



**HAL**  
open science

# Proposition d'un modèle produit liant la maquette numérique aux données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique

Mohamed Islem Ouamer Ali

## ► To cite this version:

Mohamed Islem Ouamer Ali. Proposition d'un modèle produit liant la maquette numérique aux données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole centrale de Nantes, 2016. Français. NNT: . tel-01693501

**HAL Id: tel-01693501**

**<https://hal.science/tel-01693501v1>**

Submitted on 26 Jan 2018

**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.

# Thèse de Doctorat

**Mohamed OUAMER-ALI**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du  
grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes  
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : **SPIGA**

Discipline : Génie Mécanique  
Unité de recherche : **UMR 6597**

Soutenue le **21 Novembre 2016**

**Proposition d'un modèle produit liant la maquette numérique  
aux données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique**

## **JURY**

Rapporteurs :	<b>Emmanuel CAILLAUD</b> , Professeur des Universités, Université de Strasbourg <b>Nabil ANWER</b> , Maître de Conférences, Ecole Normale Supérieure de Cachan
Examineurs :	<b>Frédéric NOËL</b> , Professeur des Universités, Grenoble INP
Invité(s) :	<b>Harvey ROWSON</b> , Ingénieur, DeltaCAD
Directeur de Thèse :	<b>Alain BERNARD</b> , Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes
Co-Directeur de Thèse :	<b>Sébastien REMY</b> , Maître de Conférences HDR, Université de Technologie de Troyes
Co-Encadrant :	<b>Florent LAROCHE</b> , Maître de Conférences, Ecole Centrale de Nantes









# Remerciements

Cette thèse a été effectuée à l'Ecole Centrale de Nantes, et plus précisément, à l'Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes (IRCCyN, UMR CNRS 6597).

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Alain BERNARD, professeur des universités, qui m'a accueilli au sein de l'équipe IS3P, et qui m'a permis de travailler sur cette thèse, ainsi que sur le projet METIS qui a fourni un environnement propice pour le développement de nouvelles idées et solutions.

Je remercie Monsieur Florent LAROCHE maître de conférences, ainsi que Monsieur Sébastien REMY maître de conférences HDR, pour m'avoir fourni un appui méthodologique conséquent, qui m'a permis d'explorer cette thèse même en ayant emprunté des chemins qui ne sont pas balisés.

Je tiens à remercier les différents collaborateurs avec lesquels j'ai travaillé sur le projet METIS. Ce projet nous a permis à tous de faire mûrir notre vision de la rétro-conception et d'échanger de manière dynamique nos idées sur le sujet.

Je remercie Monsieur Emmanuel CAILLAUD, professeur des universités, ainsi que Monsieur Nabil ANWER, maître de conférences HDR, d'avoir accepté de relire et de rapporter mon travail de thèse. Je remercie aussi Monsieur Frédéric NOËL, professeur des universités pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Farouk BELKADI, ingénieur de recherche à l'Ecole Centrale de Nantes pour m'avoir aidé avec les différentes discussions formelles et informelles sur le sujet, ainsi que son aide durant les phases de préparation.

Je remercie mes amis et collègues de bureau avec qui j'ai échangé sur nos différents travaux et m'ont permis d'avoir plus de recul ainsi qu'un soutien moral durant toute la période de la thèse.

Je remercie vivement ma femme Ines, qui m'a épaulé et supporté durant toute la période de la thèse, et qui m'a permis d'avoir les idées claires en périodes troubles. Sans oublier ma fille Salma qui me motive chaque jour pour donner le meilleur de moi-même.

J'exprime une profonde reconnaissance à mes parents Riad et Ghalia, sans qui tout cela ne serait pas arrivé. Je remercie aussi, mes frères et sœur, ainsi que ma belle-famille qui m'ont grandement aidé.

Finalement, je tiens à remercier toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail. Je vous suis infiniment reconnaissant.

*Merci !*





# Table des matières

## Liste des Figures

## Glossaire

<b>Chapitre I - Introduction au contexte général de la thèse</b> .....	12
I. Introduction générale.....	13
II. Présentation du contexte général de la thèse .....	15
III. Plan de la thèse .....	18
<b>Chapitre II - Problématique et état de l’art : La rétro-conception et l’ingénierie des connaissances</b> .....	19
<b>Problématique et contexte spécifique de notre étude</b> .....	20
I. Motivations.....	20
1. Contexte industriel .....	20
2. Projet ANR METIS .....	21
3. Contexte scientifique.....	24
II. Problématique.....	25
III. Hypothèses et objectifs.....	28
<b>Introduction à l'état de l'art</b> .....	30
<b>Rétro-conception : Concepts, méthodes et techniques</b> .....	31
I. Débuts de la rétro-conception .....	31
II. Rétro-conception : Définitions .....	32
1. Définitions de la rétro-conception.....	32
2. Proposition d’une nouvelle définition pour la rétro-conception dans notre contexte ...	34
a. Niveaux d’abstraction et degrés d’abstraction.....	34
b. Informations et connaissances .....	34
c. Nouvelle définition de la rétro-conception.....	35
III. Finalités de la rétro-conception .....	35
1. Refabrication .....	35
2. Reengineering.....	36
3. Reconception.....	37
IV. Travaux sur la rétro-conception .....	37
1. La rétro-conception conventionnelle.....	37
2. Méthodologies .....	38
a. REFAB .....	38
b. VPERI.....	40

c.	MERGE .....	44
d.	PHENIX .....	46
e.	DHRM : Rétro-conception d'objets industriels à caractère patrimonial .....	49
V.	Conclusion de la partie .....	51
	<b>Ingénierie des connaissances : Concepts, outils, et méthodes.....</b>	<b>53</b>
I.	Définitions de la connaissance .....	54
II.	Typologie de la connaissance.....	56
III.	La représentation des connaissances .....	58
1.	Formes de représentation des connaissances .....	58
2.	Difficulté d'utilisation .....	60
IV.	Modélisation des connaissances.....	61
1.	La capitalisation des connaissances .....	62
2.	L'élaboration des modèles .....	63
a.	Modèle FBS.....	63
b.	CPM et OAM.....	64
c.	Modèle holonique .....	67
d.	Modèle PPO .....	68
e.	Modèle FBS-PPRE .....	70
f.	Modèle MOKA.....	71
g.	Synthèse .....	72
V.	Conclusion de la partie .....	73
	<b>Conclusion du chapitre II : Evolution de la rétro-conception.....</b>	<b>75</b>
I.	Manques relatifs à la rétro-conception .....	75
1.	Prise en compte des données hétérogènes.....	75
2.	Intégration des connaissances .....	76
II.	Evolution du point de vue conceptuel.....	77
III.	Evolution du point de vue opérationnel .....	78
1.	Caractérisation du sous-système de traitement des données hétérogènes :.....	78
2.	Caractérisation du sous-système de gestion des connaissances :.....	79
3.	Intégration des systèmes.....	79
IV.	Formalisation de la nouvelle méthodologie de rétro-conception.....	79
	<b>Chapitre III - Proposition d'une nouvelle méthodologie de rétro-conception intégrée.....</b>	<b>82</b>
	<b>Introduction au chapitre III.....</b>	<b>83</b>
	<b>Intégration des données hétérogènes pour la rétro-conception.....</b>	<b>85</b>
I.	La représentation de l'information et des connaissances .....	86

1.	La représentation conceptuelle.....	87
2.	La représentation formelle (opérationnelle).....	88
II.	Intégration des données hétérogènes.....	88
1.	Définition de l'intégration des données hétérogènes.....	89
2.	Informations à extraire des données hétérogènes.....	90
3.	Lien entre les données hétérogènes, et le modèle-produit.....	90
4.	Exploitation du lien dans le cadre de la rétro-conception.....	91
III.	Processus d'analyse des données hétérogènes.....	92
1.	Modèle de données pour l'analyse des données hétérogènes.....	93
2.	Analyse des représentations formelles.....	94
a.	Identification du type de la donnée à analyser.....	94
b.	Prétraitement de la donnée à analyser.....	94
3.	Analyse des représentations conceptuelles.....	95
a.	Identification des types d'informations prétraitées.....	95
b.	Analyse des informations.....	96
IV.	Conclusion de la partie.....	96
	<b>Rôle des connaissances dans la nouvelle méthodologie de rétro-conception.....</b>	<b>98</b>
I.	Les niveaux d'abstraction des représentations du produit.....	98
II.	Formalisation du produit dans le contexte de rétro-conception.....	100
1.	Le processus de conception classique.....	101
2.	Différences entre la rétro-conception et la conception.....	102
a.	Approche ascendante contre approche descendante.....	102
b.	Différences entre les concepts initiaux utilisés dans les deux processus.....	102
3.	Différences entre les représentations du produit dans la conception et la rétro-conception.....	103
III.	Représentation du produit dans la rétro-conception.....	103
1.	Représentation absolue du produit (informations intrinsèques).....	105
a.	Description de la représentation absolue.....	105
b.	Modèle-produit : représentation intrinsèque.....	105
2.	Représentation relative du produit.....	107
a.	Description de la représentation relative.....	107
b.	Modèle-produit : représentation relative pour la conception.....	108
3.	Lien entre la représentation absolue et les représentations relatives.....	110
IV.	Conclusion de la partie.....	111
	<b>Concept de facettes d'informations pour l'organisation des représentations.....</b>	<b>113</b>
I.	Le besoin de gérer un ensemble d'informations contextuelles dans l'élaboration du produit.....	114

II.	L'élaboration du contexte de développement du produit.....	116
III.	Le concept de facettes d'informations .....	117
1.	Définition du concept .....	118
a.	Le cycle de vie du produit .....	119
b.	Les modèles-produit.....	119
c.	Les modèles métier.....	120
d.	La représentation systémique des produits .....	120
2.	Objectif du concept .....	121
IV.	Formalisation du concept et son utilisation.....	121
V.	Modélisation du concept de facettes d'informations.....	124
VI.	Conclusion de la partie.....	125
	<b>Le concept Ki4D pour l'organisation du processus de rétro-conception.....</b>	<b>128</b>
I.	Formaliser le processus de rétro-conception.....	129
1.	Formalisation relative au produit .....	129
2.	Formalisation relative au processus .....	130
II.	Le concept Ki4D .....	132
1.	Définition du concept Ki4D .....	133
2.	Objectif du concept Ki4D .....	133
III.	Les concepts relatifs à la démarche de Ki4D .....	134
1.	Eléments de produit (statiques).....	134
2.	Eléments de processus (dynamiques).....	135
3.	L'espace 4D.....	136
a.	Définition de l'espace 4D .....	136
a.	Objectif de l'espace 4D .....	139
b.	Utilisation de l'espace 4D.....	139
c.	Travail du moteur de workflow .....	141
IV.	Modélisation du concept Ki4D .....	142
1.	Modélisation du processus (Gestion de la rétro-conception).....	143
2.	Modèle global.....	144
V.	Conclusion de la partie.....	146
1.	Apport du modèle global pour la rétro-conception .....	148
a.	Prise en compte de différentes formes d'information en entrée.....	148
b.	Intégration des connaissances produit plus complète .....	149
c.	Structuration du processus de rétro-conception de façon modulaire.....	149
2.	Conclusion.....	150
	<b>Chapitre IV – Cas d'étude - Démonstrateur.....</b>	<b>152</b>
I.	Présentation du démonstrateur .....	153



1.	Architecture du démonstrateur .....	154
2.	Interface du démonstrateur.....	155
II.	Premier cas d'étude : reconception d'un stylo 4 couleurs.....	157
1.	Objet étudié .....	157
2.	Données hétérogènes pour l'analyse .....	158
3.	Objectif de la rétro-conception du stylo 4 couleurs .....	159
a.	Objectif.....	159
b.	Facette de sortie du processus.....	159
4.	Méthodologie de rétro-conception – Rétro-Conception Assistée par Ordinateur.....	160
a.	Etapas du processus de rétro-conception.....	160
b.	Données hétérogènes .....	162
c.	Prétraitement des données hétérogènes .....	164
d.	Extraction des informations et connaissances.....	165
e.	Intégration des données hétérogènes .....	167
f.	Recherche de correspondances .....	169
III.	Deuxième cas d'étude : reengineering de l'attelage mobile d'un moteur monocylindre	169
1.	Objet étudié .....	169
2.	Données hétérogènes pour l'analyse .....	170
3.	Objectif de la rétro-conception de l'attelage mobile.....	171
a.	Objectif.....	171
b.	Facette de sortie du processus.....	171
4.	Méthodologie de rétro-conception .....	172
a.	Etapas du processus de rétro-conception.....	172
b.	Données hétérogènes .....	174
c.	Prétraitement des données hétérogènes .....	175
d.	Extraction des informations et connaissances et intégration des données hétérogènes	175
IV.	Synthèse .....	177
V.	Conclusion.....	177
	<b>Chapitre V – Discussions et conclusion.....</b>	<b>179</b>
I.	Conclusion.....	180
II.	Discussions.....	183
1.	Liens des données hétérogènes et du modèle-produit.....	183
2.	Modélisation des connaissances.....	184
3.	Concept de facettes d'informations.....	184
4.	Concept Ki4D.....	184

<b>Références bibliographiques</b> .....	186
<b>Annexes</b> .....	197
Rétro-conception conventionnelle.....	201
1. Acquisition des données géométriques .....	198
2. Reconstruction surfacique .....	199
a. Echantillonnage .....	200
b. Filtrage des bruits.....	200
c. Maillage .....	200
3. Segmentation et ajustement des surfaces .....	201
a. Techniques de segmentation.....	201
4. Création du modèle 3D (modélisation des solides).....	203
Méthodes de capitalisation des connaissances.....	207
1. MKSM / MASK.....	204
2. CommonKADS .....	204
3. MOKA.....	205
4. Synthèse .....	206
Données hétérogènes pour la démonstration.....	211

# Liste des figures et tableaux

## Chapitre I

Figure 1.1 – Schéma de principe de la démarche proposée.....	20
--	----

## Chapitre II

Figure 2.1 – Assemblage simple représentant les pièces mécaniques d’un moteur.....	25
Figure 2.2 – Positionnement du processus de METIS dans le contexte du cycle de vie d’un système.....	26
Figure 2.3 – Cohérence des fonctions de METIS dans le but d’atteindre les résultats attendus .....	28
Figure 2.4 – Décomposition du processus de rétro-conception.....	30
Figure 2.5 – Rétro-conception et refabrication d’un bouchon de radiateur (Delahaye 135) [Nartz & al. 02] .....	40
Figure 2.6 – Etapes du processus de rétro-conception de REFAB [Thompson & al.99].....	43
Figure 2.7 – Processus global de VPERI [VPERI] .....	45
Figure 2.8 – (A) Processus de rétro-conception – (B) Processus de reengineering – (C) Processus de reconception.....	46
Figure 2.9– Workflow de rétro-conception pour le réducteur [VPERI] .....	47
Figure 2.10 – Refabrication du réducteur : ancien système (haut), et nouveau système (bas) [VPERI] .....	47
Figure 2.11 – Un utilisateur interagissant avec le système MERGE [Musuvathy & al. 05].....	49
Figure 2.12 – Situation de la méthodologie de rétro-conception par rapport au cycle de vie du produit [Durupt & al. 13].....	50
Figure 2.13 – Extension du modèle CPM pour la rétro-conception [Durupt & al. 13] .....	52
Figure 2.14 – Workflow de PHENIX [Durupt & al. 13] .....	52
Figure 2.15 – Le rétro-processus de conception contextualisé adapté au cadre patrimonial [Laroche, 07]. .....	53
Figure 2.16 – Méthodologie de rétro-conception [Bernard & al.09a] .....	54
Tableau 2.1 – Comparaison des différents projets de l’état de l’art sur la rétro-conception....	56
Figure 2.17 – Typologie des connaissances [Chandrasegaran & al. 12].....	61
Tableau 2.2 – Les différents types de connaissances [Alavi & al. 01] .....	61
Figure 2.18 – Livrables suivant les formes de représentation des connaissances [Chandrasegaran & al. 12] .....	63
Figure 2.19 – Les formes de représentation des connaissances dans le cycle de développement [Chandrasegaran & al. 12] .....	64
Figure 2.20 – Processus de capitalisation des connaissances [Laroche 07] .....	66

Figure 2.21 – Relations entre les fonctions, les comportements, et les structures [Gero & al. 03]	68
Figure 2.22 – Le modèle CPM (Core Product Model) [Sudarsan & al., 2005]	69
Figure 2.23 – Le modèle OAM (Open Assembly Model) [Foufou & al. 2005]	70
Figure 2.24 – Le modèle « Holonique » [Terzi & al. 2005]	71
Figure 2.25 – Les vues Projet Processus et Organisation du projet IPPOP [Rose, 04]	72
Figure 2.26 – Le modèle-produit dans le projet IPPOP [Noel & al. 2008]	73
Figure 2.27 – Diagramme de classes du modèle FBS-PPRE [Labrousse & al. 08]	74
Figure 2.28 – Modèle-produit MOKA [MOKA]	75
Tableau 2.3 – Synthèse des modèles de connaissances	77
Figure 2.29 – Schéma de formalisation de la nouvelle méthodologie de rétro-conception	84

### Chapitre III

Figure 3.1 – Les différentes formes d’informations dans un livrable	91
Figure 3.2 – Prétraitement des données en entrée avec traduction en forma neutre et décomposition	93
Figure 3.3 – Intégration des données hétérogènes	93
Figure 3.4 – Correspondance entre les formes de représentation et le modèle-produit	94
Figure 3.5 – Lien entre les données hétérogènes et le modèle-produit	95
Figure 3.6 – Algorithmes d’extraction des informations à partir des données hétérogènes	96
Figure 3.7 – Périmètre du processus d’analyse des données hétérogènes	96
Figure 3.8 – Modèle de données simplifié pour la gestion des données hétérogènes	97
Figure 3.9 – Illustration de la notion de degré d’abstraction	103
Figure 3.10 – Illustration de la notion de niveau d’abstraction	104
Figure 3.11 – Périmètre de la structure d’informations et connaissances dans la nouvelle méthodologie de rétro-conception	108
Figure 3.12 – Modèle de connaissances produit intrinsèques	110
Figure 3.13 – Coupe latérale d’une pièce d’un stylo quatre couleurs [CAD Blog]	111
Figure 3.14 – Modèle-produit relatif à la conception	113
Figure 3.15 – Points-de-vue définis comme une vue et une sélection d’informations à partir d’un ensemble commun [Ouamer-Ali & al. 16]	119
Figure 3.16 – Définition de la facette qui regroupe différentes perspectives	123
Figure 3.17 – Le concept de contraintes interdisciplinaires [Kleiner & al. 03]	124
Figure 3.18 – Connections entre les points-de-vue « métiers », et le point-de-vue « produit »	126
Tableau 3.1 – Quelques exemples de facettes d’informations	126
Figure 3.19 – Diagramme de classes du modèle de facettes d’informations	128
Figure 3.20 – Extraction et structuration des informations à partir des données hétérogènes	134
Figure 3.21 – Cartographie des activités du processus de rétro-conception	135

Figure 3.22 – Périmètre de mise en place et d'intervention de la démarche Ki4D dans le processus de rétro-conception.....	136
Figure 3.23 – Espace d'informations et connaissances Ki4D avec P, Q et R représentant les différents états du produit.....	138
Figure 3.24 – Exemple d'une représentation contextuelle regroupant des éléments d'informations pour une facette du contexte d'élaboration de la structure fonctionnelle d'un produit.....	139
Figure 3.25 – (A vers B) : Evolution d'une représentation géométrique du produit à travers la création d'un maillage. (B vers C) : Nouvelle représentation en éléments finis – Adapté de [AutoFEM] .....	140
Figure 3.26 – Utilisation de l'espace Ki4D pour le processus de rétro-conception.....	144
Figure 3.27 – Diagramme de package du modèle global pour le processus de rétro-conception .....	147
Figure 3.28 – Modèle processus du concept Ki4D.....	148
Figure 3.29 – Modèle global détaillé de la démarche Ki4D.....	149
Figure 3.30 – Situation de la rétro-conception classique par rapport à la nouvelle méthodologie de rétro-conception.....	152

## Chapitre IV

Figure 4.1 – Diagramme de package du démonstrateur.....	158
Figure 4.2 – Interface du démonstrateur de la démarche Ki4D – vue virtuelle.....	159
Figure 4.3 – Interface du démonstrateur de la démarche Ki4D – vue textuelle.....	159
Figure 4.4 – Interface du démonstrateur de la démarche Ki4D – vue picturale.....	160
Figure 4.5 – Création d'un projet de rétro-conception dans le démonstrateur.....	160
Figure 4.6 – Sélection des données hétérogènes dans le démonstrateur.....	161
Figure 4.7 – Objet étudié pour la démonstration : stylo 4 couleurs.....	162
Figure 4.8 – Nomenclature du stylo 4 couleurs.....	164
Figure 4.9 – Activités du processus de rétro-conception dans le cas d'étude.....	165
Figure 4.10 – Schéma de l'espace 4D pour l'exemple de la reconception du stylo.....	165
Figure 4.11 – Fraction du diagramme d'objets montrant l'instanciation du modèle pour les données hétérogènes – exemple du fichier PDF .....	167
Figure 4.12 – Chargement des données hétérogènes du stylo (Démonstrateur) .....	167
Figure 4.13 – Diagramme de séquence du processus de prétraitement (HTML) .....	168
Figure 4.14 – Prétraitement des données hétérogènes du stylo effectué.....	169
Figure 4.15 – Diagramme de séquence montrant le processus d'extraction des informations et connaissances – exemple des données du fichier HTML.....	170
Figure 4.16 – Instance du modèle de facette avec les informations extraites à partir des données hétérogènes, et utilisation du modèle-produit (intrinsèque) et du modèle métier de conception.....	171
Figure 4.17 – Résultats de l'intégration des données dans le démonstrateur (cas du stylo)....	172

Figure 4.18 – Objet étudié pour la démonstration : attelage mobile d’un moteur monocylindre Diesel.....	174
Figure 4.19 – Nomenclature de l’attelage mobile du moteur monocylindre Diesel.....	176
Figure 4.20 – Activités du processus de rétro-conception pour le reengineering.....	177
Figure 4.21 – Schéma de l’espace 4D pour l’exemple du reengineering du moteur.....	178
Figure 4.22 – Chargement des données hétérogènes du moteur (Démonstrateur) .....	178
Figure 4.23 – Prétraitement des données hétérogènes du stylo effectué (Démonstrateur) .....	179
Figure 4.24 – Résultats de l’intégration des données dans le démonstrateur (cas du moteur) (Démonstrateur) .....	180

## Annexes

Figure A.1 – Synthèse des différentes technologies de digitalisation d’objets [Kumar & al. 13] .....	202
Figure A.2 – Points en blancs : triangulation de Delaunay. Points en noirs: diagramme de Voronoï [@Maillage] .....	204
Figure A.3 – Exemples de segmentation à l’aide d’algorithmes de croissance de régions [Lavoué & al. 05] .....	205
Figure A.4 – Illustration de la technique de Ligne de Partage des Eaux [Fisher, 14] .....	205
Figure A.5 – Surfaces ajustée sur régions du nuage de points colorées [Weiss & al. 02] .....	206
Figure A.6 – Modèle informel de la méthodologie MOKA [Skarka, 06] .....	209
Tableau A.1 – Méthodes et outils de capitalisation des connaissances, adapté de [Ouamer-Ali & al. 14] .....	210
Figure A.7 – Fiche d’informations sur le stylo 4 couleurs.....	211
Figure A.8 – Page HTML décrivant le stylo sur le site du fabricant.....	212
Figure A.9 – Images du produit.....	212
Figure A.10 – Fichier STEP du stylo 4 couleurs.....	213
Figure A.11 – Numérisation 3D de la bielle assemblée (STL) .....	213
Figure A.12 – Numérisation 3D du vilebrequin (STL) .....	214
Figure A.13 – Numérisation 3D du piston (STL) .....	214
Figure A.14 – Numérisation 3D de l’assemblage piston bielle (STL) .....	215
Figure A.15 – Photo du piston.....	215
Figure A.16 – Photo de la bielle assemblée.....	216
Figure A.17 – Photo du vilebrequin (STL) .....	216

# Glossaire

CAO = Conception Assistée par Ordinateur

CAX = Computer Aided X (Engineering, Design, Manufacturing)

CFAO = Conception Fabrication Assistée par Ordinateur

CMM = Coordinates Measuring Machine

CPM = Core Product Model

FAO = Fabrication Assistée par Ordinateur

FBS = Function, Behaviour, Structure

GDT = Gestion des Documents Techniques

HMS = Holonic Manufacturing Systems

Ki4D = Knowledge integration in 4 four Dimensions

MoDAF = Ministry of Defense Architecture Framework

MVC = Model View Controller

OAM = Open Assembly Model

PDM = Product Data Management

PLM = Product Lifecycle Management

PPO = Product Process Organization

PPRE = Process, Product, Resource, External effect

SFM = Structure From Motion

SFS = Shape From Silhouette

STEP = STandard for the Exchange of Product model data

TOGAF = The Open Group Architecture Framework

UML = Unified Modelling Language

Données hétérogènes = Tous documents susceptibles de contenir des informations sur un produit (documents électroniques). Appellation historique issue du projet METIS.

# Chapitre I – Introduction au contexte général de la thèse



## I. Introduction générale

De nos jours, l'industrie manufacturière se développe dans un contexte socioéconomique qui pousse les entreprises à devenir plus compétitives. Parmi les leviers les plus importants, il y a le raccourcissement des délais de mise en œuvre des produits en amont de leur utilisation, tout cela afin de pénétrer le marché le plus rapidement possible, en engageant le moins de coûts possibles et surtout, proposer des produits de qualité, performants, et qui répondent parfaitement à la demande du client.

Il s'agit donc d'améliorer les processus de conception et de développement des produits, ainsi que leur production, si on ne tient compte que de l'activité relative au développement du produit. Mais en voulant réduire les temps d'élaboration et de pénétration dans le marché il faudra gérer ces processus de manière à pouvoir les réaliser de la façon la plus optimale. Cependant, la production dépend fortement de la conception du produit (et donc du processus de prise de décisions par rapport au produit), où la géométrie, les matériaux, les moyens mis en œuvre, la stratégie de l'entreprise, et les savoir-faire et compétences de ses collaborateurs figent les activités et tâches à réaliser durant la production. Donc, la compétitivité d'une entreprise dépend fortement de la façon dont elle conçoit ses produits, et surtout, de la façon dont elle prend ses décisions.

La prise de décision est souvent synonyme de jalons de changement de phase (par exemple : la validation des spécifications externes pour commencer la spécification interne). Pouvoir prendre une décision rapide revient à réduire les délais de la phase correspondante. Cependant, la prise de décisions est très fortement dépendante du contexte dans lequel on se place [Papadakis & al. 98]. En effet le choix fait par le concepteur pour implémenter une fonction ou une solution dépend très fortement du contexte de son utilisation en termes d'environnement d'utilisation direct et de finalité (aspect fonctionnel). Mais le développement de produits ne se limite pas qu'à la gestion des informations liées au produit, et va au-delà, où la prise en compte du système global de développement du produit, – en d'autres termes, l'environnement de développement de ce produit – est nécessaire. Cela engendre une quantité d'informations très importantes et très hétérogènes, qu'il faut bien gérer et maîtriser afin d'améliorer le processus de prise de décision.

La complexité relative à la gestion des informations dans le processus de développement de produits, fait que la conception et le développement de ces derniers soient réalisés d'une manière découpée et séquentielle. Le produit est découpé en sous-systèmes et éléments qui sont traités par différentes équipes, lesquelles ont des domaines d'expertises précis. Ceci a poussé l'entreprise à s'organiser et à se diviser en plusieurs services et équipes de travail afin de palier à cette complexité. Cette division, si elle est mal gérée, entraîne une diminution drastique de la communication entre les équipes de conception, de leur cloisonnement [Parsaei & al. 12], et d'une perte importante d'informations relatives au produit. C'est donc logiquement que l'intégration des différentes parties du système entraîne des erreurs possibles d'interfaçage, d'incompatibilité, et d'autres types d'erreurs qui à leur tour, entraînent une augmentation du

temps relatif à l'élaboration du produit, (notamment pour corriger ces erreurs), et par conséquent les délais des projets, et/ou une réponse partielle aux besoins du client en terme de performance.

La gestion de ces informations dans le but de réduire sa complexité nécessite de prendre en compte plusieurs aspects différents. Ces aspects sont :

- La création de l'information, à travers des processus métier qui permettent, à partir de données d'entrée, de produire des résultats selon un objectif en se basant sur le savoir-faire et les connaissances des acteurs du métier.
- Son organisation et sa traçabilité, qui permet de réduire les temps d'accès aux informations tout en assurant la validité des relations entre elles, et en suivant les évolutions de ces informations dans le temps.
- Sa communication à travers des canaux qui permettent aux informations de circuler sans risque de perte, ou du moins diminué au minimum.
- Son maintien tout au long du cycle de vie du produit qui s'étend de sa conception et développement jusqu'à la mise au rebut.
- Et sa réutilisation, dans le cas où des similarités entre situations sont identifiées.

Pouvoir formaliser les processus cognitifs qui permettent aux acteurs de créer de l'information permettrait de déléguer cette tâche de création aux machines qui s'occuperont de la réaliser de bout en bout et de manière rapide.

Dans le but d'améliorer l'organisation et la communication des informations, ainsi que la collaboration entre les acteurs des projets, les systèmes PLM (Product Lifecycle Management) ont vu le jour. Ces systèmes sont des environnements de développement centrés sur le produit, basés sur la conception assistée par ordinateur (CAO) et le Product Data Management (PDM). Ils visent à relier plusieurs parties prenantes au cours de tout le cycle de vie du produit [Ameri & al. 05] à travers un ensemble d'outils et technologies qui fournissent une plateforme partagée pour la collaboration entre elles. Ils permettent de gérer l'évolution des modèles du produit à travers son cycle de vie, de gérer la diversité du produit et la multi-représentation notamment à travers la gestion de configurations [Ouamer-Ali & al. 16]. Ces systèmes permettent d'organiser les informations relatives au produit tout en assurant leur traçabilité, afin de conférer à l'utilisateur une flexibilité dans l'accès à l'information, et une fluidité de communication dans sa collaboration au sein de l'entreprise, ce qui permettra d'améliorer les temps de développement.

Les systèmes PLM permettent aussi de maintenir les informations et d'en réutiliser une partie générée par des projets de développement antérieurs. Ce qui permet de réduire la quantité d'informations à générer dans un projet actuel, et par conséquent améliorer le processus de prise de décision qui, à son tour permet de réduire les délais de développement. Cela est fait notamment grâce à l'utilisation des bases de données où sont collectées les différentes informations issues d'un projet.

Cependant, il subsiste le problème relatif au maintien de l'information dans l'entreprise. En effet, chaque projet génère une quantité d'informations très importante qui ne pourra être maintenue dans sa globalité. Ajouté à cela, une mauvaise gestion des informations peut

engendrer la perte de celles-ci. Il est donc clair qu'une alternative au maintien doit être identifiée et prise en compte afin de pallier à cette problématique, tant au niveau des informations, qu'au niveau des connaissances et expertises des collaborateurs (qui en quittant l'organisation prennent leurs savoirs et savoir-faire avec eux [Laroche, 07]).

Prenons comme exemple la maintenance de produit : généralement les personnes qui s'occupent de la maintenance sont différentes des personnes qui conçoivent le produit. Dans ce cas-là, il faudrait mettre en place un processus de transfert d'informations entre les équipes de maintenance et les équipes de conception. Logiquement, dans les entreprises, au cours de la conception, il y a une démarche de réalisation de dossiers de maintenance du produit. Cependant, elle peut présenter des risques et des erreurs qui engendrent certaines problématiques notamment dans les cas où le cycle de vie du produit est long (avions, trains, bateaux, centrales nucléaires, etc.). Les trois scénarios suivants permettent de décrire ces problématiques :

- Absence de documents de maintenance produits, et manque d'informations relatives au produit.
- Existence de documents de maintenance mais correspondant à une version antérieure du produit.
- Existence de documents de maintenance correspondant au produit conçu, qui a subi des changements non répertoriés lors de la fabrication.

Dans le même créneau, il y a certains sujets qui rencontrent certaines de ces problématiques tels que : la reconception de produits, la refabrication des produits, etc.

## II. Présentation du contexte général de la thèse

Ce travail de thèse aborde la problématique liée au maintien des informations relatives au produit, en mettant en œuvre le processus de rétro-conception dans le cadre de l'ingénierie mécanique.

Le rétro-conception a été développé comme étant une solution alternative de définition ou de redéfinition des objets [Bernard & al. 09a]. C'est un processus d'examen qui permet d'analyser des artefacts afin d'en tirer les informations relatives à sa structure, notamment sa géométrie et/ou sa topologie [Remy, 04]. Ce processus permet d'apporter une solution curative au problème de manque d'informations, en analysant le produit en question dans le but d'en tirer des informations relatives à sa conception.

Dans l'industrie manufacturière, la rétro-conception a été présentée dans un premier temps comme étant un processus qui permet de refabriquer les produits qui ne sont plus fabriqués, qui ne sont plus commercialisés et dont le besoin est important [Nartz & al. 02]. Cette vision a ensuite évolué pour englober la reconception de produit et le re-engineering [Sokovic & al. 05]. Plusieurs travaux ont été entamés par des équipes de recherche et des entreprises de développement de solutions CAx qui ont abouti à des logiciels d'aide à la rétro-conception ayant pour but de faciliter le processus de rétro-conception. Cependant, ces solutions sont le

plus souvent concentrées sur des approches géométriques (de formes) de la rétro-conception, et marginalisent les autres aspects du produit.

Dans cette thèse, nous aborderons la problématique d'intégration des données hétérogènes issues du processus de rétro-conception, qui servira à identifier l'artefact analysé. Cette analyse se fera à travers divers mécanismes de filtrage d'informations appelés mécanismes d'extraction ou encore mécanismes de signature, qui permettront d'extraire des données d'ordre géométrique, topologique, ou fonctionnel. Ces données seront ensuite organisées de manière à pouvoir élaborer une représentation du produit plus ou moins abstraite, dans le but de la réutiliser. Pour cela, une démarche d'intégration des connaissances tant du point de vue produit que du point de vue métier est nécessaire pour réaliser cette représentation. En effet, l'intégration des connaissances permet de mettre en place un processus de rattachement sémantique entre la donnée analysée et extraite, et son contexte de mise en œuvre, pour remettre finalement le produit dans son contexte. Cela aura comme finalité l'implémentation d'un outil de rétro-conception.

La figure 1.1 représente le schéma de principe sur lequel repose la démarche proposée. En effet, nous proposons de replacer le processus de rétro-conception à un niveau d'application plus global, où son utilité ne sera pas seulement réduite à la récupération des données et informations géométriques et topologiques issues des processus classiques, tels que la numérisation 3D et la reconstruction de surfaces, mais s'étendra jusqu'à la prise en compte des données et informations métier, en plus des données produit dans leur globalité (fonctionnel, structurel, logique). Comme expliqué précédemment, cela ne pourra se faire qu'à travers la mise en place d'un processus de rétro-conception basé sur les connaissances.

Dans un premier temps, nous nous proposons de travailler sur le processus d'analyse des données issues de différentes sources d'information sur le produit, telles que des images, des schémas fonctionnels, des modèles 3D, des nuages de points, des textes, etc. Ce processus d'analyse identifiera les différentes informations issues de la capture des différentes données relatives à l'objet à travers un moyen identifié (tel que la numérisation 3D pour les nuages de points, ou la photographie pour les images, de la CAO avec des modèles 3D, etc.). Chacune de ces informations sera matérialisée par un fichier regroupant un ensemble de données – qu'on appellera tout au long de ce manuscrit « données hétérogènes » – organisées suivant un schéma précis, dépendant d'une technologie de donnée spécifique (qui sont les structures de données). En identifiant les différents types de données correspondantes à travers la formalisation de leurs structures, nous aurons la définition sémantique de chaque élément de donnée dans une structure qui nous permettra de rapprocher chaque donnée élémentaire extraite à partir d'une structure de donnée à un modèle de données représentant le produit. Cela se traduira par la mise en place d'un processus qui gère des mécanismes d'extraction de données à partir de fichiers identifiés en entrée (données hétérogènes), et d'organiser ces données dans le but de les comparer à une référence.

