui est la moins détaillée au sein des modèles et méthodes proposés dans la littérature, en accord avec les travaux de Cordier et Fuchs [2005] qui stipulent que l'étape de révision est trop souvent rudimentaire. En effet, nous avons révélé de nombreux types d'adaptation du CBR, comme le l'EBR (Experience Based Reasoning) ou l'IBR (Instance Based Reasoning), mais aucun de ces modèles ne propose un moyen de révision explicite.

Dans notre proposition, la méthode de révision de modèle FGBR est explicite et identifiée. Utilisant le PLM comme vecteur commun au sein de notre cycle, et plus spécifiquement le modeleur géométrique pour le concepteur, nous utilisons ce dernier comme moyen de révision. En effet, lors de la phase de conception, le concepteur modifie sa définition numérique afin de la faire correspondre aux concepts proposés. Or, dans notre cycle, nous lui avons déjà mis à disposition des géométries fonctionnelles. Ainsi, quand le concepteur modifie ces géométries fonctionnelles adaptées, pour en obtenir des nouvelles, nous sommes bien en présence d'une révision de géométrie fonctionnelle.

4.4.6 Notre méthode de capitalisation

Nous détaillons dans ce paragraphe comment extraire une K_f (Connaissance Fonctionnelle) lors du processus de conception.

Le processus proposé ci-dessous permet de capitaliser à la volée, et pour chaque nouveau cas d'étude, les nouveaux K_f . En effet, ce processus est déclenché lors du check-in final dans le PLM ACSP par les concepteurs. La figure 81 représente les quatre étapes du processus de capitalisation (extrait du cycle de CBR présenté sur la figure 78) faisant intervenir l'acteur principal, le concepteur, et un acteur métier secondaire. Cet acteur métier est normalement l'architecte produit, mais tous les acteurs métier sont susceptibles de pouvoir exploiter ce processus. La première étape consiste à mettre à disposition dans le système de PLM ACSP la définition numérique validée par le concepteur, la seconde à la traiter, la troisième à mettre à disposition le traitement et la quatrième à être exploitée par un acteur métier.

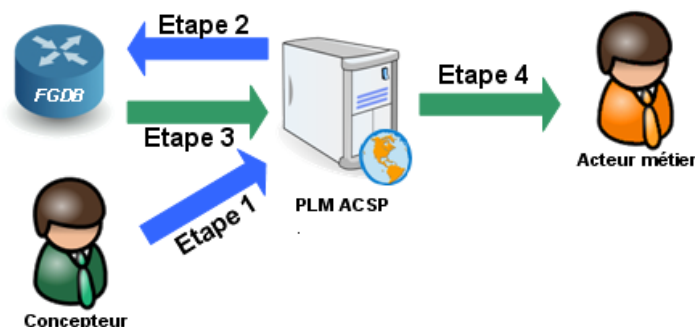


Figure 81 : Processus de capitalisation de K_f

Les quatre étapes de ce processus sont détaillées ci-dessous. Nous présentons l'intégration de ce processus au sein du PLM ACSP.

- **Etape1** : Check-in final de la définition numérique

Dans cette étape, le concepteur réalise un check-in de la pièce dans le PLM ACSP. Cette action est réalisée dans le domaine produit du PLM ACSP. Nous pouvons identifier sur la figure 82 un champ, encadré par un rectangle rouge, permettant de télécharger sur le serveur de données la définition numérique souhaitée.

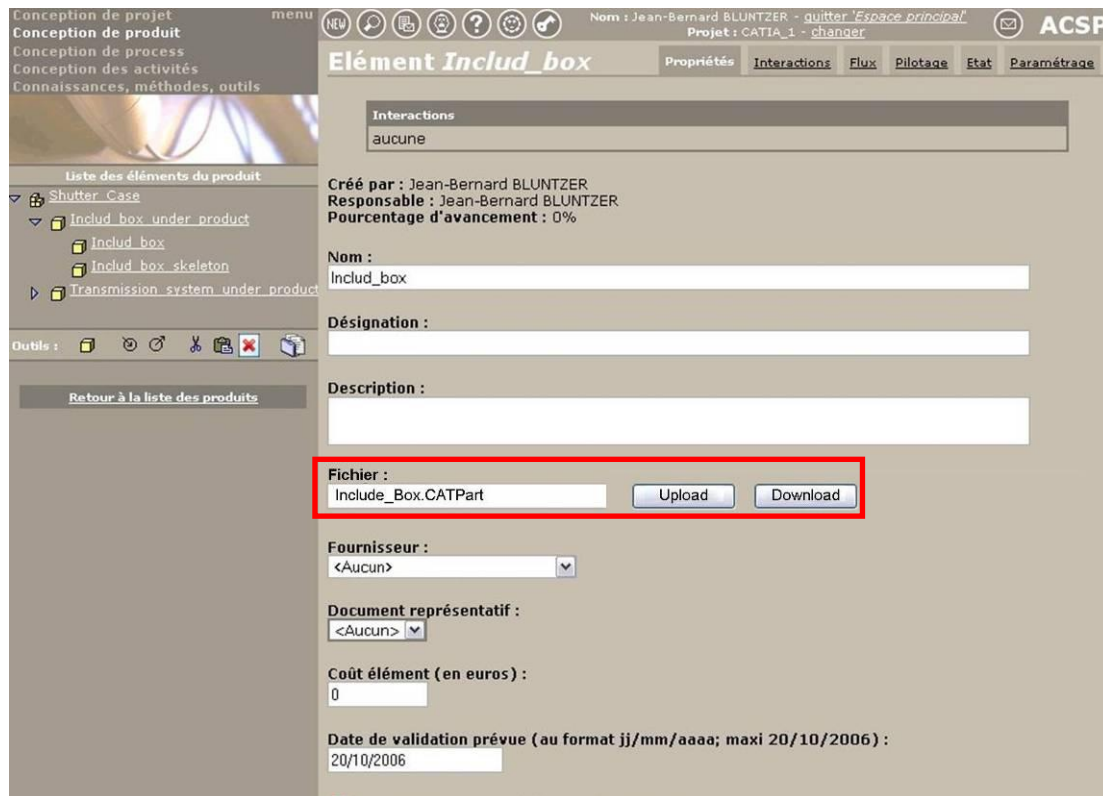


Figure 82 : Maquette de l'interface utilisateur pour le processus de Check-In

- **Etape 2** : Traitement de la définition numérique

Cette étape est réalisée en transparence face aux utilisateurs. Le modèle numérique est transféré automatiquement du poste de l'utilisateur vers la base de données de l'ACSP.

Cette étape consiste à répliquer le modèle numérique afin d'envoyer sa copie sur le FGDB (Functional Geometry Data Base, en français Base de données des géométries fonctionnelles). L'objectif de cette procédure de réplication consiste à ne pas modifier la pièce d'origine. Une fois répliquée et à disposition sur le serveur CAO, le modèle numérique est démarré en mode "batch" afin d'être piloté à distance. L'utilisation d'un script spécifique permet d'exploser la pièce en différentes sous-pièces indépendantes, chacune d'elles représentant une G_f de la pièce initiale.

La partie de droite de la figure 83 représente la structure des fichiers envoyés sur le serveur CAO et la partie de gauche représente la structure des fichiers une fois l'action d'explosion effectuée. On peut noter dans cet exemple que la pièce "Includ_BOX.CATPart"

est composée de quatre G_f différentes : un "Cutout_nut", un "Cutout_screw", un "Panel1" et un "Panel2".

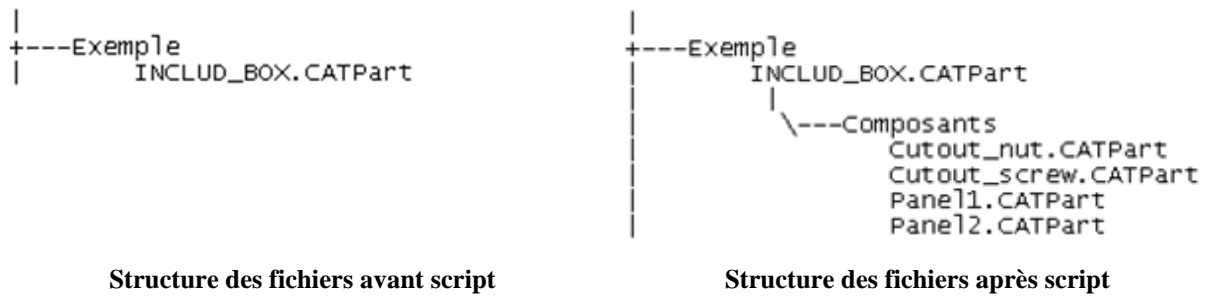


Figure 83 : Structure des fichiers avant et après le script de traitement.

De plus, cette étape permet de générer des fichiers de visualisation afin de pouvoir mettre à disposition au sein du PLM ACSP une représentation graphique de chaque G_f .

- **Etape 3 :** Mise à disposition des G_f

L'étape 3 permet la mise à disposition des nouveaux fichiers utilisables au sein du modelleur géométrique (pour Cv5 : CATPart) et des fichiers de visualisation (pour Cv5 : 3DXML). Cette étape consiste à transférer ces éléments de sortie du script vers la base de données du PDM.

- **Etape 4 :** Exploitation des G_f

Cette étape consiste à mettre à disposition des différents acteurs les nouveaux G_f via une interface spécifique dans le PLM ACSP.

L'Expert Produit doit pouvoir télécharger les nouvelles G_f générées via une interface graphique spécifique. Afin d'illustrer l'implémentation de cette fonction au sein du PLM ACSP, la figure 84 propose une maquette de l'IHM. L'utilisateur a la possibilité de les choisir en utilisant l'onglet "Entités". La génération d'une K_f a lieu durant cette étape. Dans ce cas, l'acteur métier extrait la G_f et l'analyse par rapport aux différentes fonctions dans lesquelles il a été impliqué en utilisant la procédure détaillée dans le paragraphe précédent. L'encadré sur la figure représente l'interface de téléchargement des géométries fonctionnelles.

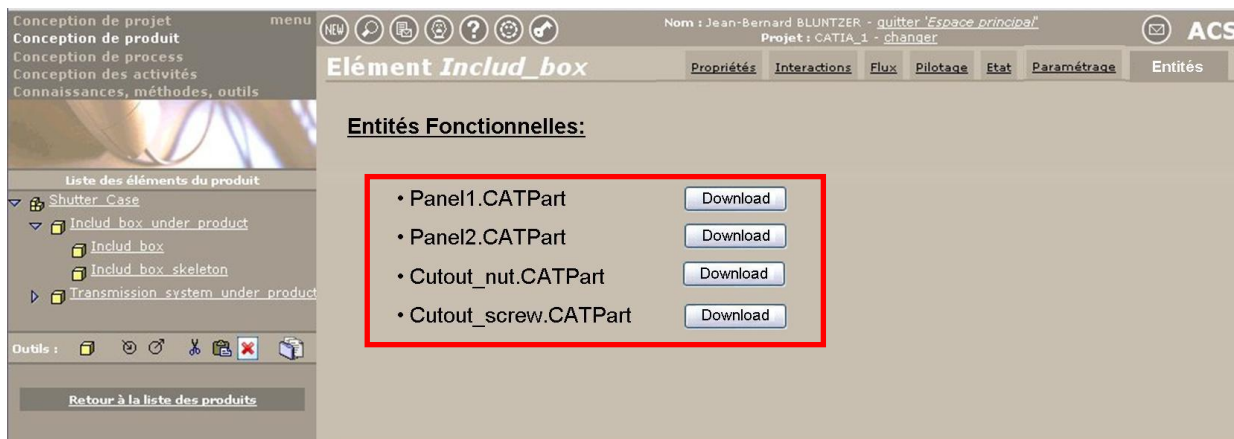


Figure 84 : Maquette de l'interface utilisateur de l'ACSP pour le processus de téléchargement.

Nous avons détaillé dans ce modèle comment générer une K_f afin de la remettre à disposition des différents acteurs métier gravitant autour du produit durant toutes ces phases de vie.

De plus, toutes les K_f peuvent être validées, de la même façon qu'une règle métier, à travers une Expert Rule Validation (en français Validation de Règle Métier) afin d'être réutilisées par la suite.

4.5 Discussion

Le modèle méthodologique précédemment détaillé permet de mettre à disposition de l'architecte les I_f en fonction des besoins définis par le chef de projet. De plus, chaque I_f est mise à disposition du concepteur afin qu'il puisse les exploiter lors de la conception sous la forme d'un modèle générique. Cette exploitation systématique, ainsi que l'adaptation de ces I_f au nouvel environnement permet ainsi d'alimenter automatiquement la base de G_f afin de les proposer dans des nouveau cas.

Bien-sûr, il s'agit d'expérimenter ce nouveau modèle en milieu industriel, ce que nous ferons dans le chapitre qui suit.

Mais avant de traiter cette expérimentation, il convient d'évoquer quelques points de discussion sur les résultats obtenus au cours du présent chapitre.

Rappelons que nous avons établi à travers les précédents chapitres différents modèles méthodologiques fondés sur l'intégration des connaissances métier lors de la conception de produits.

Nous avons, au cours d'une première expérimentation conduite dans un contexte académique, validé la possibilité d'intégrer les connaissances métier au sein du processus de conception. Cette première expérimentation nous a amené à faire évoluer ce processus de conception vers un processus qui fédère l'ensemble des acteurs métier qui s'appuie sur une plateforme de PLM qui implique un nouvel acteur métier qu'est l'expert CAO. Les limites identifiées nous ont permis d'établir différentes méthodologies spécifiques afin de définir une architecture produit, une architecture pièce, un processus de validation des connaissances et un modèle générique. Cette expérimentation nous a également permis de valider dans un contexte industriel la première, la troisième et la quatrième hypothèses de notre travail de recherche rappelées ci-dessous:

Hypothèse 1 : *"L'accélération du processus de conception de produits peut être obtenue en réduisant les temps qui sont dédiés à la reconception."*

Hypothèse 3 : *"Le lien entre besoin fonctionnel et géométrie peut être établi au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels permettant ainsi une plus grande réactivité dans les phases de reconception de produits."*

Hypothèse 4 : *"La capitalisation et l'exploitation des informations métier par les concepteurs peuvent être réalisées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels."*

L'évolution du processus de conception nous a permis d'initialiser une expérimentation, conduite dans le présent chapitre, dans un contexte industriel. Les résultats ont montré que l'on a rapidement atteint certaines limites du modèle proposé en raison de la complexité des pièces étudiées. Nous pouvons notamment rappeler que la première expérimentation est appliquée à des pièces mécaniques et que la seconde, à des pièces intégrant des surfaces complexes. De ce fait, nous avons intégré le concept de principe de solution qui permet de valider ce modèle en milieu industriel. Après un suivi de ce modèle pendant un an, nous avons remarqué qu'il était peu utilisé. En effet, le taux d'utilisation des génériques de contrôle est élevé et continu dans le temps mais le taux d'utilisation des génériques spécifiques est faible et ponctuel. Ces résultats complètement nouveaux nous ont poussé à réfléchir sur les données à fournir aux concepteurs pour une réelle exploitation dans le processus de conception. Ce point sera discuté plus tard, dans la suite de ces travaux.