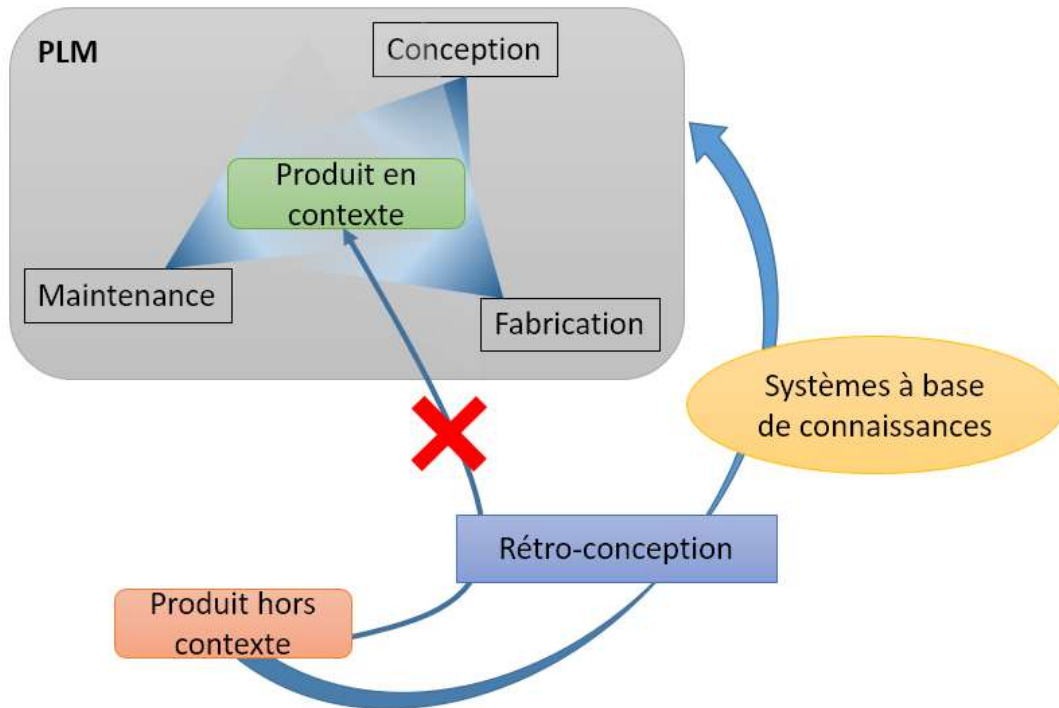


Figure 1.1 – Schéma de principe de la démarche proposée

Dans un second temps, les différentes données extraites des fichiers seront donc organisées dans le but d'être utilisées pour la remise du produit dans son contexte. Cette organisation s'opérera après l'extraction des données élémentaires à partir des données hétérogènes. Elle se basera sur trois concepts qui permettent de raccorder chaque donnée au contexte adéquat.

Le premier concept concerne le regroupement des données et informations relatives au produit en un méta-modèle-produit. Ce méta-modèle sera construit à travers l'intégration des connaissances produit. Cependant le corpus des connaissances est très important en termes de taille, en plus des différentes façons de les représenter

Le deuxième concept est le point-de-vue adopté pour analyser le produit. En effet, chaque métier est spécialisé dans un domaine relatif à un type de connaissances (calcul en éléments finis, modélisation fonctionnelle, sûreté de fonctionnement, etc). Tous ces points-de-vue constituent des ensembles d'informations qui sont utilisés par des experts afin de réaliser des tâches relatives à leurs processus métier [Ouamer-Ali & al. 16] (exemple : l'ingénieur structure utilise la méthode des éléments finis basée sur des algorithmes de calcul qui permettent d'optimiser un objectif comme la masse ou les vibrations d'un organe mécanique). En se basant sur cette vision de points-de-vue, leur somme (donc l'agrégation des informations) représente alors le modèle d'informations relatives au produit tel qu'observé par l'entreprise. Donc, l'identification des points-de-vue permet d'affiner le modèle-produit en lui ajoutant un niveau d'abstraction.

Le troisième concept est la représentation des informations. Chaque donnée hétérogène en entrée du processus de rétro-conception correspond à une forme de représentation allant d'une représentation textuelle, à une représentation virtuelle. Ce concept permettra de connecter les

données élémentaires extraites des données hétérogènes, aux informations contextuelles du produit qui ont la même forme de représentation. Ce concept sera identifié à travers des classes de représentation qui permettent de transmettre les informations du produit en correspondance avec les canaux de communication de l'être humain.

Finalement, nous proposons une méthodologie de rétro-conception qui permet de remettre le produit analysé dans son contexte PLM (Product Lifecycle Management – contexte du produit dans les différentes phases du cycle de vie du produit). Ce contexte PLM est relatif à plusieurs points-de-vue de métiers qui se traduisent par un ensemble d'informations regroupées dans un méta-modèle-produit. Ce méta-modèle-produit sera mis en place afin d'organiser les informations de ces points-de vue tout en identifiant les différentes relations entre-elles, ce qui revient donc à intégrer les connaissances et savoir-faire des experts de ces métiers qui expriment ces différents points-de-vue. Cette méthodologie sera appuyée par un cas d'étude qui permettra de l'exemplifier, et d'un démonstrateur qui intégrera les concepts discutés précédemment.

### III. Plan de la thèse

Ce manuscrit de thèse a pour objectif de présenter le cadre et les apports essentiels de notre travail, il est structuré en cinq chapitres.

Ce premier chapitre présente le contexte global du travail de thèse, ainsi qu'une introduction au contexte industriel duquel ont émergé plusieurs problématiques qui y seront présentées de manière générale.

Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, nous présentons les bases de notre travail issues de l'état de l'art sur la rétro-conception ainsi que celui de l'ingénierie des connaissances. Nous finirons par identifier plus clairement les différentes problématiques inhérentes aux sujets évoqués précédemment.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre présente la nouvelle méthodologie de rétro-conception que nous proposons. Cette partie détaillera les différents concepts que nous proposons pour améliorer le processus de rétro-conception à travers l'intégration des données hétérogènes et l'élaboration d'une démarche appelée Ki4D pour la gestion du processus de rétro-conception, qui formalisera la nouvelle méthodologie. Aussi, nous élaborerons des modèles qui vont représenter les briques élémentaires sur lesquelles sera construit le modèle de la démarche Ki4D.

Dans le 4<sup>ème</sup> chapitre nous utilisons deux cas d'étude simplifiés pour valider la démarche proposée, et abordons l'implémentation informatique de celle-ci à travers un démonstrateur simple qui montre les différentes étapes de la démarche.

Finalement, nous concluons ce manuscrit, sur les travaux de thèse en évoquant les contributions principales de ce travail de recherche, ainsi que les différentes limitations auxquelles nous avons été confrontés à travers une discussion générale, pour ensuite finir avec les perspectives d'évolution de ce travail.

# Chapitre II – Problématique et état de l'art : La rétro-conception et l'ingénierie des connaissances

# Problématique et contexte spécifique de notre étude

## I. Motivations

Ce travail de thèse a été réalisé afin de répondre à plusieurs problématiques tant industrielles qu’académiques. En effet, c’est dans le cadre du projet ANR METIS que s’est déroulée cette thèse. Nous présenterons dans un premier temps le contexte industriel qui a permis d’identifier les problématiques liées à la rétro-conception, ainsi que le projet ANR METIS. Ensuite nous présenterons le contexte de recherche qui décrit d’une manière synthétique, la situation actuelle de la rétro-conception en relation avec le contexte industriel identifié.

### 1. Contexte industriel

Durant cette étude, le travail a été mené sur la rétro-conception d’assemblages mécaniques à l’aide de l’intégration des données hétérogènes issues de différentes sources, s’appuyant sur l’extraction des informations et l’intégration des connaissances.

Les assemblages mécaniques regroupent une multitude de solutions technologiques et de pièces mécaniques. Rétro-concevoir un assemblage, c’est faire une rétro-conception de chaque pièce, et comme chaque pièce a des caractéristiques qui lui sont uniques, une quantité d’informations et de données très importantes est générée. Prenons comme exemple un moteur de voiture : il est constitué de plusieurs centaines de pièces en moyenne et intègre des savoir-faire et connaissances de domaines divers et variés, notamment avec l’intégration de capteurs électroniques, de calculateurs, de bobines d’allumages magnétiques, des injecteurs piézoélectriques, etc. La nomenclature est souvent réutilisée par les constructeurs à quelques variations près (selon qu’elle soit pour un moteur à essence ou diesel), cependant, il réside une différenciation entre chaque type de moteur d’une même catégorie (essence ou diesel), cette différenciation est de l’ordre fonctionnel (telle qu’une cylindrée différente) ou de l’ordre structurel (une adaptation à un véhicule différent). Il subsiste aussi une différenciation due à l’innovation d’un composant qui prend place dans cet assemblage et remplace un autre organe.

Les collaborateurs dans l’entreprise tendent alors à réutiliser les connaissances et informations qu’ils ont déjà sous la main, et de les adapter au contexte dans lequel se trouve le nouveau projet [Gomez Perez & al. 99], [Lin & al. 09]. Selon les types d’informations dont ils ont besoin, ils réalisent instinctivement des processus de reconception, de refabrication ou encore de reengineering pour pouvoir adapter ces connaissances au contexte. Chacun de ces processus s’appuie sur la rétro-conception, qui leur permet de récupérer les informations dont ils ont besoin, que ce soit des fonctions, des spécifications, des informations sur la structure ou autres. Le processus de développement de produit, dans ces cas-là, se trouve être associé d’une manière discrète à la reconception, au reengineering, ou encore à la refabrication, d’éléments et parfois de sous-systèmes complets. Dans certains cas, on aura besoin de reconstruire un document ou un artéfact important, qui constitue un support d’informations pour beaucoup d’équipes,



notamment le modèle CAO. Cela peut être fait soit par la reconstruction du modèle à partir de zéro, soit par la rétro-conception manuelle en utilisant un modèle déjà existant.

Donc, la rétro-conception qui réutilise les connaissances produit, présenterait des enjeux non négligeables à l’entreprise, notamment dans le ciblage des informations à réutiliser.

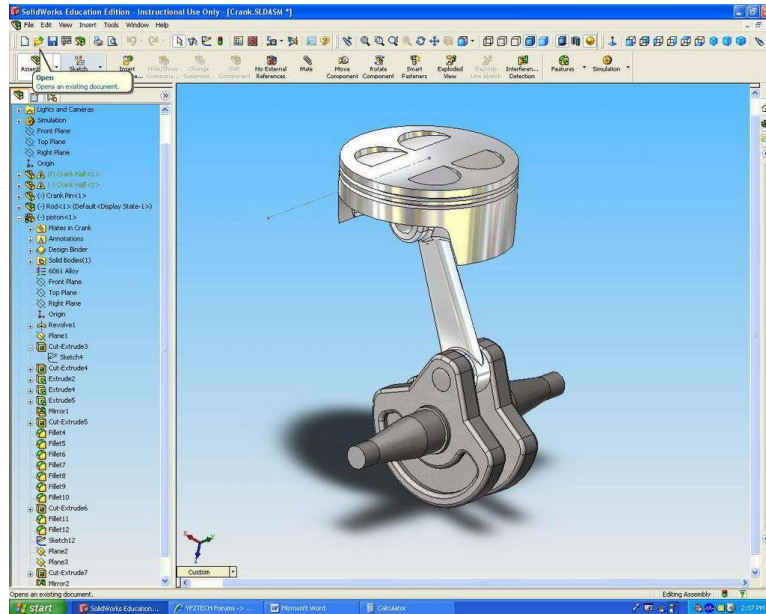


Figure 2.1 – Assemblage simple représentant les pièces mécaniques d’un moteur

Le regard a été porté sur un ensemble de pièces mécaniques simplifié (figure 2.1), qui constitue le principe de fonctionnement de base d’un moteur, à savoir, la transformation et la transmission d’énergie. A travers l’utilisation de cet assemblage, nous avons pu analyser le processus de rétro-conception dans sa globalité.

L’objectif dans ce contexte, est donc de développer un outil qui permettrait une gestion et une manipulation des informations et des connaissances dans le cadre de la rétro-conception pour des objectifs divers tels que la reconception, la refabrication ou le reengineering.

## 2. Projet ANR METIS

Le projet METIS est un projet national labellisé et financé par l’ANR. Ce projet se propose de développer un outil d’aide à la rétro-conception en intégrant des données produit, de sources et formes différentes, et non pas restreintes à des descriptions géométriques ou topologiques. La figure 2.2 schématise le positionnement du processus de METIS, dans le contexte du cycle de vie d’un système dont la structure, les informations et connaissances associées, et la maquette numérique évoluent dans le temps.

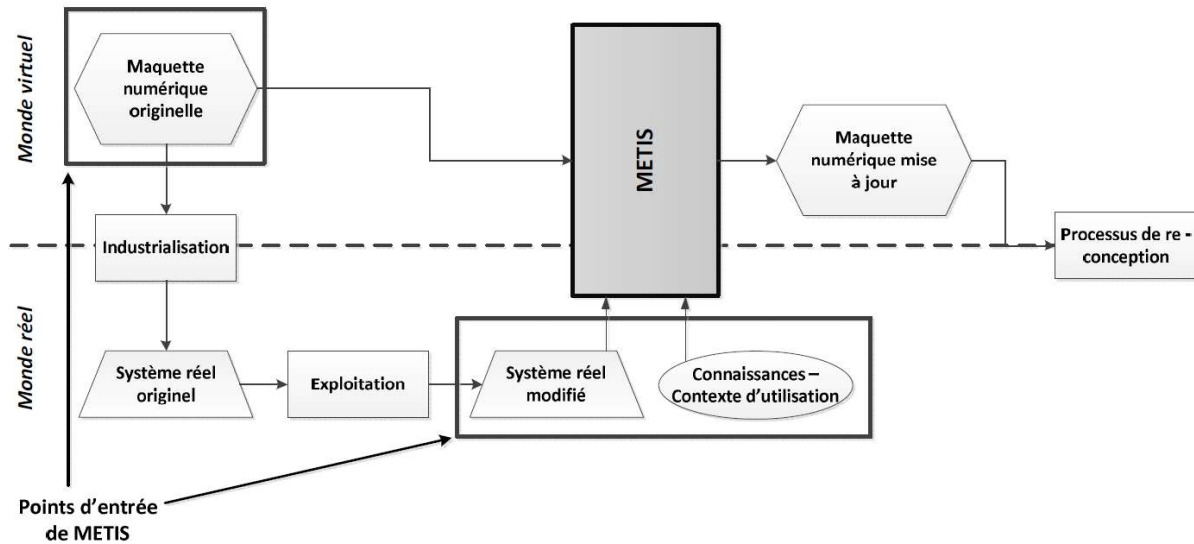


Figure 2.2 – Positionnement du processus de METIS dans le contexte du cycle de vie d’un système

La donnée principale – qui est la maquette numérique, de par sa richesse sémantique [Agathos & al. 07] – peut ne pas exister au départ du processus de METIS. Il en résulte deux scénarios d’utilisation de METIS distinct :

- Existence d’une maquette numérique du système à une version antérieure (qui présente un décalage avec le système dans sa phase de vie actuelle), qui sera utilisée et augmentée des données hétérogènes.
- L’absence d’une maquette numérique qui contraint METIS à en recréer une, et qui sera augmentée des données hétérogènes.

Donc, le système réel et les informations et connaissances le concernant dont on dispose représentent les données d’entrée de METIS.

METIS vise à combler les lacunes des méthodologies et outils classiques de la rétro-conception à travers l’intégration de connaissances produit relatives au contexte PLM, et l’utilisation de données hétérogènes que l’on peut trouver sur les produits analysés [Ouamer-Ali & al, 14]. Donc, l’une des problématiques principales de METIS est la gestion des connaissances dans sa vision globale, allant de la capture des connaissances à travers l’analyse des processus métier et la mise en place des connaissances formalisées par les experts de ces métiers, jusqu’à son utilisation dans le processus de rétro-conception. La seconde problématique est la mise en place d’une nouvelle méthodologie de rétro-conception qui permet de prendre en compte les différentes connaissances formalisées précédemment, et donc d’intégrer un contexte d’étude plus large que celui de la géométrie ou topologie seules. La troisième problématique concerne la mise en place d’outils d’extraction d’informations à partir des données hétérogènes, caractérisée par le développement de différents algorithmes de traitement de données spécifiques (extraction d’entités géométriques à partir de modèles 3D ou nuages de points, ou encore, identification des parties d’informations relatives au produit à partir d’un texte), et de les intégrer dans le processus de rétro-conception. Finalement, METIS vise à faire de la rétro-

conception pour les ensembles mécaniques complexes (grands assemblages avec un nombre de pièces important).

Le projet ANR METIS regroupe six partenaires :

- Deux partenaires industriels :
  - **DeltaCAD** : qui intervient dans le domaine de la rétro-conception dans le cadre de plusieurs projets industriels (notamment ANR PHENIX, le précurseur de METIS). Il se positionne comme maître d’œuvre, et s’occupe de l’implémentation informatique des solutions développée dans METIS, ainsi que de la gestion du projet.
  - **IFP Energies Nouvelles** : qui travaille dans le domaine de la production d’énergie notamment dans l’innovation des groupes motopropulseurs (GMP) dans l’industrie automobile. Il a été confronté à plusieurs scénarios nécessitant la rétro-conception à des fins de reconstruction de GMP pour la recherche. Il se positionne comme maître d’ouvrage, et propose des cas d’étude pour METIS.
- Quatre laboratoires de recherche qui ont pour mission de lever les verrous scientifiques relatifs au projet METIS, en apportant des réponses méthodologiques et conceptuelles. Les laboratoires sont :
  - Le laboratoire **Roberval** : qui développe des connaissances, méthodes et outils permettant d’optimiser la mise en œuvre des modèles numériques du produit en conception mécanique. Il travaillera sur la problématique d’extraction des données d’analyses à travers la mise en place de mécanismes de signature pour les données virtuelles (nuages de points, modèles 3D).
  - Le **LSIS** : (Laboratoire des Sciences de l’Information et des Systèmes) qui traite la problématique liée à la l’intégration des connaissances métier en vue de l’émergence progressive de la maquette numérique, en s’appuyant sur les compétences de modélisation des interfaces métier en conception et sur la gestion et la manipulation de la maquette numérique.
  - Le **LASMIS** : (Laboratoire des Systèmes Mécaniques et Ingénierie Simultanées) qui travaille sur l’amélioration des processus de développement de produit par intégration des connaissances et de contraintes expertes du point-de-vue de la fabrication, du tolérancement mais aussi des impacts environnementaux. Il a travaillé sur des projets de rétro-conception notamment sur le projet ANR PHENIX.
  - L’**IRCCyN** : (Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes) qui s’occupe du développement des méthodes et outils pour la modélisation, l’analyse, le pilotage, la conception et l’optimisation de systèmes au sens large, aura donc à déployer une ingénierie à base de connaissances multi-vues dans METIS.

Les fonctionnalités essentielles que l’outil METIS doit satisfaire, comme indiqué sur la figure 2.3 sont :

- L’acquisition et intégration des données hétérogènes.
- L’identification des composants du système analysé.

- La Recherche et création de la nomenclature du système analysé.
- La Génération ou modification de la maquette numérique du système analysé.

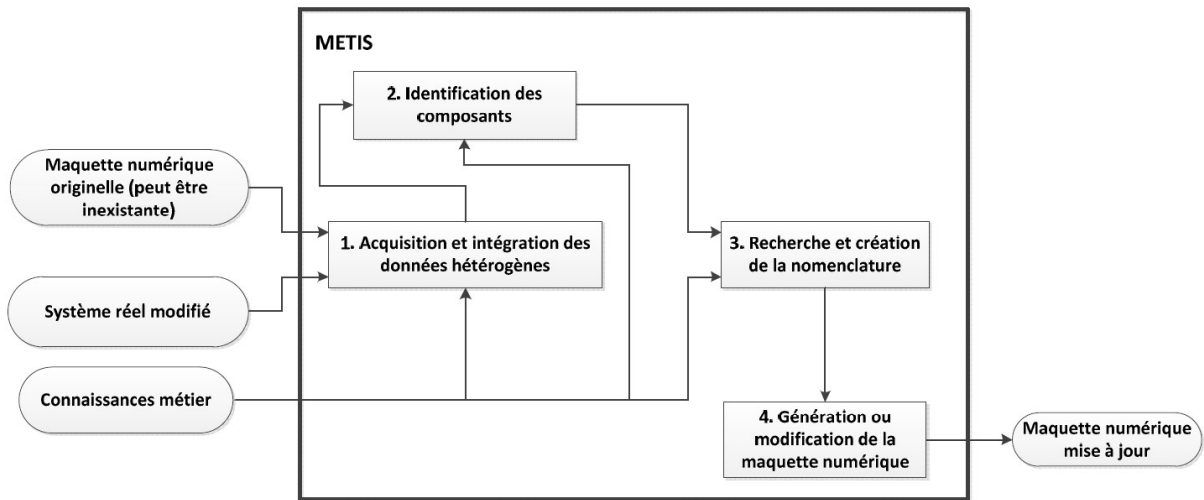


Figure 2.3 – Cohérence des fonctions de METIS dans le but d’atteindre les résultats attendus

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes focalisés sur l’aspect d’intégration des données hétérogènes, en plus de la structuration des connaissances. La partie structuration de la connaissance concernera la mise en œuvre d’un méta-modèle-produit, pour l’identification des différentes connaissances produit, ainsi que les différents points-de-vue relatifs à celui-ci. Finalement, l’intégration des données hétérogènes passera par un processus de traitement qui décomposera les fichiers et documents en entrée, en données élémentaires qui seront par la suite analysées, et desquelles seront extraites des informations qu’on utilisera dans l’élaboration des représentations du produit.

### 3. Contexte scientifique

La rétro-conception est une activité qui ne date pas d’aujourd’hui. Elle consiste en l’analyse de produits finis dans le but d’en réaliser des représentations. Les travaux sur la rétro-conception ont commencé avec des activités de métrologie afin de mesurer les dimensions des objets, pour en extraire la géométrie, qui par la suite, sera utilisée dans sa reconstruction [Wang, 10]. L’évolution de la métrologie, avec l’arrivée d’outils technologiques plus avancés tels que le scan 3D et les machines à mesure de coordonnées (CMM), et en combinaison avec les nouvelles techniques et méthodes de la conception assistée par ordinateur (CAO), ont conduit à une facilitation du processus d’acquisition des données géométriques, qui passent du scanner à la CAO, après le processus de traitement de celles-ci [Nartz & al. 02].

La rétro-conception n’est pas une fin en soi, mais un outil utilisé pour remplir un objectif précis [Chikofsky & al. 91]. Les objectifs principaux pour lesquels on utilise la rétro-conception sont la refabrication, ou encore la reconception de pièces [Sokovic & al.05]. Les activités de refabrication et de reconception sollicitent un grand nombre de ressources en termes d’informations relatives au produit. Si la refabrication ne nécessite que des données géométriques et topologiques, ainsi que des données sur les matériaux et les méthodes de fabrication, la reconception nécessite la prise en compte de tout un panel de connaissances allant de la modélisation fonctionnelle au calcul de structures jusqu’à la fabrication [ProDes, 03]. De

ce fait, les données géométriques et topologiques ne suffisent plus à combler le besoin en ressources pour réaliser ces activités. Néanmoins, plusieurs travaux ont été engagés afin d’intégrer les différentes connaissances géométriques, dans le but d’automatiser le processus, au moins pour l’activité d’acquisition des données et de leur prétraitement. Nous trouvons le projet REFAB qui avait pour objectif de permettre l’extraction des entités géométriques à partir d’un modèle 3D [Thompson & al. 99], ou encore le projet VPERI qui avait pour objectif la mise en place de stratégies différentes pour la rétro-conception du point-de-vue géométrique des pièces mécaniques de remplacement pour véhicules militaires [VPERI]. D’autres projets ont eu pour objectif d’améliorer la qualité des données acquises, dans le but d’améliorer la performance des algorithmes de prétraitement de ces données, et donc d’automatisation. Cependant, le processus de rétro-conception reste long et fastidieux. En plus, l’intégration des connaissances dans ces projets se limite à des connaissances sur la forme de l’objet (topologie et géométrie).

Le travail présenté dans ce manuscrit s’inscrit donc dans le cadre de la mise en place d’une méthodologie globale de rétro-conception, qui prend en compte les différentes connaissances qui constituent le contexte global du produit relatif à son cycle de vie [Ouamer-Ali & al. 15b]. Il s’agit donc de proposer un processus qui tienne compte des différents types de connaissances (géométriques, mais aussi de conception, de modélisation fonctionnelle, de fabrication, de spécification, etc.) intervenants dans le cycle de vie du produit. Nous nous intéresserons principalement aux connaissances « produit », dans le but de mettre en place une description de celui-ci formalisée à travers un méta-modèle. L’objectif est d’utiliser le modèle afin de structurer les informations à extraire des données hétérogènes. Cette structuration sera faite au moyen d’un lien qu’on identifiera entre les données hétérogènes, et le modèle-produit.

## II. Problématique

Pour proposer une méthodologie générique pour la rétro-conception, nous avons besoin d’identifier les ressources, et les différents paramètres de contrôle nécessaires à la réalisation du processus, ainsi que de connaître ses données d’entrée et de sortie [Ruth & al. 02] (figure 2.4). Dans un premier temps, il faudra décomposer le processus de rétro-conception en différentes activités élémentaires afin d’identifier les différents sous-processus [Müller & al. 93], et ainsi de permettre une recombinaison de ces activités de façon à optimiser le processus selon le besoin. De cette façon, nous pourrions identifier les parties du processus qui peuvent être automatisées, et donc de construire des algorithmes qui permettent de le faire.

Généralement, le processus de rétro-conception consiste en quatre sous-processus principaux, à savoir : la récupération des données du produit (mesures, digitalisation, plans 2D, etc.), l’extraction des informations et connaissances à partir de ces données en entrée, l’identification des informations et connaissances (entités de fabrication, entités géométriques, etc.), et finalement la reconstruction du modèle (représentation) du produit [Bernard & al. 09a]. On s’est donc naturellement posé les questions suivantes pour chacun de ces sous-processus afin d’identifier au mieux la problématique :

- Quelles sont les données en entrée ?

- Quelles sont les ressources nécessaires à la mise en place de chacun de ces sous-processus?
- Quelles sont les données de contrôle et les indicateurs clés ?
- Quelles sont les données de sortie ?

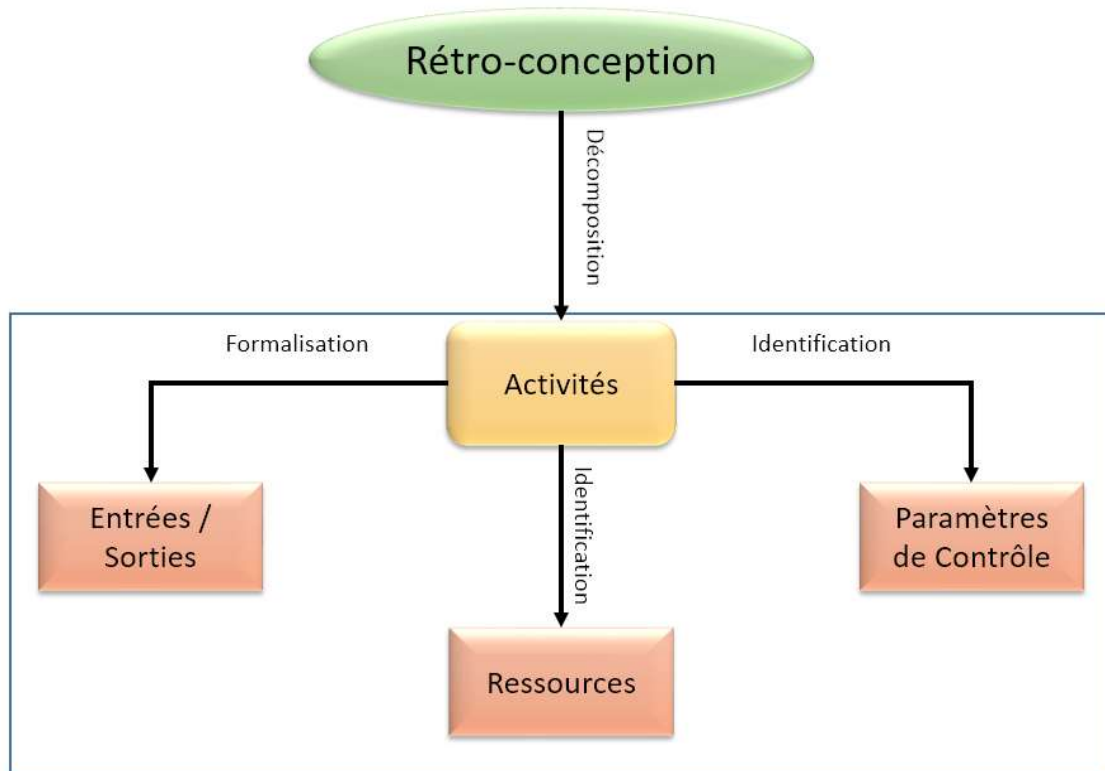


Figure 2.4 – Décomposition du processus de rétro-conception

Ainsi, on a identifié les informations suivantes pour chacun de ces sous-processus :

- Processus de récupération des données du produit :
  - En entrée : Données déjà existantes de différentes sources, nouvelles données d’analyse générées à partir du produit physique (Moyens mis en œuvre pour la capture des informations du produit : appareil photo, scanner 3D, base de données de l’entreprise, internet)
    - Vérification de la concordance des données récupérées avec le produit à analyser
  - En sortie : données triées et prétraitées
- Processus d’extraction des informations et connaissances :
  - En entrée : Données triées et prétraitées issues du processus de récupération des données du produit
    - Algorithmes d’extraction des informations et connaissances relatifs à chaque type de donnée.
  - En sortie : Connaissances et informations relatives au produit

- Processus d’identification des informations et connaissances :
  - En entrée : Connaissances et informations relatives au produit
    - Base de données produit (si présente)
    - Validation par l’utilisateur des informations et connaissances identifiées
  - En sortie : Connaissances et informations analysées et identifiées
- Processus de reconstruction du modèle du produit :
  - En entrée : Connaissances et informations identifiées
    - Relations entre les informations si elles existent à travers la nomenclature du produit
    - Méta-modèle du produit pour guider la reconstruction
  - En sortie : Représentation du produit complet reconstruite

A partir de cette liste on a pu identifier plusieurs verrous scientifiques qui nécessitaient des travaux de recherche supplémentaires. Le verrou principal est relatif au processus de rétro-conception. Les travaux issus de différentes recherches scientifiques et de projets industriels ont porté sur la rétro-conception du point-de-vue géométrique et topologique [Ouamer-Ali & al. 15a]. Pour ces travaux, les processus de rétro-conception proposés ne prennent en compte que ces types d’informations et de connaissances, or dans notre proposition, dans le but d’élargir le champ d’action de la rétro-conception, on a voulu intégrer des informations et connaissances autres que celles géométriques ou topologiques. Il est donc logique de vouloir adapter le processus de rétro-conception à ces nouveaux types d’informations et connaissances afin de mieux les traiter. Cette adaptation ne se fera pas au niveau de la logique de la méthodologie en elle-même, puisqu’elle reste la même globalement, mais plutôt au niveau de l’intégration des sous-processus de rétro-conception relatifs à chaque type de connaissance. Finalement, le processus global de rétro-conception englobera les visions déjà existantes du processus (notamment la rétro-conception de forme). Ce verrou scientifique se décompose alors en deux parties distinctes :

La première partie est relative à l’extraction des informations et connaissances à partir des données hétérogènes. Pour chaque type de donnée en entrée du processus de rétro-conception, il nous faudra extraire les éléments d’information pertinents qui nous permettraient de reconstruire le produit. Pour cela, les connaissances et informations doivent être identifiées dans le but de les intégrer dans la représentation globale du produit. On peut traduire cela par la question suivante :

***Question n°1 : Comment intégrer les informations issues des données hétérogènes dans notre processus de rétro-conception, dans le but de créer des représentations de hauts niveaux d’abstraction ?***

La deuxième partie concerne la structuration des informations du produit. En effet, dans le but de créer une représentation du produit, il nous faudra élaborer une structure d’informations qui permettra d’ordonner les connaissances relatives au produit, en prenant en compte les différents concepts nécessaires à la description exhaustive de celui-ci, à travers un modèle. Cet ensemble de concepts constituera un niveau élémentaire de la représentation du produit, et qui fournirait une base sur laquelle reposent les différents modèles de processus des métiers de l’entreprise.

Cela présume une structure modulaire, de manière à ce qu’on puisse interfacer ce modèle (i.e. : cette structure) à différents autres modèles de processus métiers. On peut traduire cela par la question suivante :

***Question n°2 : Quelle stratégie utiliser pour construire et structurer les représentations du produit analysé dans le processus de rétro-conception ? Comment l’intégrer dans le processus de rétro-conception ?***

Donc, l’élaboration de la nouvelle méthodologie de rétro-conception, entraînera l’intégration des données hétérogènes à un modèle dans le but d’utiliser les informations extraites de ces données dans la constitution d’une nouvelle représentation du produit basée. Il s’agira donc de créer un système de rétro-conception qui interface une structure d’informations qui permet d’élaborer une représentation du produit, et un ensemble d’informations qui seront extraites des données hétérogènes.

L’ensemble des informations à structurer proviendra des données hétérogènes analysées et traitées, et constituera le contenu (le fond) de la représentation. Quant à la structure d’information, elle s’occupera de donner une forme à cet ensemble d’informations pour constituer une représentation du produit, et caractérisera la forme de la représentation. On peut traduire cela par la question suivante :

***Question n°3 : Comment le processus de rétro-conception peut-il être amélioré de manière générale ?***

### III. Hypothèses et objectifs

Les problématiques identifiées précédemment sont relatives au contexte du projet ANR METIS. Cependant, ce ne sont pas toutes les problématiques du projet qui ont été présentées. Il subsiste donc certaines problématiques complémentaires qui ont été traitées par nos collaborateurs, notamment les mécanismes (algorithmes) d’extraction d’informations et connaissances à partir des données hétérogènes. En effet, chaque mécanisme d’extraction à développer peut représenter à lui seul un travail de thèse complet. De notre côté, nous aspirons à développer un système de rétro-conception qui prendra en compte dans sa conception, l’intégration de l’ensemble des mécanismes (algorithmes) d’extraction à partir des données hétérogènes.

Les problématiques qui sont sous notre responsabilité sont : la formalisation du processus de rétro-conception dans le contexte d’utilisation des données hétérogènes autres que celles géométriques et topologiques, l’intégration des données hétérogènes au modèle-produit à travers le macro processus d’identification et de prétraitement de ces données, et finalement, la mise en place d’un méta-modèle-produit qui permet de structurer les informations extraites des données hétérogènes afin de construire une représentation du produit, tout en prenant en compte des extensions relatives aux connaissances métiers.



Les résultats du processus de rétro-conception seront donc sous forme de représentations structurées du produit, qui peuvent être utilisées de manières différentes. Une manière de les utiliser serait de construire le produit selon l’objectif visé (reconception, refabrication, reengineering) en se basant directement sur les représentations issues du processus. Une seconde manière concernerait la recherche de composants similaires dans une base de données « produit ». La mise en place de cette base de données nécessitera un remplissage pour pouvoir être utilisée.

L’hypothèse principale concerne les algorithmes (mécanismes) d’extraction des connaissances. Nous nous sommes basés sur le travail d’une collègue doctorante sur un mécanisme d’extraction de connaissances géométriques par l’identification des graphes de connectivité pour chaque élément géométrique du produit. Pour le reste des algorithmes, nous émettons de fortes suggestions qui permettront de guider des travaux ultérieurs dans le but de réaliser ces algorithmes, tout en mettant en place un système de rétro-conception capable de s’interfacer à eux.

Finalement, l’objectif de ce travail est de redéfinir le processus de rétro-conception dans le but d’y intégrer des données hétérogènes autres que géométriques ou topologiques. La redéfinition de ce processus passera par l’intégration des données hétérogènes extraites à partir de mécanismes d’extraction à base de connaissances. Ces connaissances sont nécessaires à l’identification des informations et des liens entre elles. La mise en place d’une base des connaissances pourra supporter les mécanismes d’extraction et l’identification des liens entre ces connaissances. La proposition d’un modèle-produit permettra de lier les données hétérogènes aux informations et connaissances du produit, et fournira une base conséquente sur laquelle seront construits les algorithmes d’extraction, ainsi que la base de connaissances.

Notre contribution consiste à définir un processus d’intégration des données hétérogènes et de formalisation des connaissances afin de supporter la spécification et la validation d’un outil d’aide à la rétro-conception à base de connaissances.