Néanmoins, notre expérience conduite dans un contexte industriel a permis de valider plusieurs hypothèses de travail. La première, qui stipule que l'accélération du processus de conception de produits peut être obtenue en permettant au concepteur de réduire les temps qui sont dédiés à la reconception, a été validée à travers l'expérimentation du support capteur. En effet, le changement d'un paramètre fonctionnel (Force d'arrachement) impacte directement la géométrie (quatre oreilles au lieu de trois sur le support capteur) et permet ainsi d'être réactif dans le processus de modification des contraintes de conception. Ce même constat nous amène également à valider notre troisième hypothèse de travail qui stipule que le lien entre besoin fonctionnel et géométrie peut être établi au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels permettant ainsi une plus grande réactivité dans les phases de reconception de produits. Ceci se rapproche des travaux de Chang et Joo [2006] fondés sur l'Axiomatic Design proposé par Suh [1990].

Par ailleurs, l'intégration du modèle de conception au sein d'une plateforme de PLM nous permet aussi de valider notre seconde hypothèse selon laquelle le processus de conception qui est collaboratif peut fédérer l'ensemble des acteurs autour d'un même outil qu'est la plateforme de PLM, facteur de coopération et de collaboration entre les différents acteurs projet en accord avec Gronier et Sagot [2009]. Cette coopération de type asynchrone, selon Tarpin-Bernard et David [1996], facilite les échanges entre les acteurs et favorise la démarche d'innovation tout en redivisant les temps de conception.

Soulignons toutefois que la première partie de l'expérimentation a permis de faire évoluer notre sixième hypothèse de recherche. Cette dernière stipule que l'exploitation des solutions validées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels, sous forme de modèles génériques, permet d'augmenter la réactivité dans le processus de conception de produits. En effet, nous avons introduit le principe de solution dans la seconde partie de

l'expérimentation car un modèle générique ne peut pas représenter une pièce complexe entièrement. Par contre, en la divisant en principes de solution, il s'avère qu'il est possible de les exploiter. Ainsi, nous avons pu faire évoluer notre hypothèse que nous pouvons nommer sixième bis, car s'appuyant sur la sixième, que l'on se propose de vérifier dans le chapitre qui suit.

Hypothèse 6 bis : *" L'exploitation des principes de solution validées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels sous forme de modèles génériques, permet d'augmenter la réactivité dans le processus de conception de produits."*

Les résultats obtenus dans le présent chapitre nous autorisent à avancer que la capitalisation des connaissances au sein ou en lien avec un modeleur géométrique permet aux entreprises de s'affranchir des pertes de connaissances engendrées par le "turnover" et assure ainsi la pérennité des retours sur expériences, ce qui valide notre cinquième hypothèse. Ce résultat confirme les travaux de Gomes [2008] concernant la conception fonctionnelle, structurelle et géométrique à base de connaissances métier de systèmes mécaniques.

A ce stade de nos travaux de recherche, et pour répondre aux différentes limites précédemment exposées, il devient nécessaire de changer de paradigme afin de pouvoir fournir une aide à la décision plus efficace. En accord avec les travaux d'Estevez et al. [2006] qui soulignent que le modèle de raisonnement à partir de cas est adapté dans les phases de pré-étude en conception de produits mécanique, nous considérons que ce modèle semble le plus approprié au milieu industriel, en particulier à celui que nous avons observé.

Ce nouveau processus, intitulé cycle de FGBR, est décomposé en quatre étapes distinctes. Dans un premier temps, il s'agit de définir la représentation des connaissances utilisée dans ce nouveau processus en accord avec la définition de Mach [1995] qui stipule qu'il n'existe pas de connaissance en dehors de l'homme. Nous proposons donc d'utiliser les géométries fonctionnelles et les besoins fonctionnels mis à disposition d'un acteur afin de définir une connaissance exploitable dans notre modèle. Une fois cette connaissance définie, il nous est possible d'initialiser la première étape de notre cycle de FGBR comme nous avons déjà pu déjà le souligner [Bluntzer et al., 2009].

La première étape du cycle de FGBR consiste à formaliser une méthode de recherche des connaissances candidates. Nous proposons donc d'utiliser la méthodologie FAST standard [NF EN 1325-1, 1996] en y intégrant une nouvelle entité qui est la géométrie fonctionnelle. De ce fait, quand l'architecte produit doit établir une nouvelle architecture produit, le système de PLM lui met à disposition directement les géométries fonctionnelles qui sont liées aux besoins fonctionnels initialement identifiés. L'architecte peut alors choisir directement l'architecture produit en connaissant les géométries fonctionnelles qui sont disponibles.

La seconde étape consiste à proposer une méthode de réutilisation. Dans les chapitres précédents, nous avons établi qu'il est possible d'exploiter des solutions validées au sein des

modeleurs géométriques tridimensionnels sous forme de modèles génériques permettant ainsi d'augmenter la réactivité dans le processus de conception de produits. De ce fait, nous proposons dans cette étape d'utiliser les géométries fonctionnelles précédemment identifiées sous forme de modèles génériques. Ainsi, le concepteur récupère ces modèles génériques afin de les réutiliser dans sa nouvelle conception.

La troisième étape consiste à proposer une méthode révision des cas. Comme nous avons pu l'établir à travers les chapitres précédents, lors de la conception du produit, le concepteur modifie ses concepts au sein du système de CAO. Nous proposons alors de suivre les modifications des géométries fonctionnelles établies au sein du modelleur par le concepteur afin de pouvoir établir la révision des cas effectuée.

La dernière étape consiste enfin à capitaliser les différents cas. Le concepteur ayant utilisé un formalisme spécifique pour modéliser ses nouvelles pièces, il nous est alors possible d'extraire les géométries fonctionnelles associées et ainsi les capitaliser pour pouvoir les remettre à disposition par la suite à l'architecte produit.

Ce résultat global, qui est le cycle de FGBR, est particulièrement intéressant car il s'appuie sur le modèle de données systémique "Multi-Domaines et Multi-Vues" (MD-MV) issu des travaux de Gomes et Sagot [2002]. En effet, ce nouveau cycle permet de croiser les différents domaines de conception (par exemple le domaine de conception de projet avec le responsable projet ou encore le domaine de conception de produits avec l'architecte produit ou le concepteur) avec les différentes vues du produit (par exemple la vue fonctionnelle du domaine de conception du projet est liée avec la vue géométrique du domaine de conception du produit). De plus, l'intervention de l'équipe projet permet d'intégrer tous les domaines de conception et vues spécifiques résultant de l'organisation de la société industriel, tels que les domaines de conception de l'usage ou du process.

Afin de mettre à l'épreuve ce nouveau paradigme, fondé sur le cycle de FGBR, nous avons souhaité initier une nouvelle expérience industrielle au sein de FAURECIA décrite dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE 5 :

VALIDATION DU MODELE FGBR AU CONTEXTE

INDUSTRIEL AUTOMOBILE FAURECIA

Dans ce chapitre est détaillée la dernière expérimentation de notre travail de recherche dans laquelle est appliqué le modèle de FGBR. L'objectif du projet consiste à concevoir, dans un premier temps, le pare-chocs complet d'un véhicule automobile et, dans un second temps, de développer un autre pare-chocs pour un autre véhicule de la même gamme en se fondant sur la première conception.

Ce nouveau processus de conception expérimenté permet, par la suite, d'introduire une discussion autour des résultats expérimentaux et d'envisager des perspectives à travers des futurs travaux de recherche.

5.1 3^{ème} expérimentation : Application industrielle du modèle FGBR à une gamme de pare-chocs de véhicules

L'objectif de ce projet est d'expérimenter le modèle méthodologique de conception FGBR à des boucliers ainsi qu'aux pièces qui les composent afin de gagner en productivité lors de la phase de conception routinière. Pour ce faire, nous présentons tout d'abord le projet dans sa généralité, et ensuite nous détaillons chaque étape du modèle FGBR qui lui est appliqué.

Dans la première étape de cette expérimentation, le but est de concevoir, à partir des interfaces de style, un premier bouclier, appelé PC1, en utilisant le modèle méthodologique proposé. Etant la première conception utilisant ce modèle, le PLM ACSP et le FGDB ne contiennent aucune information résultant des projets précédents.

Dans la seconde étape de cette expérimentation, il s'agit de modéliser un nouveau bouclier, appelé PC2, pour un véhicule différent mais de la même gamme en se fondant sur la première modélisation. Le but étant de réutiliser les informations capitalisées lors de la première modélisation et ainsi obtenir une aide à la conception de ce nouveau produit.

La figure 85 illustre le plan de forme du premier véhicule et celui du second véhicule. Nous remarquons sur ces deux plans de forme la similarité de certaines zones comme la zone grille ou la zone trappe anneau.

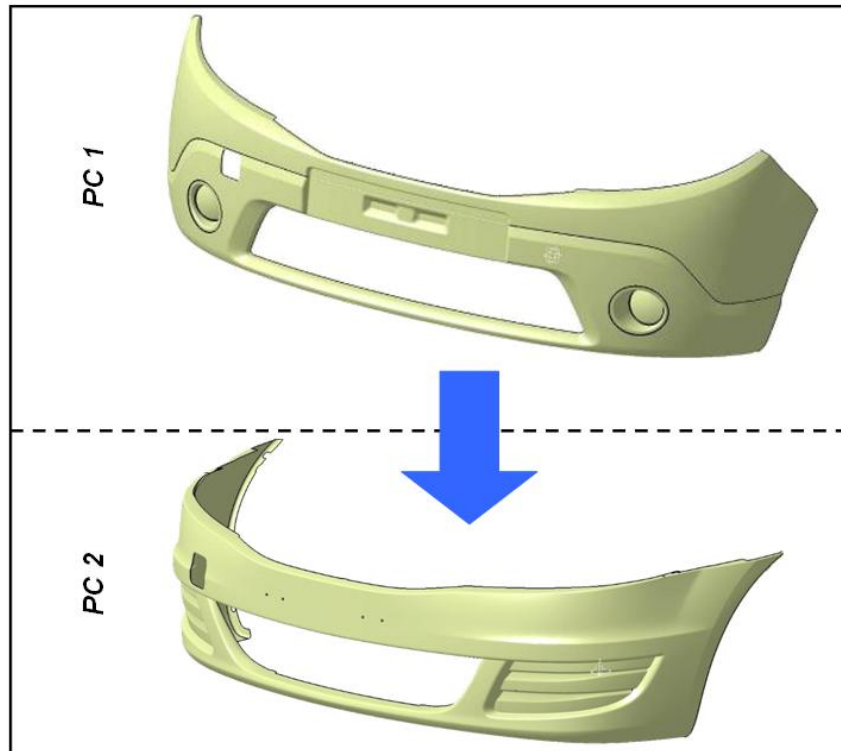


Figure 85 : Plans de forme du PC 1 et du PC 2 correspondants aux surfaces (plan de forme) fournies par le style

5.2 1^{ère} étape expérimentale : Conception du PC1 :

Nous débutons l'expérimentation par la conception du PC1 selon un premier plan de forme. Afin d'analyser l'approche, nous décomposons l'expérimentation en huit étapes distinctes.

5.2.1 Etape 1 : Définition du besoin

De la même façon que dans les premières expérimentations de ce travail de recherche, le responsable du projet définit le besoin dans l'interface du PLM ACSP. En réalisant l'analyse fonctionnelle externe, il définit les différentes fonctions principales et les contraintes du produit étudié.

Nous pouvons citer ci-dessous l'exemple d'une fonction principale, appelée FP1, pour laquelle des paramètres fonctionnels sont déterminés.

FP1 : Assurer à l'utilisateur une visibilité en cas de brouillard

Hauteur minimale de la zone de visibilité : 250 mm
 Hauteur maximale de la zone de visibilité : 450 mm
 Largeur minimale de la zone de visibilité : 1800 mm
 Largeur maximale de la zone de visibilité : 2500 mm
 Longueur minimale de la zone de visibilité : 12 m
 Longueur maximale de la zone de visibilité : 15 m

5.2.2 Etape 2 : Génération des ressources géométriques

A ce stade de l'expérimentation, aucune I_f n'a encore pu être générée à partir des cas précédents. De ce fait, nous passons directement à l'étape suivante.

5.2.3 Etape 3 : Définition de l'architecture produit

De la même manière que pour les I_f , aucune architecture produit n'a encore été créée. De ce fait, l'Architecte Produit détermine les composants (pièces et sous-produits) qui composent le produit à concevoir en réalisant l'analyse fonctionnelle interne via l'IHM du PLM ACSP ainsi que les solutions techniques candidates qui correspondent. Afin de détailler ces solutions techniques, il utilise le formalisme FAST proposé au sein du PLM ACSP.

Dans cette étape, l'Architecte Produit détermine les composants du nouveau produit à concevoir. La figure 86 représente graphiquement la vue isométrique des pièces du produit PC 1 afin d'illustrer la complexité du système. Nous pouvons remarquer la présence de 12 pièces distinctes.