# Introduction à l’état de l’art

Il existe plusieurs travaux traitant la rétro-conception, issus de différentes initiatives tant du point de vue académique, où on a tenté de proposer des méthodologies de rétro-conception basées sur la capture de la forme des objets, que du point de vue industriel, où on a développé de réelles solutions pour la rétro-conception.

Notre but étant de construire une méthodologie de rétro-conception qui accepterait un ensemble de données hétérogènes en entrée du processus, nous oblige à faire un état de l’art concernant la rétro-conception, afin de caractériser l’évolution de cette pratique, tout en situant notre problématique par rapport à ce qui se fait aujourd’hui, tant au terme méthodologique, qu’opérationnel.

Dans le chapitre précédent, nous avons introduit notre contexte de recherche et avons pu dégager la problématique principale, qui peut être résumée en trois questions :

- Comment le processus de rétro-conception peut-il être amélioré de manière générale ?
- Comment intégrer les informations issues des données hétérogènes dans notre processus de rétro-conception, dans le but de créer des représentations à de hauts niveaux d’abstraction ?
- Quelle stratégie utiliser pour construire et structurer les représentations du produit analysé dans le processus de rétro-conception ? Comment l’intégrer dans le processus de rétro-conception ?

L’ingénierie des connaissances nous permettra pour sûr d’apporter une réponse à la troisième question relative à la structuration des représentations du produit, puisque plusieurs travaux ont été réalisés dans cette optique, avec notamment, les modèles-produit, les ontologies, et les systèmes à base de connaissances. Quant à la deuxième question relative à l’intégration des informations et connaissances, on s’appuiera sur l’ingénierie des connaissances pour fournir un moyen de lier les données hétérogènes à la structure d’informations permettant de construire la représentation du produit, après avoir fait une première prospection des différentes données hétérogènes qui peuvent être considérées dans notre contexte.

Dans ce chapitre, nous introduirons dans un premier temps, les différents travaux issus de l’état de l’art relatifs à la rétro-conception de manière générale, et l’amélioration de celle-ci de manière spécifique. Dans un second temps, nous présenterons les différents travaux issus de l’ingénierie des connaissances relatifs aux différents principes et concepts d’un côté, et à la structuration des informations et connaissances de l’autre côté. Nous essayerons d’apporter une première piste relative à chaque question de la problématique, et établirons un schéma global qui nous permettra plus tard de répondre à la problématique dans sa globalité.

# Rétro-conception : Concepts, méthodes et techniques

Dans le but de répondre à la problématique de mise en place d’une méthodologie de rétro-conception intégrant différents types de connaissances, nous avons réalisé une étude approfondie sur l’activité de rétro-conception pour tenter de décomposer le sujet à un niveau de granularité assez fin, qui nous permettrait de repenser la méthodologie afin de prendre en compte les nouveaux concepts identifiés, qui sont relatifs à l’intégration des connaissances, et l’utilisation des données de natures hétérogènes. En partant des concepts élémentaires de la rétro-conception, et en intégrant de nouveaux concepts, nous arriverons à étendre le processus de rétro-conception de manière à pouvoir fournir une méthodologie globale de rétro-conception.

Nous présenterons dans un premier temps la rétro-conception dans ses débuts tout en identifiant les principes fondamentaux autour desquels elle gravite. Puis nous explorerons les finalités de la rétro-conception en identifiant les différents objectifs pour lesquels cette activité est réalisée, tout en identifiant le contexte de son émergence. Après cela, nous tenterons de faire le tour des différentes définitions de la rétro-conception qu’on retrouve dans l’état de l’art, pour ensuite proposer notre propre définition de la rétro-conception, qui constituera la base conceptuelle de nos travaux, tout en expliquant l’intérêt de cette nouvelle définition. Nous verrons ensuite les différents travaux réalisés dans le cadre de différents projets de recherche qui ont permis de mettre en place plusieurs méthodologies ainsi que différents processus, cela nous permettra de définir le périmètre global de la rétro-conception. A partir de cette identification du périmètre, nous rebondirons sur l’évolution de la rétro-conception avec l’intégration de nouveaux concepts tant du point de vue méthodologique qu’opérationnel. Nous finirons par la formalisation d’un nouveau processus de rétro-conception qui prend en compte ces nouveaux concepts tout en s’accordant à la nouvelle définition que nous proposons.

## I. Débuts de la rétro-conception

La rétro-conception n’est pas une activité nouvelle, en effet elle existe depuis très longtemps et consistait en l’analyse de produits et objets qui ont un intérêt dans un contexte donné afin de trouver les techniques d’élaboration et de fabrication qui ont permis de les construire, ou dans le but d’en dévoiler les secrets afin d’identifier les faiblesses et les exploiter.

Nous trouvons dans l’histoire une multitude d’exemples relatifs à la rétro-conception. Une grande majorité des projets de rétro-conception étaient réalisés dans le contexte militaire :

- Les Hyksos qui ont dominé l’Egypte d’un point de vue militaire avec notamment leurs chars qui étaient utilisés durant les différentes batailles qui les opposaient à l’armée égyptienne, celle-ci en a profité pour l’analyser et l’améliorer afin d’en produire en masse, ce qui leur a permis de dominer à leur tour après [Appstate].

- La marine romaine qui a profité du naufrage de quinquérèmes étrangers (bateaux de guerre) sur leurs rives pour les capturer et les utiliser comme modèles pour construire leur flotte, pour ensuite régner en mer dans le bassin méditerranéen [@Romains].
- Le missile BGM-71 TOW produit par l'Armée américaine qui a été rétro-conçu par l'armée Iranienne en la série de missiles Toophan après l'échec des négociations pour la co-production du missile et la révolution Iranienne de 1979 [@Toophan].

La rétro-conception, aussi appelée « rétro-ingénierie », n'est pas seulement appliquée aux objets physiques et mécaniques, mais va au-delà pour répondre à des problématiques de contextes divers et variés tels que l'informatique [Brunelière & al. 14], l'électronique [Torrance & al. 11a], [Torrance & al. 11b], ou encore la biologie [Scete & al. 02], [Basso & al. 05].

Dans le contexte de l'industrie manufacturière et surtout dans le domaine de la mécanique, la rétro-conception a évolué avec l'émergence des solutions de métrologie électroniques et automatisées telles que les scanners laser ou les CMM (Machine à mesure de coordonnées) [Dalton, 98], qui permettent de capturer les données géométriques d'un objet, et de les transformer en données informatiques. Ces données, notamment des nuages de points, sont ensuite analysés, et traités, ce qui permettra de donner vie à une représentation tridimensionnelle virtuelle de l'objet analysé.

C'est dans ce contexte de déploiement de la rétro-conception que nous nous plaçons dans notre travail de recherche, où nous tenterons d'explorer les différentes approches proposées issues de différents travaux de recherche et de développement.

## II. Rétro-conception : Définitions

### 1. Définitions de la rétro-conception

L'intérêt que présente la rétro-conception pour l'industrie manufacturière n'a cessé de pousser les industriels à développer des solutions pour convenir à leurs besoins. Plusieurs travaux de recherche en collaboration avec l'industrie ont tenté de définir la rétro-conception selon leurs visions. En général, les différents travaux s'accordent à dire que la rétro-conception consiste en l'analyse d'un objet afin de récupérer les informations relatives à son élaboration. Mais nous verrons que les définitions diffèrent selon le contexte d'application de la rétro-conception.

Selon [Bernard et al.09] l'objectif principal de la rétro-conception, est l'analyse d'un produit existant (qui peut être une application logicielle, ou un produit mécanique...) afin de produire une copie et/ou une version améliorée de celui-ci. [Durupt & al. 09] voit la rétro-conception comme l'activité qui consiste en la digitalisation d'une pièce réelle afin de créer un modèle numérique ou virtuel. Pour [Urbanic & al. 06] la rétro-conception est le processus reproduisant le modèle d'un objet (composant, sous-ensemble, ou produit), sans l'aide des spécifications formelles (telles que des plans de l'objet ou un modèle informatique), et son objectif est la construction et la caractérisation du produit par l'accumulation de toutes les données et connaissances techniques concernant le fonctionnement du produit. Dans [Wood & al. 01], on voit la rétro-conception comme un processus ayant pour but de comprendre entièrement l'instanciation actuelle du produit qui est observé, désassemblé, analysé, testé, expérimenté, et documenté en termes de fonctionnalités, formes, principes physiques et fabricabilité. [Sokovic

& al. 06] voit la méthodologie de rétro-conception comme ayant pour objectif, la génération d'un modèle conceptuel (exemple : surface triangulée) à partir d'un modèle physique (une pièce ou un prototype). Dans [Lee & al. 00], la rétro-conception est définie en termes de création de modèles CAO de produits nouveaux ou existants à travers la capture des données de la surface (géométrie). Dans [Ye & al. 08] on définit la rétro-conception conventionnelle comme étant un processus de conception partant d'un objet physique ou d'un modèle d'argile vers un modèle numérique, ou essentiellement un processus de modélisation qui permet de dupliquer le modèle physique ou d'argile en un modèle numérique.

Toutes ces définitions sont issues de travaux réalisés dans le contexte de l'industrie manufacturière et de la conception de produits et de systèmes mécaniques. On peut remarquer qu'il y a deux types de définitions, la première qui est générique et qui décrit la rétro-conception comme étant un processus d'acquisition d'informations en général, alors que la deuxième est plus spécifique et concerne l'acquisition d'informations géométriques ou topologiques.

Il existe d'autres définitions de la rétro-conception qui sont issues de travaux de recherche relatifs à des contextes différents qu'il est pertinent d'évoquer.

Nous pouvons voir dans [De Luca & al. 06] qui traite de la rétro-conception des bâtiments architecturaux la définition de la rétro-conception en terme d'extraction de règles, de leur formalisation, et de leur mise en forme appropriée pour une traduction numérique vers une bibliothèque de modèles sémantiques.

Dans le domaine de l'informatique nous trouvons [Chikofsky & al. 90] qui définit la rétro-conception comme le processus d'analyse d'un système pour : (1) identifier les composants du système et leurs interrelations, (2) créer des représentations du système dans d'autres formes ou à des niveaux d'abstraction élevés. La rétro-conception implique l'extraction des artéfacts de conception et la construction ou la synthèse des abstractions qui sont moins dépendantes de l'implémentation. Si la rétro-conception implique souvent un système fonctionnel existant comme sujet, ce n'est pas obligatoire. On peut effectuer une rétro-conception à partir de n'importe quel niveau d'abstraction ou à n'importe quelle phase du cycle de vie du produit. La rétro-conception en soi, n'implique pas de changer le système sujet ou de créer un nouveau système basé sur la rétro-conception du système sujet, c'est plutôt un processus d'examen et non pas un processus de changement ou de réplication.

Bien que cette dernière définition soit issue du domaine informatique, elle s'avère être complète et détaillée du fait de la nature de l'activité dans laquelle la rétro-conception est effectuée. En effet, dans le domaine de l'informatique l'artéfact principal auquel aboutit le processus de développement est le code, qui permet de traduire des procédures, fonctions et algorithmes en langage compréhensible par la machine pour qu'elle puisse l'exécuter. Le code informatique est de nature abstraite, puisqu'il se traduit concrètement en signaux électriques transmis à travers des circuits électroniques. Ces signaux portent des informations élémentaires qui, combinées entre elles forment des structures hiérarchiques de données donnant naissance à des concepts plus abstraits, qu'on trouve dans le code informatique. Ce concept d'abstraction est davantage présent dans le développement de solutions informatiques où il est utilisé pour regrouper des caractéristiques communes comme dans le langage UML qui est abstrait et

indépendant des langages de programmation [Boggs & al. 99]. Cette définition est donc complète et détaillée du fait que les auteurs aient caractérisé le périmètre d'application de la rétro-conception en termes de processus d'examen, tout en la distinguant des différentes finalités pour lesquelles elle peut être mise en œuvre. Nous baserons notre travail sur cette définition, ainsi que sur les travaux de [Bernard & al. 09] pour proposer une définition adéquate à notre contexte d'étude.

## 2. Proposition d'une nouvelle définition pour la rétro-conception dans notre contexte

Le but de ce travail de thèse étant la proposition d'une méthodologie de rétro-conception générique, qui prenne en compte des informations et connaissances de différentes sources, nous proposons une définition qui prend en compte les concepts classiques de la rétro-conception dans l'industrie manufacturière en les combinant aux concepts d'informations et de connaissances, ainsi que le concept des niveaux d'abstraction. Mais avant cela, il nous faudra définir ces concepts dans notre contexte de manière claire.

### a. Niveaux d'abstraction et degrés d'abstraction

Dans le domaine de l'informatique, on utilise beaucoup le concept des niveaux d'abstraction. Dans [Chikofsky & al. 90], les auteurs remarquent qu'il y a une bonne correspondance entre le concept des niveaux d'abstraction et la transition d'un niveau de détail à un autre plus élevé dans la progression descendante du cycle de vie. En effet, les phases préliminaires dans le développement de systèmes telles que la spécification implique l'expression du système en conception à des niveaux d'abstraction élevés, en comparaison avec son implémentation. Ces abstractions sont étroitement liées aux règles métier de l'entreprise, qui sont exprimées en une terminologie spécifique à l'utilisateur, et qui ont une relation qui fait correspondre ces abstractions à des entités du système final, dans le même sens qu'un plan 2D qui exprime la géométrie du système, ou un schéma fonctionnel qui exprime les fonctions remplies par le système.

Toujours dans [Chikofsky & al. 90] les auteurs indiquent qu'il y a une différence entre les niveaux d'abstraction et les degrés d'abstraction. Les niveaux d'abstraction sont un concept qui traverse les phases conceptuelles de la conception, alors que les degrés d'abstraction sont relatifs à une seule phase. Couvrir les phases du cycle de vie du produit implique une transition entre les niveaux d'abstraction du niveau supérieur dans les premières phases, aux niveaux inférieurs dans les phases ultérieures, alors que dans n'importe quelle phase du cycle de vie du produit, l'information peut être représentée d'une manière détaillée (degré d'abstraction bas) ou d'une manière globale ou résumée (degré d'abstraction élevé).

### Informations et connaissances

Etant un processus de reconstruction de représentations du produit, la rétro-conception doit s'appuyer sur des informations et connaissances pour pouvoir le faire. En effet, proposer une représentation du produit à un niveau d'abstraction élevé signifie intégrer des connaissances de hauts niveaux d'abstraction dans cette représentation. Cette opération s'effectue au niveau de l'intégration des données hétérogènes, puisque les données brutes seules n'ont aucun sens et ne peuvent fournir aucune information en soi, si ce n'est le système d'interprétation construit sur la base des connaissances intégrées à la représentation. Prenons comme exemple un nuage de

points : le nuage de points en soi ne représente qu’un ensemble de points dans un espace, mais soumis à un système d’interprétation, ce nuage de points peut devenir un objet, à condition d’identifier les différentes informations ou connaissances qui peuvent être ajustées au nuage de point (cylindre ou sphère pour la géométrie, et un trou borgne ou une gorge pour la fabrication).

#### Nouvelle définition de la rétro-conception

Afin de définir le cadre conceptuel global de notre méthodologie de rétro-conception, nous proposons une nouvelle définition de celle-ci qui correspond à notre contexte d’étude, tout en intégrant le concept de niveaux d’abstraction, ainsi que ceux d’informations et connaissances.

Dans notre contexte :

*la rétro-conception est le processus d’analyse d’un artefact, qui permet d’identifier les différentes informations et connaissances relatives à celui-ci à travers l’analyse de données de l’artefact, de types et de sources hétérogènes, et l’élaboration de représentations à des niveaux d’abstractions plus élevés de cet artefact, qui permettent de le remettre dans son contexte selon la phase de vie voulue de l’artefact.*

Cette nouvelle définition nous permettra plus tard d’élaborer une méthodologie de rétro-conception qui se base sur l’intégration des connaissances pour élaborer des représentations du produit non-seulement géométriques ou topologiques, mais aussi fonctionnelles, dynamiques, etc.

### III. Finalités de la rétro-conception

Comme cité précédemment, dans [Chikofsky & al. 90], la rétro-conception en soi, n’implique pas de changer le système sujet ou de créer un nouveau système basé sur la rétro-conception du système sujet. La rétro-conception est un processus d’examen du système sujet, en aucun cas il implique un processus de changement ou de réplique de celui-ci. Ceci implique donc de connaître les finalités offertes par la rétro-conception dans le cadre du développement de produits.

Dans la littérature scientifique, nous pouvons retrouver des activités qui peuvent être confondues avec la rétro-conception, notamment la refabrication, le reengineering ou encore la reconception [Sokovic & al. 05]. Cette confusion est due au fait que la rétro-conception fasse partie des processus de ces activités. Finalement, il sera pertinent de distinguer ces activités de manière à ce qu’on puisse obtenir une cartographie permettant d’utiliser convenablement ces activités.

#### 1. Refabrication

La refabrication des objets est souvent confondue avec la rétro-conception. Nous pouvons le constater dans [VPERI] qui voit la rétro-conception comme un processus impliquant la production d’une réplique la plus proche possible de la pièce originale. Cependant, nous avons vu précédemment que la rétro-conception n’est que l’activité d’examen de la pièce et non sa fabrication, il est donc évident de séparer les deux processus.

La refabrication est l'activité qui permet de fabriquer un objet à partir des données de rétro-conception conventionnelle. La refabrication utilise donc les données géométriques issues de la rétro-conception pour recréer un modèle (typiquement un modèle CAO qui servira à l'élaboration d'un modèle FAO) de l'objet qui servira au bureau d'étude pour la fabrication à l'identique de cet objet.



Figure 2.5 – Rétro-conception et refabrication d'un bouchon de radiateur (Delahaye 135)  
[Nartz & al. 02]

Dans [Nartz & al. 02], les auteurs ont réalisé le projet de refabrication d'une pièce qui, aujourd'hui, est introuvable. A l'aide des techniques de rétro-conception conventionnelle, ils sont partis d'une pièce existante mais dans un état défectueux, pour reconstruire une pièce neuve qui reprend les caractéristiques de la pièce originale (figure 2.5).

## 2. Reengineering

Le reengineering est l'activité qui permet de changer l'implémentation physique de l'objet qui peut être un produit ou un système. Dans [VPERI] on identifie la disponibilité de nouveaux matériaux, de nouvelles méthodes de fabrication, ou encore des outils d'analyse CAE (Computer-Aided Engineering) comme étant une opportunité favorisant l'amélioration de la conception de l'objet, plutôt que de simplement le répliquer. En effet, l'implémentation d'une pièce ou d'un système dépend fortement du contexte global dans lequel se trouve l'entreprise durant sa réalisation. De ce fait, le reengineering consiste en l'amélioration de la conception du produit à travers le changement de certaines de ses caractéristiques afin de répondre à des motivations d'amélioration du produit ou de la production. Ainsi, dans [VPERI] on identifie certains facteurs de motivation comme le faible coût des matériaux, la réduction du coût de production, l'optimisation de la masse du composant, une plus grande fiabilité, ou encore des spécifications techniques qui ont évolué, qui peuvent amener à faire un reengineering.



Pour réaliser une activité de reengineering, il est primordial de récupérer les informations et connaissances relatives au produit analysé à travers sa rétro-conception, pour ensuite identifier les leviers d’amélioration dans chacune des caractéristiques identifiées, pour finalement réaliser un produit qui répond au même besoin que celui du premier, tout en ayant amélioré certaines de ces caractéristiques dans son implémentation.

### 3. Reconception

La reconception est l’activité qui vise à remplacer complètement ou partiellement un produit/système en utilisant les spécifications qui caractérisent le besoin relatif à ce produit/système au moins, ou en ajoutant de nouvelles spécifications qui complètent celles qui existent. La reconception totale d’un produit ou d’un système entrainera donc l’utilisation des spécifications du produit identifiées, pour le reconcevoir en ne tenant compte que de celles-ci. La reconception partielle quant à elle dépend du cas de son application, dans le cas d’un système cela correspondrait à la reconception totale ou partielle d’une partie des composants le constituant. La reconception totale d’un composant consiste en la récupération des données de ses interfaces avec les autres composants, alors que la reconception partielle consiste en la reconception et l’implémentation d’une partie de ses spécifications en réutilisant l’autre partie. Dans tous les cas, on aura besoin d’informations concernant le produit à reconcevoir à des niveaux d’abstraction élevés (fonctions, spécifications, etc.). Pour ce faire, la reconception aura recours à l’examen du produit que réalise la rétro-conception.

Dans [VPERI] on indique que dans certains cas, il serait plus pertinent d’ignorer le composant d’origine dans son ensemble et de le reconcevoir complètement, ou le remplacer par un objet équivalent contemporain. Avant que la reconception ne soit réalisée, les spécifications et les contraintes d’interfaces doivent être extraites du système existant, en d’autres termes, utiliser la rétro-conception pour réaliser cette tâche.

## IV. Travaux sur la rétro-conception

Dans cette partie nous présenterons dans un premier temps la rétro-conception de façon générique avec toutes les activités qui permettent de la réaliser, puis nous introduirons les travaux de recherche qui ont abouti à des méthodologies ou des solutions dans le domaine de la mécanique.

### 1. La rétro-conception conventionnelle

La rétro-conception de manière classique concerne l’élaboration de représentations géométriques du produit à partir de données de capteurs. Les données issues des capteurs sont ensuite traitées et analysées dans le but de construire un modèle 3D géométrique de l’objet en question.

Généralement, le processus de rétro-conception peut être découpé en quatre parties différentes [Durupt & al. 10]:

- Acquisition des données géométriques
- Reconstruction surfacique
- Segmentation et ajustement des surfaces

- Création du modèle 3D

Ces différentes étapes font partie du processus de traitement des données issues de la digitalisation des objets. Ces opérations font partie des techniques de reconstruction numérique des formes (Digital Shape Reconstruction), et ne permettent que de créer un modèle 3D pouvant être utilisé par des solutions CAO/FAO/CAE. Chaque technique correspond à un contexte d’utilisation donné, il reviendra donc à l’utilisateur de choisir les bonnes techniques mais aussi les bons outils. De plus, aucune méthodologie ne ressort de cet ensemble de techniques, c’est alors l’utilisateur qui définira la méthodologie qui lui permettra de partir d’un objet physique et d’arriver à un modèle 3D le plus représentatif possible de celui-ci.

Nous avons choisi de ne pas détailler davantage cette partie. Néanmoins, vous trouverez en annexe les différentes techniques et méthodes relatives à chaque étape de manière détaillée.

## 2. Méthodologies

Dans cette partie, nous explorerons différentes méthodologies et outils de rétro-conception issues de projets de recherche. Cela nous donnera une image des systèmes de l’état de l’art qui nous permettra d’explorer les manques dont la rétro-conception souffre.

### a. REFAB

REFAB est l’un des projets pionniers dans l’utilisation des entités de fabrication dans la rétro-conception de pièces mécaniques. Le projet avait pour but de développer une solution interactive (mieux adaptée et plus efficace qu’un processus automatique) qui permettrait à un utilisateur de procéder à la rétro-conception d’une pièce à partir d’un nuage de points. Dans le système REFAB, l’utilisateur met en place à partir d’une liste proposée, l’entité géométrique adéquate relative à un ensemble de points du nuage, et guide ainsi le processus de rétro-conception. L’ajustement de l’entité de fabrication est alors simplifié et sera fait automatiquement [Thompson & al.99].

REFAB est un système de rétro-conception qui utilise les entités de fabrication comme primitives géométriques [Thompson & al.99]. Dans ce projet, les auteurs ont noté deux principaux avantages dans l’utilisation des entités de fabrication dans la reconstruction des modèles CAO à travers la rétro-conception :

- Les modèles résultants peuvent être directement exportés vers des systèmes CAO de modélisation par entités, sans perdre les sémantiques et les informations topologiques inhérentes aux représentations par entités.
- Les méthodes sont capables de produire des modèles très précis, malgré les erreurs substantielles et les bruits présents dans la donnée 3D digitalisée.

Le projet REFAB propose une approche alternative pour la rétro-conception qui permet de créer des modèles CAO de pièces, avec un nombre important de ces entités de fabrication de manière efficiente. Cela est possible grâce à l’analyse des données scannées, basée sur les connaissances du processus de fabrication et des techniques de modélisation [Thompson & al.99].

L’apport principal de cette approche est donc la prise en compte des entités de fabrication associées à des opérations d’usinage comme primitives géométriques, dans le but de les ajuster aux données scannées plutôt que d’utiliser les techniques de triangulation et de maillage ou de

modélisation surfacique en général. Le système utilise des entités de fabrication 2,5 D telles que des trous simples.

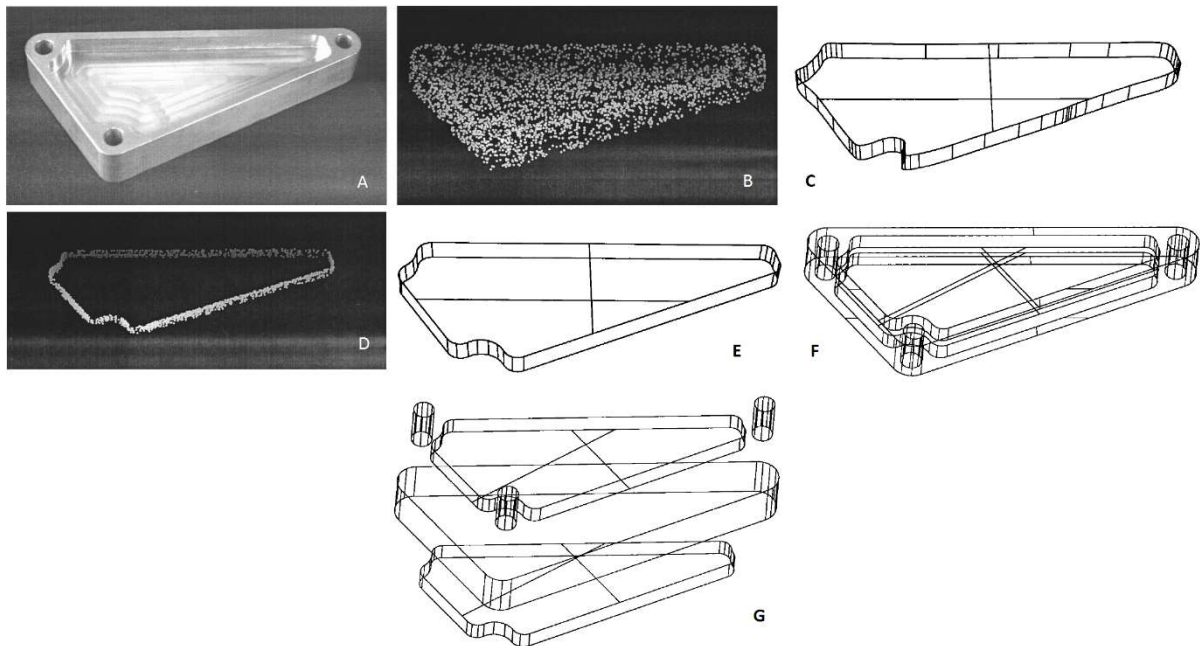


Figure 2.6 – Etapes du processus de rétro-conception de REFAB [Thompson & al.99] : A – pièce réelle, B – nuage de points, C – croquis de la poche intérieure (utilisateur), D – nuage de points segmenté associé au croquis, E – poche ajustée au nuage de points segmenté, F – modèle filaire de la rétro-conception de la pièce complète G – vue explosée des entités de fabrication

Cette approche repose sur la résolution de trois problèmes afin de fournir une modélisation précise d’une entité de fabrication :

- La détermination du type d’entité : Cette étape est réalisée par l’utilisateur qui permet de sélectionner, à partir d’un ensemble d’entités proposées par REFAB, l’entité adéquate afin de l’utiliser dans l’étape d’ajustement. De ce fait, il n’y a pas besoin de reconnaître automatiquement les entités de fabrication (figure 2.6 – C).
- Les deux problèmes suivants sont résolus à travers des opérations automatiques qui utilisent un affinage itératif :
  - La segmentation des points 3D pertinents : Les modèles d’entités sélectionnés par l’utilisateur sont utilisés afin de segmenter le nuage de points en un groupe de sous-ensembles de points qui, vraisemblablement, correspondent aux entités sélectionnées (figure 2.6 – D).
  - Ajustement des modèles : Cette opération permet d’ajuster les modèles des entités au nuage de points en utilisant 2 types de contraintes ; une contrainte d’orientation des entités puis projection sur le plan pour simplifier l’ajustement, et une contrainte basée sur l’expression des géométries dans ces entités lors de la conception (figure 2.6 – E).

L’approche globale est une approche descendante (top-down) qui permet de générer des modèles précis puisque le système intègre les utilisateurs au processus de sélection des

informations et connaissances représentées à des niveaux d'abstraction élevés, pour les utiliser dans la segmentation de données représentées à des niveaux d'abstraction bas (nuages de points), tout cela pour construire le modèle, plutôt que d'utiliser une approche ascendante (bottom-up) en commençant par le traitement de données brutes.

Le projet REFAB reste un projet qui caractérise la rétro-conception géométrique et topologique des produits, et ne s'affranchit en aucun cas de l'intégration d'informations autres que celles de la forme (géométrie) de ceux-ci.

Bien que le projet ait été développé dans le but de fournir un système d'aide à la rétro-conception en ayant automatisé une partie du processus, et que l'utilisation des entités de fabrication représente en soi, de l'utilisation des connaissances métier (métier de fabrication), il reste en désavantage quant à l'utilisation de types d'informations complémentaires à la géométrie, et ne permet pas de fournir une représentation à un haut niveau d'abstraction.

En effet, la solution proposée dans le projet permet de construire des représentations à des niveaux d'abstraction relativement bas, puisqu'on traite plus de la géométrie du produit, que de l'aspect fonctionnel. Même si cette approche permet d'intégrer des connaissances, elle reste cependant limitée à des connaissances spécifiques à un contexte d'application : la fabrication. Cette vision limite concrètement la rétro-conception à de la refabrication, ou bien rend la reconception ou le reengineering beaucoup plus difficiles à réaliser, puisqu'une nouvelle représentation à un plus haut niveau d'abstraction serait nécessaire dans les deux cas.

De plus, la limite du processus concernant les types de données traitées consolident ce manque avéré, ce qui donne comme résultat, une structuration de l'information assez basique (construction d'une représentation géométrique) bien qu'elle puisse être complexe dans sa réalisation.

## VPERI

Le projet VPERI (Virtual Parts Engineering Research Initiative) est un projet initié par l'armée américaine qui avait pour but de réaliser des frameworks, outils, et technologies qui permettraient de rendre des systèmes durables et maintenables dans le temps [VPERI]. Le contexte d'émergence de ce projet a été l'indisponibilité des informations concernant la conception et la fabrication de certaines pièces dans des véhicules ou autres systèmes militaires, qui ont été conçus il y a longtemps et ayant de longues durées de vie. Dans le but de prolonger la durée de vie de ces systèmes, la refabrication des composants de remplacement pour ces systèmes est demandée.

Afin de pouvoir refabriquer ces composants de remplacement, plusieurs considérations devaient être faites [VPERI] :

- Le système entier dans lequel se trouve le composant ne peut pas être entièrement remplacé, alors le composant devra s'interfacer avec les composants déjà existants.
- La documentation concernant ces composants peut ne pas exister, sinon incomplète ou incompatible avec les systèmes CAO/FAO.
- Les avancées en matière de technologies de matériaux, de méthodes de fabrication et d'outils d'analyse depuis la conception des composants.

- La défaillance du composant peut avoir été causée par une erreur dans la conception initiale du composant, ou le système est sollicité de manière non anticipée par le bureau d’études.

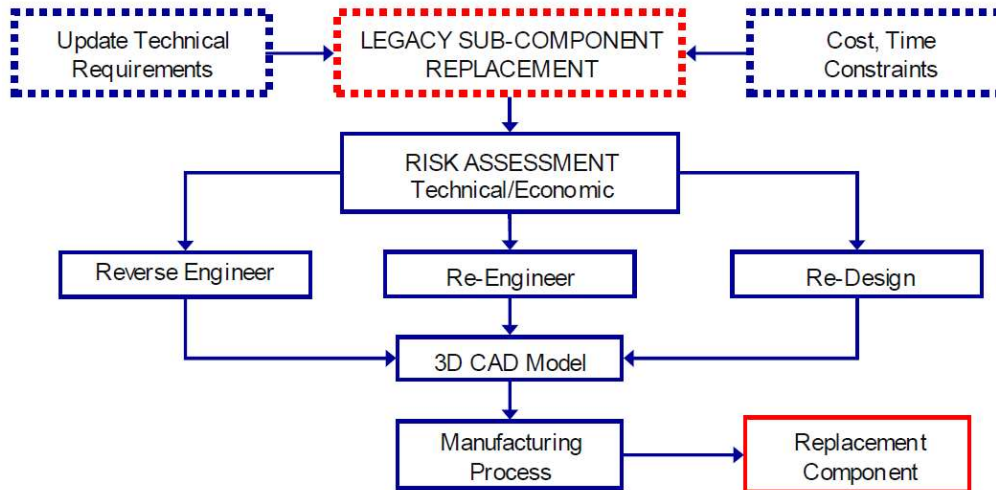


Figure 2.7 – Processus global de VPERI [VPERI]

En prenant en compte les différentes considérations précédentes, on peut aisément déduire le but du projet VPERI d’intégrer les différentes finalités de la rétro-conception qui sont : la refabrication, le reengineering, et la reconception.

Le projet se base sur trois différentes stratégies pour refabriquer l’objet, et qui sont relatives aux finalités de la rétro-conception : la rétro-conception (reverse engineering, mais qui est plus de la refabrication), le reengineering, et la reconception (redesign). La figure 2.7 représente le schéma global de l’approche adoptée pour la refabrication des composants. Cependant, dans le projet VPERI, on traite ces trois finalités comme étant différentes.

#### *Rétro-conception (Reverse Engineering)*

La retro-conception dans VPERI consiste en la production d’une réplique proche du composant analysé. Dans le cas où, il existe des plans 2D des composants, ils seront scannés et interprétés afin de produire des plans CAO. Puis ces mêmes plans CAO devront être transformés en modèles CAO tridimensionnels dans le but de générer des modèles FAO pour la refabrication de la pièce. Dans le cas où aucune donnée de ce genre n’existe, alors l’utilisation des outils de numérisation devient nécessaire, ce qui permettra d’acquérir les données géométriques en vue de les transformer en modèle CAO exploitable pour générer la FAO. La figure 2.8 (A) schématise le processus de rétro-conception.

Reengineering

Le reengineering est défini comme étant l'activité d'amélioration du composant analysé, en utilisant de nouveaux matériaux, de nouvelles méthodes de fabrication ou encore des analyses sur des plateformes CAE plus poussées qui permettent d'optimiser les caractéristiques structurelles de l'objet (telles que la répartition des masses en réduisant la masse globale du composant, ou l'analyse des vibrations et ondes mécaniques). Pour ce faire, on a besoin d'outils d'analyse, ainsi que de bases de connaissances et de bases de données pour faciliter le changement du composant d'origine, en ayant en perspective les coûts de développement, la capacité de production, la fiabilité, etc. La figure 2.8 (B) représente le processus suivi pour le reengineering des composants. Généralement, vis-à-vis de l'âge des composants analysés, toutes les étapes du processus seront réalisées, cependant cela n'est pas nécessaire. En effet, chaque étape du processus n'est réalisée que si le besoin est explicité. Par exemple, si le matériau est toujours correspondant au contexte d'utilisation, alors il ne sert à rien de réaliser la phase de substitution du matériau.