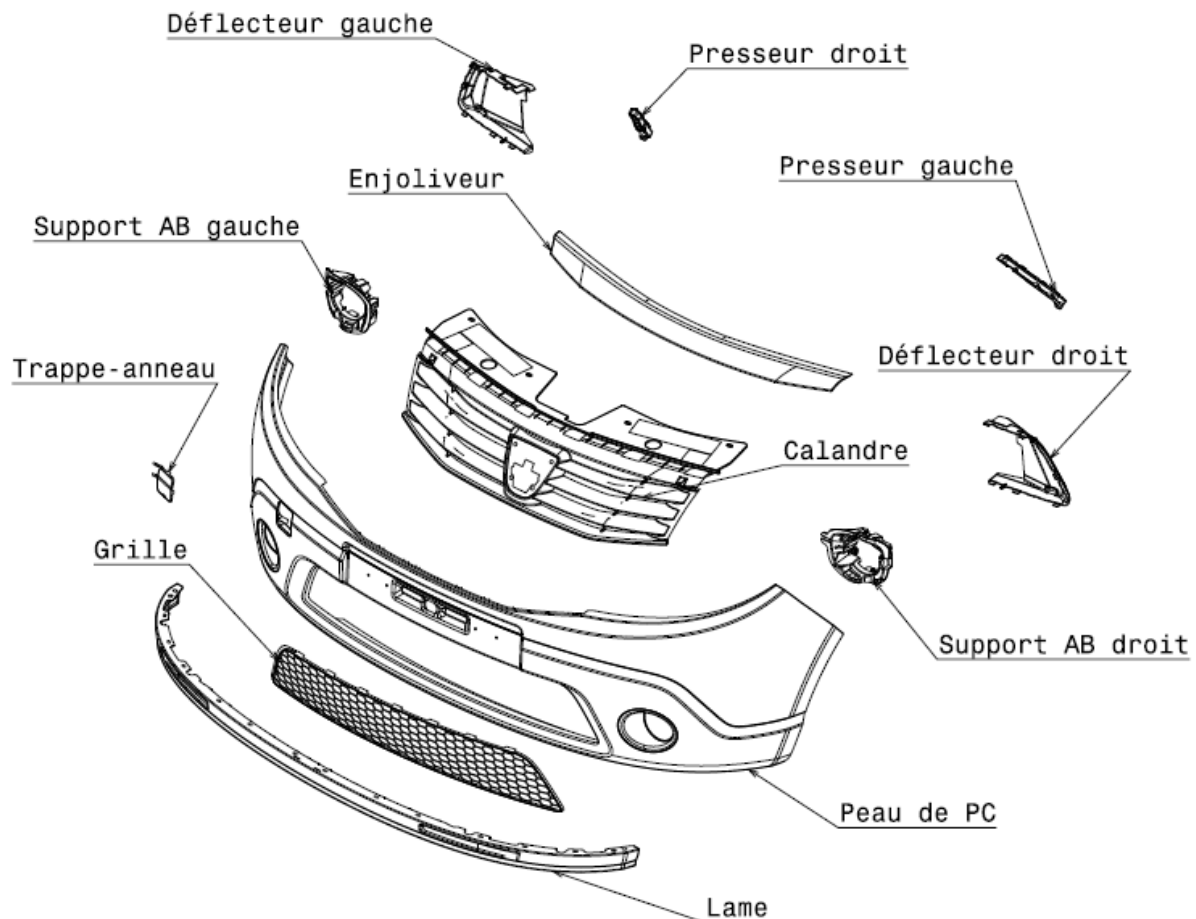


Figure 86 : Vue éclatée du produit PC 1 composé de 12 pièces une fois le travail réalisé

Quand cette étape est réalisée, Afin de réaliser une propagation des contraintes fonctionnelles sur les composants impactés, l'architecte produit réalise une analyse

fonctionnelle interne (AFI). Cette AFI est réalisée interactivement dans l'interface du PLM ACSP.

Dans cette étape, l'architecte produit ne peut pas encore choisir des principes de solution fondés sur les cas précédents. En effet, il peut seulement créer des nouveaux principes. L'interface du PLM ACSP lui permet de créer un arbre de solutions lui permettant de déterminer la solution technique la plus appropriée pour chaque fonction technique sous forme de diagramme FAST.

5.2.4 Etape 4 : Génération des ressources géométriques

Dans cette étape, seule l'architecture produit exploitable par le modelleur géométrique peut être générée. En effet, n'ayant pas encore de G_f exploitable dans le FGDB, le PLM ACSP n'est pas à même de pouvoir les préparer. Ainsi, cette étape ne réalise que la moitié des tâches prévue. En effet, il ne propose pas les modèles génériques.

5.2.5 Etape 5 : Modélisation tridimensionnelle

Dans cette étape, le concepteur extrait le pack de conception géométrique. A ce stade de l'expérimentation, le pack n'est composé que du script de génération de l'architecture produit.

La représentation de l'architecture produit paramétrée et réglée, générée automatiquement à partir du script fourni au concepteur, est illustrée sur la figure 87.

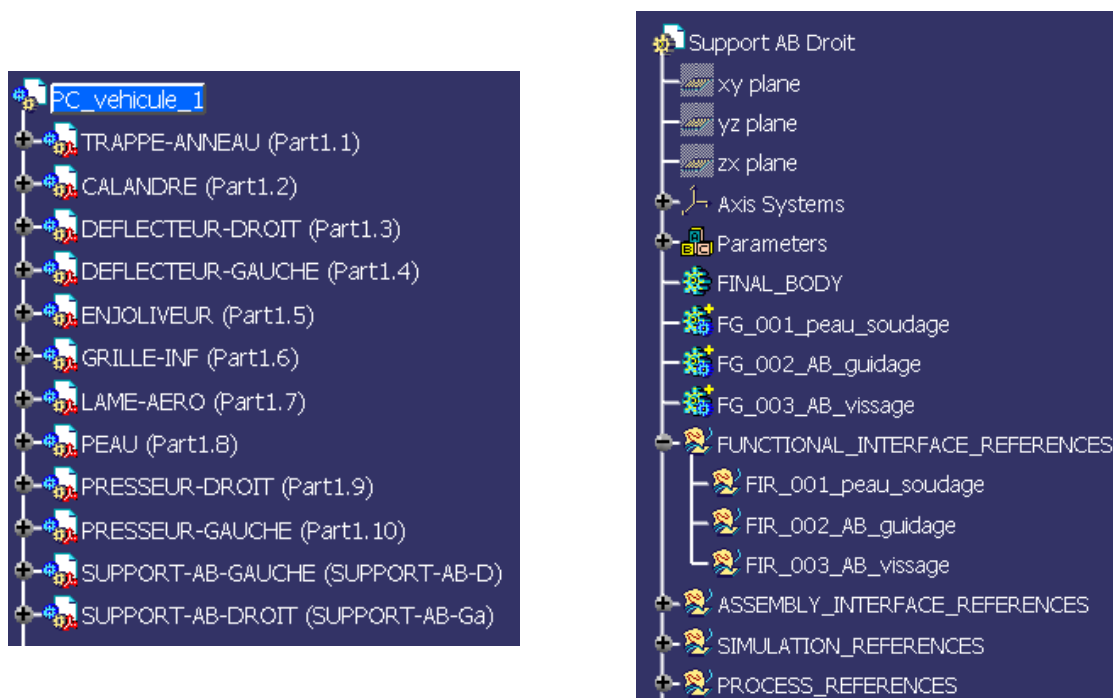


Figure 87 : Représentation de l'architecture produit générée au sein du modelleur géométrique ainsi qu'une pièce

Nous remarquons que l'architecture produit correspond à la liste des pièces établie par l'architecte produit lors de la seconde étape de ce processus. De plus, l'architecture pièce présentée à gauche contient les éléments permettant de débiter la modélisation pour chaque

principe de solution. Nous pouvons par exemple voir le conteneur "FG_001_peau_soudage" qui permet de modéliser en son sein le principe de solution "soudage" entre le support AB et la peau de PC. Ces conteneurs vierges vont permettre par la suite d'extraire les différentes G_i correspondantes à chaque pièce.

Le concepteur est maintenant à même de pouvoir débiter la modélisation des concepts choisis en amont (étape 3) par l'architecte produit. Il utilise les conteneurs vierges afin d'y intégrer les géométries correspondantes.

5.2.6 Etape 6 : Modification du modèle numérique

Cette étape consiste à modéliser les différents concepts au sein du modèleur géométrique. Suivant la méthodologie de modélisation appliquée, le concepteur organise sa définition de façon structurée. En effet, chaque principe de solution est modélisé de façon à pouvoir être identifié par la suite.

Durant cette étape, le concepteur travaille de manière classique en utilisant le PDM mis à disposition dans le PLM. Les opérations de "check-in" / "check-out" lui permettent de réaliser le versionnement de ces définitions numériques, et ainsi d'assurer l'historique des modifications. De plus, l'utilisation du PDM permet à plusieurs concepteurs de travailler en parallèle sur le même modèle numérique en s'assurant qu'ils utilisent toujours la dernière définition.

La figure 88 représente le principe de solution clippage pour une zone de ce produit ainsi que ses différentes évolutions.

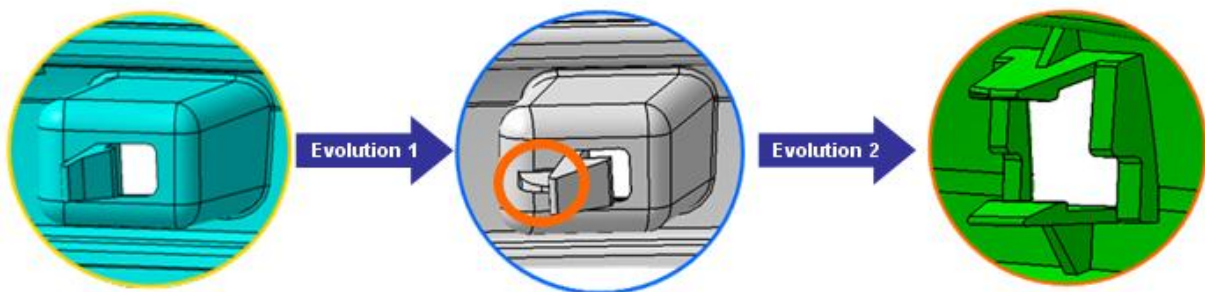


Figure 88 : Représentation du principe de solution clippage et de ses révisions issu d'un système de fixation d'anti-brouillard.

La première bulle représente la première version du clip. En raison d'un manque de rigidité déterminé par simulation numérique, une nervure (entourée sur la figure) est ajoutée dans la seconde version. Le concept est modifié dans la troisième version pour correspondre pleinement au nouveau cahier des charges.

5.2.7 Etape 7 : Validation du modèle numérique

Cette étape consiste à valider le modèle numérique. Réalisée par l'équipe projet et pilotée par le concepteur, cette revue de conception a pour objectif de valider le modèle numérique du point de vue produit et process.

A ce niveau du processus de conception, deux possibilités résultent de cette revue de conception :

- Soit le produit est validé et peut continuer son cycle de vie. Dans ce cas, un check-in final est réalisé par le concepteur et nous pouvons poursuivre notre cycle de CBR,
- Soit le produit n'est pas validé et le concepteur doit réviser le produit numérique. Dans ce cas, nous revenons à l'étape précédente de telle sorte que le concepteur puisse mettre à jour la définition numérique en intégrant les préconisations des différents métiers.

5.2.8 Etape 8 : Exploitation du modèle numérique pour capitalisation

Cette étape consiste à générer les I_f . En effet, ayant utilisé la méthodologie de numérisation adéquate, le concepteur permet au système d'exploiter la définition numérique en capitalisant les I_f contenues dans cette dernière.

Selon le principe retenu, la géométrie numérisée peut être mise en relation avec le besoin initial en capitalisant le principe de solution retenu par l'architecte qui est lié à l'AFI et à l'AFE.

Ainsi les définitions numériques sont redécomposées en I_f afin de pouvoir les capitaliser au sein du FGDB. Ces I_f serviront de base de cas pour les projets suivants.

De plus, ces I_f contenant l'intégralité de l'historique de modélisation des G_f , il est possible de générer des G_f non seulement représentant la géométrie (3DXML), mais aussi des G_f sous forme de modèles génériques. Afin de pouvoir les extraire, nous utilisons aujourd'hui une identification des G_f par l'intermédiaire de la typologie attribuée à chaque conteneur.

5.3 2^{ème} étape expérimentale : Conception PC2 :

Nous avons réalisé dans la première étape de cette expérimentation la modélisation du produit PC 1. Cette première étape permet de capitaliser les besoins, les principes de solution ainsi que les G_f correspondantes. En effet, nous rappelons que certaines étapes du processus de CBR n'ont pas encore pu être exploitées par manque de capitalisation.

Dès lors, nous pouvons démarrer la seconde étape expérimentale avec toutes les données et informations capitalisées à partir du cas PC1. Ainsi, l'objectif est de concevoir un nouveau produit pare-chocs pour un second véhicule, mais fondé sur le cas précédent.

5.3.1 Etape 1 : Définition du besoin

Les besoins initiaux sont similaires au produit pare-chocs de la première étape de l'expérimentation. En effet, on est en présence d'une totale reconduction de la conception. De ce fait, la seule donnée initiale qui n'est pas similaire au premier véhicule est le plan forme. Tous les paramètres fonctionnels sont ainsi similaires au produit pare-chocs précédent.

Le responsable du projet est alors à même de choisir les besoins du projet précédent, devenus besoins génériques, en les sélectionnant dans l'interface du PLM ACSP.

5.3.2 Etape 2 : Recherche des I_f candidates

Ayant déjà réalisé une première modélisation, le FGDB contient des G_f . Ces G_f sont liées aux différents besoins. De ce fait, le PLM est à même de pouvoir générer un arbre FAST afin de le proposer lors de l'étape 3 de la méthodologie.

Par exemple, nous pouvons présenter l'arbre FAST (figure 89) correspondant à la fonction technique, nommée FT1, suivante :

FT1 : Interfacer un support Anti-Brouillard

Nous pouvons voir dans cet arbre FAST, en adéquation avec l'évolution de la définition qui est décrite dans le chapitre précédent, que les principes de solution sont représentés pour chaque solution technique. De plus, nous notons que les principes de solution sont nommés de façon générique afin de rappeler que chaque principe capitalisé est remis à disposition sous forme de modèle générique.

5.3.3 Etape 3 : Définition de l'architecture produit

Dans cette étape, l'architecte produit choisit l'architecture produit de la même manière que dans la conception du pare-chocs précédent. En utilisant l'analyse fonctionnelle interne, il choisit ainsi les composants de son produit.

Par ailleurs, ayant déjà des I_f capitalisées au sein du FGDB, le PLM propose les principes de solution candidats, en fonction des besoins initiaux, sous la forme du diagramme FAST. De plus, ces I_f sont proposées sous la forme d'une représentation géométrique au sein de l'interface de telle sorte que l'architecte puisse comprendre le concept directement.

Ainsi il peut choisir les principes de solution déjà éprouvés ou en proposer des nouveaux, qui eux sont vierges de toute I_f .

Dans l'exemple précédent, l'architecte produit choisit le principe de solution du vissage, en utilisant un élément extérieur au système ainsi qu'un moyen portable pour l'assemblage, pour répondre à FT1. Dès lors, le système met à disposition du concepteur trois modèles génériques, en l'occurrence, un pour la vis, un pour le fût de vissage et un pour le support autonome 1.

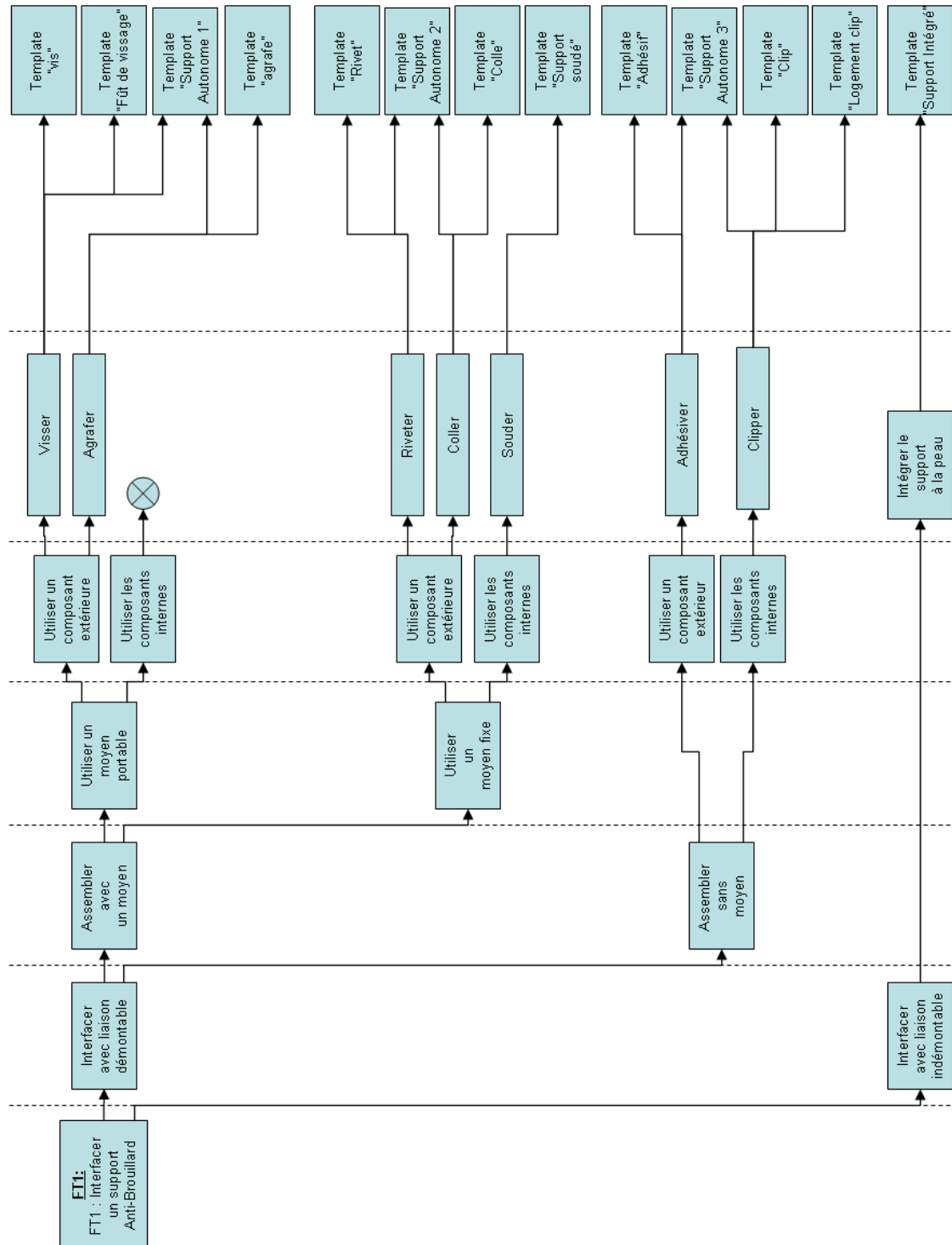


Figure 89 : Arbre FAST correspondant à la fonction technique 1 de la peau de pare-chocs

5.3.4 Etape 4 : Génération des ressources géométriques

Comme dans la première modélisation, le PLM ACSP génère l'architecture produit exploitable par le modeleur géométrique. Cet élément est la première partie du pack de ressources géométriques qui va être mis à disposition dans la prochaine étape au concepteur.

La seconde partie de ce pack correspond aux G_f . En effet, l'architecte ayant sélectionné certaines I_f dans l'étape précédente, le FGDB est maintenant à même de fournir les G_f correspondantes. Etant capitalisé sous forme de modèles génériques, le FGDB fournit au concepteur une bibliothèque regroupant toutes les G_f identifiées. Cette bibliothèque peut être représentée sous la forme d'un répertoire temporaire partagé contenant les modèles génériques ou encore, si le modeleur le permet, une bibliothèque spécifique utilisable seulement dans le cadre de sa modélisation. En effet, cette bibliothèque est temporaire et est créée à la volée suivant les G_f identifiées. Cette caractéristique permet de ne pas fournir au concepteur une bibliothèque figée contenant une grande quantité de modèles génériques afin de le préserver d'une recherche longue et fastidieuse. Dans notre cas d'application, Cv5 permet la génération d'une bibliothèque dédiée.

5.3.5 Etape 5 : Modélisation tridimensionnelle

Le concepteur, en récupérant le pack de ressources géométriques au sein du PLM ACSP, est maintenant à même de démarrer sa conception. La différence majeure avec la première partie de cette expérimentation est que le concepteur est en possession de modèles génériques paramétrés et réglés. En les instanciant au sein de son architecture paramétrée, il génère directement une première géométrie candidate. De plus, en agissant sur les paramètres fonctionnels, la première géométrie se modifie en conséquence.

Il peut maintenant démarrer les modifications et les adaptations de sa nouvelle conception au sein du modeleur géométrique.

5.3.6 Etape 6 : Modification du modèle numérique

Comme exposé dans la première partie de cette expérimentation, le concepteur modélise géométriquement les concepts jusqu'à la validation de sa dernière conception.

5.3.7 Etape 7 : Validation du modèle numérique

Lors de la validation du modèle numérique par l'ensemble de l'équipe projet, nous nous retrouvons confrontés à la même situation que dans la première partie de l'expérimentation. Soit le modèle numérique est adéquat, soit il faut revenir dans l'étape précédente.

Une fois le modèle numérique validé, le concepteur réalise le check-in final au sein du PLM ACSP.

5.3.8 Etape 8 : Exploitation du modèle numérique pour capitalisation

De la même manière que dans la première partie de l'expérimentation, le modèle numérique est traité afin de mettre à disposition les I_f pour les prochains cas d'étude.

De plus, si les G_f instanciées sous forme de modèles génériques ont été modifiées, le système les récupère en les mettant à jour.

5.4 Résultats et bilan de l'expérimentation

Lors de nos deux modélisations, nous avons comptabilisé le temps passé à concevoir chacune des pièces des deux produits pare-chocs. Ainsi, nous avons pu évaluer le gain de temps engendré par cette méthode. Le tableau 12 récapitule les différents temps et pourcentage de gain de temps (les temps sont volontairement représentés en pourcentage et sont issue de l'expérimentation).

| Part/Product | Temps 1ère modélisation (%) | Gain/Perte lors de la 2ème modélisation (%) |
|---------------|-----------------------------|---|
| Peau | 100 | -52,17 |
| Calandre | 100 | -75 |
| Jupe | 100 | -70 |
| Enjoliveur | 100 | -50 |
| Grille | 100 | -42,42 |
| Trappe Anneau | 100 | -70 |
| Presseur | 100 | 50 |
| Assemblage | 100 | -75 |
| Total | 100 | -41,23 |

Tableau 12 : Comparatif des temps de modélisation des modèles des deux produits pare-chocs

Ces statistiques permettent de montrer un gain de temps moyen de l'ordre de 40%. Il s'avère que le temps passé lors de la seconde conception du presseur est supérieur de 50%. En effet, cette pièce étant une pièce de structure, celle-ci ne correspondait pas en termes d'architecture au nouveau plan de forme. De ce fait, il a fallu remodeliser complètement le concept afin de l'adapter, ce qui a engendré un temps supérieur.

Nous pouvons ainsi en déduire que cette expérimentation est un premier succès et reste à être confirmé dans le cadre de nouveaux projets de conception routinière de pare-chocs. En effet, toutes les étapes du cycle de CBR, et plus précisément le processus de FGBR, sont validées au sein de cette expérimentation.

Ce processus permet d'adapter les principes de solution en flux tendu face aux évolutions des règles métier de conception. En effet, par la création ou la mise à jour des I_f à chaque itération, les K_f sont toujours à jour. De ce fait, nous dépassons les limites identifiées lors de la seconde expérimentation proposée au précédent chapitre.

De plus, proposer au concepteur une première base de géométries afin qu'il l'utilise et qu'il l'adapte ne le contraint pas dans son processus de conception, ce qui permet d'envisager un taux d'utilisation plus important que celui atteint précédemment.

Le paragraphe suivant propose de discuter les différents résultats obtenus dans cette expérimentation en contexte industriel.

5.5 Discussion

A travers notre dernière expérimentation industrielle, nous établissons que notre nouvelle méthode, fondée sur le paradigme de raisonnement à partir de cas, correspond bien aux attentes des concepteurs. Elle permet d'accélérer le processus de reconception et l'apprentissage des nouveaux collaborateurs. A travers la dernière expérimentation industrielle, les statistiques montrent un gain de temps moyen très représentatif de 40%. Ce gain confirme ainsi notre cinquième hypothèse de travail rappelée ci-dessous :

Hypothèse 5 : *"La capitalisation des connaissances au sein d'un modeleur géométrique permet de s'affranchir des pertes de connaissance engendrées par le turnover et d'assurer la pérennité ainsi que la continuité des retours sur expérience."*

En effet, nous montrons que les acteurs utilisent les conceptions précédentes à des fins de réutilisation, mais aussi d'apprentissage. Dans le cas de l'apprentissage, il convient de noter que ce nouveau paradigme peut permettre de palier au turnover, c'est-à-dire la rotation de l'emploi ou le renouvellement du personnel, qui est aujourd'hui souvent élevé dans l'industrie automobile en accord Dalmaso et Sardas [2008].

Lors de notre dernière expérimentation industrielle, nous avons néanmoins noté deux nouvelles limites qui sont le tri des informations mises à disposition des acteurs métiers et la capitalisation de connaissances qui est aujourd'hui fondée sur une approche syntaxique.

La première limite concerne le nombre de propositions réalisées lors de la première et de la troisième étape du modèle de FGBR. En effet, si ce processus est utilisé par l'ensemble des concepteurs d'un bureau d'études sur l'ensemble des projets, il s'avère que très rapidement, les utilisateurs seront face à un nombre très important de propositions. Par exemple, dans la seconde étape, lors du choix de l'architecture, l'architecte voulant appliquer un principe de solution clippage risque de devoir choisir, au bout de six mois d'application du processus, entre 200 principes de solution de clippage. Pour ce calcul, nous considérons le nombre de clippage réalisé par un concepteur pour un projet (environ 20) appliqué à l'ensemble des projets (environ 10 différents). Face à ce nombre important de solutions, il convient aujourd'hui de proposer un modèle permettant de les trier.

La seconde limite repose sur le choix de générer les G_f via la sémantique utilisée lors de la création des modèles tridimensionnels. En effet, si le concepteur modifie manuellement le nom des conteneurs fournis automatiquement via l'architecture paramétrée et réglée, le système n'est pas à même de pouvoir faire le lien entre géométrie et besoin fonctionnel. De la même façon, si le concepteur ne respecte pas la méthodologie de modélisation au sein du modeleur, par exemple en référençant les éléments de référence dans le bon conteneur, le système n'est pas à même de générer les modèles génériques rattachés. En effet, nos

premières méthodes de recherche se fondent sur une approche syntaxique. Or, une approche sémantique de type ontologie, en accord avec les travaux de notre laboratoire [Monticolo, 2008], permettrait de répondre plus spécifiquement à ce besoin.

La section suivante revient sur les résultats et les limites discutés dans ce paragraphe à travers une discussion générale sur ces travaux de recherche. Nous exposerons également les différentes perspectives de recherche que l'on peut envisager dans le cadre d'une poursuite de ces travaux.

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

L'industrie automobile devient aujourd'hui de plus en plus compétitive en raison de la mondialisation et l'apparition de nouveaux concurrents. Ce nouveau contexte oblige les industriels à s'adapter rapidement, être flexibles et innover afin de pouvoir pérenniser leurs activités [Byosière et Ingham, 2001]. Cependant, comme nous avons pu souligner, beaucoup de produits qui nous entourent ne prennent pas ou peu en compte les utilisateurs et intègrent peu d'innovation [Sagot, 1999]. Selon Prasad [1996] et Rezayat [2000] ce taux est seulement de 20%. Parallèlement, cette mondialisation impacte aussi le processus de conception et de développement de produits. L'avènement des nouveaux principes organisationnels, tels que le principe de Back Office et de Front Office, est un exemple de la nature multi-sites et de la complexité de ces processus adoptés de plus en plus aujourd'hui [United Nations, 2005].

Il devient nécessaire d'établir de nouvelles méthodologies de conception prenant en compte ces nouvelles contraintes [Bluntzer et al., 2006]. Sur la base d'une première expérimentation conduite dans un cadre académique (chapitre 3), reflétant la synthèse des méthodes et outils aujourd'hui disponibles, nous avons validé l'hypothèse selon laquelle l'accélération du processus de conception de produits peut être obtenue en réduisant les temps dédiés à la conception routinière et paramétrique (reconception). Cette observation montre que les temps gagnés sur le processus de reconception permet au concepteur de les attribuer à des processus d'innovation, et plus particulièrement sur des innovations incrémentales [Markides et Geroski, 2004]. Cette même expérimentation a confirmé que le processus de conception peut fédérer l'ensemble des acteurs autour d'un seul et même outil. Notons qu'auparavant, les concepteurs n'utilisaient pas les mêmes outils, ni les mêmes formalismes pour transmettre des informations. Les nombreux échanges entre les différents acteurs étaient souvent propices aux erreurs et pertes d'informations [Gonier et Sagot, 2009]. La fédération autour d'un seul et même outil, en l'occurrence le PLM (Product Lifecycle Management), permet d'éviter ces pertes d'informations et ainsi optimiser le processus de conception, et développer dès lors des produits dans des délais plus courts et intégrant plus d'innovation.

Nous avons ainsi établi qu'il devient aujourd'hui nécessaire d'intégrer, non seulement les informations génériques au sein des modèles numériques, mais aussi les informations fonctionnelles. Notre première expérimentation nous a conduit à faire évoluer le processus de conception vers un processus fédéré autour d'une plateforme de PLM et impliquant un nouvel acteur métier qui est l'expert CAO. Par ailleurs, les limites identifiées nous ont permis d'établir différentes méthodologies spécifiques afin de définir une architecture produit, une architecture pièce, un processus de validation des connaissances et un modèle générique [Bluntzer et al., 2009].