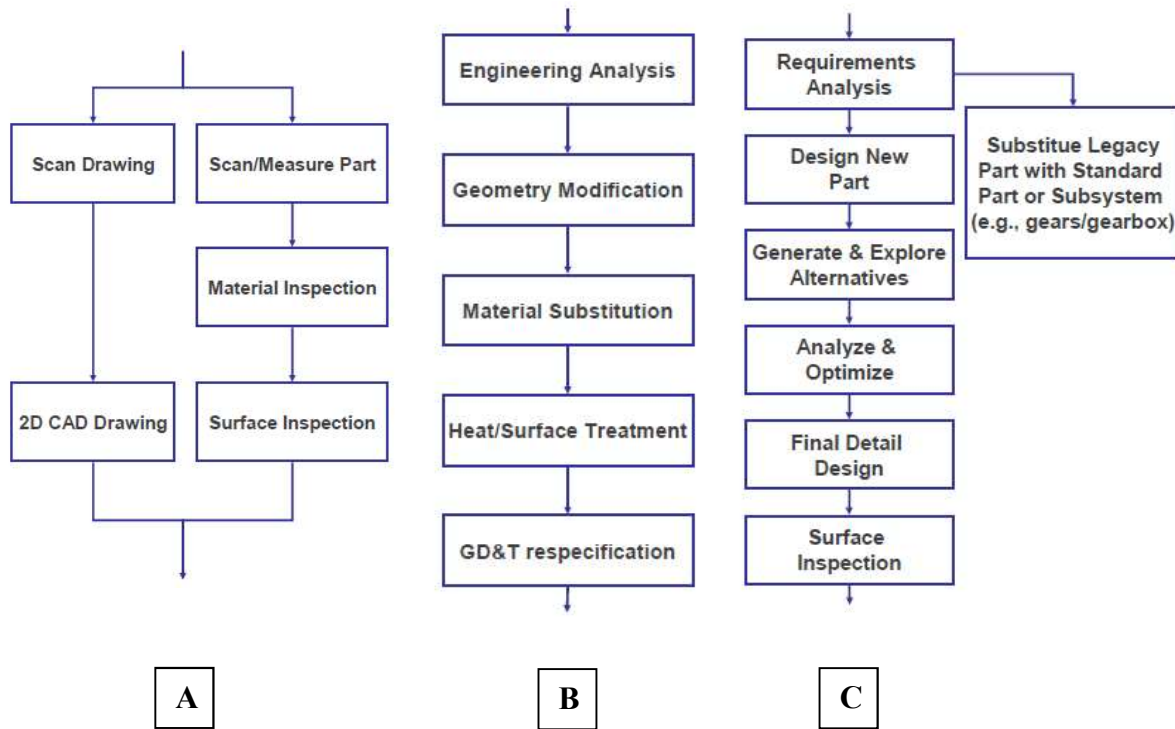


Figure 2.8 – (A) Processus de rétro-conception – (B) Processus de reengineering – (C) Processus de reconception

Reconception (Redesign)

Dans certains cas, il est plus pertinent d'ignorer la conception initiale du composant, et de reconcevoir un nouveau composant sur la base des exigences fonctionnelles de l'ancien. Pour cela, on aura besoin des informations relatives aux exigences fonctionnelles du produit, ainsi que de son environnement externe avec lequel il sera interfacé, puisque le système ne change pas, seulement le composant change. Les exigences d'interfaçage incluent les contraintes spatiales, les contraintes pondérales, les connections mécaniques et électriques, les flux et les variables potentielles aux connections, signaux, etc. La récupération de ces informations sera faite d'une manière ou d'une autre (test de l'objet dans le cas où la documentation est



inexistante). La figure 2.8 (C) illustre le processus de reconception allant de l’analyse des exigences jusqu’à la conception détaillée et l’inspection des surfaces.

Le projet VPERI englobe le cas d’étude d’un réducteur installé dans un véhicule tout terrain militaire sur lequel a été appliqué le processus de rétro-conception pour la restitution des informations sur le produit, et le processus de reengineering afin d’améliorer la conception du produit en intégrant de nouvelles méthodes de fabrication, ainsi que des nouveaux matériaux, et une amélioration de la répartition de la masse des engrenages (figure 2.10), etc. La figure 2.9 illustre le workflow réalisé dans le but de refabriquer la pièce analysée.

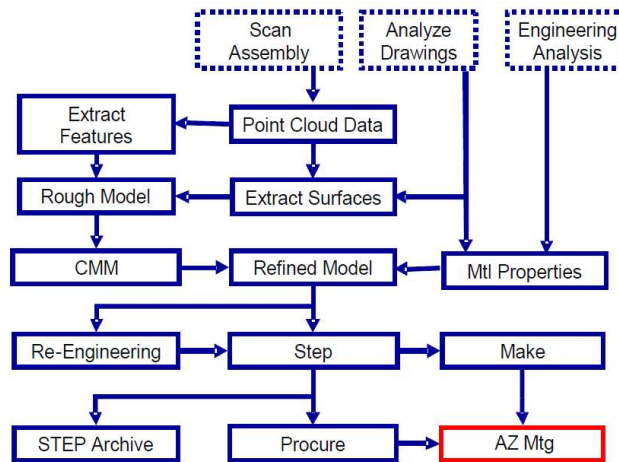


Figure 2.9 – Workflow de rétro-conception pour le réducteur [VPERI]

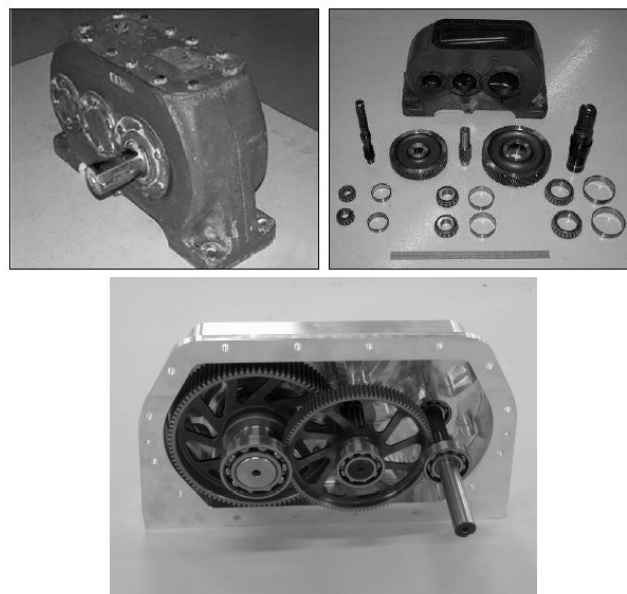


Figure 2.10 – Refabrication du réducteur : ancien système (haut), et nouveau système (bas) [VPERI]

Le projet VPERI compte des avantages qui ne sont pas négligeables, notamment avec la prise en compte des différentes finalités de la rétro-conception (même si ces dernières sont séparées), ainsi que de la possibilité d’intégrer des informations pertinentes à travers l’interface ASU-DAL, qui permet d’annoter les plans et les modèles 3D en y ajoutant des informations.

Cependant, il subsiste des manques qu'il est important de noter, tant du point de vue méthodologique, que du point de vue structurel. En effet, bien que la méthodologie de VPERI considérait les différentes finalités de la rétro-conception, cette dernière les séparait de manière à les rendre complètement indépendantes les unes des autres. Or dans notre définition de la rétro-conception, elle est présentée comme étant un processus d'analyse et de recherche d'informations dans le but de constituer une représentation, qui peut être utilisé dans d'autres activités telles que la reconception, la refabrication, et le reengineering. Alors, la rétro-conception n'est pas complètement indépendante des autres activités, mais elle est utilisée par celles-ci. De plus, même si l'utilisation des annotations pour rajouter de l'information non considérée par VPERI est un avantage, ce moyen reste élémentaire, et ne permet pas de faire ressortir les différences sémantiques entre les différentes informations pertinentes qui sont présentes dans les annotations, ce qu'une structure d'informations aurait pu éviter.

### MERGE

MERGE est un projet qui a pour objectif la conception d'un système qui fournit un environnement unifié dans lequel le rétro-concepteur peut visualiser et traiter les informations simultanément à partir de plusieurs ressources, dans le but d'obtenir un modèle basé sur les entités géométriques qui capture de manière plus précise, l'intention de conception des composants physiques [Musuvathy & al. 05]. En particulier, le système vise à :

- Fournir des outils d'inspection et de visualisation intuitifs.
- Faciliter le transfert de données entre différentes ressources de manière intuitive.
- Intégrer différents agents de calcul afin de simplifier le processus de rétro-conception.

L'idée de créer ce système a émergé du besoin de maintenir en phase d'utilisation des systèmes anciens qui seraient très coûteux à remplacer, et donc de ne remplacer que les composants ou sous-systèmes qui sont défectueux et de ce fait, prolonger la durée de vie du système global. L'objectif de ce projet est donc semblable à celui de VPERI qui traite de la maintenance de systèmes anciens (legacy systems).

Dans le domaine de maintenance des systèmes anciens, la disponibilité de multiples sources d'information (qui peuvent être incomplètes ou encore incohérentes), et le manque de descriptions virtuelles concernant ces types de produits, ainsi que les restrictions relatives aux contraintes temporelles, et la nécessité d'une expertise du domaine importante sont présumées, et caractérisent donc l'enjeu de cette activité.

Concrètement, MERGE fournit un environnement virtuel interactif qui satisfait les exigences d'un système ancien. Cet environnement unifié permet de comparer et manipuler des données d'origine, notamment les scans d'objets physiques, ou de plans 2D. Cela est permis grâce à l'intégration des agents qui aident à analyser ces données d'origine afin de présenter des modèles dérivés de celles-ci, de manière unifiée et accessible, comme indiqué dans la figure 2.11, où l'utilisateur manipule différents types de données.



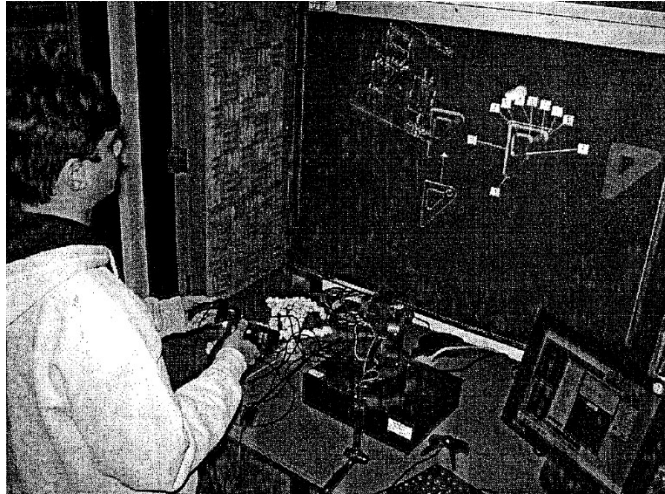


Figure 2.11 – Un utilisateur interagissant avec le système MERGE [Musuvathy & al. 05]

Le système regroupe trois types d'agents :

- Agents d'analyse des plans
- Agents de gestion des visualisations
- Agents de gestion des dispositions

Le processus de rétro-conception qui a été développé pour le système repose sur plusieurs activités réalisées conjointement par l'utilisateur de l'interface quand il y a besoin, à l'aide d'un bâton qui permet de suivre les mouvements dans 6 degrés de liberté, et par les agents qui permettent d'automatiser le processus. Le processus se décline en plusieurs étapes :

- Import des ressources d'informations dans l'environnement MERGE ; où l'utilisateur sélectionne les données pertinentes dans le cadre de la rétro-conception.
- Segmentation et ajustement des surfaces ; qui permettent de générer un modèle CAO construit à partir d'entités géométriques de manière automatique à partir des plans 2D et des nuages de points.
- Visualisation du graphe de dépendance ; qui représente l'ensemble des entités géométriques composant l'objet représentées dans un graphe hiérarchique.
- Interprétation et dimensionnement des plans ; réalisés par un système d'agents non-déterministes qui permet l'extraction des informations de dimensionnement des pièces.
- Comparaison directe des entités géométriques ; à travers la superposition d'un plan 2D et du modèle CAO ou du nuage de points pour vérifier la cohérence entre eux.
- Correspondance interactive des vues ; où le système anime une vue du plan 2D pour la faire correspondre au modèle CAO ou au nuage de points.
- Représentation visuelle des paramètres des entités géométriques via des étiquettes.
- Modification des paramètres des entités par interaction directe entre les plans 2D et le modèle CAO.

L'un des avantages avérés dans le projet MERGE, est l'utilisation d'agents dans le but de traiter et d'extraire des informations à partir de données sur le produit. Cependant, ces données se résument à des plans 2D ou des modèles 3D tout au plus. L'intégration d'informations relatives à des aspects autres que ceux de la forme du produit ne sont pas intégrés (en tous cas, pas

explicitement), ce qui donne une première limite au projet REFAB en comparaison avec notre définition de la rétro-conception.

Sa deuxième limite qu'on pourra remarquer est l'absence d'une structure d'informations explicite qui permet d'associer les informations issues de la rétro-conception, et ainsi de constituer plusieurs représentations possibles.

## PHENIX

Le projet PHENIX a pour objectif de capitaliser les connaissances dans le but de rendre possible sa réutilisation pour d'autres produits [Durupt & al. 13]. Le projet vise à construire durant le processus de rétro-conception, des modèles CAO paramétrés en utilisant une approche basée sur les connaissances. Une nouvelle méthodologie de rétro-conception est proposée afin d'utiliser les connaissances le plus tôt possible dans le processus de rétro-conception pour construire plusieurs alternatives possibles du produit analysé relatives à plusieurs interprétations possibles du produit. Nous pouvons voir la nouvelle méthodologie de rétro-conception sur laquelle se base PHENIX dans la figure 2.12, où elle est mise en situation par rapport au cycle de vie du produit.

Le projet PHENIX se base sur l'hypothèse que l'analyse des processus de fabrication et des exigences fonctionnelles résulte en l'apport d'informations qui sont implicitement intégrées, comme intention de conception, dans un modèle CAO au cours du cycle de développement de produit. Cela se traduit dans la rétro-conception par la possibilité de créer plusieurs alternatives d'un même produit analysé à partir d'un ensemble d'entités, ainsi que des contraintes, des paramètres et des relations entre elles, dans le cas où les informations sur les processus de fabrication et les exigences fonctionnelles sont intégrées dans le processus de rétro-conception. Aussi, les formes spécifiques qu'on trouve dans un composant matérialisent les spécifications fonctionnelles et les entités de fabrication propres au composant.

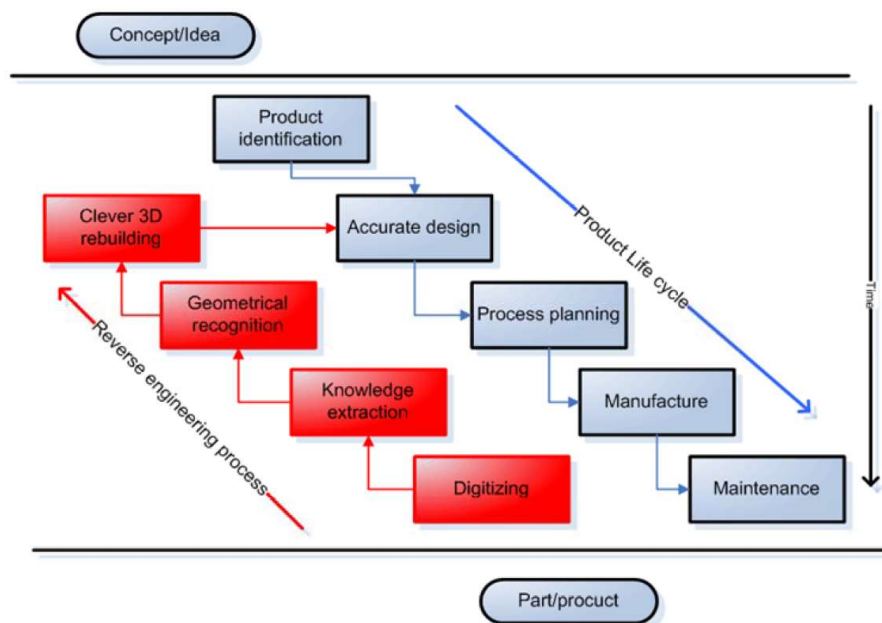


Figure 2.12 – Situation de la méthodologie de rétro-conception par rapport au cycle de vie du produit [Durupt & al. 13].

Le processus de rétro-conception de PHENIX peut générer plusieurs alternatives du modèle CAO selon l’interprétation des connaissances extraites, de ce fait, émerge le besoin de gérer la multi-représentation en utilisant la structure d’un système PDM. L’utilisation d’une telle structure permet de structurer et suivre le processus de rétro-conception, mais aussi de gérer les liens entre les différents modèles CAO générés afin de gérer les changements.

PHENIX est basé sur une base de connaissances construite à partir des différentes entités du produit qui permet le pilotage du processus de rétro-conception, ainsi que sur une stratégie d’identification des entités paramétrées déployée pour localiser et évaluer les paramètres des entités dans le nuage de points. Un modèle de données basé sur le CPM (Core Product Model) est proposé, qui supporte le suivi du processus de rétro-conception et qui permet de gérer la multi-représentation des modèles CAO, ainsi que la capitalisation des connaissances dans la base de connaissances. Ce modèle de données regroupe des informations qui permettent de représenter le produit en termes de peau et de squelette, où la peau regroupe les surfaces fonctionnelles, et le squelette représente la structure géométrique et topologique (figure 2.13).

Ils proposent alors un workflow de rétro-conception qui est schématisé dans la figure 2.14 :

- Réalisation de plusieurs segmentations des nuages de points issus de la digitalisation de l’objet en utilisant plusieurs algorithmes de segmentation.
- Génération de groupes de points issus de la segmentation.
- Pour chaque groupe de points, des entités sont sélectionnées. Dans le cas où plusieurs entités peuvent être sélectionnées pour un seul groupe de points, alors des alternatives sont générées qui correspondent au nombre d’entités sélectionnées pour le groupe (deux entités sélectionnées pour un seul groupe donneront deux alternatives différentes), et plus il y a de groupes de points pour lesquels il y a plusieurs entités, plus le nombre augmente (en combinatoire).

Dans certains cas, PHENIX peut ne pas reconnaître une entité à partir d’un groupe de points. A ce moment-là, l’utilisateur sera responsable de la proposition de modèles d’entités relatives au groupe de points non-identifiés par le système, qui peut être capitalisé comme connaissance par le système pour être réutilisé dans les cas futurs.

PHENIX a la particularité d’utiliser les connaissances relatives au produit plus tôt dans le processus de rétro-conception afin d’explorer plusieurs alternatives de représentation géométrique du produit, comme on le voit dans la figure 2.14.

Dans le but de fournir un système supportant la multi-représentation, les auteurs ont utilisé un modèle-produit qui permet de créer une structure d’informations du produit, et ainsi, d’associer les différentes informations du produit à un niveau, mais aussi de relier les différentes représentations du produit à travers l’identification des entités similaires entre celles-ci.

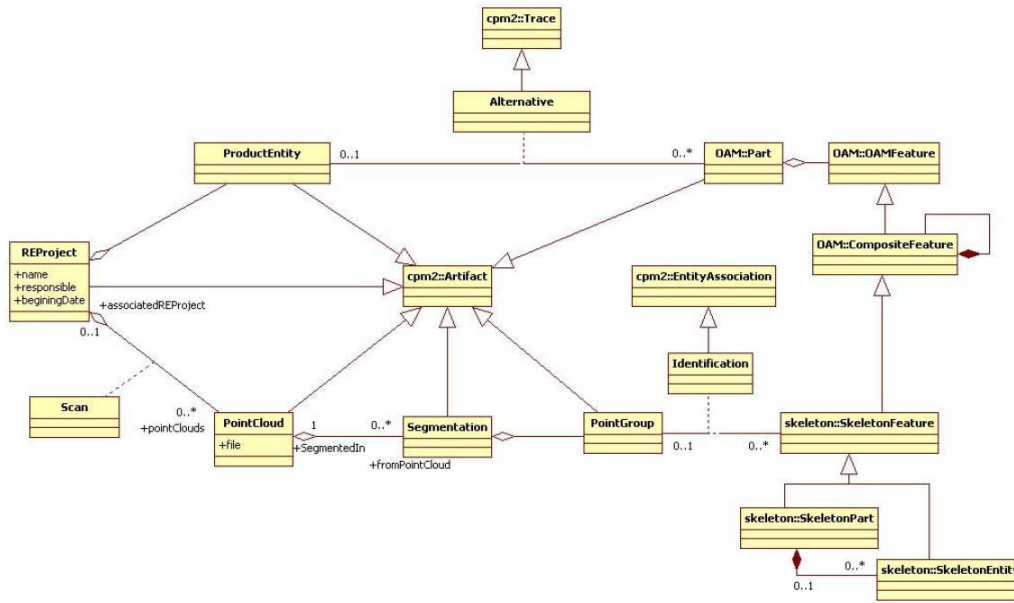


Figure 2.13 – Extension du modèle CPM pour la rétro-conception [Durupt & al. 13]

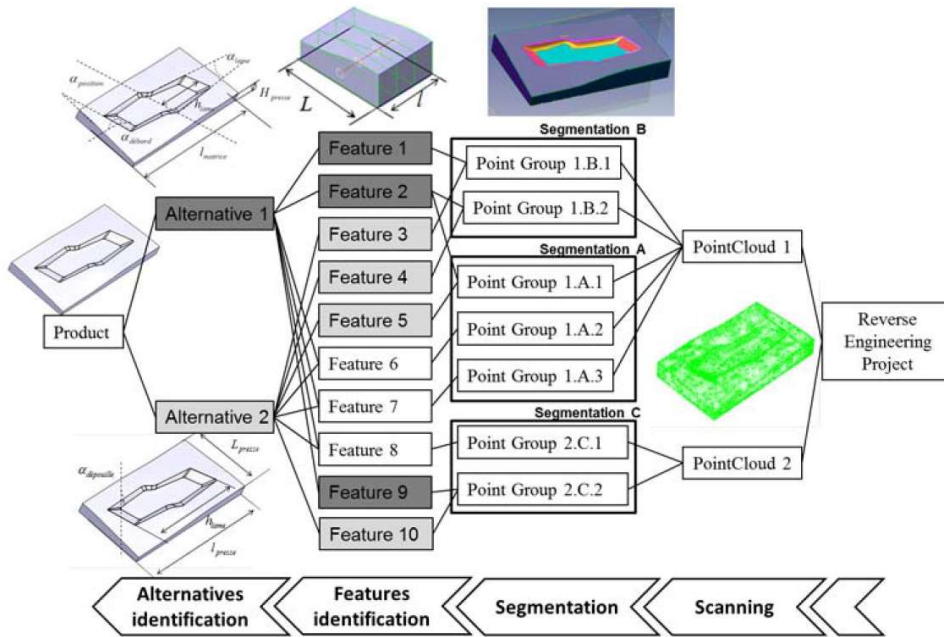


Figure 2.14 – Workflow de PHENIX [Durupt & al. 13]

Néanmoins, PHENIX reste un projet qui traite plus de la rétro-conception géométrique, puisqu'on parle de connaissances métier, et plus précisément d'entités de fabrication. De plus, les données prises en compte dans le processus de rétro-conception de PHENIX sont de type géométrique et sont sous forme virtuelle (Nuages de Points). L'intégration de plusieurs types de données, et la prise en compte de plusieurs formes de ces données nous permettrait de consolider le processus de rétro-conception dans la prise de décision, et ainsi d'offrir un processus plus robuste. Ces points sont des pistes d'amélioration de PHENIX, qui ont conduit à l'émergence du projet METIS.

### DHRM : Rétro-conception d’objets industriels à caractère patrimonial

Dans le contexte d’archéologie industrielle cette fois, les travaux de [Laroche, 07] ont permis de développer une démarche de rétro-conception appliquée aux objets industriels à caractère patrimonial. Cette démarche se basant sur le méta-modèle Digital Heritage Reference Model (DHRM), repose sur les mêmes étapes par lesquelles passe la démarche classique de la conception, et utilise les mêmes outils, à une différence fondamentale près : la rétro-conception commence son investigation depuis la fin du processus de conception.

L’élément dominant la conception classique est la fonction principale pour laquelle l’objet est créé. Le processus de conception permet donc, la définition et la caractérisation de la fonction principale de l’objet étudié, qui par la suite deviendra un objet physique, réel, palpable [Laroche, 07]. Dans le processus de rétro-conception, la fonction principale reste l’élément dominant du processus, qui cependant, « répond à une situation d’usage vécue, il ne s’agit plus d’une seule fonction telle que définie dans la phase de conception, mais de plusieurs fonctions positionnables dans un espace multidimensionnel et multi-temporel. Les fonctions nécessitant d’être contextualisées donnent naissance à des usages ».

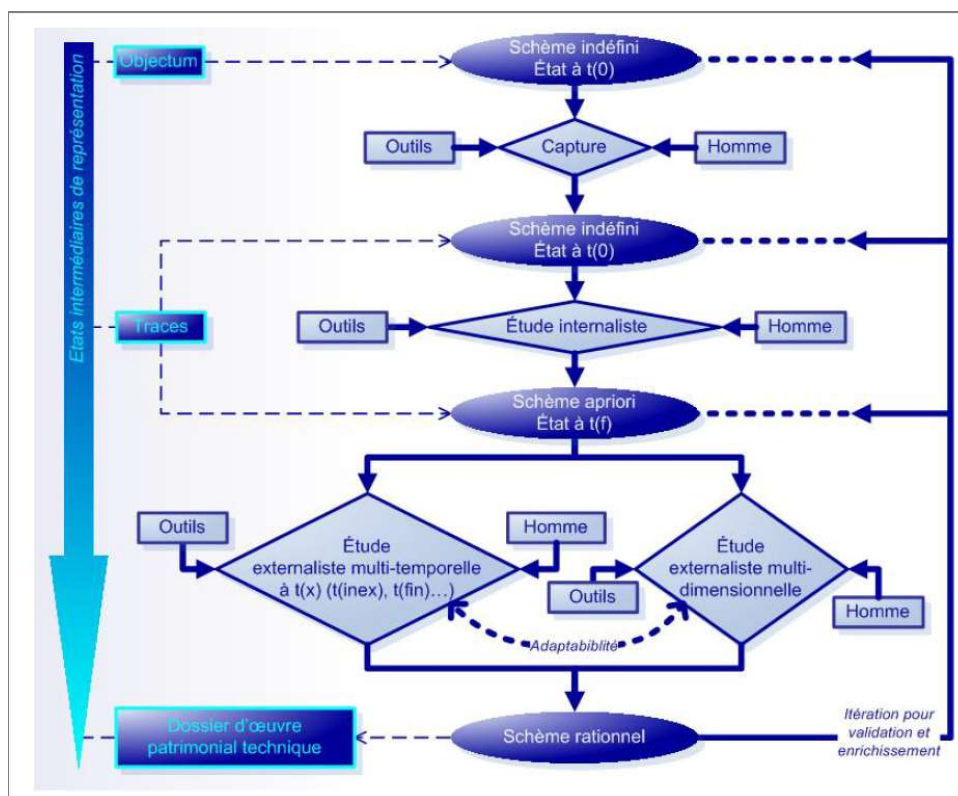


Figure 2.15 – Le rétro-processus de conception contextualisé adapté au cadre patrimonial [Laroche, 07].

La figure 2.15 représente le rétro-processus de conception contextualisé des objets patrimoniaux en se basant sur le modèle DHRM, et qui permet de constituer le dossier d’œuvre patrimonial technique qui regroupe les informations sur le produit analysé en se basant sur le concept de schéma qui peut structurer les connaissances associées à l’objet tout en prenant en compte l’aspect multi-temporel et multidimensionnel. Le rétro-processus de conception

contextualisé est alors décliné en la méthodologie de rétro-conception patrimoniale illustrée dans la figure 2.16.

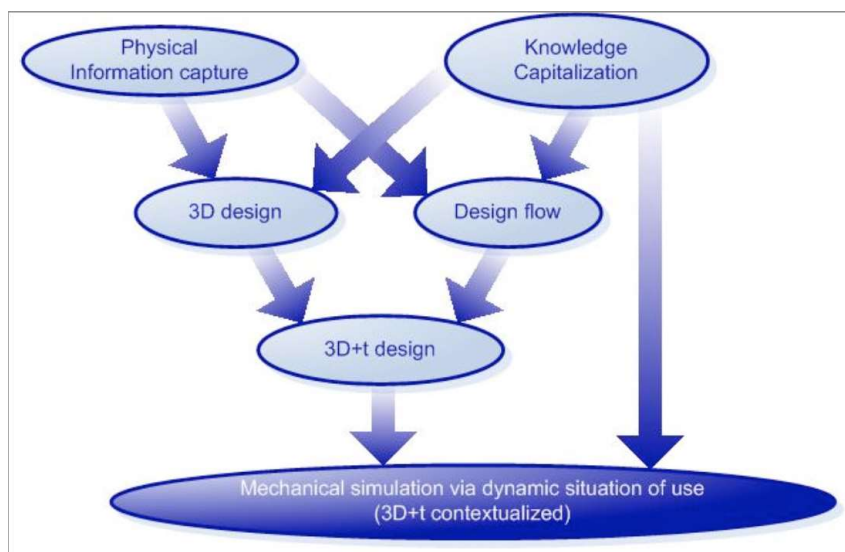


Figure 2.16 – Méthodologie de rétro-conception [Bernard & al.09a]

La rétro-conception d'un objet industriel à caractère patrimonial passe par plusieurs phases (figure 2.16). Le but étant de digitaliser l'objet afin de construire un ensemble d'informations cohérentes, lisibles et transmissibles aux générations futures pour capitaliser le patrimoine industriel. La méthodologie de rétro-conception se décline en quatre phases qui sont [Bernard & al.09a] :

1. La conception d'un squelette de l'objet analysé.
2. L'introduction du concept de temporalité, qui permet de produire un croquis cinématique en 3D.
3. La maturation des connaissances : compréhension du mécanisme.
4. La création du modèle digital dynamique qui représente l'objet, en ancrant les solides sur les squelettes.

Cette démarche permet en sortie d'élaborer un modèle CAO qui capitalise la dynamique de l'objet patrimonial analysé, ainsi que des connaissances complémentaires.

Emergeant d'une problématique multidisciplinaire, le DHRM a pu profiter d'un regard différent sur le produit. En effet, il prend en compte les différents aspects du produit, et cela du point-de-vue multidimensionnel, ainsi que multi-temporel, puisqu'on considère un produit ayant eu plusieurs cycles de vie (plusieurs vies, relatives à plusieurs utilisations ou fonctionnements possibles).

Un des avantages du DHRM est qu'il vise à constituer un dossier d'œuvre patrimonial technique qui constitue une référence informative. En d'autres termes, c'est un dossier qui reprend toutes les informations et connaissances auxquelles on a abouti après la rétro-conception de celui-ci. Cela indique aussi, l'hétérogénéité des sources d'information auxquelles on a eu recours afin de la réaliser, ce qui nous rapproche du concept de données hétérogènes. Aussi, la méthodologie proposée permet d'analyser les différents aspects du produit pour finalement proposer un



schéma global associant les informations entre-elles, et cela dans le but de constituer une ou plusieurs représentations de l’objet patrimonial, qui se retrouveront donc dans le dossier d’œuvre patrimonial technique.

Cependant, la méthodologie proposée est plus adéquate dans un contexte spécifique à l’archéologie industrielle. En effet, cette méthodologie repose sur des techniques et outils de capitalisation des connaissances basées sur l’analyse de corpus d’informations importants, avec des objectifs de capitalisation des connaissances qui varient selon le projet, en termes d’informations et connaissances visées. Dans notre contexte, nous souhaitons proposer une méthodologie de rétro-conception qui permet d’analyser un produit selon des aspects spécifiques, et surtout, proposer une solution qui peut être implémentée du point-de-vue informatique.

## V. Conclusion de la partie

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à la rétro-conception avec les différents travaux qu’on retrouve dans la littérature scientifique, ainsi que différents outils et méthodes qui permettent de réaliser cette activité.

Nous avons vu que jusqu’à maintenant, la rétro-conception était une activité fortement axée sur la reconstruction géométrique des produits, et se concentrait plutôt sur la description des aspects géométriques et topologiques du produit.

La définition que les différents auteurs tendent à donner à cette activité est plutôt relative à la capture des données structurelles. Nous nous sommes donc efforcés de proposer une nouvelle définition plus globale de la rétro-conception, en y intégrant d’autres aspects qui permettent de décrire un produit de manière plus globale, et nous nous sommes inspirés pour cela, des définitions issues de la rétro-conception des systèmes informatiques.

De plus les méthodologies proposées sont souvent locales et relatives à des contextes précis, et ne peuvent être étendues à des applications diverses, et cela sans évoquer les manques des points-de-vue technique ou technologique, ou la grande majorité des solutions construisent des représentations géométriques à un bas niveau d’abstraction en se basant sur des descriptions figées de la géométrie, ce qui rend son évolution très difficile.

Néanmoins, ce travail de prospection nous a permis de dresser une première cartographie de l’état de l’art de la rétro-conception, sur lequel nous nous baserons dans le but de construire une méthodologie plus globale de la rétro-conception, en y intégrant l’analyse et la représentation d’autres aspects du produit, tels que l’aspect fonctionnel ou structurel. Nous avons réalisé un récapitulatif des différents projets issus de l’état de l’art que nous avons exploré, et dressé un tableau pour regrouper toutes ces informations (Tab.2.1).

L’analyse du tableau 2.1, nous permet de consolider notre analyse de la situation, et d’asseoir la problématique proposée dans le chapitre précédent. Il y a des solutions qui envisagent l’intégration des données hétérogènes, mais celle-ci est faite à travers un processus manuel où l’information n’est pas ou peu structurée, ce qui rend son utilisation difficile. D’un autre côté, le recours à un processus de rétro-conception exclusivement géométrique (relatif aux différents

objectifs visés par les projets) permet la reconstruction d’une représentation géométrique du produit, et qui ne prend pas en compte les autres aspects relatifs au produit tels que l’aspect fonctionnel, ou comportemental. Cela ne permet pas d’aborder plusieurs objectifs ou finalités (reconception ou refabrication) à partir d’une même rétro-conception. Donc, nos questions relatives à notre problématique restent en suspens, néanmoins, certains de ces projets permettent d’aiguiller notre recherche et de nous diriger vers certains types de solutions possibles, notamment concernant la problématique relative à la structuration des informations et connaissances.

Dans la partie suivante, nous allons explorer les solutions possibles qui existent dans le monde de l’ingénierie des connaissances. Cela nous permettra d’identifier les outils et méthodes d’amélioration existants, et d’explorer les chemins d’amélioration possibles pour la méthodologie de rétro-conception.

<b>Projet</b>	<b>Type de projet</b>	<b>Intégration / structuration des connaissances</b>	<b>Intégration / utilisation des données hétérogènes</b>	<b>Types de données en entrée / sortie</b>
<b>REFAB</b>	Rétro-conception à l’aide d’entités de fabrication	Utilisation des connaissances du métier de fabrication dans la reconnaissance de la forme du produit	Non. Utilisation données géométriques virtuelles uniquement (nuages de points)	En entrée : Nuages de points. En sortie : modèle 3D (CAO)
<b>VPERI</b>	Rétro-conception pour des objectifs de refabrication, reengineering ou de reconception de produits	Non	Ajout manuelle d’informations sous forme d’annotations	En entrée : Nuages de points. En sortie : modèle 3D (CAO)
<b>MERGE</b>	Environnement unifié pour la rétro-conception	Utilisation d’agents pour l’extraction d’informations à partir de plans 2D ou de modèles 3D	Utilisation de plans 2D en plus des nuages de points	En entrée : Nuages de points, plans 2D. En sortie : modèle 3D (CAO)
<b>PHENIX</b>	Rétro-conception à base de connaissances	Utilisation de connaissances de fabrication (entités) et structuration des connaissances pour cartographier les représentations alternatives du produit	Utilisation de nuages de points, de maillages, et de modèles 3D (CAO)	En entrée : Nuages de points, maillages, modèles 3D. En sortie : modèle 3D paramétré (CAO)
<b>DHRM</b>	Rétro-conception des objets anciens (archéologie industrielle)	Intégration des connaissances à l’aide de méthodes de capitalisation des connaissances	Intégration manuelle d’informations issues de sources hétérogènes à travers la capitalisation des connaissances	En entrée : Nuages de points, documents techniques. En sortie : modèle 3D (CAO), dossier d’œuvre patrimonial

Tableau 2.1 – Comparaison des différents projets de l’état de l’art sur la rétro-conception



# Ingénierie des connaissances : Concepts, outils, et méthodes

Depuis quelques années, avec l'apparition du concept de connaissances, le rapport qu'entretenaient les entreprises avec l'information a changé. En effet, l'émergence d'une nouvelle discipline relative à la connaissance a fait évoluer le paradigme de gestion des informations dans le contexte de l'entreprise : cette discipline est l'ingénierie des connaissances.

Depuis son apparition, l'ingénierie des connaissances n'a pas arrêté de susciter l'intérêt des entreprises ainsi que des laboratoires de recherche. Plusieurs travaux ont été conduits tant du point-de-vue conceptuel, où on a tenté de définir les fondements et les bases des concepts relatifs à la gestion des connaissances, que du point-de-vue opérationnel, où on a développé des méthodes, techniques et outils de la gestion des connaissances dans le but de les intégrer dans l'écosystème de l'entreprise et de bénéficier de ses avantages [Aussenac, 89], [Szykman, 01], [Ammar-Khodja & al. 06].

L'une des parties les plus intéressantes dans le contexte de notre recherche, est la modélisation des connaissances et leur utilisation dans le but d'améliorer les processus métier dans l'entreprise. En effet, cette partie de l'ingénierie des connaissances définit les concepts relatifs à la connaissance, ainsi que des méthodes qui permettent de modéliser les connaissances dans le but de les intégrer dans des systèmes d'aide à la décision.

Dans notre cas, le processus de rétro-conception vise à élaborer une représentation d'un produit à un haut niveau d'abstraction, en prenant en compte des descriptions de ce produit de plusieurs types différents. Cette élaboration nécessitera l'intégration de différentes formes d'informations élaborées : c'est l'intégration des connaissances. Alors, dans ce but, nous explorerons l'ingénierie des connaissances afin de trouver les outils et méthodes qui nous faciliteront la construction d'un système de rétro-conception basé sur la connaissance.

Dans cette partie, nous verrons le domaine de l'ingénierie des connaissances à travers les différents concepts, méthodes, et outils dans l'état de l'art. Nous tenterons dans un premier temps de définir la connaissance, pour voir comment elle se positionne par rapport à notre travail, puis nous passerons à la formalisation de celle-ci à travers l'identification des différentes techniques et méthodes de gestion des connaissances, et leur utilisation. Finalement, nous conclurons avec la comparaison des différentes techniques pour ainsi, diriger notre travail vers une solution ou un ensemble de solutions qui vont permettre d'améliorer la méthodologie de rétro-conception.

## I. Définitions de la connaissance

Plusieurs travaux ont été conduits dans le but de définir le concept de connaissance. Il y a eu des définitions plutôt génériques, qui définissent la connaissance en termes d'objectif, et d'autres qui estiment que la connaissance doit être identifiée et définie dans le contexte relatif à la donnée et à l'information :

Dans [Hayes-Roth & al. 94] on définit la connaissance comme étant l'ensemble de toutes les données qui améliorent la résolution des problèmes. Cette définition est plutôt générique, et ne permet pas de construire une image formelle de la connaissance.

Selon Tixier [Tixier, 01] la connaissance est transférée entre deux individus à travers l'information. Grundstein [Grundstein, 95], [Grundstein, 00] définit la connaissance selon trois postulats :

- 1<sup>er</sup> postulat : « La connaissance n'est pas un objet, elle résulte de la rencontre d'une donnée avec un sujet, et s'inscrit au travers du système d'interprétation de l'individu dans sa mémoire ».
- 2<sup>nd</sup> postulat : « La connaissance est reliée à l'action. Du point-de-vue de l'entreprise, la connaissance est créée par l'action et est essentielle à son déroulement. Elle est finalisée par l'action ».
- 3<sup>ème</sup> postulat : « Il existe deux grandes catégories de connaissances de l'entreprise : les éléments tangibles (connaissances formalisées) et les éléments intangibles (connaissances incarnées par des personnes) ».

Dans [Ermine, 00], l'auteur définit la connaissance en termes d'adéquation à un référentiel. Pour lui, la connaissance « est de l'information qui prend un (ou plusieurs) sens dans un (ou plusieurs) contexte(s) à travers les acteurs de l'entreprise ». Dans [Labrousse, 04], la connaissance est définie comme étant « le résultat d'une interaction entre des informations et un système d'interprétation dans un domaine d'application donné. Elle peut être modélisée par le triplet « information / utilisateur / domaine » et peut être décomposée en trois catégories : les savoirs formalisés, les savoirs formalisables, et les savoirs tacites ». L'auteur dans cette définition tente de définir la connaissance en termes d'informations, d'utilisateurs et de domaine. Nous pouvons constater que cette définition est semblable à celle de [Ermine, 00] dans le sens où l'utilisateur et le domaine représentent le contexte dans lequel se placent les informations. Plusieurs travaux dans la littérature définissent la connaissance en identifiant ses relations avec la donnée et l'information [Bernard & al. 08], [Chandrasegaran & al. 12], [Braganza, 04], [Bhatt, 01]. Ainsi, la connaissance est construite sur la base des deux premiers concepts comme suit :

- « La donnée est usuellement, considérée comme textuelle (numérique ou alphabétique) » [Bernard & al. 08]. « Elle est le reflet symbolique des nombres, quantités, grandeurs ou faits » [Alavi & al. 01].
- « L'information, peut être définie comme étant le devenir des données quand celles-ci sont interprétées et contextualisées par l'homme » [Bernard & al. 08].

- « La connaissance est de l'information dans l'esprit de l'homme, et peut être vue comme étant de nouvelles idées, impressions, et interprétations qui peuvent être appliquées à l'information dans l'effort de générer de la valeur » [Bernard & al. 08]. Elle est aussi relative à de l'information dépendante du contexte, si on se réfère à la définition de [Ermine, 00].

Dans [Nonaka, 94], l'auteur définit généralement la connaissance comme étant une croyance vraie justifiée. Il propose aussi une définition de la connaissance en comparaison avec l'information, où « *l'information est un moyen ou matériel nécessaire à l'initiation et la formalisation des connaissances, et peut être observée d'une perspective "syntaxique" et "sémantique" »* ».

De toutes ces définitions, nous pouvons constater que le concept de connaissances est étroitement lié à celui d'information. Nous pouvons alors dire que la connaissance est relative à l'intégration d'informations dans un contexte spécifique. En d'autres termes, les liens que vont tisser ces informations, avec le contexte (qui n'est autre qu'un ensemble d'informations) représente la connaissance. Dans [Alavi & al. 01], on identifie trois points cruciaux qui émergent de la définition de la connaissance :

1. Une grande importance est accordée à la compréhension des différences entre les données, les informations et les connaissances
2. La connaissance étant personnalisée, son utilité dans un contexte individuel ou dans un groupe dépend de son expressivité. En d'autres termes, la manière dont elle est communiquée et comment elle peut être interprétée par les autres.
3. Des amas d'informations en soi ont très peu de valeur, si ce n'est le traitement actif de celles-ci dans l'esprit d'un individu à travers les processus de réflexion, d'éclaircissement, ou d'apprentissage.

On a alors, à partir de ces définitions, une vision de la connaissance décrite par plusieurs concepts. Dans notre contexte, le but de notre travail est de permettre une intégration de connaissances dans un système d'information. Il nous faudra formaliser des descriptions du produit sur la base de connaissances issues du processus de conception et de développement de produit. Il sera alors plus pertinent d'explicitier cette description en termes d'informations et données clairement formalisées.

Nous nous baserons alors sur la définition de [Labrousse, 04], légèrement modifiée pour qu'elle puisse s'accorder à notre contexte. En résumé, la connaissance est alors « *le résultat d'une interaction entre des informations et un système d'interprétation dans un domaine d'application donné. Elle peut être modélisée par le triplet 'information / utilisateur / domaine' »* », ce triplet d'information représente le contexte qui permet de caractériser ces informations afin qu'elles soient considérées comme connaissances.

Nous adopterons dans notre contexte une vision de la connaissance comme étant un ensemble d'informations contextualisées. En effet, notre intention est de construire une méthodologie de rétro-conception basée sur les connaissances. L'utilisation des connaissances dans notre cas, nous permettra de construire une structure d'informations qui permet à la foi de prendre en

compte des données qui proviennent de sources hétérogènes et de les associer dans le but de créer une ou plusieurs représentation possibles du produit (selon le point de vue adopté).

## II. Typologie de la connaissance

Dans la définition de [Labrousse, 04], on a introduit les notions de savoirs formels, savoirs formalisables, et savoirs tacites. Toutes ces notions sont relatives à des types de connaissances qui existent. Plusieurs travaux ont tenté d'explicitier les différents types de connaissance et les différences entre eux.

Dans [Nonaka & al. 98], on identifie deux dimensions dans la connaissance : La dimension tacite, et la dimension explicite. Dans la dimension tacite, la connaissance est ancrée profondément dans les actions et les expériences d'un individu, aussi bien que dans les valeurs, idéaux, ou émotions. Ce type de connaissance peut être décomposé en deux parties, la première partie est relative à la connaissance tacite technique qui englobe des compétences personnelles informelles, connues sous le nom de « savoir-faire », et la seconde partie est relative à la connaissance tacite cognitive qui englobe les croyances, idéaux, valeurs, etc.

Dans la dimension explicite, la connaissance est celle qui peut être exprimée en termes de mots et de nombres, et partagée sous forme de données, spécifications, manuels, etc.

Dans [Chandrasegaran & al. 12] on identifie les types de connaissance selon trois axes (figure 2.17). Chacun des trois axes est relatif à une classification qui a sa propre base.

Formel / Tacite : Cet axe se base sur les travaux cités précédemment [Nonaka & al. 98]. Les connaissances formelles sont intégrées aux documents du produit, description de la structure et des fonctions du produit, etc. Et les connaissances tacites sont les connaissances liées à l'expérience, règles implicites, intuition, et autres, qui sont ancrées dans la mémoire de l'acteur.

Produit / Processus : Les connaissances produit prennent en compte les informations et connaissances relatives à l'évolution du produit tout au long de son cycle de vie. Les connaissances processus peuvent elles, être classées en : connaissances du processus de conception, connaissances projet, et connaissances du processus de fabrication.

Compilé / Dynamique : Les connaissances compilées sont essentiellement obtenues de l'expérience qui peut être compilée en règles, plans, scripts, etc. Les solutions sont explicites. La connaissance dynamique, utilise les connaissances qui peuvent être utilisées pour générer des structures de connaissances additionnelles, qui ne sont pas prises en compte par les connaissances compilées.

Dans [Zack, 99], en plus d'évoquer la connaissance comme étant tacite ou explicite, propose d'autres types de connaissances : la connaissance déclarative, qui représente la description de quelque chose, basée sur la compréhension explicite et partagée de concepts, catégories, et descripteurs pour une communication et un partage des connaissances efficaces dans une organisation. La connaissance procédurale concerne les procédures, ou comment effectuer un processus ou une opération. La connaissance causale, quant à elle, concerne la relation de causalité entre une cause et une conséquence.

Le tableau suivant permet de synthétiser les différents types de connaissance issus de l’état de l’art (tableau 2.2).

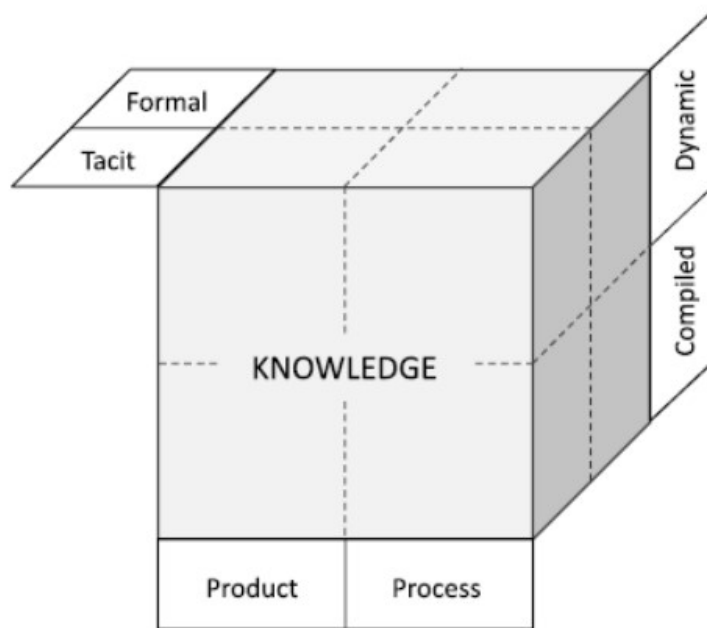


Figure 2.17 – Typologie des connaissances [Chandrasegaran & al. 12]

Table 2. Knowledge Taxonomies and Examples		
Knowledge Types	Definitions	Examples
Tacit	Knowledge is rooted in actions, experience, and involvement in specific context	Best means of dealing with specific customer
Cognitive tacit:	Mental models	Individual's belief on cause-effect relationships
Technical tacit:	Know-how applicable to specific work	Surgery skills
Explicit	Articulated, generalized knowledge	Knowledge of major customers in a region
Individual	Created by and inherent in the individual	Insights gained from completed project
Social	Created by and inherent in collective actions of a group	Norms for inter-group communication
Declarative	Know-about	What drug is appropriate for an illness
Procedural	Know-how	How to administer a particular drug
Causal	Know-why	Understanding why the drug works
Conditional	Know-when	Understanding when to prescribe the drug
Relational	Know-with	Understanding how the drug interacts with other drugs
Pragmatic	Useful knowledge for an organization	Best practices, business frameworks, project experiences, engineering drawings, market reports

Tableau 2.2 – Les différents types de connaissances [Alavi & al. 01]

Dans notre contexte, nous tentons de développer un système d’aide à la rétro-conception qui prend en compte des informations formelles relatives à la description du produit. Ces informations peuvent être issues d’un scan 3D du produit analysé, comme elles peuvent être issues de dossiers techniques contenant des informations sous formes picturales ou textuelles,

relatives à la fonction ou au comportement du produit. Dans ce cas, nous considérons dans notre travail les connaissances formelles.

Les connaissances formelles peuvent être représentées de plusieurs formes différentes, et il est pertinent d'explorer les différentes formes de représentation possibles. Cela nous permettra d'explorer d'un côté la représentation des connaissances d'un côté, et les formes que peuvent prendre les données hétérogènes en entrée du processus de rétro-conception.

### III. La représentation des connaissances

On retrouve dans la littérature scientifique plusieurs significations relatives à la représentation des connaissances. L'une d'entre elles est relative à la structuration des informations et connaissances dans le but de construire une description formelle d'un objet ou produit. Dans [Szykman & al. 01], on parle de représentation des connaissances produit, où celle-ci est utilisée dans le but d'identifier et de structurer les connaissances et informations relatives au produit, en prenant en compte les aspects principaux qui permettent de le décrire (fonctions, comportements, structures). Tout cela afin de construire une représentation du produit qui permet de supporter la conception très tôt dans la phase de développement. Cette vision de la représentation de la connaissance est donc relative à la structuration des connaissances, que nous aborderons plus tard avec la modélisation des connaissances.

Dans [Davis & al. 93], la représentation des connaissances est décrite comme ayant 5 rôles :

- 1) La substitution d'une entité externe (monde réel) qui est réalisée par un processus interne.
- 2) C'est un ensemble d'engagements ontologiques.
- 3) C'est une théorie fragmentaire (vision partielle) d'un raisonnement intelligent.
- 4) Un moyen de raisonnement efficace (en intelligence artificielle).
- 5) Un moyen d'expression humaine (communication).

Une autre définition [Horváth & al.02] est relative à l'externalisation de la connaissance et sa communication. Elle identifie les différentes formes de représentation suivant lesquelles, les connaissances (ou informations) peuvent être communiquées. La représentation applicable pour chaque connaissance est indiquée par la nature et les caractéristiques de celle-ci. Quel que soit la représentation considérée, elle doit faciliter le traitement de la connaissance décrite.

Toujours dans [Horváth & al.02] on définit la représentation des connaissances comme étant un filtre qui crée un modèle de connaissance simplifié, extrait ou obtenu des êtres humains. Cette simplification est accompagnée d'une décontextualisation, qui crée une rupture entre les connaissances représentées, et les connaissances qui représentent le contexte dans lequel elles s'intègrent, contraignant ainsi l'interprétation de celle-ci, qui ne peut se faire qu'à l'aide d'une vérification intellectuelle.

#### 1. Formes de représentation des connaissances

La représentation de connaissances peut être classifiée selon différentes formes. Dans [Horváth & al.02], on propose 5 catégories de représentation des connaissances :

1. La représentation picturale, qui est relative aux connaissances qui sont communiquées à travers des photos, vidéos, tableaux, dessins, etc.
2. La représentation symbolique, qui permet de représenter des connaissances relatives à l’aspect logique, tels que des diagrammes, des tables de décision, des graphiques, etc.
3. La représentation linguistique, qui est relative aux différentes connaissances communiquées à travers le langage, tel que dans les communications verbales enregistrées, des textes interactifs, des textes, etc.
4. La représentation virtuelle, qui permet de représenter les connaissances à travers des modèles virtuels tels que la CAO, les modèles de réalité virtuelle, les animations, etc.
5. La représentation algorithmique, qui est relative aux différentes expressions mathématiques, aux algorithmes informatiques, aux procédures de calcul, etc.

Dans la figure 2.18, nous pouvons voir le lien entre certains livrables qu’on peut retrouver dans l’écosystème de l’entreprise, en relation avec les différentes formes de représentation telles que présentées précédemment.

Pictorial	Symbolic	Linguistic	Virtual	Algorithmic
Sketches	Decision tables	Customer Requirements	CAD Models	Mathematical Equations
Detailed drawings	Production rules	Design Rules, constraints	CAE Simulations	Parametrizations
Charts	Flow charts	Analogies	Virtual Reality simulations	Constraint Solvers
Photographs	FMEA diagram	Customer feedback	Virtual prototypes	Computer Algorithms
CAD model views	Assembly tree	Verbal communication	Animations	Design/ operational procedures
	Fishbone diagrams		Multimedia	
	Ontologies			

Figure 2.18 – Livrables suivant les formes de représentation des connaissances  
[Chandrasegaran & al. 12]

Dans [Chandrasegaran & al. 12], se basant sur les catégories de représentation précédentes, on met en relation les différentes formes de représentation des connaissances avec les différentes phases du cycle de développement du produit. On voit dans la figure 2.19 la correspondance des différents outils mis en place aux différentes phases du cycle de développement d’un produit, avec les formes de représentation correspondantes.

Cette figure nous permet de voir l’évolution de la représentation du produit dans son cycle de vie. Nous pouvons observer la concordance entre les représentations des informations et connaissances triées selon un ordre chronologique, et la diminution de l’abstraction relative au produit jusqu’à son élaboration physique. Cela permet de mettre en évidence le niveau de détail relatif à chaque forme de représentation et la facilité avec laquelle elle communique l’information: linguistique, puis picturale, puis symbolique et/ou algorithmique, puis virtuelle (de la plus abstraite à la plus concrète). Cela aura un impact sur le processus de traitement des informations quant à la sélection des données pertinentes.

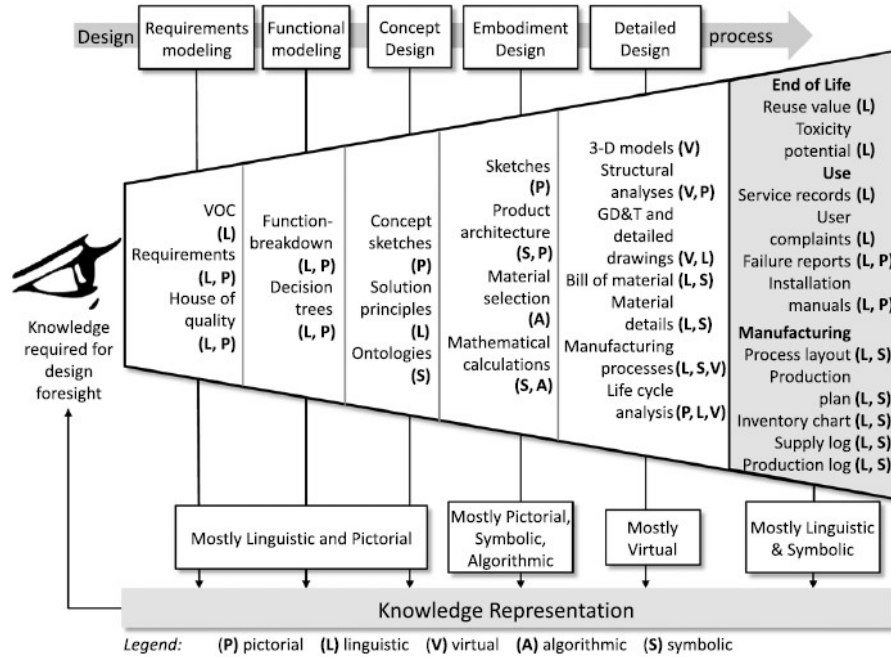


Figure 2.19 – Les formes de représentation des connaissances dans le cycle de développement [Chandrasegaran & al. 12]

## 2. Difficulté d'utilisation

Une des difficultés rencontrées lors de la mise en place d'une classification des livrables sur la base de ces formes de connaissances est relative aux limites entre ces différentes formes. En effet, il est possible de classer certains livrables selon différentes formes de représentation adéquates. Par exemple, plusieurs livrables considérés comme étant de forme symbolique peuvent être aussi considérés comme étant de forme picturale (les diagrammes par exemple). Cela suppose que la classification actuelle tend à être inefficace, puisqu'elle ne permet pas de statuer de manière sûre à quelle forme appartient tel ou tel livrable.

De notre point-de-vue, cela est dû à la considération des formes de représentation des connaissances à un niveau d'abstraction élevé, et un manque de formalisation de la classification. En effet, chaque livrable représente plutôt une collection d'éléments de connaissances, ce qui rend la tâche de classification délicate, puisqu'on peut trouver différents types d'éléments d'informations qui peuvent être représentés différemment. De ce fait, l'utilisation de cette classification serait plus efficace si elle était utilisée au niveau des éléments d'informations et de connaissances.

Finalement, cette classification serait plutôt utilisée pour identifier les différentes informations élémentaires (structure d'une pièce – piston par exemple) en correspondance avec la forme de représentation la plus adéquate (forme virtuelle). Donc, une adaptation du concept doit être faite dans le but de mettre en évidence cette relation. Nous verrons plus tard dans la proposition comment ce concept peut être utilisé dans l'intégration des connaissances et comment il sera adapté.



## IV. Modélisation des connaissances

L’avènement de l’ingénierie des connaissances a vu évoluer en même temps des techniques et méthodes issues du génie informatique dans le but de formaliser des approches basées sur des connaissances, et ainsi développer des outils à base de connaissances [Sowa, 99], [Baral, 03], [Gelfond & al. 02]. Ce développement consiste en l’élaboration de systèmes qui formalisent les connaissances selon une certaine structure afin de la réutiliser. L’élaboration de la structure des connaissances revient à construire des modèles de connaissances qui seront intégrés dans le modèle de données global de ces systèmes.

La modélisation est une activité qui consiste en la capture ou l’extraction d’informations dans le but de les réutiliser à travers l’élaboration d’un modèle relatif à un contexte d’utilisation. Candlot [Candlot & al. 06] définit la notion de modèle comme étant « *un consensus sur une représentation partielle de la réalité* ». Le modèle est alors une représentation simplifiée de la réalité, ce qui implique une abstraction d’un ensemble d’informations qui permettent d’établir cette représentation. En d’autres termes, la modélisation permet d’élaborer des descriptions abstraites des contextes qu’elle doit représenter.

La modélisation des connaissances consiste alors en l’élaboration de représentations (dans le sens de structuration) schématiques de connaissances. Modéliser des connaissances revient à décrire les différents éléments de connaissances, « *de manière à pouvoir les utiliser pour le raisonnement ou le calcul* [Ammar-Khodja, 07]. *Cette description peut être faite à l’aide de représentations graphiques visant à permettre une manipulation de ces objets – (éléments de connaissances) –, essentiellement par des systèmes informatiques. Cependant cette représentation graphique doit respecter des formalismes et des règles de modélisation* ». En conséquence, dans le but d’externaliser la connaissance à travers sa modélisation, il faudra s’attacher à une représentation formelle qui facilite la compréhension du modèle.

L’activité de modélisation des connaissances vise donc à établir des représentations selon le contexte d’utilisation. Dans l’écosystème de l’entreprise, il y a différents contextes où les modèles de connaissances peuvent être utilisés. Ces contextes dépendent des types de connaissances spécifiques dans cette phase de modélisation, et plus précisément les types de connaissances relatifs aux artefacts d’entreprise : on peut trouver des modèles de connaissances relatifs aux produits, d’autres relatifs aux processus, des modèles combinant les deux (produit-processus), etc. Dans [Ammar-Khodja, 07] on identifie deux grandes familles de travaux qui ont porté sur les modèles de connaissances :

1. La première famille propose un (des) cadre(s) méthodologique(s) structuré(s) et structurant(s) pour construire des modèles de connaissances en vue de développer des systèmes informatiques.
2. La seconde famille est relative à la modélisation des connaissances selon l’objet sur lequel elles portent et prend en compte les connaissances dans le cycle de conception du produit.

Ces deux familles se distinguent d’un point-de-vue méthodologique et opérationnel, cependant, elles restent complémentaires au regard de l’activité de modélisation. En fait, la première

famille qui propose un cadre méthodologique permet de formaliser l’activité de modélisation des connaissances depuis la capture ou l’extraction des connaissances, jusqu’à la création du modèle à implémenter, et optionnellement, la modélisation de celle-ci. Dans la deuxième famille cette activité d’extraction ou de capture y est implicite, tout en étant indépendante d’un formalisme visible pour ce faire.

Finalement, nous pouvons dire que l’activité de modélisation de connaissances est composée de deux parties distinctes : la première partie concerne la capitalisation des connaissances à travers l’extraction et la capture des connaissances dans le but de les réutiliser, et la deuxième partie concerne la réutilisation de ces connaissances dans le but d’élaborer des modèles selon les objectifs d’utilisation visés (mémoire d’entreprise, système d’information, etc.). Nous allons détailler dans la suite ces deux parties en présentant différents outils et méthodes issues des travaux de recherche.

### 1. La capitalisation des connaissances

La phase de capitalisation des connaissances est une phase cruciale dans l’élaboration des modèles de connaissances. Cette phase se caractérise par l’identification des différents éléments de connaissances qui seront utilisés plus tard dans l’élaboration du modèle.

La capitalisation des connaissances a été le sujet de plusieurs travaux de recherche qui ont abouti à des outils et méthodes dans le but de modéliser les connaissances. La norme sur le Record Management est une norme qui a été élaborée dans le but de proposer une méthodologie générique (figure 2.20) pour capitaliser les connaissances de l’entreprise à travers la capitalisation de ses documents [ISO 15489]. A l’issue du processus implémentant cette méthodologie, les documents sont considérés comme des archives.

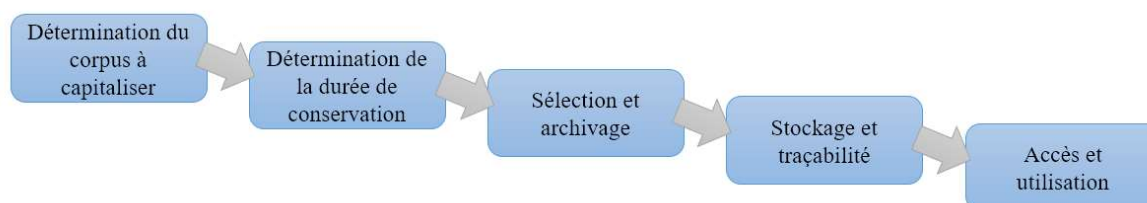


Figure 2.20 – Processus de capitalisation des connaissances [Laroche 07]

Dans [Laroche, 07] on stipule que « la généralité de cette méthode ne peut tenir compte de la diversité des sources à prendre en compte. Plusieurs finalités peuvent être appliquées aux connaissances capitalisées ». En conséquence, il est possible d’utiliser cette méthodologie de plusieurs façons différentes, et pour atteindre des objectifs divers. Pour cela, on trouve des méthodologies de capitalisation de connaissances qui sont spécifiques à un contexte donné.

Ces méthodes et outils de capitalisation des connaissances sont plus intéressants dans un contexte où les connaissances considérées sont de natures tacite et/ou explicite. Compte tenu de notre contexte d’utilisation relatif à des connaissances formelles (explicites), nous nous tournons vers des solutions de modélisation plus adaptées telles que les modèles-produit. Pour cette raison, nous avons choisi de ne pas détailler cette partie de capitalisation des connaissances avec les différentes méthodes développées, et qu’on retrouve dans l’état de l’art.

Nous détaillerons quelques-unes de ces méthodologies de capitalisation des connaissances dans la section annexe. Nous les regroupons dans un tableau de synthèse qui permettra de les comparer selon leurs objectifs et leurs contextes d'utilisation.

## 2. L'élaboration des modèles

La phase d'élaboration de modèles a pour but principal de mettre en place une cartographie des connaissances capitalisées de manière formelle (à travers l'utilisation des méthodes et outils précédents) ou de manière informelle (en proposant systématiquement des modèles permettant de décrire un objet, une situation, etc.).

Dans cette partie, nous verrons les différents modèles de connaissances élaborés dans le but de décrire différents objets d'entreprise tels que les produits, les processus, ou les ressources. Pour la majorité, il s'agira de modèles produit (méta-modèles « produit ») qui permettent de décrire le produit selon différents aspects tels que l'aspect fonctionnel ou l'aspect structurel. Ces modèles sont souvent décrits selon le formalisme UML (Unified Modelling Language) dans le but de fournir une structure formelle qui peut être implémentée, aux différentes applications informatiques qui se basent sur ceux-là.

### a. Modèle FBS

Le modèle FBS est à la base de plusieurs modèles produit développés dans le but de décrire la structure globale d'un produit. Dans [Gero, 90], on a considéré le processus de conception comme étant un processus de transformation des informations fonctionnelles du produit, en description conceptuelles d'un artéfact qui permet de réaliser ces fonctions. Cette transformation n'est pas directe, elle passe par plusieurs états intermédiaires où plusieurs autres aspects du produit sont explorés, comme par exemple le comportement de celui-ci [Dorst & al. 05].

Les trois aspects permettant de caractériser un produit sont donc : la fonction, qui décrit les résultats attendus par les comportements de l'artéfact, le comportement, qui décrit les actions ou processus de l'artéfact selon le contexte et la nature de l'environnement, et enfin, la structure, qui décrit les éléments de l'artéfact, leurs arrangements et leurs connectivités [Rosenman & al. 98]. Ces trois aspects sont utilisés dans le but d'élaborer une description du produit et de le caractériser durant les différentes phases de conception et de développement de celui-ci.

Dans la figure 2.21 est schématisé l'ensemble des aspects qui décrivent le produit selon trois visions différentes avec les différentes opérations possibles :

- Une vision attendue du produit, qui décrit le besoin des parties prenantes en caractérisant le produit selon des fonctions attendues, des comportements attendus, et une structure attendue.
- Une vision interprétée du produit qui elle correspond à l'interprétation des fonctions, comportements, et structure attendues par les parties prenantes.
- Une vision réelle du produit caractérisée par les fonctions, les comportements et la structure réelle du produit.

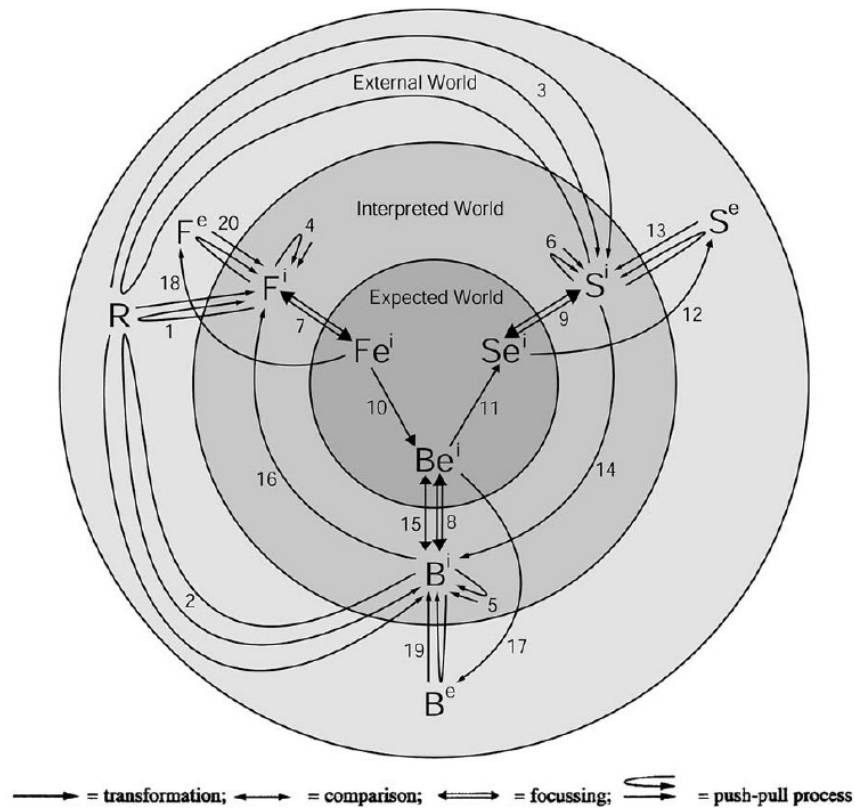


Figure 2.21 – Relations entre les fonctions, les comportements, et les structures [Gero & al. 03]

Le modèle FBS permet de décrire le produit suivant ces trois aspects, mais manque de formalisme. Il sera à la base d'autres modèles produit (notamment le modèle FBS-PPRE [Labrousse & al. 04] qu'on verra un peu plus loin), qui vont permettre de l'étendre tout en lui ajoutant un formalisme dans le but de créer des modèles qui capitalisent les connaissances produit dans un système à base de connaissances.

### CPM et OAM

Le NIST (National Institute of Standards and Technology) a développé un modèle-produit dont le but est de proposer un support assez générique, simple et extensible pour représenter les informations liées à la gestion du cycle de vie du produit indépendamment des applications informatiques métier qui vont utiliser ces informations [Sudarsan & al. 2005], [Fenves & al. 2004]. Deux modèles principaux sont utilisés pour décrire le produit à deux niveaux différents :

- Le « Core Product Model » : permet la représentation des différentes informations relatives à la description d'un artéfact (composant, sous-assemblage, assemblage).
- Le « Open Assembly Model » : permet la représentation des différentes informations sur les relations d'assemblage entre les artéfacts.

Parmi les différents modèles, Le CPM (pour Core Product Model) fournit une description multi-vues à travers la notion d'artéfacts. En plus des concepts géométriques, ce modèle prend en compte les aspects de forme, de fonction, de comportement, de matériaux, de décompositions physiques et fonctionnelles, de mise en correspondance entre la fonction et la forme ainsi que plusieurs relations entre ces différents concepts.

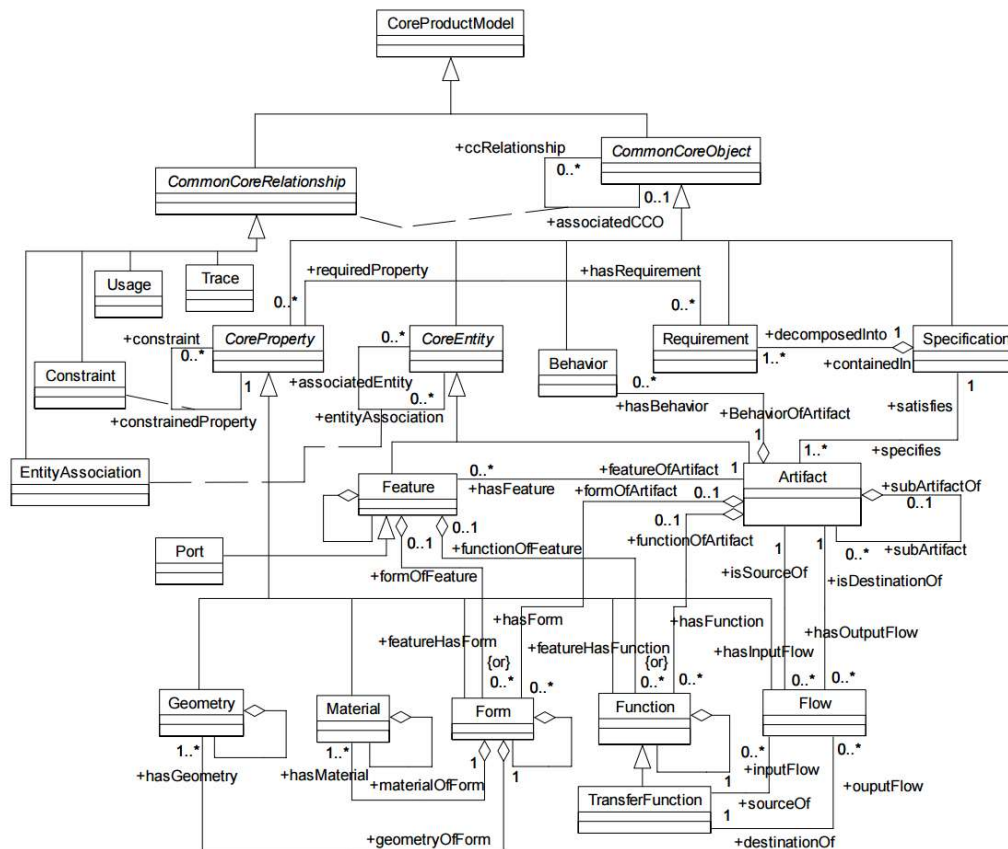


Figure 2.22 – Le modèle CPM (Core Product Model) [Sudarsan & al., 2005]

Ce modèle est construit sur la base entité-relation qui permet de décrire un objet en termes d’entités de différents types, et de relations (de différents types aussi) pour les lier.