Dès lors, en capitalisant et en exploitant des informations métier directement au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels, les concepteurs établissent des liens entre besoins fonctionnels et modèles géométriques permettant ainsi une plus grande réactivité dans les phases de reconception du produit. En modifiant un critère de valeur du cahier des charges fonctionnel, le concepteur modifie instantanément la géométrie du produit initial pour en générer une nouvelle. Ce lien, qui permet de générer une nouvelle conception instantanément, a été validé dans des travaux autour des thématiques d'optimisation permettant ainsi de générer des conceptions directement optimisées, par exemple en masse ou encore en coût ainsi que nous avons pu le montrer au sein de notre laboratoire [Gomes et al., 2006] [Bluntzer et al., 2008] [Gomes et al., 2009].

Ces premières observations nous ont amené à conduire une seconde expérimentation, au sein d'une industrie candidate (chapitre 4) afin de valider nos différentes hypothèses soulevées dans un cadre académique pour validation dans un contexte industriel.

Les premiers résultats obtenus ont permis de montrer qu'il était possible de lier le cahier des charges fonctionnel directement à la géométrie, permettant ainsi d'être réactif dans le processus de modification des contraintes de conception. Cette observation a validée, en contexte industriel, la première et la troisième hypothèses rappelées ci-dessous :

"L'accélération du processus de conception de produits peut être obtenue en réduisant les temps qui sont dédiés à la reconception."

"Le lien entre besoin fonctionnel et géométrie peut être établi au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels permettant ainsi une plus grande réactivité dans les phases de reconception de produits."

Nous pouvons aussi rappeler qu'il est dorénavant possible de modifier directement la conception initiale lors de la modification d'un paramètre du cahier des charges afin qu'il s'adapte directement à cette nouvelle contrainte. Ce résultat répond également à une des contraintes industrielles initialement exposées dans ce travail qui consiste à mettre sur le marché des produits nouveaux, à savoir la concrétisation d'une innovation selon la définition donnée par Duchamp [1999], de plus en plus fréquemment et dans des délais de conception toujours plus réduits [PSA, 2007] [VW, 2008].

Par ailleurs, l'intégration du modèle de conception au sein d'une plateforme de PLM nous a également permis de valider la seconde hypothèse de nos travaux de recherche qui est rappelée ci-dessous.

"Le processus de conception étant collaboratif, il peut fédérer les acteurs métier autour d'un seul et même outil."

En effet, nous avons alors déterminé dans la première expérimentation en contexte académique que les différents acteurs impliqués dans le processus de conception travaillaient tous indépendamment des uns des autres, et que chacun d'entre eux exploitait un logiciel informatique différent. Or, dans notre seconde expérimentation, nous avons fédéré tous les acteurs autour d'un seul et même outil qui est le système de PLM en y intégrant les différents outils dont ils ont besoin. Cette intégration a alors permis de valider en contexte industriel qu'en utilisant un même outil, on réduisait le risque de perte d'informations, de façon significative, entre les différents acteurs. Cette validation confirme les travaux de Saaksvuori et Immonen [2004] qui stipule que le PLM contient tous les outils nécessaires aux différents acteurs projet afin de réduire la scission existante entre les différents domaines de conception.

Toujours dans le cadre de notre seconde expérimentation, nous avons montré que l'exploitation des informations métier ne peut pas être appliquée au niveau d'une pièce dans son ensemble, mais doit être appliquée à un niveau de granularité inférieur, celui des principes de solution. Cette observation a déjà fait l'objet de travaux au sein de notre équipe [Bluntzer et al., 2009] permettant ainsi de formaliser l'architecture produit en lien avec l'architecture pièce. Ce formalisme, en accord avec les travaux fondateurs sur les modèles produits, tels que ceux de Débarbouillé [1994] ou de Tichkiewitch [1996], est alors spécifiquement adapté à notre contexte permettant ainsi d'intégrer, en plus des produits dits mécanique, les produits de style. Dès lors, nous pouvons exploiter à travers ce formalisme tous les produits au sein de ce processus de conception ainsi défini.

De ces observations a résulté la proposition de décomposition d'une pièce en principes de solution exploitables indépendamment les uns des autres. Cette seconde expérimentation en contexte industriel nous a ainsi permis de valider notre sixième hypothèse de recherche rappelée ci-dessous :

"L'exploitation des principes de solution validées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels sous forme de modèles génériques, permet d'augmenter la réactivité dans le processus de conception de produits."

Comme nous l'avons détaillé au cours de cette expérimentation, la décomposition d'une pièce en principes de solution semble être plus aisée à exploiter par la suite que la pièce globale. Dès lors, un principe de solution appliqué pour un type de pièce peut être reconduit sur un autre type, comme par exemple un système de clippage d'un support antibrouillard peut être porté aisément sur un support capteur. De plus, les modèles génériques sont la technologie choisie pour pouvoir exploiter des principes de solution sur étagères au sein des modeleurs géométriques afin d'appliquer les informations métier qui y sont intégrées. De ce fait, nous pouvions ainsi valider notre quatrième hypothèse de recherche, à savoir :

"La capitalisation et l'exploitation des informations métier par les concepteurs peuvent être réalisées au sein des modeleurs géométriques tridimensionnels."

L'observation de l'utilisation de ces principes de solution génériques au sein d'une industrie sur une période conséquente établit que les concepteurs utilisent peu ce principe. Nous avons déduit de cette observation, sur la base d'entretiens personnalisés avec les concepteurs impliqués et étudiés, que la méthodologie de conception proposée n'est pas réellement adaptée à l'industrie automobile. La principale raison est le renouvellement rapide des principes techniques retenus et des règles métier associées aux modèles génériques. En effet, les modèles génériques intégrant ces principes et règles métier doivent être mis à jour lors du renouvellement de ces derniers. Or, il s'avère que la mise à jour de ces modèles n'est pas immédiate car effectuée manuellement par l'expert CAO. De ce fait, quand le concepteur veut utiliser un modèle générique et qu'il s'aperçoit que ce dernier n'est pas mis à jour, il ne l'utilise pas de peur d'être plus contraint que aider. Ces observations confirment les travaux de notre équipe de recherche [Bluntzer et al., 2009].

Afin de pouvoir tout de même fournir une aide à la décision efficace au concepteur, un changement de paradigme fut nécessaire. Pour ce faire, les techniques de raisonnement à partir de cas ont été envisagées. En effet, la définition fournie par Aamodt et Plaza. [1994], qui établit que le raisonnement à partir de cas permet de résoudre un nouveau problème en se rappelant d'une situation précédente similaire et en réutilisant les informations et les connaissances de cette dernière, correspond à l'activité des acteurs métier du processus de conception. Rappelons que de nombreux travaux ont déjà fait l'objet de l'intégration de ce paradigme dans le processus de conception à l'image des travaux de Estevez et al. [2006], qui l'ont intégré dans le processus de pré-conception, nous confortant dans ce nouveau choix de paradigme.

Fournissant au concepteur des principes de solution fondés sur des cas similaires issus de projets précédents, ce nouveau système permet d'une part de capitaliser à la volée et de façon autonome les nouveaux principes de solution, et d'autre part, de suggérer au concepteur les principes de solution qui sont candidats lors d'un nouveau projet. Avec cette nouvelle méthode, le concepteur a toujours à disposition des modèles génériques, mais cette fois, qui correspondent plus spécifiquement aux choix de conception réalisés.

Afin de mettre à l'épreuve ce nouveau paradigme, notre propre modèle de raisonnement à partir de cas, le cycle de FGBR (Functional Geometry Based Reasoning) a été déployé lors d'une dernière expérimentation en contexte industriel. Les résultats de cette dernière ont montré un gain de temps moyen très représentatif de 40%. Ce gain a confirmé alors notre cinquième hypothèse de travail rappelée ci-dessous.

"La capitalisation des connaissances au sein d'un modelleur géométrique permet de s'affranchir des pertes de connaissance engendrées par le turnover et d'assurer la pérennité ainsi que la continuité des retours sur expérience."

En effet, à travers cette expérimentation, nous avons montré que les acteurs utilisent les conceptions précédentes à des fins de réutilisation, mais aussi d'apprentissage. Dans ce dernier cas, il convient de noter que ce nouveau paradigme peut permettre de pallier au turnover, c'est-à-dire la rotation de l'emploi ou le renouvellement du personnel, qui est aujourd'hui souvent élevé dans l'industrie automobile selon Dalmasso et Sardas [2008].

Malgré les limites citées concernant le cycle de FGBR, à savoir, le tri des informations mis à disposition des acteurs métier et le principe de génération des géométries fonctionnelles qui aujourd'hui repose sur une approche syntaxique, ce cycle n'en demeure pas moins adapté à la conception de produits et de pièces de style qui, en comparaison avec la conception mécanique, est beaucoup moins formelle (moins de règles métier). Ce constat confirme également les travaux de notre équipe de recherche [Bluntzer et al., 2009]. Cependant, ce modèle est aussi utilisable en conception mécanique car fondé sur le vecteur de connaissances qu'est la définition numérique. N'importe quel type de conception, qui peut être modélisé au sein d'un modelleur, peut ainsi être capitalisé.

Notons par ailleurs que le cycle de FGBR se rapproche des travaux sur les modelleurs déclaratifs [Lucas et al., 1989]. En effet, selon Lucas et Desmontils [1995], ces nouveaux modelleurs répondent à un processus de conception spécifique qui est divisé en trois étapes.

La première, qui consiste à "décrire la scène" (description de haut niveau proche des besoins de l'utilisateur selon La Greca et al. [2005]), se rapproche de notre première étape du cycle de FGBR qui est la définition du besoin, réalisée par le responsable du projet, et qui consiste à définir les besoins fonctionnelles. La seconde étape du processus de conception de ce modelleur consiste à rechercher des solutions mettant ainsi à disposition du concepteur toutes les formes répondant aux besoins précédemment identifiés [Champciaux, 1997]. Cette étape correspond avec la troisième étape du cycle de FGBR qui est la définition de l'architecture par l'architecte produit. La dernière étape du cycle de conception des modelleurs déclaratifs consiste à faire prendre connaissance de ces solutions au concepteur en lui mettant à disposition toutes les formes générées dans la précédente étape avec un système d'aide à la compréhension afin qu'il puisse choisir à bon escient ou alors réintégrer d'autres besoins en amont. Cette étape correspond également à une étape du cycle de FGBR, en l'occurrence la cinquième qui permet au concepteur de réaliser la définition numérique.

Enfin, l'intégration de ce modèle à une plateforme de PLM permet de l'appliquer dans tout le processus de conception fédérant aujourd'hui la gestion de projet autour de ce type d'outil. Ce modèle répond également aux nouveaux principes organisationnels de l'industrie automobile qui établissent des stratégies d'internationalisation des centres de recherche et développement [United Nations, 2005], correspondant par exemple à une approche de "Front Office" et "Back Office" empruntée aux principes organisationnels des systèmes financiers décrits par Safizadeh et al. [2003].

Ce résultat global, qui est le cycle de FGBR, est particulièrement intéressant car il s'appuie sur le modèle de données systémique "Multi-Domaines et Multi-Vues" (MD-MV) issu des travaux de Gomes et Sagot [2002] et qui est rappelé sur la figure 90.

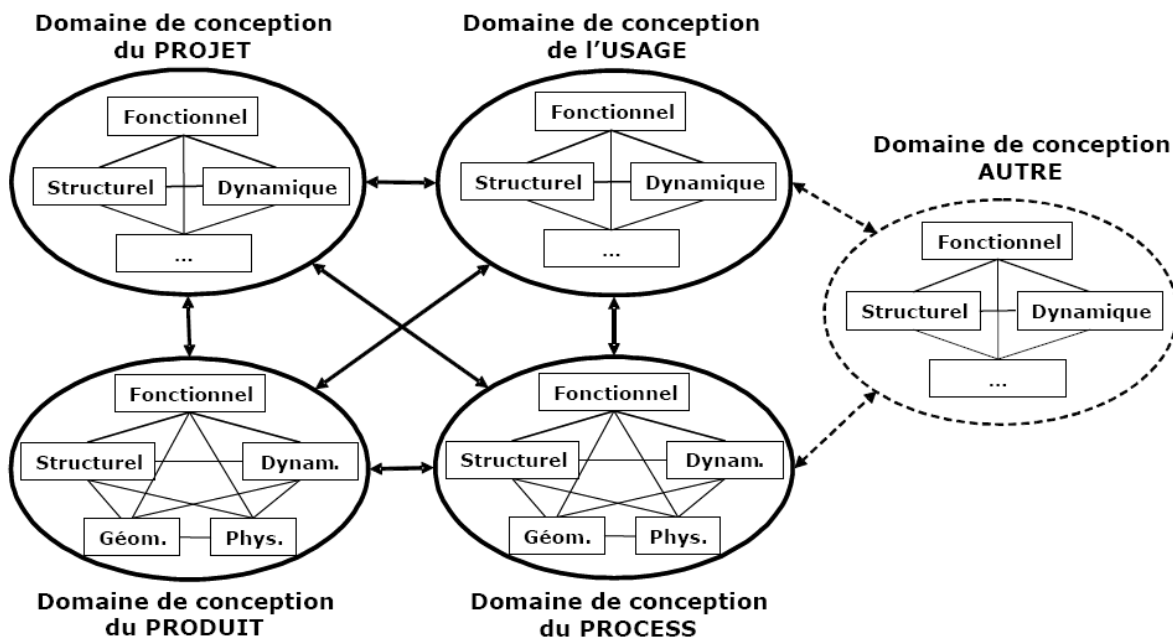


Figure 90 : Modèle de données systémique "Multi-Domaines et Multi-Vues" (MD-MV) en accord avec Gomes et Sagot [2002]

En effet, ce nouveau cycle permet de croiser les différents domaines de conception avec les différentes vues du produit. De plus, l'intervention de l'équipe projet permet d'intégrer tous les domaines de conception et vues spécifiques résultant de l'organisation de la société industrielle, tels que les domaines de conception de l'usage ou du process.

Résultats significatifs de notre travail de recherche

A travers ces travaux de recherche, nous établissons que "l'accélération" du processus de reconception permet d'allouer plus de temps au concepteur pour innover. L'intégration du processus de conception dans une plateforme de type PLM permet aussi d'optimiser la coopération lors de ce processus, offrant ainsi un processus robuste d'échange d'informations. Pour valider cette approche, nous avons élaboré différents modèles intégrant le processus de conception dans son ensemble.

Nous établissons une démarche de conception, nommé FGBR (Functional Geometry Based Reasoning), permettant d'intégrer toutes les étapes du processus de conception déjà détaillées par Zeid [1991], de l'identification du besoin à la conception détaillée, et permettant de capitaliser les connaissances métier à la volée de façon autonome. Le FGBR s'appuie sur différents modèles.

Le premier modèle concerne la décomposition fonctionnelle d'un produit. A travers une méthodologie permettant de lier les critères de valeur (paramètres fonctionnels) à la géométrie (paramètres spécifiques), une décomposition du produit en sous-produits, pièces et

géométries fonctionnelles est proposée. Cette décomposition permet d'établir un nouveau modèle, permettant cette fois de définir une connaissance conforme à la définition établie par Mach [1995] qui stipule qu'il n'existe pas de connaissance en dehors de l'homme.

La formalisation d'une connaissance constitue alors le second modèle. A travers les géométries fonctionnelles, on propose une exploitation d'entités offrant aux concepteurs des nouvelles connaissances. Parallèlement, ces principes sont proposés aux concepteurs sous forme de modèles génériques au sein des modeleurs tridimensionnels.

Le troisième modèle proposé établit le cycle de vie d'un modèle générique ainsi que la méthodologie à appliquer pour pouvoir obtenir ces modèles génériques. De ce modèle résulte une implémentation au sein du FGBR qui permet d'extraire automatiquement les modèles génériques liés aux principes de solution utilisés lors d'un processus de conception.

L'implantation du cycle de FGBR au sein de la plateforme de PLM ACSP est un autre apport de la thèse. Etant actuellement un outil de recherche universitaire, il s'agit normalement de le faire évoluer en intégrant ces nouveaux modèles. A travers ces nouvelles évolutions, nous pouvons envisager plusieurs perspectives de recherche.

Perspectives de recherche

La dernière expérimentation industrielle de ces travaux de recherche soulève deux limites qui sont, dans un premier temps, le tri des principes de solution lors de leur mise à disposition aux concepteurs ainsi que, dans un second temps, le mode de génération des géométries fonctionnelles.

Effectivement, nous avons mis en évidence que la multiplication des principes de solution peut rapidement devenir complexe et difficile à gérer. Il s'agit dans la suite de ces travaux de recherche de mettre à disposition du concepteur un moyen de filtrage de ces solutions. Nous avons déjà établi précédemment une voie de recherche qui consiste à utiliser une approche sémantique, utilisant ainsi des ontologies. Or, une autre voie de recherche potentielle pouvant toucher l'exploitation d'un comparateur de forme peut aussi être envisagée. Pour rappel, le mode actuel réside sur la comparaison de la syntaxique utilisée lors de la conception. Si le concepteur propose un mot clé, par exemple "clip", le système remet à disposition tous les principes contenant ce mot clé, en l'occurrence "clip". Le nouveau principe consisterait à comparer géométriquement le nouvel environnement de la zone fonctionnelle avec les anciens environnements des géométries fonctionnelles. De ce fait, si un ancien environnement est similaire, le système peut mettre à disposition les géométries fonctionnelles candidates.

Une autre voie de recherche qui permettrait de lever cette limite, consisterait à adapter un modèle de Data Mining (en français, Exploration de Donnée) [Chen et al. 1996]. Le principe de Data Mining consiste à retrouver des informations pertinentes au sein d'une grande quantité de données en utilisant des systèmes automatisés ou semi-automatisés.

De la même manière, la génération de géométrie fonctionnelle se fonde sur une sémantique rigoureuse. Or, les concepteurs innoveront sans cesse, et de ce fait, il est fréquent de proposer de nouvelles sémantiques. Il s'agit dans ce contexte de changer le mode de génération pour qu'il devienne moins rigide. Une voie de recherche consisterait à exploiter les nouveaux outils de modélisation tridimensionnelle qui offrent aujourd'hui la possibilité d'exploiter des géométries non contraintes afin de les adapter dans leur nouvel environnement. A travers les différents environnements, cités dans le dernier paragraphe, il devient possible d'extraire chaque zone fonctionnelle pour pouvoir les fournir aux concepteurs sous forme de géométries fonctionnelles. Nous pouvons citer, entre autres, la "Synchronous Technology" (en français Technologie Synchrone) établie par SIEMENS au sein des modeleurs NX 6 et SOLID EDGE qui offre une modélisation fondée sur les caractéristiques géométriques de la pièce et ainsi être libérée des contraintes de l'historique. De ce fait, cette technologie permet, sans être limitée par la manière dont le modèle initial a été créé, d'avoir un contrôle direct sur la géométrie, tout en synchronisant automatiquement les relations fonctionnelles, les entités technologiques et les paramètres [SIEMENS, 2008].

BIBLIOGRAPHIE

- A -

[Aamodt et Plaza, 1994] Aamodt, A. & Plaza, E. (1994) "Case-Based Reasoning: Foundational ISSUES, Methodological Variations, and System Approaches", Artificial Intelligence Communications, Vol 7 Nr1, pp 39-59.

[AFCIQ, 1990] AFCIQ/AFQ (1990) "Guide des outils de la qualité", Association Française pour la Qualité, Paris.

[AFNOR, 2002] AFNOR (2002) "Outils de management : Maîtrise du processus de conception et développement", Norme française FD X 50-127, Association Française de NORMalisation (AFNOR).

[Altshuller, 1998] Altshuller, G.S. (1998) "40 Principles: TRIZ Keys to Technical Innovation", Translated by Lev Shulyak. Technical Innovation Center, Worcester, MA.

[Ameri et Dutta, 2005] Ameri F. & Dutta, D. (2005) "Product Lifecycle Management: Closing the Knowledge Loops", Computer-Aided Design & Applications, Vol. 2, No.5, pp.577-590.

[Aoussat, 1996] Aoussat, A. (1996) "Contribution de la modélisation du processus de conception de produits industriels", rapport de synthèse en vue d'obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, ENSAM.

[APTE, 2006] Site web de APTE S.A., (2006) "Introduction à la méthode APTE", http://www.methode-apte.com/methode_introduction.htm.

[Archibald et al, 1999] Archibald, G., Karabakal, N. & Karlsson, P. (1999) "Supply Chain vs. Supply Chain: Using Simulation to Compete beyond the Four Walls", In Proc. Winter Simulation Conference. (Arizona, USA, Dec). pp 1207-1214.

[Authier et Levy, 1992] Authier, M. & Levy, P. (1992) "Les arbres de connaissances", Editions La découverte, Les cahiers libres, Paris.

- B -

[Bachelet, 2009] Bachelet, R. (2009) "Outils Projets : Analyse Fonctionnelle", http://rb.eclille.fr/1/Projets/Projet_Analyse_fonctionnelle.pdf.

[Baizet, 2004] Baizet, Y. (2004) "La Gestion des Connaissances en Conception", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier.

[Ballu et al., 1993] Ballu, A., Falgarone, H., Chevassus, N. & Mathieu, L. (2006) "A new design method based on functions and tolerance specifications for product modelling", Annals of CIRP, 55(1),pp.139-142.

[Baumgart, 1975] Baumgart, B.G. (1975) "A Polyhedron Representation for Computer Vision", American Federation of Information Processing Societies (AFIPS), The National Computer Conference, vol. 44, 19-22 May, 1975, AFIPS Press, Anaheim, CA, USA, pp. 589-596.

[Bentley, 1979] Bentley, J.L. & Ottmann, T.A., (1979) "Algorithms for reporting and counting geometric intersections", IEEE Transaction on Computers 28(9): 643-647.

[Bernard, 2000] Bernard, A. (2000) "Modèles et approches pour la conception et la production intégrées", Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 34, n°2-3, pp. 163-193.

[Besl, 1990] Besl, P. J. (1990) "The free-form surface matching problem, in Machine Vision for Three-Dimensional Sciences" (H. Freeman, Ed.), pp. 25–71. Academic Press, San Diego.

[Bézier, 1977] Bézier, P. (1977) "Essai de définition numérique des courbes et des surfaces expérimentales", Thèse d'Etat, Université Paris 6 (France).

[Blinn, 1982] Blinn, J.F. (1982) "A generalization of algebraic surface drawing", ACM Transactions on Graphics 1(3):235-256.

[Blondel et al., 2006] Blondel, F., Edouard, S. & El Mabrouki, M.N. (2006) "Quelle articulation entre intelligence économique et knowledge management au sein de l'entreprise", XVème conférence internationale de management stratégique de l'association internationale de management stratégique (AIMS), Annecy.

[Bluntzer et al., 2008] Bluntzer, J-B., Gomes, S., Bassir, D.H., Varret, A. & Sagot, J-C, (2008) "Direct multiobjective optimization of parametric geometrical models stored in PLM systems to improve functional product design", International Journal of Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, Vol. 2, pp. 83-90.

[Bluntzer et al., 2006] Bluntzer, J.B., Gomes, S. & Sagot, J.C., (2006) "Functional design through a PLM system for fastening routine definition of CAD models", Proceedings of Virtual Concept, Playa Del Carmen, Mexico, 10p.

[Bluntzer et al., 2009] Bluntzer, J.B., Gomes, S. & Sagot, J.C., (2009) "Definition of a knowledge representation based on functional CAD models", Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED09), Stanford, CA, USA, 12 p.

[Booch et al., 1999] Booch, Rumbaugh & Jacobson (1999) "The Unified Modeling Language User Guide", Addison-Wesley.

[Borst, 1997] Borst, W.N. (1997) "Construction of Engineering Ontologies", PhD Thesis, University of Twente, Enschede.

[Boutigny, 2004] Boutigny, E. (2004) "Coopération dans l'entreprise et compétence collective", AGRH, Actes du congrès, Tome 3 La gestion des compétences.

[Bowman, 1997] Bowman, I. (1997) "Coned Off", Expert Delays Manufacturing-Computer-Solutions. 3:1, 32-33.

[Bresenham, 1965] Bresenham, J. (1965) "Algorithm for computer control of a digital plotter", IBM System Journal 4:25-30.

[Brissard et al, 2003] Brissard, J.-L., Dardy, F., Polizzi, M. & Teixido, C. (2003) "Guide de la compétitivité industrielle", tome I, "Démarche de conception", Delagrave.

[Byosièrè et Ingham, 2001] Byosièrè, P. & Ingham, M. (2001) "Création de connaissances et innovation", Revue française de Gestion.

- C -

[Campatelli et Citti, 2009] Campatelli, G. & Citti, P. (2009) "Business Process Analysis and Reengineering of Administrative Processes using Axiomatic Design: Theory and Case Study from the University of Firenze", The Fifth International Conference on Axiomatic Design, Campus de Caparica, Portugal.

[Champciaux, 1997] Champciaux, L. (1997) "Declarative modelling: speeding up the generation", International Conference on Imaging Science, Systems and Technology.

[CIMDATA, 1998] CIMdata (1998) "Product Data Management: The Definition", CIMdata Inc., Ann Arbor, MI, USA.

[Chang et Joo, 2006] Chang, K.H. & Joo, S.H. (2006) "Design parameterization and tool integration for CAD-based mechanism optimization", *Advances in Engineering Software* 37(12): 779-796.

[Chen et al., 1996] Chen, M. S., Han, J. & Yu, P. S. (1996) "Data mining: An overview from a database perspective", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 8, 866–883.

[Clark et al., 1993] Clark, K.B., Wheelwright & S.C. (1993) "Managing New Product and Process Development: Text and Cases", Maxwell Macmillan International, New York.

[Colin et al., 1997] Colin, C., Desmontils, E., Martin, J. & Mounier, J. (1997) "Working modes with a declarative modeler", *Compugraphics*.

[Corbel, 1997] Corbel, J.C. (1997) "Méthodologie et retour d'expérience : démarche MEREX de Renault", Hermès.

[Cordier et Fuchs, 2005] Cordier, A. & Fuchs, B. (2005) "Un assistant pour la conception et le développement des systèmes de RÀPC", Dans *Plate-Forme AFIA 2005 - Atelier Raisonnement à Partir de Cas*, Sylvie Després ed. Nice.

[Coulibaly, 2008] Coulibaly, A. (2008) "Modélisation Sémantique et Evaluation de Performances Comportementales de Produits en Conception", *Mémoire de synthèse en vue d'obtenir l'HDR*.

[Culversouse, 1995] Culversouse, P.F. (1995) "Constraining designers and their CAD tools", *Design Studies*, n°16.

- D -

[Dalmasso et Sardas, 2008] Dalmasso, C. & Sardas, J.C. (2008) "Quelles contributions des gestionnaires des ressources humaines dans les stratégies d'internationalisation de recherche et développement? Etude d'un cas dans l'industrie automobile", *Congrès de l'Association francophone de Gestion des Ressources Humaines (AGRH)*, Dakar, Sénégal.

[Dassault, 2009] Dassault Systèmes (2009) "Dassault Systèmes Dominates Automotive Design", Communiqué de presse, www.3ds.com.

[Davenport et Prusak, 1998] Davenport, T. & Prusak, L. (1998) "Working Knowledge: How organizations manage what they know", Harvard Business School Press.

[Débarbouillé, 1994] Débarbouillé, G. (1994) "Design data structure - version 1.0", Rapport interne, Matra Datavision.

[Dieng et al, 1998] Dieng, R., Corby, O., Giboin, A. & Ribiere, M. (1998) "Methods and tools for corporate knowledge management", rapport technique 3485, INRIA.

[Dieter, 2000] Dieter, G.E. (2000) "Engineering design – A materials and processing approach", 3rd Edition, Mc Graw-Hill International Editions.

[Dorai et Jain, 1997] Dorai, C. & Jain, A.K. (1997) "COSMOS - A representation scheme for 3D free-form objects", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 19, 1115–1130.

[Dorville et al., 1996], Dorville, G., Lecompte, G., Serrafero, P. & Bourne, C. (1996) "Flange : assistant métier pour la conception optimale de liaisons à brides", Conférence Internationale IDMME'96 sur la Conception et la Fabrication Intégrées en Mécanique, Edition ECN, Nantes, p. 335-343.

[Duchamp, 1999] Duchamp, R. (1999) "Méthode de conception de produits nouveaux", Paris :Hermès Science Publications. ISBN : 2-7462-0045-7.

[Durruvu, 1989] Durruvu, S. (1989) "Knowledge based systems applications in engineering design : research at MIT", AI Magazine, 10(3), 79-96.

- E -

[Ermine, 2001] Ermine, J.L. (2001) "Les processus de la gestion des connaissances, Extraction et gestion des connaissances", H. Briand, F. Guillet (éd.), Hermès.