La figure 2.22 montre le diagramme de classes UML du modèle CPM. Elles sont regroupées en différentes catégories selon la nature des informations :

- Les classes abstraites qui sont : la classe « **CoreProductModel** », qui englobe tout le modèle, la classe « **CommonCoreObject** » qui est divisée en « **CoreEntity** » pour les objets physiques et « **CoreProperty** » pour les propriétés, et la classe « **CoreRelationship** » pour décrire les différents types de relations. Elles regroupent de manière générique, les informations de base du modèle, sans les décrire en détail.
- Les classes « objet » héritent de la classe « **CommonCoreObject** ».
- Les classes « relation » qui héritent de la classe « **CoreRelationship** », prennent en compte les différents types de relation entre les objets du produit.
- Les classes « utilité » (ne sont pas visibles sur la figure 2.22) qui comportent un ensemble d’attributs associés à chacune des classes d’objets.

Nous pouvons remarquer que c’est la classe abstraite « **CommonCoreObject** » qui regroupe l’ensemble des concepts qui permettent de décrire le produit.

La classe « **Artifact** », qui est la classe principale du modèle, représente une entité distincte dans un produit (un composant, un sous-assemblage ou un assemblage), et permet de représenter l’aspect structurel de celui-ci. La notion de hiérarchie entre assemblage, sous-

assemblage et composants, est reflétée par la relation réflexive qu’a la classe « **Artifact** » avec elle-même (relation subArtifacts / subArtifactOf). Cette classe utilise différents concepts pour décrire le produit de manière détaillée : la classe « **Flow** » pour décrire les flux canalisés par le produit, la classe « **Function** » pour décrire les fonctions du produit, la classe « **Form** » qui permet de décrire la forme géométrique et topologique du produit, la classe « **Material** » qui décrit les propriétés des matériaux utilisés pour élaborer le produit, et la classe « **Feature** » représente une entité caractéristique qui est une partie de la structure d’un « **Artifact** », la classe « **Port** » représente une interface.

L’ensemble des autres classes permet de décrire le produit selon les autres aspects (fonctionnel et structurel) :

- La classe. Elle assure une fonction particulière. Selon sa fonction, une entité caractéristique peut être « de conception », « d’analyse », « de fabrication », etc.
- La classe « **Specification** » est relative à la formalisation des besoins en conception.
- La classe « **Requirement** » est relative au besoin exprimé par les parties prenantes, de cette classe sont utilisées les informations pour former les objets « **Specification** ».
- La classe « **Behaviour** » qui permet de décrire le comportement dynamique de l’artéfact, relatif à des changements d’états selon des transitions.

Il faudra cependant séparer la classe « **Function** » décrite en haut et la classe « **Specification** ». La première est relative aux fonctions techniques qui permettent de décrire le produit, alors que la deuxième est relative aux fonctions de service, qui permettent d’identifier les fonctions à remplir par le produit, indépendamment de la solution à proposer (Elles sont à deux niveaux d’abstraction différents).

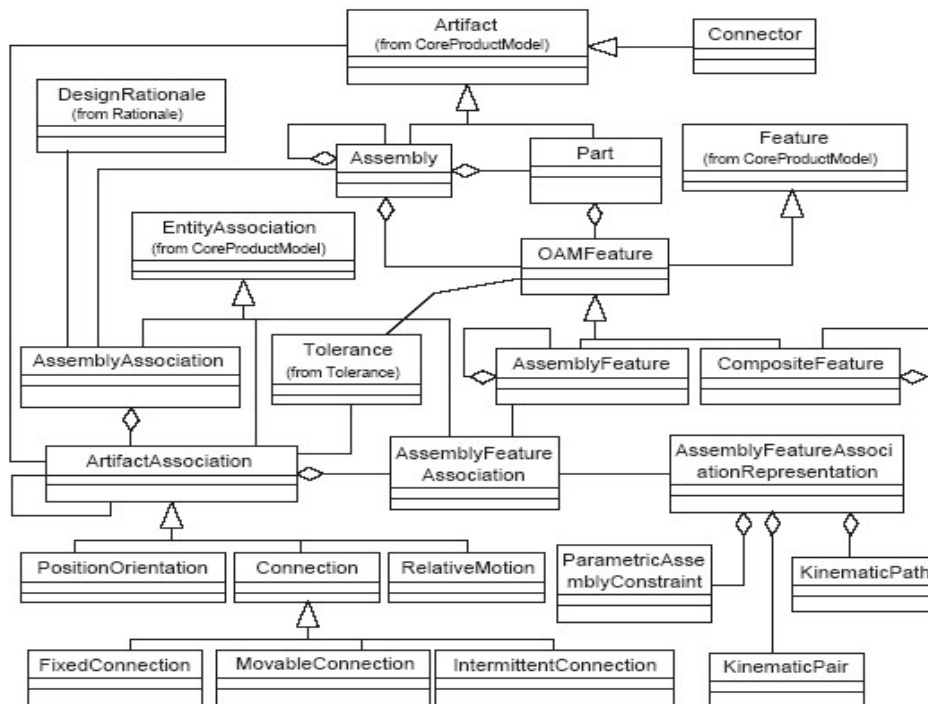


Figure 2.23 – Le modèle OAM (Open Assembly Model) [Foufou & al. 2005]



Le OAM, (Open Assembly Model) vient étendre le modèle CPM afin d’intégrer les différentes informations qui caractérisent les liens des artefacts dans un système [Foufou & al. 2005]. L’OAM s’appuie sur la norme d’échange de données STEP pour l’extraction des informations géométriques à partir du CPM. La figure 2.23 montre la structure de ce modèle avec toutes les informations qui permettent de décrire les relations d’assemblage.

### Modèle holonique

Le modèle « Holonique », comme son nom l’indique, se base sur le concept de « holon », qui représente la fusion d’un objet physique et de son information connexe. Toute entité « Holonique » est représentée en reliant d’une manière univoque sa partie physique (si elle existe) et sa partie information associée qui la décrit.

Le terme « Holonique » a été adapté au monde de la fabrication, faisant ainsi émerger le concept de système de fabrication holonique (HMS : Holonic Manufacturing Systems). Un HMS est un système autonome et coopératif pour transformer, transporter, stocker et/ou contrôler simultanément de l’information et des objets physiques [Terzi & al. 2005].

La figure 2.24 montre le modèle holonique proposé par [Terzi & al. 2005] pour représenter les données du produit. Ce modèle est formalisé en utilisant le langage UML. La classe « ObjectInformation » est la classe principale du modèle. Elle est composée d’autres classes regroupant des informations qui permettent de caractériser le produit. La classe « **Description** », par exemple, permet une représentation textuelle de l’objet physique.

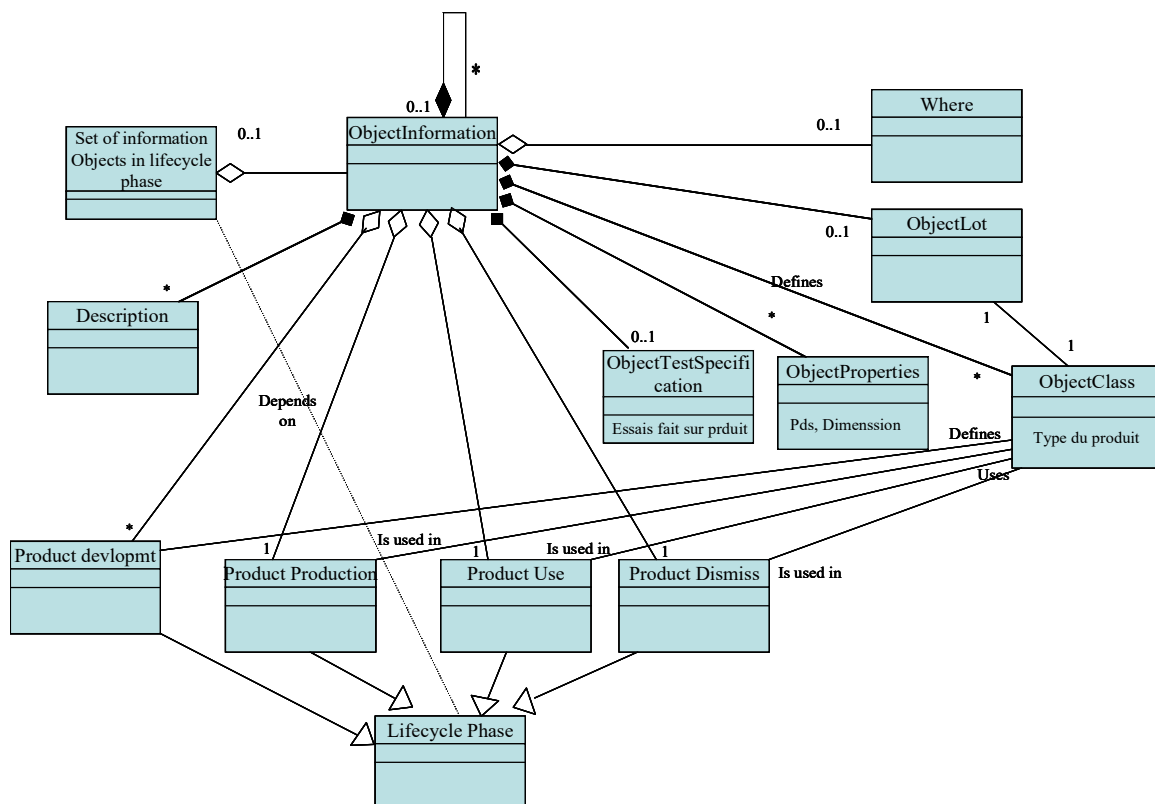


Figure 2.24 – Le modèle « Holonique » [Terzi & al. 2005]

Le modèle holonique intègre également une structuration des informations produit par rapport aux différentes phases du cycle de vie du produit en intégrant la classe « **Lifecycle Phase** » qui

fournit une base pour les différentes informations produit selon chaque phase. Ces informations sont regroupées dans des classes qui héritent de celle-ci : la classe « **Product Development** », la classe « **Product Production** », la classe « **Product Use** », et la classe « **Product Dismiss** ». Chacune de ces classes permet de décrire une phase particulière du cycle de vie du produit :

- La classe « **Product Development** » représente la phase de conception (regroupe les décisions, les choix faits, les exigences posées par le client, etc).
- La classe « **Product Production** » intègre les informations relatives à la fabrication du produit (les ressources humaines et matérielles mobilisées, les matières premières, etc).
- La classe « **Product use** » est relative à la phase d'utilisation du produit et prend en compte les différentes informations relatives au produit durant cette phase.
- La classe « **Product Dismiss** » concerne la mise au rebut du produit.

Ce modèle a été élaboré dans le but de fournir une structure d'information pour les systèmes PLM. Cependant, il n'intègre pas une description détaillée du produit, qui permettrait d'élaborer une représentation à un haut niveau d'abstraction. Il se focalise surtout sur l'élaboration d'un modèle décrivant le contexte externe au produit, dans son cycle de vie.

### Modèle PPO

Dans le cadre du réseau national de technologies logicielles, le projet IPPOP (pour Intégration Produit, Processus, Organisation pour l'amélioration des Performances en ingénierie) a été lancé [Nowak & al. 04]. L'objectif du projet IPPOP est de développer un système collaboratif pour supporter et partager les informations entre les acteurs tout au long du cycle de vie d'un projet avec une intégration, d'une part, des dimensions Produit, Processus et Organisation, et d'autre part, d'extensions des logiciels de CFAO et GDT existants en prenant en compte les aspects technologiques liés à la conception (figure 2.25).

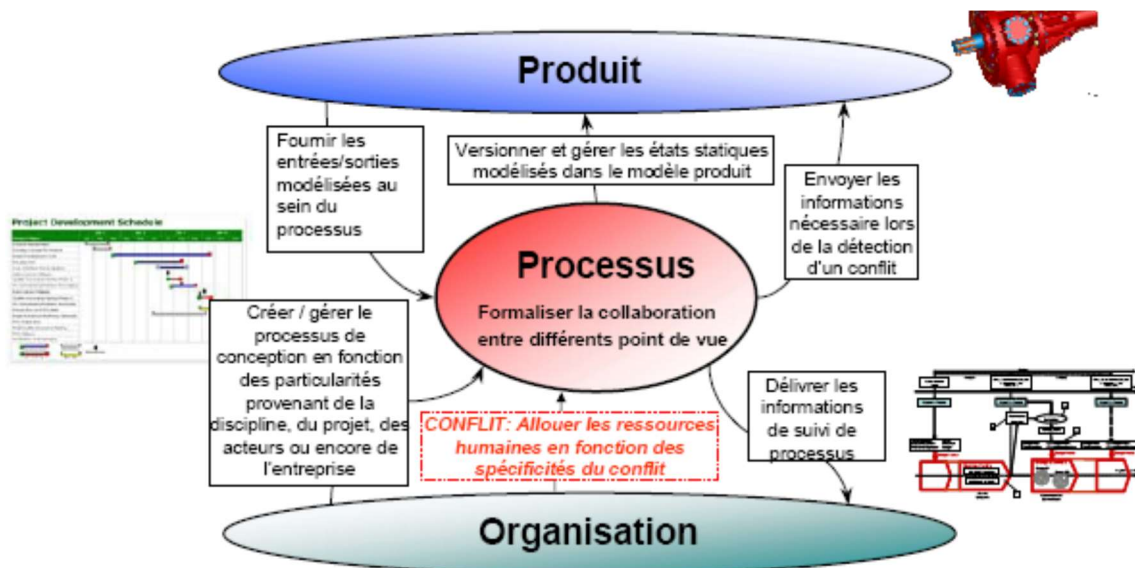


Figure 2.25 – Les vues Projet Processus et Organisation du projet IPPOP [Rose, 04]

Le modèle PPO a été développé dans le cadre du projet IPPOP, comme un espace d'échange et de gestion des relations entre les différents modèles existants. Ce modèle intègre donc, trois différents modèles : un modèle-produit, un modèle processus, et un modèle organisation. Le



modèle PPO peut être adapté dans le but de créer une vue holistique du cycle de vie du produit [Noël & al. 08].

Le modèle PPO comporte donc une partie descriptive des informations projet en termes de processus, d’organisation des ressources et de gestion des conflits, ainsi qu’une partie décrivant le produit. Le modèle PPO est représenté dans la figure 2.26 selon les trois modèles évoqués :

- Le modèle « Organisation » qui regroupe les ressources, les contraintes, et les objectifs du projet à travers les classes « **Resource** », « **Constraint** », et « **Objective** ». Il prend aussi en compte le centre de décision qui définit le contexte d’une décision (la classe « **Decision\_center** »), le framework de conception relatif à un domaine de compétence (la classe « **Design\_Framework** », ainsi que le framework de décision relatif à un ensemble de variables pour prendre une décision (la classe « **Decision\_Framework** »).
- Le modèle « Processus » quant à lui regroupe les ressources nécessaires à la réalisation des processus (les classes « **Human** », « **Hardware** », « **Software** », et « **Information** »), et les relie au projet (la classe « **Project** »).
- Le modèle « Produit » permet de décrire le produit à travers les classes : « **Component** » qui décrit un composant du produit du point de vue structurel, « **Interface** » qui décrit les interfaces d’un composant qui le relie à d’autres composants, « **Function** » qui décrit les fonctions du composant, et « **Behaviour** » pour décrire les changements d’état du composant tout au long de son cycle de vie.

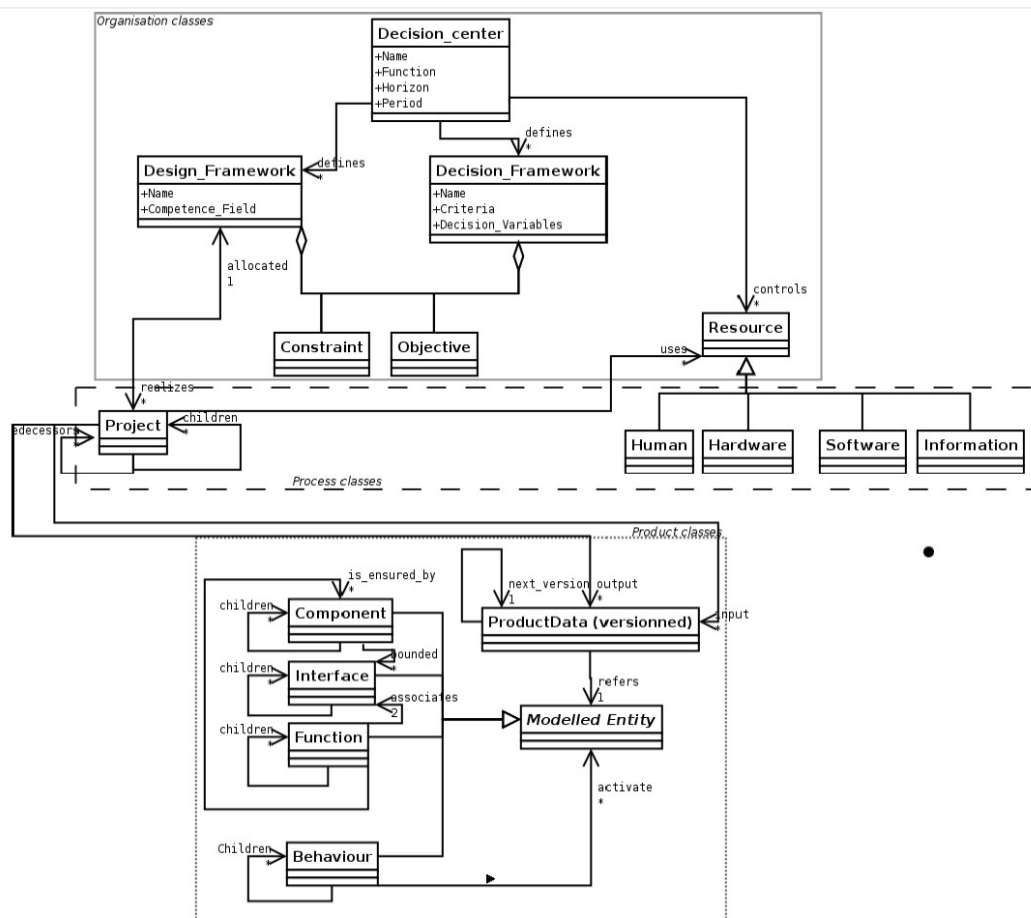


Figure 2.26 – Le modèle-produit dans le projet IPPOP [Noel & al. 2008]

Le modèle PPO est très simple d’utilisation et permet de décrire le contexte projet dans lequel se trouve un produit, et le met en relation avec les différents objets d’entreprise (processus, ressources) qui sont manipulés durant ce même projet.

### Modèle FBS-PPRE

Sur la base du modèle-produit FBS, FBS-PPRE (Function, Behaviour, Structure – Process, Product, Resource, External effect) est une extension de FBS qui a été proposée dans le but de décrire un ensemble d’artéfacts d’entreprise qui sont les processus, les produits, les ressources et les effets externes [Labrousse & al. 08].

Les concepts de processus, produits, ressources et effets externes sont abstraits et circonstanciels dans la vision où, un objet change d’état durant son cycle de vie. Cet objet peut alors être un produit dans un contexte donné, et une ressource dans un autre contexte (le modèle CAO est un produit lors de la conception, et une ressource lors de la fabrication).

Une des spécificités de ce modèle est la gestion des comportements qui permet de définir l’objet processus, qui joue un rôle prépondérant dans cette approche, où il permet de lier les différents objets jouant un rôle dans l’activité en définissant le contexte, et en gérant les comportements du produit, des ressources, et des effets externes.

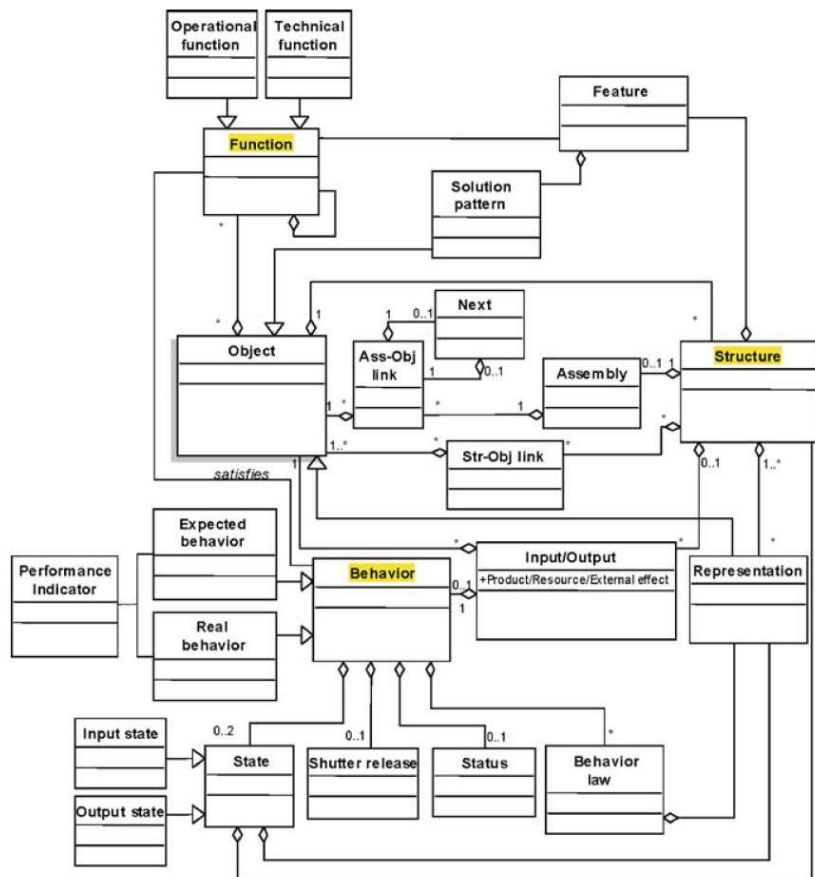


Figure 2.27 – Diagramme de classes du modèle FBS-PPRE [Labrousse & al. 08]

La figure 2.27 montre le diagramme de classes du modèle FBS-PPRE dans lequel on peut identifier les briques principales relatives au modèle FBS, auxquelles viennent s’ajouter d’autres briques afin de détailler le modèle pour son application dans la représentation des

objets d’entreprise. Le concept d’entrée/sortie est là pour caractériser l’aspect temporel et dynamique relatif aux processus dans le but de définir l’élément processus qui comme stipulé précédemment, permettra d’identifier le contexte dans lequel est décrit le comportement d’un produit, d’une ressource, ou d’un effet externe. Ce modèle de connaissances permet donc de caractériser les objets d’entreprise, et vise donc un large spectre d’utilisation.

### Modèle MOKA

MOKA est une méthodologie de capitalisation des connaissances qui se base sur deux processus distincts : une partie informelle qui permet de caractériser les connaissances dans le but de les capitaliser, tout en étant représentées de manière à être compréhensibles par les personnes qui ne sont pas expertes, et une partie formelle qui elle, a été développée dans le but de l’implémenter dans un système d’information. Dans cette partie nous présenterons le modèle formel qui lui, est plus apte à être utilisé dans la construction de systèmes d’information. Vous trouverez un complément sur le modèle informel en annexe avec les autres méthodes de capitalisation des connaissances

Ce modèle formel représenté sous forme d’un diagramme de classes UML, permet de décrire les différents aspects du produit. Dans la figure 2.28, nous pouvons voir ce diagramme avec les différents concepts métier relatifs au produit décrits par des classes.

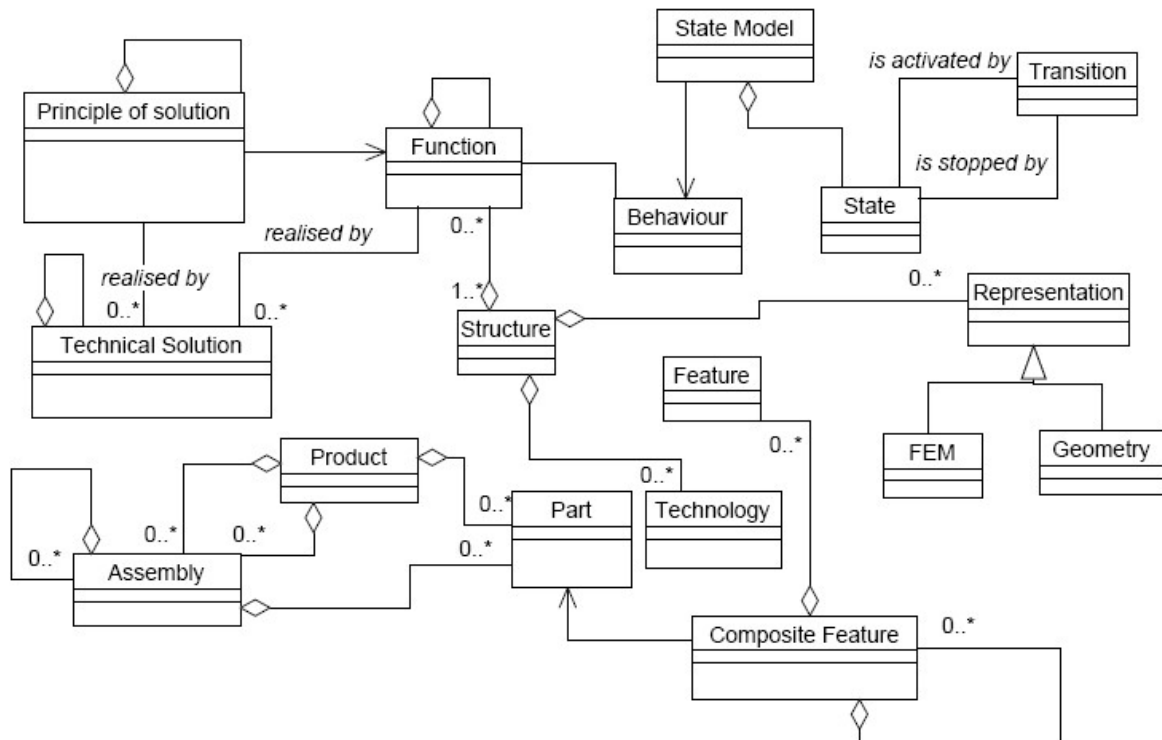


Figure 2.28 – Modèle-produit MOKA [MOKA]

Le modèle formel de MOKA se base sur le triptyque FBS proposé par [Gero, 90]. Les trois aspects permettant de décrire le produit qui sont relatif à FBS sont formalisés à travers les classes « **Function** », « **Behaviour** », et « **Structure** ». La vue fonctionnelle est ensuite étendue avec l’utilisation des classes « **Principle of solution** » qui indique le principe de solution qui permet de réaliser la fonction, et « **Technical Solution** » qui décrit la solution

technique qui la réalise. La vue comportementale quant à elle, est décomposée en un modèle simple décrivant les états et transitions du produit à travers les classes « **State** » et « **Transition** ». La vue structurelle regroupe la représentation du produit à travers la classe « **Representation** » qui se spécialise en classes « **FEM** » et « **Geometry** » correspondant respectivement à une représentation en éléments finis, et une représentation géométrique classique, et la classe « **Technology** » qui décrit la structure technologique du produit. Finalement, pour modéliser la hiérarchie structurelle du produit le produit caractérisé par la classe « **Product** » qui peut être un système composé de pièces et d'assemblage. Ceux-là sont formalisés par les classes « **Assembly** » et « **Part** ». La classe « **Part** » permet de décrire un composant sur la base des entités composites (la classe « **Composite Feature** » qui le composent.

### Synthèse

Dans le tableau 2.3, nous pouvons constater que les différents modèles ont pour objectif de caractériser le produit soit localement en ne prenant en compte que les connaissances produit, soit plus globalement en prenant en compte certains aspects complémentaires relatifs à son contexte, tels que les processus, ou encore les ressources, etc. De plus, chacun de ces modèles est formalisé à un niveau de détail qui lui est propre. Cependant, plus la description est détaillée, plus sa mise en œuvre est complexe.

De notre point de vue, il y a certains modèles qui correspondent mieux à notre contexte, notamment les modèles basés sur le triptyque FBS, qui permettent de distinguer explicitement les aspects fonctionnel, comportemental, et structurel, bien qu'il y ait des manques relatifs aux contextes dans lesquels ils ont été développés. En effet, aucun de ces modèles-produit, n'a été développé dans le cadre d'un processus de rétro-conception, ou encore en prenant en compte l'intégration de données hétérogènes.

En conséquence, les différents travaux sur les modèles-produit présentés précédemment, nous permettent de constituer une base sur laquelle repose notre travail de recherche, dans le but de répondre à la problématique de la question n°2 qui est :

- **Quelle stratégie utiliser pour construire et structurer les représentations du produit analysé dans le processus de rétro-conception ? Comment l'intégrer dans le processus de rétro-conception ?**

Finalement, le travail qui nous incombe devra nous permettre de nous affranchir de notre problématique en proposant un modèle-produit qui sera construit sur la base des différents modèles identifiés précédemment. Ce modèle devra prendre en compte le contexte relatif à la méthodologie de rétro-conception, avec ses différents objectifs et finalités. Il devra aussi prendre en compte les données hétérogènes qui seront utilisées pour réaliser l'analyse du sujet.

Modèle	Connaissances modélisées	Niveau de détail de la description	Complexité de mise en œuvre	Formalisation
FBS	Connaissances produit (modèle-produit)	Moyenne	Basse	Schéma
CPM	Connaissances produit (modèle-produit)	Elevée	Elevée	UML
Holonique	Connaissances générales (PLM)	Basse	Moyenne	UML
PPO	Connaissances produit / processus / organisation	Moyenne	Moyenne	UML
FBS-PPRE	Connaissances produit / processus / ressources / Effets externes	Moyenne	Moyenne	UML
MOKA	Connaissances produit	Moyenne	Moyenne	UML

Tableau 2.3 – Synthèse des modèles de connaissances

## V. Conclusion de la partie

Dans cette partie nous avons exploré l’état de l’art sur les connaissances tout en détaillant les différents concepts qui les caractérisent, mais aussi en présentant les différents outils et méthodes utilisés pour les formaliser dans des modèles, dans le but d’être implémentés dans des systèmes d’information.

Dans le but de répondre à notre première question relative à l’intégration des données hétérogènes, nous nous baserons sur le concept de formes de représentations pour explorer les différentes formes d’informations et connaissances que nous pouvons utiliser dans le processus de rétro-conception, et qui pourraient nous fournir des éléments d’information capables de construire une représentation complète du produit.

Concernant la deuxième question, nous nous baserons sur les travaux réalisés sur les modèles-produit afin d’en proposer un à notre tour, qui permet de répondre à notre besoin d’intégration des données hétérogènes, en fournissant une correspondance avec les données hétérogènes, mais aussi, de répondre à notre besoin de formuler une nouvelle méthodologie de rétro-conception, qui non seulement, concernera un large spectre d’informations relatives au produit, mais aussi qui ait une architecture modulaire qui nous permet de l’utiliser quel que soit

l'objectif visé par le processus de rétro-conception, à savoir, la refabrication, le reengineering, ou la reconception.

# Conclusion du chapitre II : Evolution de la rétro-conception

Nous avons vu précédemment dans l'analyse de l'état de l'art relatif à la rétro-conception, un ensemble de solutions de reconstructions géométriques ou surfaciques permettant de passer d'un ensemble de données brutes, à des représentations topologiques et géométriques d'objets, et de construire (ou reconstruire) des modèles CAO qui représentent les objets analysés. Cependant, plusieurs manques subsistent quant à la méthodologie de rétro-conception globale d'un produit.

## I. Manques relatifs à la rétro-conception

L'importance donnée à la maquette numérique dans le contexte de développement de produits, véhiculée par les bureaux d'études contraint la vision de conception de produits et la limite dans un premier temps à l'élaboration d'un modèle CAO représentant l'objet [Noël & al. 08].

Le modèle CAO revêt certes, une grande importance, puisqu'il permet d'élaborer des prototypes virtuels sur la base desquels seront réalisés différents tests (optimisation de la conception et de l'ingénierie, plans d'expériences numériques, etc.), et facilite la visualisation ainsi que le partage d'informations, tout en réduisant les coûts. Il reste néanmoins incomplet au regard des informations et connaissances relatives au produit. Il ne permet de représenter qu'une partie de celles-ci, notamment la géométrie et la topologie.

La rétro-conception est très souvent définie dans le domaine de la mécanique, comme étant l'élaboration d'un modèle CAO à partir de données brutes issues de la digitalisation d'objets physiques réels. Cela est dû à deux raisons principales, la première étant celle évoqué ci-dessus, la deuxième étant l'historique de la rétro-conception, puisque cette activité consistait initialement à refabriquer des pièces à l'identique, et donc le besoin d'aller vers la fabrication le plus rapidement possible. Cette vision délimite donc le produit à sa représentation géométrique et topologique qui est une représentation de bas niveau, là où il peut intégrer des représentations de niveaux différents comme les représentations fonctionnelles, ou encore les représentations comportementales.

Bâtir une méthodologie de rétro-conception en intégrant des données issues de sources différentes, et qui sont de formes différentes, nécessite d'élargir le champ d'action des systèmes d'information responsables de sa réalisation. En effet, à l'état actuel, la rétro-conception utilise les données géométriques et topologiques.

### 1. Prise en compte des données hétérogènes

Afin de proposer une vision globale du produit, les données analysées lors de la réalisation du processus de rétro-conception doivent être de natures différentes et ne doivent pas être restreintes à la seule représentation de forme de l'objet.

Les méthodologies classiques de rétro-conception permettant d'automatiser le processus, proposent toujours de le commencer par l'acquisition des données géométriques et topologiques de l'objet à travers sa digitalisation : c'est ici que commence la limitation du processus de rétro-conception. En effet, si les données en entrées ne concernent que la géométrie et la topologie, le système ne pourra pas en sortir une représentation complète au regard des différents aspects du produit, et selon les connaissances qu'il souhaite y intégrer.

Dans certains cas, notamment dans les systèmes interactifs présentés précédemment, l'ajout d'autres types de données est possible tout en restant restreint, comme dans MERGE où on utilise les plans 2D pour faire la segmentation des nuages de points, ou encore dans VPERI avec les annotations manuelles dans l'interface ASU-DAL [VPERI].

Cependant, on traite toujours un seul type de représentation du produit : la représentation topologique et géométrique. Les finalités de la rétro-conception ne se restreignant pas à la seule refabrication du produit, il serait donc nécessaire d'arriver à proposer d'autres types de représentation, notamment la représentation fonctionnelle (pour une reconception par exemple) ou bien la vue dynamique (pour le reengineering). Sur la base de ces systèmes, la représentation fonctionnelle du produit ne pourra se faire qu'à travers l'analyse de l'objet par l'homme, et donc risque de rendre le travail de rétro-conception aussi fastidieux qu'une rétro-conception sans système d'information.

Pour cela, il faudra intégrer des informations sur le produit, complémentaires aux informations géométriques. Cela ne sera rendu possible qu'en intégrant des données de sources et de natures différentes traitant ces différentes informations sur le produit. Ces données seront essentiellement issues du corpus des livrables de l'entreprise et qui prendra en compte des documents de natures différentes, telles que des données textuelles, virtuelles, schématiques, etc.

Cela engendrera une première évolution du processus de rétro-conception avec l'élargissement de son périmètre d'application, passant ainsi du traitement de données géométriques, au traitement de données en tous genres.

## 2. Intégration des connaissances

L'utilisation de données hétérogènes pour l'analyse du produit supposera alors des traitements sur ces données qui seront utilisées pour reconstruire une représentation de celui-ci. Cette étape d'analyse consistera en l'interprétation des données de bas niveau pour reconstruire un ensemble d'informations et de connaissances du produit à un haut niveau. Cette étape d'interprétation ne peut être réalisée qu'en utilisant des connaissances capables de fournir une interprétation qui s'intégrera à la représentation visée par la rétro-conception. Dans le contexte d'automatisation du processus de rétro-conception, il s'agira de proposer des algorithmes permettant de réaliser l'interprétation des données en entrée, en se basant sur un ensemble de connaissances (base de connaissances), c'est d'ailleurs une de nos hypothèses de départ. Ces algorithmes peuvent utiliser plusieurs technologies déjà existantes, notamment le traitement du langage naturel pour les données textuelles, en effectuant un apprentissage machine basé sur une stratégie d'apprentissage supervisé [Collobert & al. 08], ou encore, les techniques de vision d'ordinateur à travers l'utilisation de la SFM (Structure From Motion) [Häming & al. 10], ou



de la SFS (Shape From Silhouette) [Cho & al. 03] pour faire une reconstruction 3D à partir d'images bidimensionnelles.