[Ermine et al., 1996] Ermine, J.L., Chaillot, M., Bigeon, P., Charreton B. & Malavielle, D. (1996) "MKSM, méthode pour la gestion des connaissances : Ingénierie des systèmes d'information", AFCET-Hermès, vol. 4, n°4, pp. 541-575.

[Estevez et al., 2006] Estevez, I., Dubois, S., Gartiser, N., Renaud, J. & Caillaud E. (2006) "Le raisonnement à partir de cas est-il utilisable pour l'aide à la conception inventive", 14^o atelier de Raisonnement à Partir de Cas, 30 – 31 Mars, Besançon, France.

[Eynard, 1999] Eynard, B. (1999) "Modélisation du produit et des activités de conception. Contribution à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie", thèse de l'université Bordeaux 1.

[Eynard et al., 2004] Eynard, B., Lombard, M., Matta, N. & Renaud, J. (2004) "Gestion dynamique des connaissances industrielles", Cachan, HERMES - LAVOISIER, 378 p.

[Eynard et Gomes, 2004] Eynard, B. & Gomes, S. (2004) "Collaborative and remote design of mechatronic products", In Perspective from Europe and Asia on Engineering, Design and Manufacture, Kluwer Academics Publishers, p261-270.

- F -

[Fall et al., 2003] Fall, A., Gomes, S. & Sagot, J.C. (2003) "An organizational change management experiment integrating CSCW Systems", In Conference International Association for Management Technology, IAMOT, pp.6.

[Fan et Bermell-Garcia, 2003] Fan, I.-S. & Bermell-Garcia, P. (2003). "Virtual Concept Modeling Using Design Knowledge", Virtual Concept 2003, Biarritz – France.

[Fdez-Riverola et al., 2007] Fdez-Riverola, F., Iglesias, E.L., Diaz, F., Mendez, J.R. & Corchado, J.M. (2007) "SpamHunting: An instance Based reasoning system for spam labelling and filtering", Decision Support System, Issue 3, pp 722-736.

[Fuchs, 1980] Fuchs, H. (1980) "On visible surface generation by priori tree structure", in SIGGRAPH'80 conference proceeding, pages 149-158.

- G -

[Gardan et al., 1995] Gardan, Y. (1995) "Emerging Technologies and Factory Automation", ETFA '95, Proceedings, 1995 INRIA/IEEE Symposium on Volume 2, Page(s):141 - 148 vol.2 Digital Object Identifier 10.1109/ETFA.1995.496653.

[Garro et al., 1995] Garro, O., Salau, I. & Martin, M. (1995) "Distributed design theory and methodology", Concurrent Engineering.

[Gero, 1987] Gero, J. S. (1987) "Prototypes: A new schema for knowledge-based design." Working Paper, Design Computing Unit, Department of Architectural Science, University of Sydney, Sydney, Australia.

[Gero, 1990] Gero, J.S. (1990). "Design prototypes: a knowledge representation schema for design." AI Magazine 11(4), 26-36.

[Gero et Maher, 1993] Gero, J. S. & Maher, M. L. (1993). "Modeling Creativity and Knowledge-Based Creative Design.", Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Gomes, 2008] Gomes, S. (2008) "Ingénierie à base de connaissances pour une conception, productive, optimisée, collaborative et innovante du système Projet-Produit-Process-Usage", Mémoire de synthèse en vue d'obtenir l'HDR.

[Gomes, 1999] Gomes, S. (1999) "Contribution de l'analyse de l'activité au processus de conception de produits innovants", thèse de doctorat.

[Gomes et al., 2009] Gomes, S., Varret, A., Bluntzer, J.B. & Sagot, J.C. (2009) "Functional design and optimization of parametric CAD models in a knowledge-based PLM environment", International Journal of Product Development, Vol. 9, Nos. 1/2/3, pp.60–77.

[Gomes et al., 2006] Gomes, S., Bluntzer, J.B., Bassir, D.H. & Mahdjoub, M. (2006) "Functional design through a PLM system for automatic creation of optimized 3D models", Congrès ASMDO (Association for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization).

[Gomes et al., 1999] Gomes, S., Sagot, J.C., Koukam, A. & Leroy, N. (1999) "MANERCOS, a new tool providing ergonomics in a concurrent engineering design life cycle", 4th Annual Scientific Conference on Web Technology, New Media, Communications and Telematics - Theory, Methods, Tools and Applications, EUROMEDIA 99, Munich, p 237-241.

[Gomes et Sagot, 2002] Gomes, S. & Sagot, J.C., (2002) "A concurrent engineering experience based on a cooperative and object oriented design methodology", In Best papers book from 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Kluwer Publishers, (Dordrecht, Pays bas), 11-18.

[Gronier, 2006] Gronier, G. (2006) "Psychologie ergonomique du travail collectif assisté par ordinateur : l'utilisation du collecticiel dans les projets de conception de produits", Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, en partenariat avec l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[Gronier et Sagot, 2009] Gronier, G. & Sagot, J.C. (2009) "Démarche d'intégration d'un collecticiel au sein d'une organisation : facteurs de résistance et d'appropriation", In B. Cahour, F. Anceaux, & A. Giboin (Eds.), Cinquième Colloque de Psychologie Ergonomique (EPIQUE), Nice, France, pp. 89-92.

[Gruber, 1993] Gruber, T.R. (1993) "A translation approach to portable ontology specifications", Knowledge Acquisition 5, 2, 199-221.

[Grundstein, 2002] Grundstein, M. (2002) "Le management des connaissances dans l'entreprise : problématique, axe de progrès, orientation", MG conseil, Paris, 21p.

- H -

[Heath et al., 2000] Heath, I., Wills, G., Crowder, R., Hall, W. & Ballantyne, J. (2000) "Toward a new authoring methodology for large scale hypermedia applications", *Multimedia Tools and Applications*, 12(2-3) :129-144.

[Hertel et Mehlhorn, 1983] Hertel, S. & Mehlhorn, K. (1983) "Fast triangulation of simple polygons", *Lecture Notes in Computer Science* 158:207-218.

[Hoffmann et Joan-Arinyo, 2001] Hoffmann, C.M. & Joan-Arinyo, R. (2001) "Parametric Modeling", *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, Edition North Holland.

[Hu et al., 2000] Hu, X., Pang, J., Pang, Y., Atwood, M., Sun, W. & Regli W.C. (2000) "A survey on design rationale: representation, capture and retrieval", *Proceedings of DETC'00, ASME Design Engineering Technical Conferences*, Baltimore.

- I -

[IEC, 1988] IEC (1988) "Preparation of function charts for control systems", Technical Report 848:1988, Geneva, Switzerland.

[ISO, 1985] ISO 5807:1985 (1985) "Information processing - Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts", program network charts and system resources charts.

- J -

[Jeantet, 1998] Jeantet, A. (1998) "Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception", *Sociologie du travail* 3.

[Jones, 1971] Jones, C.B. (1971) "A new approach to the hidden line problem", *Computer Journal* 14(3):232-237.

- K -

[Karkan et Tjoen, 1993] Karkan, J.M. & Tjoen, G. (1993) "Systèmes experts -Un nouvel outil pour l'aide à la décision", Masson édition. ISBN : 2-87343-022-2.

[Karlsson et al., 2008] Karlsson, L., Juslin, P. & Olsson, H. (2008) "Exemplar-based inference in multi-attribute decision making: Contingent, not automatic, strategy shifts?", *Judgment and Decision Making*, Vol. 3, No 3, pp. 244-260.

[Kolodner, 1992] Kolodner, J. (1992) "An introduction to case-based reasoning", *Artificial Intelligence Review* 6(1), pp. 3-34.

[Krishnan et Manocha, 1996] Krishnan, S. & Manocha, D. (1996) "Efficient representations and techniques for computing B-rep's of CSG models with NURBS primitives", Technical Report TR95-008, Department of Computer Science, University of N. Carolina, Chapel Hill. *Proceedings of CSG*, pp. 101-122.

- L -

[La Greca, 2005] La Greca, R. (2005) "Approche déclarative de la modélisation de surfaces", thèse de doctorat en informatique.

[La Greca et al., 2005] La Greca, R., Daniel, M. & Bac, A. (2005) "Local Deformation of NURBS Curves", Daehlen, M., Morken, K. and Schumaker, L. (eds.), *Mathematical Methods for Curves and Surfaces: Tromso 2004*, pages 243–252. Nashboro Press, Brentwood, TN.

[Labrousse, 2004] Labrousse, M. (2004) "Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise", Thèse délivrée conjointement par l'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.

[Labrousse et Bernard, 2008] Labrousse, M. & Bernard, A. (2008) "Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management", par Alain Bernard, Serge Tichkiewitch, Chapitre "FBS-PPRE, an enterprise Knowledge Lifecycle Model", DOI : 10.1007/978-3-540-78431-9_16, Springer, Page 285 à 302.

[Laprie, 1996] Laprie, J.C. (1996) "Guide de la sûreté de fonctionnement" CEPADUES Editions, Toulouse, ISBN 2.85428.382.1, 369p.

[Larive, 2008] Larive, M. (2008) "Modélisation de maquettes numériques de villes", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier.

[Lee, 1999] Lee, K. (1999) "Principles of CAD/CAM/CAE systems", Reading, Mass., Addison-Wesley.

[Lee et Kim, 1996] Lee, J.Y. & Kim K., (1996) "Geometric Reasoning For Knowledge Based Parametric Design Using Graph Representation", *Computer Aided Design*, vol. 28 No 10, pp. 8831-841.

[Le Moigne, 1977] Le Moigne, J.L. (1977) "La théorie du système général, Théorie de la modélisation", Paris: Col., Systèmes-Décisions, Presses Universitaires de France.

[Leparc et Marcé, 1993] LeParc, P. & Marcé, L. (1993) "Synchronous definition of GRAFCET with SIGNAL", in *IEEE SMC*.

[Lesage, 2002] Lesage, D. (2002) "Un modèle dynamique de spécifications d'ingénierie basé sur une approche de géométrie variationnelle", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.

[Liu et Xu, 2001] Liu, D.T. & Xu, X.W. (2001) "A review of web-based product data management systems", *Computer in Industry*, 44, 251-262.

[Lucas et al., 1989] Lucas, M., Martin, D., Martin, P. & Plemenos, D. (1989) "Le projet ExploFormes, quelques pas vers la modélisation déclarative de formes", Journées GROPLAN, Strasbourg.

[Lucas et Desmontils, 1995] Lucas, M. & Desmontils, E. (1995) "Les modeleurs déclaratifs", *Revue Internationale de CFAO et d'Informatique Graphique*, vol. 10, pages 559-586.

- M -

[Mach, 1995] Mach, M. (1995) "L'organisation apprenante comme système de transformation de la connaissance en valeur", *Revue Française de Gestion*, p. 43-45.

[Maculet et Daniel, 2003] Maculet, R. & Daniel, M. (2003) "Conception, modélisation géométrique et contraintes en CAO : Une synthèse", Rapport de Recherche LSIS-2003-005.

[Mahdjoub, 2007] Mahdjoub, M. (2007) "La réalité virtuelle pour une conception de systèmes mécaniques centrée sur l'utilisateur", Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[Malvache et al., 1994] Malvache, P., Eichenbaum, Ch. & Prieur, P. (1994) "La maîtrise du retour d'expérience avec la méthode rex", *Revue Performances Humaines et Technique* n°69.

[Man, 1999] Mann, D. (1999) "Axiomatic Design and TRIZ: compatibilities and contradictions", *TRIZ Journal*.

- [Mantyla, 1986] Mantyla, M. (1986) "Boolean Operations of 2-manifold Through Vertex Neighborhood Classification", *ACM Trans. on Graphics*, 5(1):1.
- [Maranzana et al., 2008] Maranzana, N., Gartsier, N. & Caillaud, E. (2008) "From concurrent engineering to collaborative learning of design", *International Journal of Design and Innovation Research*, Vol. 4, n°1, pp39-51.
- [Markides et Geroski, 2004] Markides, C. & Geroski, P. (2004) "Fast Second: How Smart Companies Bypass Radical Innovation to Enter and Dominate new Markets", *Joey-Bass*.
- [Marks, 1987] Marks, P. (1987) "What do solid models need?", *Machine Design*, 12.
- [Markus et Tanis, 2000] Markus, L.M. & Tanis, C. (2000) "The Enterprise System Experience - From Adoption to Success. Framing the Domains of IT Management", *R.W. Zmud Ann Arbor, Pinnaflex Educational Resources, Inc.*
- [Marsot, 2002] Marsot, J. (2002) "Conception et Ergonomie: Méthodes et outils pour intégrer l'ergonomie dans le cycle de conception des outils à mains", *INRS, Note scientifique et technique n°219*.
- [Matta et Ermine, 2001] Matta, N. & Ermine, J.L. (2001) "Gestion des connaissances et conception mécanique", *Journée AIPPriméca "Dynamique des connaissances en conception : acquisition, capitalisation et réutilisation "*, Grenoble, France.
- [McMahon et al., 2002] McMahon, C., Crossland, R., Lowe, A., Shah, T., Williams, J.H. & Culley, S.J. (2002) "No Zero Match' browsing of hierarchically categorised information entities", *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*.
- [Mel'cuk, 1988] Mel'cuk, I.A. (1988) "Dependency Syntax: Theory and Practice", *State University of New York Press*.
- [Millard et al., 2006] Millard, D.E., Tao, F., Doody, K., Woukeu, A. & Davis, H.C. (2006) "The knowledge life cycle for e-learning", *International journal of continuing Engineering Education and Lifelon Learning*, 16 : 110-121.
- [Moatti, 2008] Moatti, V. (2008) "Low cost sourcing... or high cost supplying?", *XVème conférence internationale de management stratégique de l'association internationale de management stratégique (AIMS), NICE*.

[Monticolo., 2008] Monticolo, D. (2008) "Une approche organisationnelle pour la conception d'un système de gestion des connaissances fondé sur le paradigme agent", Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

[Mutel, 1988] Mutuel, B. (1988) "Computer-Aided group Technology integrated systems", annals of CIRP, vol. 37, n°1.

- N -

[NF EN 1325-1, 1996] NF EN 1325-1 (1996) "Vocabulaire du management de valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle", Partie 1 : analyse de la valeur et analyse fonctionnelle.

[NF1, 1990] Norme Française X50-152, (1990) "Analyse de la Valeur, Caractéristiques fondamentales".

[NF2, 1991] Norme Française X50-151 (1991) "Guide pour l'élaboration d'un Cahier des Charges Fonctionnel".

[Nonaka et Takeuchi, 1995] Nonaka, I. & Takeuchi, H. (1995) "The Knowledge – Creating Compagny", Oxford University Press, Oxford.