Concernant l'aspect d'intégration des connaissances dans le processus de rétro-conception, le but étant de développer une méthodologie qui permet à partir de la modélisation des connaissances formalisées sur le produit, d'élaborer des systèmes d'aide à la rétro-conception capables de prendre en compte l'hétérogénéité des connaissances et informations inhérente au développement de produit. En effet, l'élaboration du processus global de rétro-conception sera non pas basé sur un seul type de connaissances (géométriques et topologiques), mais plutôt sur un ensemble de connaissances représentant le produit sur tous les axes possibles. De ce fait, la mise en place d'un cadre conceptuel, pour décomposer le processus d'acquisition et d'interprétation des informations en sous-processus afin de traiter chaque type de connaissance, est nécessaire. Ce cadre conceptuel permettra donc de faciliter l'intégration des connaissances dans un modèle global décrivant le produit.

## II. Evolution du point de vue conceptuel

Nous avons vu que la prise en compte des données hétérogènes dans le processus de rétro-conception le ferait évoluer en élargissant son périmètre d'application.

Il nous faudra donc identifier les différents éléments méthodologiques qui permettent de décrire la rétro-conception avec une granularité assez fine pour prendre en compte dans le processus, un grand nombre de données hétérogènes. En même temps, une granularité assez importante facilitera une construction générique du processus tout en le gardant indépendant des éléments opérationnels et technologiques relatifs à sa réalisation.

Il nous faudra développer cette méthodologie centrée sur l'utilisation d'un modèle global regroupant les différentes représentations possibles d'un produit. Pour cela, au lieu de s'orienter vers un modèle CAO du produit, la rétro-conception devrait plutôt se tourner vers les travaux réalisés dans le cadre des développements pour les systèmes PLM afin d'identifier la façon par laquelle est modélisé le produit. En effet, cela pourrait être pertinent, du fait que la fonction principale d'un système PLM est la gestion de toutes les informations et connaissances d'un produit tout au long de son cycle de vie. Il faudra cependant disposer d'un modèle complet, et qui prend en compte les éléments d'informations nécessaires à la description complète du produit.

Parmi les travaux évoqués précédemment, PHENIX a clairement identifié la possibilité d'utiliser un modèle-produit issu du monde du PLM, mais sa finalité était orientée vers la gestion des modèles CAO représentant les alternatives d'interprétation des données géométriques. L'utilisation d'un modèle-produit aura un impact sur plusieurs aspects de la méthodologie de rétro-conception :

- Développement de la méthodologie de rétro-conception en ayant une vision axée sur le produit, et les points de vue qu'ont les métiers de développement sur celui-ci.

- Prise en compte des connaissances du produit et des métiers afin de définir au mieux le contexte de l'objet étudié en partant d'un ensemble de données de sources et de types différents.
- Situer la méthodologie de rétro-conception dans le contexte global du cycle de vie du produit.

Finalement, le modèle-produit constituera l'élément principal autour duquel se dessinera la méthodologie de rétro-conception.

### III. Evolution du point de vue opérationnel

L'évolution de la rétro-conception d'un point de vue opérationnel impliquera la mise en place d'un système d'information capable de gérer le processus, tout en permettant son automatisation partielle. Ainsi, l'utilisateur pourra intervenir ponctuellement durant le processus de rétro-conception pour vérifier et valider les résultats intermédiaires et finaux.

L'élaboration de ce type de systèmes d'information se caractérisera par l'implémentation de plusieurs sous-systèmes qui réalisent la rétro-conception étendue, en prenant en compte les aspects d'intégration des données hétérogènes et des connaissances. L'intégration des données hétérogènes se fera à l'utilisation du système qui en extraira les informations nécessaires à la représentation du produit. Quant à l'intégration des connaissances, elle se fera à l'élaboration du système lui-même, puisque celui-ci aura besoin de connaissances pour construire son système d'interprétation qui lui permettra de réaliser l'intégration des données hétérogènes.

Le système sera basé sur un workflow global permettant de balayer complètement le processus de rétro-conception. Nous pouvons résumer les points à explorer lors de son élaboration à travers trois grandes étapes qui sont :

- La caractérisation du sous-système de traitement des données hétérogènes.
- La caractérisation du sous-système de gestion des connaissances.
- L'intégration des sous-systèmes et élaboration du système d'information.

Pour chacune de ces étapes nous avons pu mettre en place le plan d'action qui permettrait de les réaliser.

#### 1. Caractérisation du sous-système de traitement des données hétérogènes :

- Identification des différentes données hétérogènes sur lesquelles sera basée la méthodologie de rétro-conception.
- Identification des structures de données qui caractérisent ces données hétérogènes pour permettre l'élaboration des processus d'analyse de ces données.
- Identification et développement des mécanismes d'extraction des connaissances basés sur la méthodologie de rétro-conception, et appliqués aux différentes données hétérogènes.
- Elaboration d'un système de traitement qui permet de traiter automatiquement chaque donnée afin d'en extraire les informations et connaissances à intégrer au modèle global du produit.

## 2. Caractérisation du sous-système de gestion des connaissances :

- Identification des connaissances à prendre en compte dans le système de rétro-conception.
- Modélisation des connaissances à travers la mise en place d'un méta-modèle qui permet de décrire le produit selon différents aspects.
- Elaboration d'une base de connaissance qui structure les concepts relatifs au produit qu'on trouve dans le modèle-produit.
- Le problème de l'hétérogénéité des représentations des connaissances nécessitera le développement d'un modèle de gestion des représentations des connaissances du produit.
- Intégration du modèle de gestion des représentations des connaissances dans le méta-modèle de données du sous-système.

## 3. Intégration des systèmes

- Elaboration de l'architecture du système d'information responsable du processus de rétro-conception, en intégrant les deux sous-systèmes évoqués précédemment, et qui sera basé sur la méthodologie proposée.

Ces plans d'action constituent un point de départ à partir duquel nous proposerons des solutions, tant du point de vue conceptuel qu'opérationnel, qui permettront d'élaborer la méthodologie de rétro-conception, et de caractériser les exigences auxquelles doit répondre un système d'information afin de pouvoir implémenter cette méthodologie, et la rendre opérationnelle.

# IV. Formalisation de la nouvelle méthodologie de rétro-conception

A travers le schéma illustré dans la figure 2.29, nous établissons une première image de la formalisation globale du processus de rétro-conception que nous proposerons au fur et à mesure qu'on évolue dans ce manuscrit.

La méthodologie sera esquissée autour de l'axe principal du processus de rétro-conception qui s'étend de l'acquisition des données hétérogènes, jusqu'à la reconstruction d'une représentation de l'objet analysé. Plusieurs ressources seront utilisées pour réaliser ce processus : nous aurons besoin d'algorithmes d'extraction des informations et connaissances selon plusieurs critères, d'un modèle-produit qui nous permettra de structurer les informations dans une description globale du produit, pour cela, nous utiliserons un modèle qui prend en compte les connaissances produit, mais aussi des connaissances métier pour l'interprétation des informations métier qu'on pourra retrouver dans les données hétérogènes.

Premièrement, les données hétérogènes seront analysées en utilisant les algorithmes d'analyse de données selon le type de données, et la forme de représentation utilisée. Pour chaque donnée sera utilisé un algorithme spécifique qui procédera à son analyse dans l'objectif d'en extraire les informations pertinentes, qui peuvent être réutilisées dans le processus de rétro-conception. Ces algorithmes cibleront aussi les différentes informations et connaissances relatives au produit (des algorithmes spécifiques aux connaissances produit, et aux connaissances métier).

Ensuite, le résultat d’extraction sera structuré selon les concepts intégrés dans le modèle-produit en utilisant une instance du modèle pour regrouper toutes les informations issues de l’extraction. De ce fait, nous arriverons à proposer un lot d’informations structurées qui pourra être utilisé selon le but, de plusieurs manières différentes : on pourra, par exemple comme le montre la figure 2.28, utiliser ces informations pour construire des requêtes dans le but de rechercher des produits qui peuvent correspondre à celui analysé, dans une base de données. Une autre solution serait d’utiliser directement cette représentation dans le but de construire manuellement le produit, ce qui revient à réaliser un processus direct (selon la complétude de la représentation issue de la rétro-conception) de reconstruction du produit.

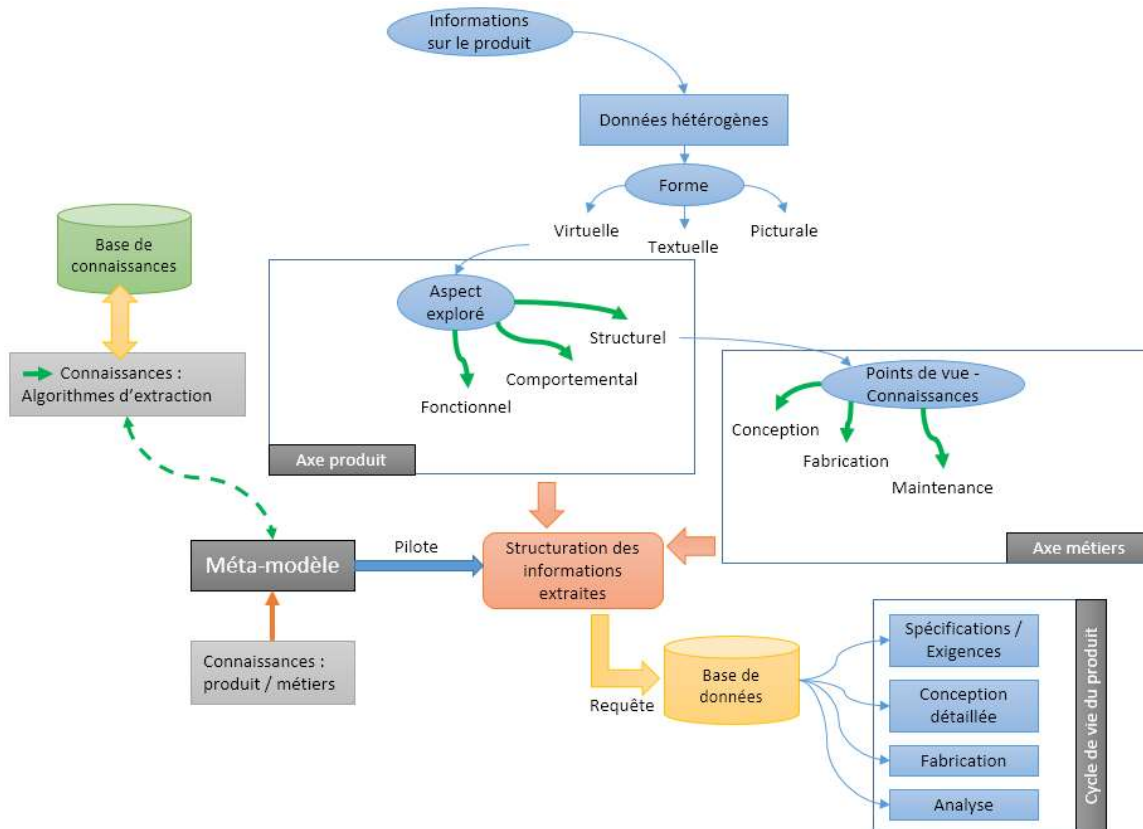


Figure 2.29 – Schéma de formalisation de la nouvelle méthodologie de rétro-conception

Enfin, la construction de notre méthodologie sera basée sur un plan d’action divisé en trois phases distinctes :

- 1) Une première phase d’étude sur les données hétérogènes avec comme objectif, l’identification des différents types de données utilisés, et les moyens mis en œuvre dans le but d’identifier les éléments d’informations qui peuvent être extraits et utilisés dans la rétro-conception. De cette manière on pourra répondre à la **première question de notre problématique** relative à l’intégration des données hétérogènes.
- 2) Une seconde phase d’élaboration ou d’utilisation d’un modèle-produit, assez détaillé pour permettre de prendre en compte les différents éléments d’information extraits des données hétérogènes. De cette manière on pourra répondre à la **deuxième question de notre problématique** relative à la structuration des informations et connaissances.

- 3) Une troisième relative à la formalisation de la nouvelle méthodologie à travers l’intégration des résultats issus des deux premières phases, et de la prise en compte des différents objectifs et finalités de la rétro-conception. De cette manière on pourra répondre à la **troisième question de notre problématique** relative à la formalisation de la nouvelle méthodologie de rétro-conception avec l’intégration des données hétérogènes, et la structuration des résultats de l’extraction d’informations.

Nous détaillerons dans le chapitre qui suit, les différentes propositions qui vont nous permettre de répondre à chaque point identifié de la problématique en utilisant le plan d’action détaillé précédemment.

#### **Note relative à l’état de l’art**

Bien que la recherche sur la rétro-conception ait fournit des informations importantes depuis son émergence, il nous a semblé que le nombre de travaux sur le sujet ait considérablement diminué depuis un certain temps. C’est pour cela que notre état de l’art se trouve situé à une période spécifique. En effet, beaucoup d’articles de notre état de l’art ont été publiés avant 2010, et nous trouvons quelques autres articles publiés après. Donc, l’état de l’art qui n’est pas récent, n’est pas dû à une omission de notre part, mais plutôt à un nombre de publications moins important.

# Chapitre III – Proposition d’une nouvelle méthodologie de rétro-conception intégrée

## Introduction au chapitre III

L’exploration de l’état de l’art relatif à la rétro-conception, et à l’ingénierie des connaissances nous a permis d’un côté, d’asseoir notre problématique sur l’amélioration de la rétro-conception, avec les trois questions relatives à l’intégration des données hétérogènes, la structuration des informations et des connaissances, ainsi que la proposition d’une nouvelle méthodologie de rétro-conception qui permet la prise en compte de différents objectifs et finalités. D’un autre côté, nous avons pu identifier certaines pistes intéressantes qui nous permettraient de répondre à ces questions.

On a conclu le chapitre précédent en dressant un plan d’action, et ce dans le but de proposer des solutions qui nous permettent de répondre spécifiquement à chaque question de la problématique, tout en en prenant en compte le contexte global afin d’assurer la meilleure intégration possible de ces solutions.

La première phase du plan d’action consiste en la prise en compte de l’aspect d’intégration des données hétérogènes à travers l’analyse des différentes informations qui peuvent être utilisées dans le processus de rétro-conception. Pour cela, nous avons identifié le concept de base sur lequel repose cette intégration comme étant la considération des formes de représentation des informations et connaissances. Nous nous attaquerons donc en premier à la définition des données hétérogènes dans le contexte de la rétro-conception, à l’élaboration d’un cadre conceptuel relatif à leur intégration dans le processus de rétro-conception, et de manière opérationnelle, le processus qui permet cette intégration.

La seconde phase du plan d’action consiste en l’élaboration d’une structure d’informations et de connaissances qui sera caractérisée par la mise en place d’un modèle-produit qui correspond au processus de rétro-conception. La première phase nous permet d’utiliser les données hétérogènes afin d’identifier et d’utiliser les informations et connaissances pour reconstruire le produit, mais s’arrête à la prise en compte de celles-ci (et de leur extraction dans le cas de l’intégration des algorithmes d’extraction). Le modèle-produit, est ce qui va nous permettre de recombinaison ces différentes informations dans le but de construire une représentation complète du produit. Pour cela, il nous faudra prendre en compte les différentes informations et connaissances qui peuvent être utilisées dans le processus de rétro-conception (à savoir : la géométrie, les fonctions, etc.). Donc, une instance du modèle-produit, constituera en quelques sortes, un dossier de conception du produit analysé (plus ou moins rempli, selon la consistance en données hétérogènes, et surtout en informations extraites).

La troisième phase, quant à elle, est relative à la construction de la méthodologie de rétro-conception en nous basons sur ce qui a été proposé dans les phases précédentes. Cette construction se fera en prenant en compte deux aspects importants relatifs à la rétro-conception.

Le premier concerne l’objectif d’utilisation des informations de la rétro-conception. Pour cela, nous aspirons à développer une extension au modèle-produit, qui permet de créer des représentations relatives du produit qui correspondent à l’objectif de la rétro-conception. En

effet, toutes les informations contenues dans une instance du modèle-produit peuvent être utilisées pour constituer des sous-ensembles de celle-ci afin de construire des représentations du produit relatives à différents points-de-vue. D’un point-de-vue opérationnel, cela consistera en l’ajout d’un niveau d’abstraction supplémentaire pour la gestion des informations et connaissances afin de construire des points-de-vue relatifs à l’objectif final de la rétro-conception d’un produit.

Le deuxième point concerne la proposition d’un modèle de processus caractéristique de la nouvelle méthodologie de rétro-conception, qui permettra d’un côté l’intégration effective des différents modèles qui seront proposés jusque-là, et d’un autre côté, d’intégrer la modularité cherchée concernant les objectifs et finalités de la rétro-conception.



# Intégration des données hétérogènes pour la rétro-conception

La rétro-conception conventionnelle telle que présentée dans l’état de l’art n’a été formalisée que pour les informations relatives à la forme de l’objet, en d’autres termes la géométrie et la topologie du produit. Cependant, la représentation physique d’un objet ne permet pas d’identifier la raison pour laquelle il a été conçu, ni comment il fonctionne de manière exhaustive. En effet, si on prend l’exemple du moteur à combustion, on peut remarquer que son évolution à travers le temps a engendré l’intégration de composants dont le fonctionnement n’est pas déductible de leurs formes : le calculateur moteur, les capteurs de position, et tous les composants électroniques, mais aussi informatiques. L’amélioration du processus de rétro-conception suppose donc, l’intégration de nouvelles formes d’informations dans le processus d’analyse des données relatives au produit dans le but de construire des représentations du produit à un haut niveau d’abstraction, et riches sémantiquement.

Afin de proposer une nouvelle méthodologie de rétro-conception, il nous faudra d’abord identifier le périmètre d’étude de la rétro-conception, en caractérisant les informations et connaissances dont on a besoin pour mener à bien le processus de rétro-conception. Si l’amélioration du processus de rétro-conception proposé suppose la prise en compte d’informations et connaissances en provenance de plusieurs types de données, il nous faudra alors identifier ces types de données dans un premier temps.

Dans cette partie du manuscrit, nous décrirons les différentes étapes afin de caractériser les données à intégrer au processus de rétro-conception dans le but de l’améliorer. Elles se déclinent en deux étapes distinctes :

La première concerne la réalisation d’un état des lieux des informations et connaissances qui peuvent être utilisées dans le processus de rétro-conception. Pour ce faire, il faudra analyser le processus de conception pour permettre la définition de l’ensemble des documents et livrables, formels et informels vivants dans l’écosystème de l’entreprise. Tous ces documents représentent des sources d’informations potentiellement utilisables dans le processus de rétro-conception.

La deuxième étape est relative à l’identification des liens entre les données et informations utilisées dans l’analyse du produit, et la structure d’information qui devra représenter le produit. En effet, le but étant d’intégrer des informations de sources et de types différents, il nous faudra alors trouver un moyen de rattacher chaque information extraite des données hétérogènes au contexte auquel elle appartient dans la représentation globale du produit, qui est établie grâce au modèle-produit.

Nous commencerons par l’identification des différentes données hétérogènes que l’on pourra intégrer dans le processus de rétro-conception. Nous tenterons aussi d’établir un lien préliminaire entre les données hétérogènes et les informations et connaissances dans la structure

d’informations représentant le produit. Cela permettra de cadrer notre travail dans les étapes suivantes, et aidera dans l’établissement d’un processus de rétro-conception cohérent, et robuste.

Ce travail nous permettra alors de répondre à la première question de notre problématique, qui est relative à l’utilisation et l’intégration des données hétérogènes dans le processus de rétro-conception.

## I. La représentation de l’information et des connaissances

Nous avons vu dans l’état de l’art relatif aux connaissances, que celles-ci ont été définies dans un contexte précis relatif aux données, et informations.

Les données et informations sont souvent décontextualisées, ce qui leur permet d’être communiquées plus ou moins facilement. Pour cela, différents canaux peuvent être utilisés pour les communiquer. L’être humain utilise ses sens pour pouvoir communiquer avec l’extérieur, ce sont ses interfaces avec le monde.

Dans cette nouvelle ère, où l’être humain est passé de la civilisation des objets à celle de l’information, il est confronté à de nouveaux canaux de communication qui lui permettent d’étendre ces canaux élémentaires. Maintenant, toutes les données et informations matérialisées par des documents, sont devenues virtuelles. L’écran est devenu le canal par lequel passent la majeure partie des données et informations communiquées.

Dans les entreprises d’aujourd’hui, différents types de documents virtuels ou physiques sont utilisés pour caractériser les livrables dont on a besoin dans le processus de création de la valeur (même si les entreprises d’aujourd’hui tendent à n’utiliser que des documents virtuels). Ces documents sont des canaux intermédiaires (canaux au sens forme de l’information) de l’information et permettent de communiquer des collections d’informations de types différents. Il existe plusieurs types de documents relatifs à des formes particulières. Chaque information dans le document sera représentée selon le type qui lui correspond le plus : un texte qui retranscrit une description linguistique, une image ou un schéma d’un objet représentant sa forme, etc. L’information sera transmise selon des canaux qui sont propres à la forme et au type de celle-ci, en utilisant différentes structures (documents).

Il est donc important de distinguer la forme de l’information communiquée à l’être humain, et sa structure (document) qui prend une ou plusieurs formes pour communiquer cette information. Dans ce qui suit, nous faisons une distinction entre la forme de l’information (caractérisant une représentation conceptuelle de l’information – texte, images, symboles, etc.) et le document (caractérisant une représentation formelle – documents techniques, fiches descriptives, modèles virtuels, etc.).

La représentation formelle est construite sur la base de la représentation conceptuelle (un document peut prendre plusieurs informations de formes différentes). Donc, pour identifier les données hétérogènes dans le processus de rétro-conception, il nous faudra les caractériser en termes de ces deux représentations.

## 1. La représentation conceptuelle

La représentation conceptuelle est relative à la forme que prend l’information quand elle est communiquée à l’être humain. Nous avons introduit le concept de forme de représentation des informations issue de l’état de l’art. Ce concept permet d’identifier cinq formes principales, qui caractérisent l’information de manière générale : Algorithmique, Linguistique, Picturale, Symbolique, et Virtuelle [Horváth & al. 02]. De ce fait, chaque information issue du processus de création de valeur dans l’entreprise se trouvera caractérisé par l’une de ces formes. Nous trouverons par exemple, les modèles CAO utilisant la forme virtuelle, les plans 2D utilisant la forme symbolique, les cahiers des charges utilisant des formes mixtes telles que symboliques et linguistiques, etc.

Il est important de rappeler que les livrables de l’entreprise (documents) peuvent regrouper plusieurs formes de représentation des informations et connaissances. De ce fait, le concept de formes de représentation à lui seul ne suffira pas à trier les informations dans un document. En explorant en profondeur les différents livrables de l’entreprise, nous nous apercevons que ceux-ci sont en fait, des collections d’informations. Alors le livrable n’est plus une information, mais un ensemble d’informations élémentaires qu’il faudra identifier afin de pouvoir les utiliser (figure 3.1).

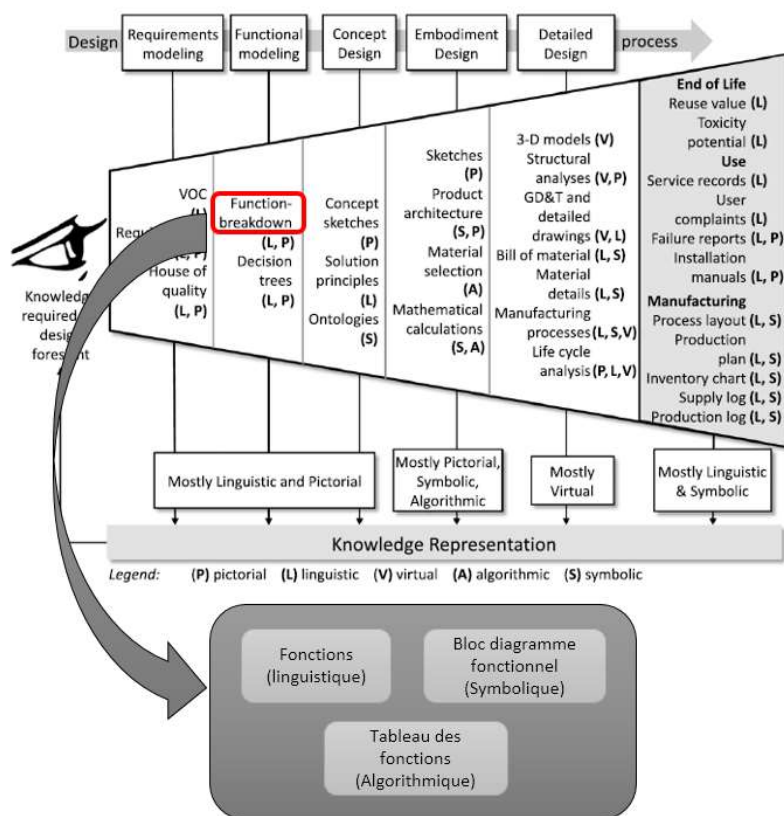


Figure 3.1 – Les différentes formes d’informations dans un livrable

Les modes de représentation de l’information permettront de décrire les informations élémentaires dans chaque livrable de l’entreprise. Alors, dans le but de formaliser l’ensemble des informations à extraire des données d’analyse dans le processus de rétro-conception, il

faudra identifier en détail les informations élémentaires dans chaque donnée utilisée pour réaliser la rétro-conception.

Nous verrons plus tard que les cinq formes de représentation se résumeront à trois formes au regard de la rétro-conception. En effet, notre but de formaliser le processus de rétro-conception pour l’élaboration et l’implémentation d’une solution d’aide à la rétro-conception nous contraint à n’utiliser que des formes communiquées virtuellement (à travers les machines), et de ce fait, la forme de l’information devra être contrainte par la capacité de la machine à utiliser ces formes de représentation.

## 2. La représentation formelle (opérationnelle)

La digitalisation de l’information suppose la création de structures d’information qui permettent de la représenter réellement à l’utilisateur. La représentation formelle est relative à ces structures d’informations qui les communiquent : ce sont les technologies de l’information.

Chaque solution informatique est basée sur des structures de données prenant en compte plusieurs formes de l’information. Prenons comme exemple la technologie PDF : Celle-ci permet de regrouper des informations de toutes les formes connues. Elle peut contenir des informations textuelles, des images, des modèles tridimensionnels (virtuels), etc. Cette technologie elle-même est basée sur d’autres technologies comme JPEG, PNG ou TIFF pour la forme picturale.

Finalement, chaque donnée hétérogène qui sera utilisée dans le processus de rétro-conception sera formalisée à l’aide d’une représentation formelle, et qui sera relative à une structure de données. Donc, le processus de rétro-conception devra intégrer une phase préliminaire qui permettra d’identifier les formes d’informations à partir des structures de données de chaque donnée hétérogène utilisée, et devra aussi être capable de les traiter séparément.

## II. Intégration des données hétérogènes

Les données hétérogènes qui vont être utilisées pour l’analyse d’un produit dans le processus de rétro-conception peuvent donc être décrites à deux niveaux différents : au niveau des représentations formelles, et au niveau des représentations conceptuelles. Initialement, les données hétérogènes sont des documents relatifs à des informations digitales. Elles sont communiquées sous forme de représentations formelles qu’il faudra prétraiter. Dans chaque donnée formelle il faudra identifier tous les éléments d’information conceptuels afin de les séparer.

Le prétraitement des représentations formelles a pour but de normaliser les formes d’informations relatives à chaque structure de données des documents (figure 3.2). Comme on l’a fait remarquer précédemment, les livrables sont communiqués sous forme de document ayant des structures de données hétérogènes. Avant de pouvoir traiter les informations dans une représentation conceptuelle, il faudra créer une représentation formelle relative à une représentation conceptuelle : c’est la traduction des données et informations. C’est à l’issue de cette traduction que le processus d’intégration pourra être effectué.

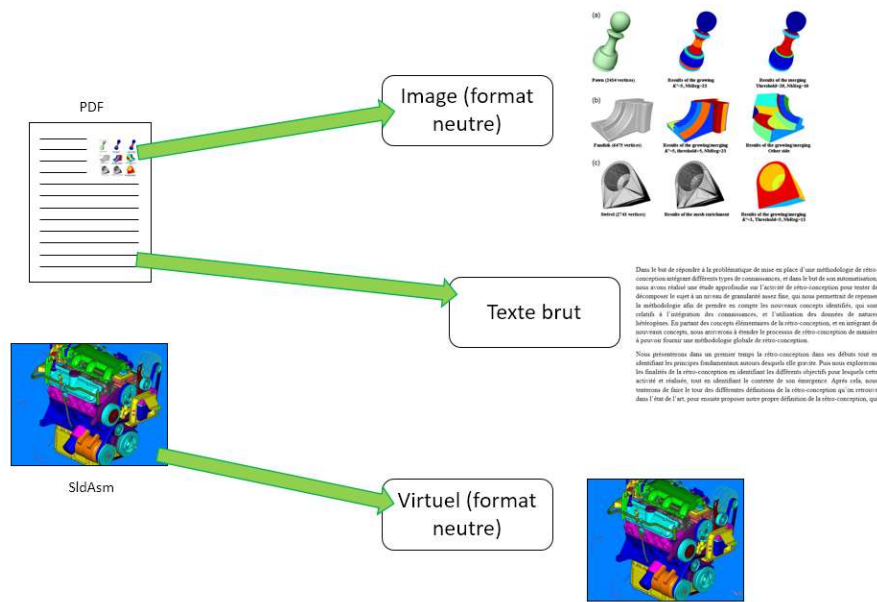


Figure 3.2 – Prétraitement des données en entrée avec traduction en forma neutre et décomposition

### 1. Définition de l'intégration des données hétérogènes

De notre point de vue, l'intégration des données hétérogènes est *l'identification, l'extraction, et la correspondance des éléments d'informations contenus dans les données hétérogènes analysées dans le processus de rétro-conception* (figure 3.3).

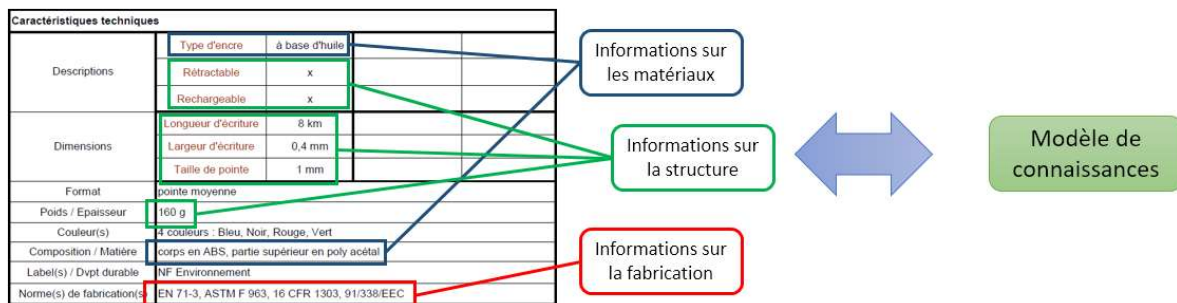


Figure 3.3 – Intégration des données hétérogènes

Dans un ensemble de données hétérogènes, il y a certaines informations qui sont pertinentes dans le contexte de la rétro-conception. L'étape d'identification permet de cibler cet ensemble d'informations et de le séparer des autres qui ne correspondent pas au contexte, ou qui ne sont pas pertinentes. Il s'agit donc de filtrer les données hétérogènes pour n'en ressortir que des informations qui seront utilisées dans le processus de rétro-conception. L'étape d'extraction est relative à l'isolement de ces informations dans des structures temporaires d'informations. Cette étape permettra plus tard de vérifier la cohérence entre les informations extraites. Finalement, l'étape de correspondance permettra de lier les informations extraites à partir des données hétérogènes avec le contexte qui leur correspond, en d'autres termes structurer ces informations selon un modèle spécifique (le modèle-produit).

## 2. Informations à extraire des données hétérogènes

L’étape d’identification des éléments d’informations à extraire des données hétérogènes suppose que ces éléments sont connus, et sont ciblés. Pour cela, il faudra identifier quels sont ces éléments d’informations que nous voulons extraire des données hétérogènes. C’est dans cette étape qu’il faudra identifier, quels sont les concepts relatifs au produit qu’il faudra intégrer au modèle-produit afin de structurer les informations.

Nous pouvons nous y prendre de deux manières possibles : la première est de créer un ensemble de concepts relatifs au produit à partir de zéro (identification des concepts et relations entre eux, et création d’un modèle-produit sur cette base). La deuxième correspond à l’utilisation d’une représentation globale du produit déjà existante (utilisation d’un modèle-produit existant), à partir de laquelle seraient identifiés les différents concepts. Dans tous les cas, il nous faudra un modèle-produit pour réaliser cette action.

L’intégration des données hétérogènes est caractérisée par la correspondance entre le modèle-produit et les données hétérogènes, et suppose que le modèle-produit en lui-même représente une bonne base pour l’élaboration du lien entre les concepts qu’il regroupe et les données en entrée correspondantes aux différents types.

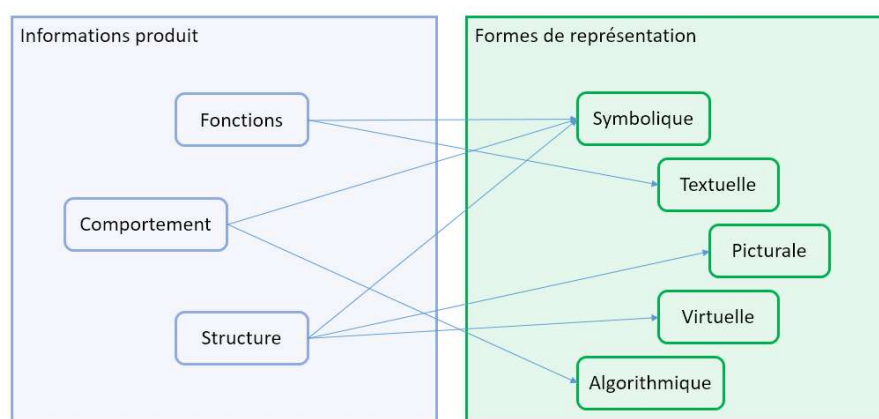


Figure 3.4 – Correspondance entre les formes de représentation et le modèle-produit

A partir des concepts dans le modèle-produit, il est possible de les faire correspondre aux différentes représentations conceptuelles (formes de représentation – figure 3.4). Pour cela il faudra donc proposer des couples concepts (informations du modèle-produit) / modes de représentation, qui permettent de caractériser les informations correspondantes dans chaque données formelles, et de les extraire. Cela facilitera le développement des algorithmes d’extraction plus tard, puisqu’on se basera sur ces exigences principales pour les caractériser (par exemple, les fonctions sont souvent décrites textuellement, alors un algorithme qui a pour principe de fonctionnement le traitement du langage naturel permettra d’extraire l’ensemble des informations relatives aux fonctions).

## 3. Lien entre les données hétérogènes, et le modèle-produit

Chaque élément d’information correspondra à une forme de représentation qui le décrira le plus efficacement (en d’autres termes, il prendra la forme dans laquelle il est communiqué le plus souvent). Le modèle-produit étant une structure d’informations construite sur la base

d’éléments d’informations, alors chaque élément d’information du modèle-produit pourra être représenté à travers le mode de représentation qui lui correspond.

Ainsi, le couple formé par les informations élémentaires relatives au modèle-produit, et les modes de représentations établissent une sorte de signature d’information qui sera utilisée dans l’étape d’identification de celle-ci dans les données hétérogènes. C’est donc ce couple qui permettra d’établir le lien entre les données hétérogènes et le modèle-produit.

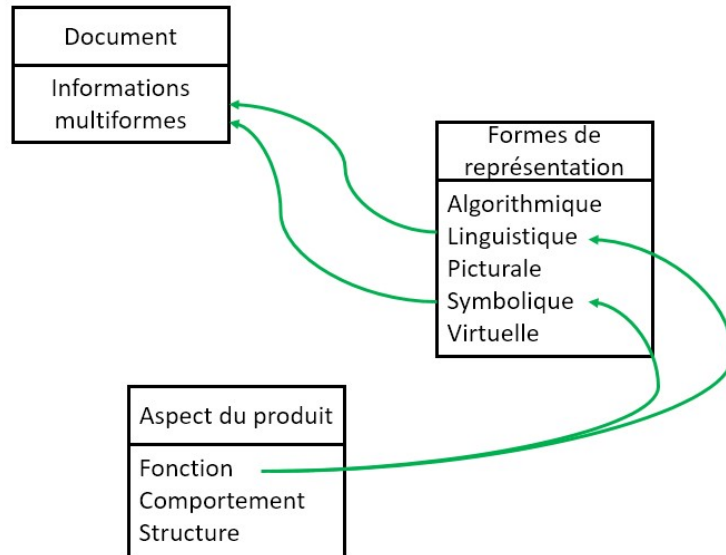


Figure 3.5 – Lien entre les données hétérogènes et le modèle-produit

La figure 3.5 permet d’identifier le lien entre les données hétérogènes, et les informations structurées dans le modèle-produit. Ainsi, pour chaque information élémentaire correspondant à une forme de représentation (figure 3.4) on pourra construire des mécanismes qui permettent d’identifier les informations dans les données hétérogènes et de les extraire.