- O -

[Obank et al., 1995] Obank, A., Leaney, P. & Roberts, S. (1995) "Data mangement within a manufacturing organization. Integrated Manufacturing Systems", 6(3):37–43.

[OCDE, 2005] OCDE (2005) "Principes directeurs pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation", Manuel d'Oslo, 3ème éd., Paris : OCDE.
<http://213.253.134.29/oecd/pdfs/browseit/9205112E.PDF>.

[Olson, 2008] Olson (2008) "Memory-Based Reasoning Methods", Advanced Data Mining Techniques, Springer Berlin Heidelberg Publisher, pp 39-52.

[Ostrosi et al., 2008] Ostrosi, E., Haxhiaj, L. & Ferney, M. (2008) "Configuration Grammars: Powerful tools for Product Modelling in CAD systems", Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering (CE2008), August 18-22, Belfast, Northern Ireland, Published in "Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World", Edited by: R. Curran, S-Y Chou, A. Trappey, Springer, Berlin, pp. 469-481.

- P -

[Pahl et Beitz, 1992] Pahl, G. & Beitz, W. (1992) "Engineering Design: A Systematic Approach", New York: Springer-Verlag, Edited by Ken Wallace.

[Paillot, 2004] Paillot, D. (2004) "Gestion des données pour la visualisation de maquettes numériques en environnement virtuel immersif. Application au design automobile", Thèse de doctorat.

[Piechowiak, 2003] Piechowiak, S. (2003) "Intelligence artificielle et diagnostic", Techniques de l'ingénieur, S7 217.

[Prasad, 1996] Prasad, B. (1996) "Concurrent Engineering Fundamentals", PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, VOL I: "Integrated Product and Process Organization". (ISBN 0-13-147463-4) and VOL II: "Integrated Product Development", (ISBN 0-13-396946-0).

[Prax, 2000] Prax, J.Y. (2000) "Le guide de knowledge management : Concepts et pratiques du management de la connaissance".

[PSA, 2009] Groupe PSA Peugeot Citroën, Direction des Plates-Formes Techniques et Achat, (2009) "Le cycle de vie d'un véhicule", Ressources pédagogiques, www.psa-peugeot-citroen.com/fr/psa_enseignant/display.php.

[PSA, 2007] PSA Group Press Release (2007) "Strategy an Ambition for 2010-2015".

- R -

[Requicha et Rossignac, 1991] Requicha, A.A.G. & Rossignac, J. R. (1991) "Constructive non-regularized geometry", Computer-Aided Design, 23(1).

[Reymen, 2001] Reymen, I. (2001) "Improving design process through structures reflexion – a domain-independent approach", PhD thesis, Eindhoven, The Netherlands.

[Rezayat, 2000] Rezayat, M. (2000) "Knowledge-based Product Development Using XML and KCs", Computer-Aided Design, 32(5): 299–309.

[Roller, 1991] Roller, D. (1991) "Advanced Methods For Parametric Design, Geometric Modelling Methods and Applications", Springer-Verlag, p. 251-266.

[Rose, 2004] Rose, B. (2004) "Proposition d'un référentiel support à la conception collaborative : CO²MED (COllaborative CONflict Management in Engineering Design), Prototype logiciel dans le cadre du projet IPPOP", Thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I.

[Ross, 1989] Ross, B.H. (1989) "Some psychological results on case-based reasoning", Case-Based Reasoning Workshop, DARPA, Pensacola Beach, Morgan Kaufmann, pp 144-147.

[Roucoules, 2007] Roucoules, L. (2007) "Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit", Mémoire de synthèse en vue d'obtenir l'HDR.

- S -

[Saaksvuori et Immonen, 2004] Saaksvuori, A. & Immonen, A. (2004) "Product Lifecycle Management", Springer, Berlin.

[Safizadeh et al., 2003] Safizadeh, M.H., Field, J.M. & Ritzman, L.P. (2003) "An empirical analysis of financial services processes with a front-office or back-office orientation", Journal of Operations Management 21, pages 557-576.

[Sagot, 1999] SAGOT, J.C. (1999) "Ergonomie et conception anthropocentrée", document pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, INPL.

[Sagot et al., 2003] Sagot, J.C., Gouin, V. & Gomes, S. (2003) "Ergonomics in product design: a safety factor", Safety Science International Journal, vol. 41, no. 2-3, pp.137-154.

[Samet, 1984] Samet, H. (1984) "The quadtree and related hierarchical data structures", ACM Computing Surveys 6(2):187-260.

[Schank, 1982] Schrank, R. (1982) "Dynamic memory; a theory of reminding and learning in computers and people", Cambridge University Press.

[Schreiber et al., 1999] Schreiber, G., Akkermans, H., Anjewierden, A., De Hoog, R., Shadbolt, N., Van De Felde, W. & Wielinga, B. (1999) "Knowledge Engineering and Management: The CommonKADS Methodology", MIT press.

[Schuh et al., 2008] Schuh, G., Rozenfeld, H., Assmus, D. & Zancul E. (2008) "Process oriented framework to support PLM implementation", Computers in Industry 59, Nr. 8, S. 210-218.

- [Serrafero, 2000] Serrafero, P. (2000) "Cycle de vie, maturité et dynamique de la connaissance : des informations aux cognitions de l'Entreprise Apprenante", Revue Annuelle ENSAM des Arts et Métiers sur le Knowledge Management, Edition Dunod, 2000, p. 158-169.
- [Serrafero, 1998] Serrafero, P. (1998) "From CAD/CAM to KAD/KAM for the design of congruent products of the extended enterprise", UNIMEP seminar, 3e Seminario Internacional de Alta Tecnologia, San Paolo, p. 90-104.
- [Serrafero et al., 2006] Serrafero, P., Gomes, S., Bonnivard, D. & Jezequel, L. (2006) "De la mémoire projet à la compétence métier : vers la synthèse de connaissances métier en ingénierie robuste des produits/process", IDMME 2006, May.
- [Shadbolt et Milton, 1999] Shadbolt, N. & Milton N. (1999) "From knowledge engineering to knowledge management", British Journal of Management, 10(4) : 309-322.
- [Shah, 1986] Shah, J.J. (1986) "A schema for CAD – CAPP Integration", Report, Automation Systems Laboratory, General Electric Corp. Research and Development Center, Schenectady, NY.
- [SIEMENS, 2008] SIEMENS Press Release (2008) "Siemens PLM Software Delivers the Next Big Breakthrough in Digital Product Development with Synchronous Technology", PLANO, Texas and HANNOVER, Germany, April 22.
- [Simperl, 2009] Simperl, E. (2009) "Reusing ontologies on the Semantic Web: A feasibility study", Data & Knowledge Engineering 68, pp. 905–925.
- [Sohlenius, 1992] Sohlenius, G. (1992) "Concurrent engineering", Annals of the CIRP.
- [Sowa, 1976] Sowa, J.F. (1976) "Conceptual graphs for a database interface", IBM Journal of Research and Development 20(4):336–357.
- [Stein et Medioni, 1992] Stein, F. & Medioni, G. (1992) "Structural indexing: Efficient 3-D object recognition", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14, 125–145.
- [Studer et al., 1998] Studer, R., Benjamins, V.R. & Fensel, D. (1998) "Knowledge Engineering: Principles and Methods", Data and Knowledge Engineering, Volume 25, Number 1, March, PP. 161 -197, Elsevier.
- [Suh, 1999] Suh, N.P. (1999) "Application of Axiomatic Design", Integration of process Knowledge into Design Support, ISBN 0-7923-5655-1, Kluwer Academic Publishers.

[Suh, 1998] Suh, N.P. (1998) "Axiomatic Design Theory for Systems", Research in Engineering Design, Vol. 10, pp. 189-209.

[Suh, 1990] Suh, N.P. (1990) "The Principles of Design", Oxford Press, New York.

- T -

[Tarpin-Bernard et David, 1996] Tarpin-Bernard, F. & David, B.T. (1996) "Ergonomie du Travail coopératif en conception", ERGO-IA'96, Biarritz.

[Thibault, 2008] Thibault, A. (2008) "Contribution à l'intégration produit – processus de fabrication, application au domaine de la forge", Thèse de doctorat, spécialité Génie Industriel.

[Tichkiewitch, 1996] Tichkiewitch, S. (1996) "Specification on integrated design methodology using a multi-view product model", ESDA Proceedings of the 1996 ASME System Design and Analysis Conference, PD-Vol. 80, pp. 101-108.

[Tisseau et Nedelec, 2003] Tisseau, J. et Nedelec, A. (2003) "Réalité virtuelle : un contexte historique interdisciplinaire - Protohistoire de la réalité virtuelle (1963-1989)", Revue Internationale de CFAO et d'Infographie. n° Volume 17, pp. 263-278.

[Tollenaere, 1998] Tollenaere, M. (1998) "Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles, outils", Hermès.

- U -

[Ullman, 2009] Ullman, D.G. (2009) "The mechanical design process", 4 ed., McGraw-Hill Higher Education, New York.

[Umeda et al., 1996] Umeda, Y., Ishii, M., Yoshioka, M. & Tomiyama, T. (1996) "Supporting conceptual design based on the Function-Behavior-State modeler", In Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AIEDAM) , Vol. 10, No. 4, pp. 275-288.

[Umeda et al., 1990] Umeda, Y., Takeda, H., Tomiyama, T. & Yoshioka, M. (1990) "Function, behavior and structure", Gero, J.S., editor, Applications of Artificial Intelligence in Engineering V, volume 1, pages 177-194, Berlin, Springer-Verlag.

[United Nations, 2005] United Nations (2005) "Globalization of R&D and developing countries", Proceedings of the Expert Meeting, 24-26 January, Geneva, Switzerland.

- V -

[Van Emmerik et al., 1993] Van Emmerik, M., Rappoport, A. & Rossignac, J. (1993) "Simplifying interactive design of solid models: A hypertext approach", The Visual Computer, vol. 9, No. 5, pp. 239-254.

[Vargas, 1995] Vargas, C. (1995) "Design process modelisation in mechanical systems engineering, implementation based on the propagation of the constraints, application to the design of an automobile cylinder head", (in French), PHD Thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France.

[VW, 2008] Speech Manuscript Prof. Dr. Winterkorn, (2008), Annual Press Conference.

- W -

[Waltz, 1972] Waltz (1972) "Generating semantic descriptions from drawings of scenes with shadows", MIT Library.

[Wojna, 2005] Wojna, A. (2005) "Analogy-Based Reasoning in classifier construction", Lectures Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg Publisher, pp 277-374.

[Wong et al., 2006] Wong, S.C., Crowder, R.M., Wills, G.B. & Shadbolt, N.R. (2006) "Knowledge engineering – from front line support to preliminary design", Proceedings of ACM Symposium on Document Engineering, Amsterdam, The Netherlands, p. 44-52.

- Y -

[Yan, 2001] Yan, X.T. (2001) "A multiple perspective product modeling and simulation approach to engineering design support", Concurrent Engineering Research and Application Journal (CERA): 221-234.

- Z -

[Zaibet, 2006] Zaibet, O. (2006) "Collaboration dans l'entreprise et intelligence collective", La XVème conférence internationale de management stratégique de l'association internationale de management stratégique (AIMS), Annecy.

[Zeid, 1991] Zeid, I. (1991) "CAD/CAM theory and practice", New York: McGraw-Hill.

Intégration des savoir-faire métier produit-process pour une amélioration de la productivité en développement de produits de style

Résumé :

Face à un durcissement des objectifs de performance Qualité-Coûts-Délais des donneurs d'ordre, à un environnement économique à faible croissance et à forte concurrence, nous constatons une baisse de compétitivité des fournisseurs français au sein de la filière automobile. L'intensification de cette concurrence leur impose un renouvellement rapide de leurs produits à des coûts toujours plus réduits. Aujourd'hui, les processus d'ingénierie qualifiés de "reconception" représentent dans les bureaux d'études de ces fournisseurs environ 80% du temps, 20% du temps restant étant dédiés à l'innovation, processus hautement stratégique pour assurer la pérennité de l'entreprise. La conception de produits nouveaux reste au cœur des problématiques industrielles. De ce fait, le renouvellement continu de leurs gammes de produits et l'innovation deviennent dès lors indispensables.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons à la problématique d'ingénierie collaborative en entreprise étendue et à l'intégration des connaissances métier en conception routinière et innovante pour accélérer justement le processus de conception de produits, afin de faire des produits toujours plus robustes et dans des délais toujours plus courts.

A travers différentes expérimentations conduites aussi bien en contexte académique qu'en contexte industriel, ce travail de recherche nous a amené à développer un modèle permettant d'accélérer le processus de conception de produits en réduisant les temps qui sont dédiés à la reconception. Se fondant sur le paradigme de raisonnement à partir de cas, ce nouveau modèle montre qu'il est ainsi possible de fournir un système d'aide efficace aux différents acteurs métier impliqués dans le processus de conception et de développement de produit. Ce travail montre également quelques limites au modèle arrêté et propose à cet égard des perspectives de recherche pour avancer sur le sujet.

Mots clés :

processus de conception de produits mécanique, ingénierie routière, modélisation CAO, ingénierie collaborative, PLM, ingénierie à base de connaissances, produit de style, raisonnement à partir de cas

Integration of expert product-process knowledge to improve productivity in the development of designed products.

Abstract:

In the face of more intense quality-cost-deadline performance objectives from clients, in an economic climate of weak growth and a high level of competition, we note a decline in competitiveness amongst French suppliers at the heart of the automobile industry. The intensification of this competition impose on them a rapid revitalisation of their products at ever reduced costs.

Today, the engineering processes termed as redesign represent around 80% of time spent in the design offices of these suppliers, the remaining 20% being dedicated to innovation. A highly strategic process to ensure the company's durability. The conception of new products remains at the heart of industrial problems. As a consequence, the continuous renewal of their product ranges and innovation are becoming indispensable for the future.

In the framework of this thesis, we will look at the problem of collaborative engineering in a large company and of the integration of professional knowledge in routine and innovative conception to accelerate the process of product conception, in order to make ever more robust products in ever tighter deadlines.

Through different experimentations carried out in both academic and industrial contexts, this research work has enabled us to develop a model that allows the speeding up of the product conception process whilst reducing the time dedicate to reconception. Based on a paradigm of case based reasoning, this new model thus shows that it is possible to provide an efficient help system to different professional agents involved in the processes of conception and product development. This work also shows some limitations of the finished model and, in this regard proposes some research prospects to make progress in the subject.

Keywords:

mechanical product design process, routine engineering, CAD modelling, collaborative engineering, PLM, Knowledge-Based Engineering, designed product, Case-Based Reasoning.