#### 4. Exploitation du lien dans le cadre de la rétro-conception

En ayant identifié le lien qui relie les données hétérogènes aux informations du modèle-produit, il nous faudra maintenant développer un moyen qui nous facilitera l’utilisation de ce lien afin d’intégrer les données hétérogènes lors du déploiement de la nouvelle méthodologie de rétro-conception.

Ce lien ne peut être utilisé que dynamiquement, c’est-à-dire à travers un processus qui permet d’effectuer la liaison entre les différentes informations dans les données hétérogènes, et le modèle-produit. En effet, les couples « information élémentaire / forme de représentation » caractériseront un ensemble de processus d’extraction des informations, à partir des données hétérogènes, qui vont correspondre à l’élément d’information (figure 3.6). Dans le cas où la rétro-conception est automatisée, les rôles de ces processus seront remplis par des algorithmes d’extraction d’informations à partir des données hétérogènes.



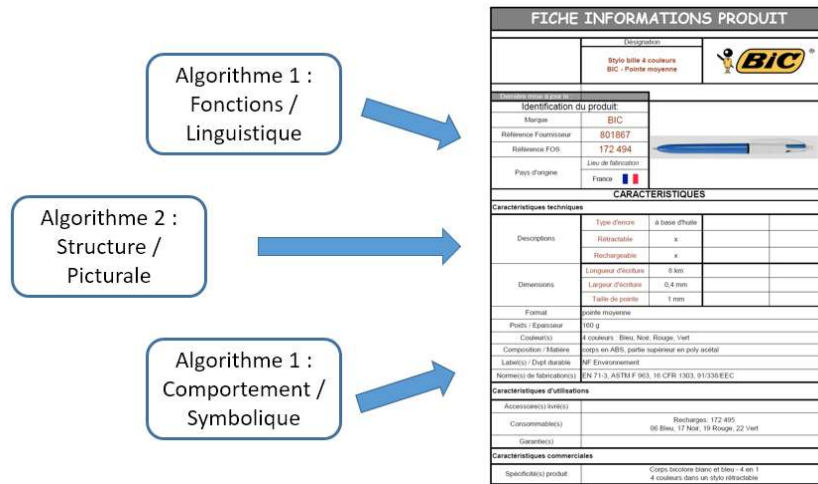


Figure 3.6 – Algorithmes d'extraction des informations à partir des données hétérogènes

Finalement, le lien entre les données hétérogènes et le modèle-produit se fera sur deux niveaux différents : un niveau statique relatif aux structures de données exploitées, et un niveau dynamique relatif aux processus d'extraction d'informations, dans lequel le lien sera établi concrètement.

### III. Processus d'analyse des données hétérogènes

Passer d'un ensemble de données hétérogènes à un ensemble d'informations structurées suppose la réalisation d'un processus de transformation. Comme montré précédemment l'analyse des données hétérogènes se matérialisera donc par un ensemble de processus qui vont effectuer l'extraction des informations à partir des données hétérogènes, pour ensuite les utiliser dans la reconstitution du contexte du produit analysé. Ce processus passera par des états intermédiaires où une multitude de données de sources et de formes différentes, seront traitées (figure 3.7).

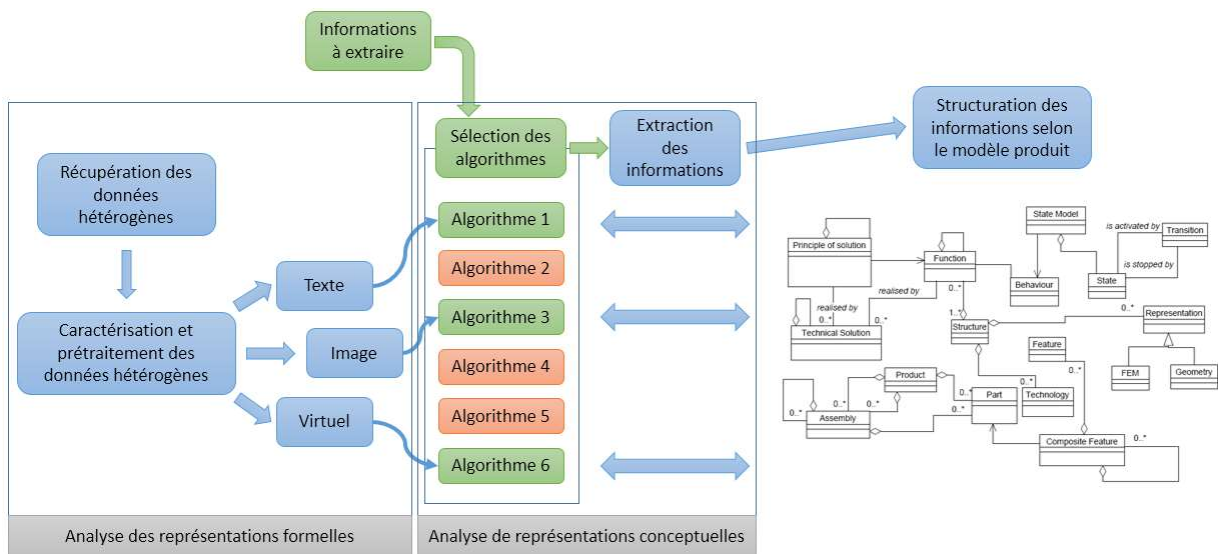


Figure 3.7 – Périmètre du processus d'analyse des données hétérogènes



Le processus se divisera alors en deux parties distinctes : la première concernera l’analyse des représentations formelles issues des différentes données, la deuxième concernera l’analyse des représentations conceptuelles pour en extraire les informations et connaissances requises pour la rétro-conception.

Dans cette partie, nous allons analyser le processus sur les représentations formelles ainsi que sur les représentations conceptuelles dans le but de formaliser un modèle qui caractérisera la structure de données relative au traitement et à l’intégration des données hétérogènes dans le processus de rétro-conception.

Un modèle de données sera construit sur la base du processus dans le but de l’implémenter d’un point-de-vue informatique. Nous utiliserons le formalisme UML pour le construire, puis, nous détaillerons sa construction au fur et à mesure qu’on analysera le processus d’analyse des données hétérogènes.

### 1. Modèle de données pour l’analyse des données hétérogènes

L’utilisation d’un modèle de données pour cette étape nous aidera à structurer les informations nécessaires à la mise en place d’un processus d’intégration des données hétérogènes. Nous proposons alors le modèle de données en figure 3.8 qui prend en compte les deux représentations de données explorées dans notre cas : les représentations conceptuelles, et les représentations formelles.

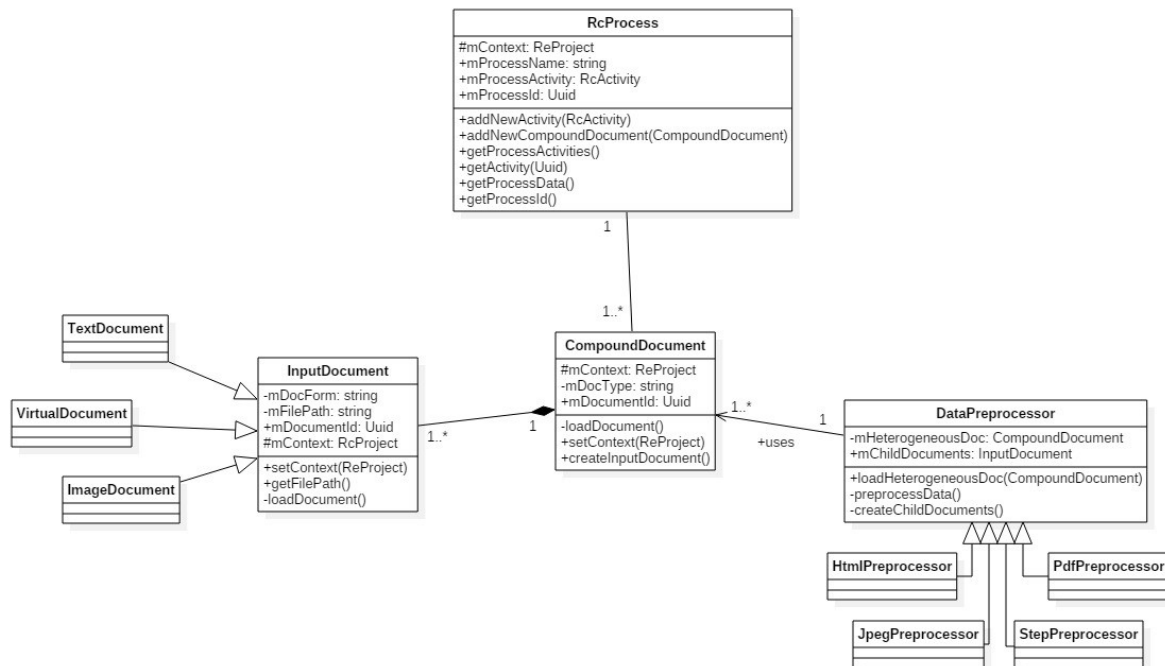


Figure 3.8 – Modèle de données simplifié pour la gestion des données hétérogènes

Nous proposons ce modèle de données comme étant une structure qui va gérer les données hétérogènes tout au long du processus de rétro-conception. Il permettra alors dans un premier temps de charger et de prétraiter les données hétérogènes dans le but d’isoler les informations en formes différentes, et ainsi préparer l’opération d’extraction d’informations.

Ce modèle n’est pas utilisable tout seul. En effet, il ne représente qu’une structure d’informations qui va être utilisée par le processus de rétro-conception. Nous pouvons voir la classe « RcProcess », qui correspond à la classe du processus de rétro-conception, liée à la classe « CompoundDocument ». Ce lien caractérise une relation d’appartenance de la classe « CompoundDocument » avec une cardinalité allant d’un document à plusieurs documents ; à la classe « RcProcess ». Nous verrons donc dans la suite, comment cette structure de données peut s’interfacer d’un côté avec le modèle-produit pour fournir une structure d’informations correspondant au produit, et d’un autre côté avec le processus de rétro-conception globalement.

## 2. Analyse des représentations formelles

Les données hétérogènes sont initialement chargées en tant que documents ayant une structure précise, relative à une technologie (PDF, DOCX, JPEG, STL, STEP, etc.). Il est alors pertinent de traiter chaque structure de données différemment dans une étape de prétraitement. Le processus de prétraitement va favoriser la normalisation de la forme de l’information pour faciliter ensuite l’extraction des éléments pertinents au regard du contexte de rétro-conception.

Cette analyse des représentations formelles commencera donc par l’identification de chaque type de donnée à analyser pour lui procurer après le prétraitement nécessaire afin que ses informations soient utilisables par les algorithmes d’extraction.

### a. Identification du type de la donnée à analyser

L’analyse des représentations formelles commencera par l’identification de chaque forme ou structure de donnée en entrée dans le processus de rétro-conception. Dans le but de traiter les différents types de données, il sera alors nécessaire de connaître leurs structures afin de décomposer les informations selon les formes de représentation. D’un point de vue opérationnel, cela reviendra à identifier les extensions des fichiers relatifs aux données hétérogènes dans le but de les analyser en utilisant l’algorithme de prétraitement adéquat.

Par exemple la structure d’un fichier PDF peut prendre en compte plusieurs formes de représentations telles que picturale ou linguistique. L’identification du fichier PDF permettra de sélectionner la structure de données qui lui correspond pour procéder au prétraitement de celui-ci, en séparant les données de formes différentes (images seules, et texte seul), pour n’avoir qu’une forme de représentation qui correspond à un fichier.

Cette tâche d’identification est assez facile à mettre en place. Dans un premier temps, au chargement des données hétérogènes, chaque donnée se verra prise en compte en tant que document composé, qui aura une structure spécifique et qui correspond à une extension de fichier telle que \*.pdf pour un fichier PDF, ou \*.jpg pour un fichier image JPEG. Le choix de prendre en compte chaque donnée comme étant un document composé correspond au fait que chaque document peut contenir des informations de plusieurs formes de représentation. Cela se traduira donc par l’utilisation d’une classe spécifique pour les documents composés : la classe « CompoundDocument ».

### b. Prétraitement de la donnée à analyser

Pour chacune des données identifiées, un algorithme de prétraitement devra être utilisé afin de séparer les informations de différentes formes, en utilisant les formes de représentation. Ensuite

ses informations peuvent être traduites dans des formes normalisées qui correspondent aux entrées des algorithmes d’extraction d’informations et connaissances.

Chacune de ses données recevra donc un traitement adéquat, et qui correspondra à son modèle de données, permettant ainsi la séparation des informations qui y sont présentes, pour ensuite les traduire vers des formes normalisées.

L’étape de séparation des informations selon les modes de représentation est relativement simple. La structure d’un fichier est analysée dans le but d’en extraire des informations uniformes du point-de-vue de leur représentation. Dans l’exemple du fichier PDF, cela reviendra à séparer les images du texte par exemple.

En se basant sur la classe « CompoundDocument » relative à chaque document, nous intégrons une nouvelle classe mère pour prendre en compte tous les processus relatifs à la séparation des fichiers. Ces processus prendront en compte les différents types de fichiers, et les traiteront selon leurs structures de données. Cette classe mère est la classe « DataPreprocessor » qui intègre les bases du traitement de données avec les différents attributs et méthodes, qu’on peut retrouver dans toutes ses classes filles. La spécialisation permet alors d’écrire des classes qui feront le travail de traitement pour chaque type de document. Ainsi, nous trouverons les classes « StepPreprocessor » pour le traitement de fichiers STEP, « PdfPreprocessor » pour les fichiers PDF, ainsi de suite.

En sortie de chacun des différents processus de prétraitement, dans le cas où le document est composé, une structure de données est créée de manière à pouvoir manipuler chaque élément de document séparé des autres. Pour cela, chaque classe « CompoundDocument » prendra en compte un ensemble de sous-documents représentés par la classe « InputDocument » qui est une classe de base pour les différentes formes de sous-documents. Chaque sous-document correspondra alors à une forme de représentation et prendra en compte les informations de cette forme qu’on retrouve dans la donnée hétérogène. La classe « InputDocument » aura donc comme classes filles : la classe « TextDocument » pour la forme textuelle, la classe « VirtualDocument » pour la forme virtuelle, et la classe « ImageDocument » pour la forme picturale.

### 3. Analyse des représentations conceptuelles

Après le prétraitement des données hétérogènes, on aura un ensemble de données prétraitées, normalisées, qui sont prêtes à être utilisées pour l’extraction des éléments d’information.

L’analyse des représentations conceptuelles consiste en une deuxième couche de traitement qui permet, à partir des données prétraitées, d’extraire des informations relatives à une forme, et un élément d’information structuré dans le modèle-produit. Cette analyse des représentations conceptuelles utilisera les processus basés sur les couples éléments d’information / modes de représentations qui permettront d’établir le lien d’intégration entre les informations structurées dans le modèle-produit, et les données hétérogènes.

#### a. Identification des types d’informations prétraitées

La première étape commencera donc à partir des données prétraitées et normalisées, qui seront regroupées selon les formes identifiées. Comme énoncé précédemment, pour chaque couple

d’entité/forme de représentation (formes neutres) seront choisis les algorithmes d’extraction adéquats. Finalement, pour les algorithmes relatifs à chaque forme, sera mise en place, une structure de traitement qui regroupe en une chaîne de traitement, les données prétraitées, normalisées, et l’ensemble des algorithmes qui vont en extraire les informations dans un pipeline de traitement.

Prenons l’exemple d’un fichier PDF pour illustrer cette étape : le fichier a été prétraité et normalisé, nous avons pu extraire un fichier texte correspondant à la forme linguistique, et un fichier image correspondant à la forme picturale. L’utilisateur souhaitant extraire des informations textuelles relatives à la fonction de l’objet analysé, orientera le système vers l’utilisation d’un algorithme d’extraction d’informations textuelles (notamment basé sur le traitement du langage naturel) qui lui-même utilisera des formes d’extraction d’informations relatives aux fonctions de l’objet (des prédicats concernant la structure textuelle d’une fonction par exemple).

#### **b. Analyse des informations**

La dernière partie consistera en la réalisation des processus relatifs aux algorithmes d’extraction. En sortie, on retrouvera un ensemble d’informations structurées selon les concepts relatifs au modèle-produit, et selon les formes de représentation utilisées dans leur analyse et extraction.

Finalement, ces informations seront regroupées dans une instance du modèle-produit qui représentera les informations extraites des données hétérogènes pour identifier le contexte du produit analysé.

## **IV. Conclusion de la partie**

L’intégration des données hétérogènes est l’une des parties les plus importantes dans cette nouvelle méthodologie de rétro-conception. Le but étant de créer une méthodologie capable de prendre en compte différents aspects du produit, en utilisant des données de sources et de structures différentes, nous proposons une première approche conceptuelle qui permet de créer des liens entre ces différentes données hétérogènes et les différents aspects du produit analysés avec une structure de données opérationnelle pour cela.

En effet, dans cette première partie nous avons pu identifier les différentes informations et connaissances qui peuvent être utilisées dans le processus de rétro-conception dans le but de reconstruire des représentations du produit. Dans un second temps, nous avons pu identifier le lien entre les données hétérogènes et le modèle-produit. Ce lien est identifié par des couples d’entités d’informations du modèle-produit, et des formes de représentation qui peuvent les représenter.

L’intégration s’opère à travers un processus qui effectue dans un premier temps la prospection des différents types de données en partant des différents fichiers en entrée. L’identification de ces types de données permettra de sélectionner un algorithme de prétraitement correspondant.

Le but d’un algorithme de prétraitement est de décomposer le document en entrée, en différentes formes de représentation de l’information. Comme résultat, nous aurons pour chaque document composé, un ensemble de documents correspondants aux formes de représentation élémentaires qu’il regroupe. Ainsi, s’il regroupe des informations textuelles et des images, l’algorithme de prétraitement créera un document spécifique pour la représentation linguistique (texte) et un autre pour la représentation picturale (image).

Ce sont ces documents qui seront ensuite analysés dans le processus d’extraction d’informations en utilisant les algorithmes propres à chaque couple entité / forme de représentation.

Finalement, cette première partie nous a permis de nous attaquer à la première question de recherche relative à l’intégration des données hétérogènes. Nous avons pu identifier de manière plutôt claire, comment les données hétérogènes peuvent être utilisées dans le processus de rétro-conception. Cependant, il reste la partie relative à l’extraction des informations et connaissances, qui repose sur l’utilisation des algorithmes d’extraction. Cette partie est importante dans la réalisation de l’intégration des données hétérogènes, puisqu’elle permet de réaliser de manière explicite le lien entre les données hétérogènes et le modèle-produit.

# Rôle des connaissances dans la nouvelle méthodologie de rétro-conception

Dans la partie précédente, nous avons proposé une solution pour lier les données hétérogènes avec les connaissances produit grâce à l’identification des couples constitués d’entités d’informations relatives au produit que l’on retrouve dans le modèle-produit, et des formes de représentation possibles de ces informations. Nous avons présenté les formes de représentations qu’on pouvait prendre en compte lors de la réalisation du processus de rétro-conception, mais jusqu’à maintenant, nous n’avons pas encore exploré la deuxième question de la problématique, relative à la structuration des informations et connaissances du produit.

La rétro-conception classique vise à retrouver les informations géométriques et topologiques. Nous retrouvons dans l’état de l’art des travaux qui ont été conduits dans le but d’intégrer des connaissances topologiques et géométriques dans le processus de rétro-conception, et de construire des systèmes d’information capables de réaliser cette tâche de manière automatisée. Cependant, un produit ne se résume pas à son enveloppe physique, que cela soit la forme (géométrie) ou la matière qui le constitue (matériaux). Pouvoir recouvrir le contexte global dans lequel avait été développé le produit nécessite la prise en compte d’un ensemble d’informations plus important. De ce fait, l’intégration des informations et connaissances de natures et types différents favorisent la récupération d’un ensemble de données plus détaillé, qui permet une représentation du produit analysé plus fidèle, et à des niveaux d’abstractions différents.

Dans la méthodologie qu’on propose, nous souhaitons élaborer une représentation du produit qui regroupe tous ses aspects pris en compte lors de sa phase de conception et de développement.

Donc, ce qu’il conviendrait de faire pour répondre aux deux besoins identifiés, c’est de modéliser une description du produit qui puisse être utilisée dans le but d’intégrer les données hétérogènes, et en même temps, regrouper toutes les entités d’information relatives au produit qui permettent de l’utiliser.

Dans cette partie, nous proposons une structuration des informations et connaissances du produit, schématisée à travers un méta-modèle qui prendra en compte plusieurs types d’informations, et qui nous permettra plus tard d’élaborer avec plus de détail l’aspect d’intégration des données hétérogènes. C’est dans cette partie qu’on traite à la deuxième question de la problématique, qui, en y répondant, nous permettra de proposer une structure d’informations afin de construire une représentation du produit. Mais avant cela, nous commencerons par définir la notion de niveaux d’abstraction des représentations du produit.

## I. Les niveaux d’abstraction des représentations du produit

La notion de niveaux d’abstraction est une notion centrale dans notre proposition de nouvelle méthodologie de rétro-conception. En effet, celle-ci permet de déterminer quelles sont les

différentes représentations que l’on peut construire de l’objet, tout en identifiant à quel moment elles interviennent.

L’objet physique réel est sa représentation la plus concrète. Il ne peut y avoir une représentation plus concrète que l’objet lui-même. Par contre, il peut y avoir des représentations plus abstraites, et à des degrés et niveaux d’abstraction différents.

Nous verrons plus tard avec la phase de conception et de développement de produits, que les différentes représentations du produit évoluent dans le temps, avec l’intégration de nouvelles informations et données au fur et à mesure que la description de celui-ci est détaillée. En partant de l’idée principale à l’origine de la réalisation du produit, plus on ajoute de l’information, plus sa description se concrétise. Alors on parle de représentation la plus abstraite quand on parle d’idée. A partir de ces deux points distincts, nous pouvons dire que plus on se rapproche de l’idée, plus on est dans l’abstrait, et plus on s’en éloigne, et par conséquent on se rapproche de l’objet physique, plus on est dans le concret.

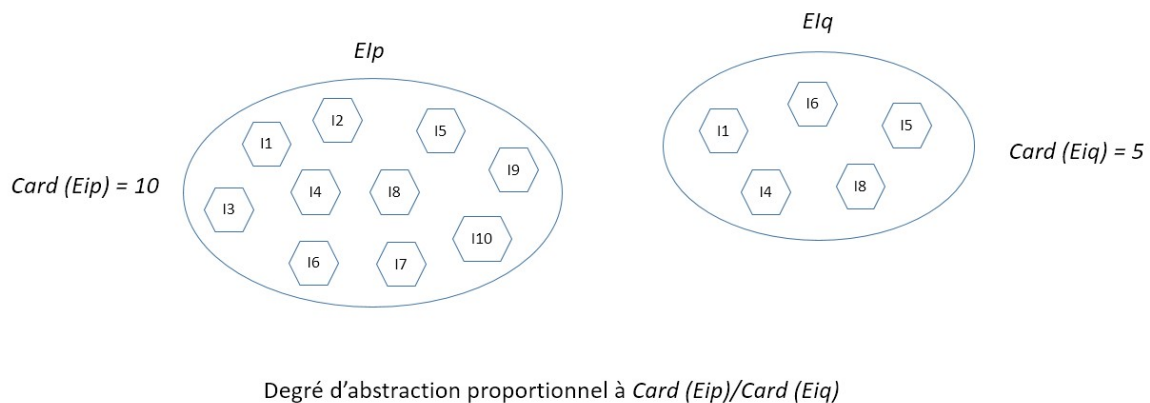


Figure 3.9 – Illustration de la notion de degré d’abstraction

Il peut arriver qu’on confonde le degré d’abstraction et le niveau d’abstraction, ils restent cependant différents. Si on devait considérer la représentation la plus concrète d’un objet comme étant un ensemble d’informations ((*EI*) avec un nombre d’information  $card(EI)$ ), alors plus le nombre d’informations relatives à une représentation quelconque ( $card(EIq)$ ) se rapproche (respectivement s’éloigne) de celui de la représentation la plus concrète ( $card(EIp)$ ) plus cette représentation est concrète (respectivement abstraite) en d’autres termes, plus le degré d’abstraction est bas (respectivement haut), à condition que les deux ensembles contiennent les mêmes informations bien sûr (figure 3.9).

Les niveaux d’abstraction quant à eux sont définis différemment. Le niveau d’abstraction est relatif à l’encapsulation d’un ensemble d’informations relatives à un produit dans un concept qui prend toutes ces informations en considération. Prenons comme exemple l’ensemble *EIp* constitué de plusieurs informations  $I_i$ , et l’ensemble *EIq* qui est un sous ensemble de *EIp*. L’utilisation de *EIq* dans la représentation de *EIp* va alors conduire à l’encapsulation des éléments contenus dans *EIq* dans sa représentation. En d’autres termes, les éléments de *EIq* ne seront plus visibles, seule une représentation de l’ensemble *EIq* sera prise en compte (figure



3.10 gauche), et cette représentation-là est à un niveau d’abstraction plus élevé que la description complète (figure 3.9 gauche).

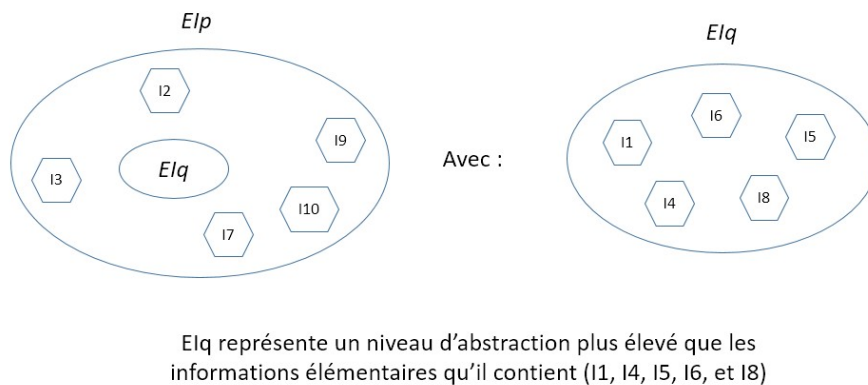


Figure 3.10 – Illustration de la notion de niveau d’abstraction

Donc, le degré d’abstraction et le niveau d’abstraction sont des notions complémentaires. Une représentation à un niveau d’abstraction élevé sera forcément à un degré d’abstraction élevé puisqu’on remplace un ensemble d’informations par une représentation intermédiaire.

Finalement, une modélisation des connaissances relative à la description du produit va forcément être abstraite (à un degré d’abstraction élevé). Dépendant du nombre d’informations et connaissances utilisées, on peut être à des niveaux d’abstraction plus ou moins élevés. Une représentation fonctionnelle est à un niveau d’abstraction élevé puisqu’elle permet de faire abstraction des informations structurelles du produit, et regroupe les informations fonctionnelles exclusivement.

## II. Formalisation du produit dans le contexte de rétro-conception

L’intégration des connaissances nécessite de changer la vision qu’on a sur le produit dans le contexte de la rétro-conception. Dans ce but, il faudra alors réétudier les concepts relatifs à la représentation du produit, qui permettent de prendre en considération les différents types d’informations et connaissances dont on aura besoin pour réaliser cette nouvelle méthodologie de rétro-conception. Pour cela, nous aurons besoin dans un premier temps, d’identifier quelles sont les informations et connaissances qui permettent d’élaborer une description du produit dans le contexte de la rétro-conception.

Il existe dans la littérature scientifique un ensemble de modèles permettant de décrire le produit : ce sont les modèles-produit (p.51). Ces modèles sont souvent élaborés avec pour objectif de représenter le produit dans un contexte PLM, où le produit est considéré dans le processus ascendant de conception et de développement de produit. Il subsiste quelques différences entre le processus de conception, et celui de rétro-conception qu’il est important de souligner afin d’identifier les possibles différences entre les deux représentations relatives aux deux processus. Il sera alors pertinent d’identifier ces différences dans le but d’élaborer une



représentation du produit qui correspond au processus de rétro-conception, et pour cela, nous explorerons le processus de conception.

Dans un premier temps, nous proposons de souligner les différences entre le processus de rétro-conception, et le processus de conception et de développement de produits. En identifiant ces différences, nous pourrions alors mettre en évidence les informations et connaissances qui sont en communs entre les représentations utilisées dans les deux contextes, mais aussi celles qui sont propres à chaque processus.

Une analogie avec le processus de conception du produit nous permettrait d’analyser la représentation du produit et ainsi, de formaliser les différentes informations et connaissances relatives aux différents aspects du produit.

### 1. Le processus de conception classique

Dans leur ouvrage sur l’ingénierie de conception [Pahl & Beitz, 13], les auteurs définissent le processus de conception et de développement de produits en termes de quatre phases principales, à savoir :

- La clarification des tâches (Task clarification) qui implique l’identification et la formulation des contraintes et exigences générales et spécifiques, ainsi que la mise en place d’une liste d’exigences qui permet d’identifier clairement le besoin des parties prenantes.
- L’étude conceptuelle (Conceptual design) qui implique l’élaboration d’une représentation conceptuelle basée sur l’abstraction de la formulation initiale de la liste des exigences, et l’établissement d’une structure fonctionnelle qui, permettra par la suite d’aboutir à une structure de travail regroupant un ensemble de principes de fonctionnement pour remplir les différentes fonctions : c’est l’émergence du concept.
- La conception de forme (Embodiment design) qui, en partant du concept défini lors de l’étude conceptuelle, permet d’élaborer une architecture définitive du produit ou système technique proposé, en concordance avec les exigences techniques et économiques.
- La conception détaillée (Detail design) concerne les instructions finales par rapport à la géométrie, la forme, les dimensions, et les propriétés de surface, ainsi que la sélection définitive des matériaux et des méthodes de production.

Dans chacune de ces phases du processus de conception, des descriptions du produit sont construites dans le but de définir les différents aspects lui permettant de remplir ses fonctions, tout en respectant les objectifs du projet de conception en termes de coût, de qualité et performance, et de délais. Chacune de ces descriptions se base sur un ensemble de connaissances et d’informations permettant de caractériser le produit.

Dans le but d’identifier les différentes connaissances relatives à la description du produit, nous avons exploré chacune de ces phases de manière à pouvoir générer au final, un modèle qui regroupe les différentes connaissances et informations permettant de représenter le produit. Une comparaison avec le processus de rétro-conception nous permettra de structurer ces

connaissances afin de les rendre en adéquation avec ce même processus, pour finalement, proposer un modèle-produit qui y sera utilisé.

## 2. Différences entre la rétro-conception et la conception

Le processus de conception démarre d’une idée de base qui a pour but de combler un besoin, pour aboutir à un concept détaillé qui décrit la manière dont ce besoin devra être comblé. Ce processus passe par plusieurs étapes qui permettent à chaque fois d’ajouter plus de détail à la description de l’objet, et d’aboutir à des représentations de niveaux de plus en plus bas, pour finalement arriver à une représentation la plus concrète et la plus directe du produit qui est la représentation de forme.

Le processus de rétro-conception quant à lui, démarre à partir de l’analyse d’un objet physique. La première représentation à laquelle il aboutit est la représentation la plus concrète (à savoir la représentation de forme), puis généralement c’est sur cette représentation que les ingénieurs se basent pour construire des représentations de hauts niveaux d’abstraction telles que des représentations fonctionnelles ou dynamiques du produit.

### a. Approche ascendante contre approche descendante

La conception est une approche ascendante. Elle part d’une idée de produit par rapport à un besoin, et se termine par la réalisation de celui-ci. Durant la phase de conception, les différents métiers relatifs à l’élaboration du produit, commencent par identifier les différents besoins relatifs au contexte d’utilisation du produit. Chaque métier apportera un ensemble de contraintes et d’exigences qui vont être intégrées au produit (c’est la phase de clarification des tâches). En se basant sur cet ensemble d’exigences, on construit des représentations conceptuelles du produit pour chaque métier, qui intègrent un ensemble de ces exigences, ce qui donne donc, un ensemble de concepts unitaires. A partir de là, chaque représentation conceptuelle est intégrée à une représentation globale qui définit l’architecture finale du produit, puis on procède à la conception détaillée, avec l’émergence de la forme physique du produit.

La rétro-conception est tout à fait à l’opposé de la conception. On part d’une forme physique finale du produit qui peut être représentée en une architecture du produit. Et à partir de cette architecture, on décompose le système pour trouver les exigences qui ont permis la construction du produit, une à une.

### Différences entre les concepts initiaux utilisés dans les deux processus

La conception part d’une liste d’exigences partagée par les différents métiers participants au processus. Il s’agit de la première représentation du produit qui est construite dans le processus de conception.

La rétro-conception, part quant à elle d’un modèle 3D du produit analysé. Il s’agit de la première représentation du produit construite dans le processus de rétro-conception. C’est à partir de cette représentation qu’on peut extraire des informations et connaissances, en la faisant correspondre avec différentes autres informations issues de documents de conception. Il est possible de n’utiliser qu’une représentation géométrique de l’objet pour faire la rétro-conception d’un produit. Mais le problème réside dans la reconstitution du contexte initial du développement du produit. Il est alors beaucoup plus intéressant d’apporter des éléments supplémentaires pour définir de manière plus précise ce contexte [Dhuieb, 16].

### 3. Différences entre les représentations du produit dans la conception et la rétro-conception

Du fait des différences entre les deux processus, une différence entre les représentations du produit dans les deux cas peut être déduite.

La conception utilisera une représentation avec comme base, les différentes exigences et contraintes auxquelles doit répondre le produit, et évoluer jusqu’à fournir une représentation plus concrète du produit (souvent une représentation géométrique, ou même un prototype physique). Pour aboutir à la finalité du processus de rétro-conception, cette chronologie doit être respectée, et toutes ces étapes réalisées.

La rétro-conception utilisera une représentation avec comme base, la représentation de forme du produit qu’on traduira ensuite selon le contexte d’utilisation du processus de rétro-conception (les sorties du processus sont différentes dans le cas d’une reconception ou d’une refabrication). La réalisation du processus dépendra donc de l’objectif final. Il serait donc plus pertinent de construire une première représentation du produit qui est générique, puis de passer à des représentations plus spécifiques selon l’objectif final du processus de rétro-conception.

## III. Représentation du produit dans la rétro-conception

Dans l’état de l’art que nous avons présenté précédemment, nous avons pu croiser certains travaux traitant de la formalisation des représentations du produit à travers la mise en place de méta-modèles regroupant les différents concepts qui peuvent le décrire. Tous ces travaux s’accordent à dire que le produit peut être représenté à plusieurs niveaux d’abstraction (notamment la base fournie par Gero dans FBS).

Jusqu’à maintenant, ces modèles ont permis de définir les concepts principaux intervenant dans la description du produit tels qu’identifiés dans la partie précédente, sans pour autant être appliqués à la rétro-conception. Bien qu’une adaptation du modèle CPM (Core Product Model) ait été faite dans le projet PHENIX, elle était plutôt axée sur la rétro-conception classique. Nous souhaitons donc nous baser sur les travaux précédents afin de pouvoir fournir une représentation du produit qui soit :

- Correspondante à notre contexte de rétro-conception (approche descendante).
- Qui prend en compte l’aspect multi-objectif de la rétro-conception, ainsi que de la multi-représentation du produit selon le contexte souhaité.

Pour cela, nous voyons que le méta-modèle-produit, doit être représenté selon plusieurs couches d’abstraction. Cette nécessité de représenter les méta-modèles suivant plusieurs couches émane du fait des différences entre la conception et la rétro-conception vue dans la section précédente (section II). Nous pouvons voir dans la figure 3.11 l’utilisation du modèle-produit comme étant un moyen de structurer les informations dans la nouvelle méthodologie que nous proposons. En effet, l’existence de la représentation du produit en utilisant un méta-modèle ne précède pas l’existence du produit physique lui-même dans le contexte de rétro-conception. De plus, la rétro-conception classique a favorisé l’élaboration de représentations physiques permettant de décrire la forme du produit.

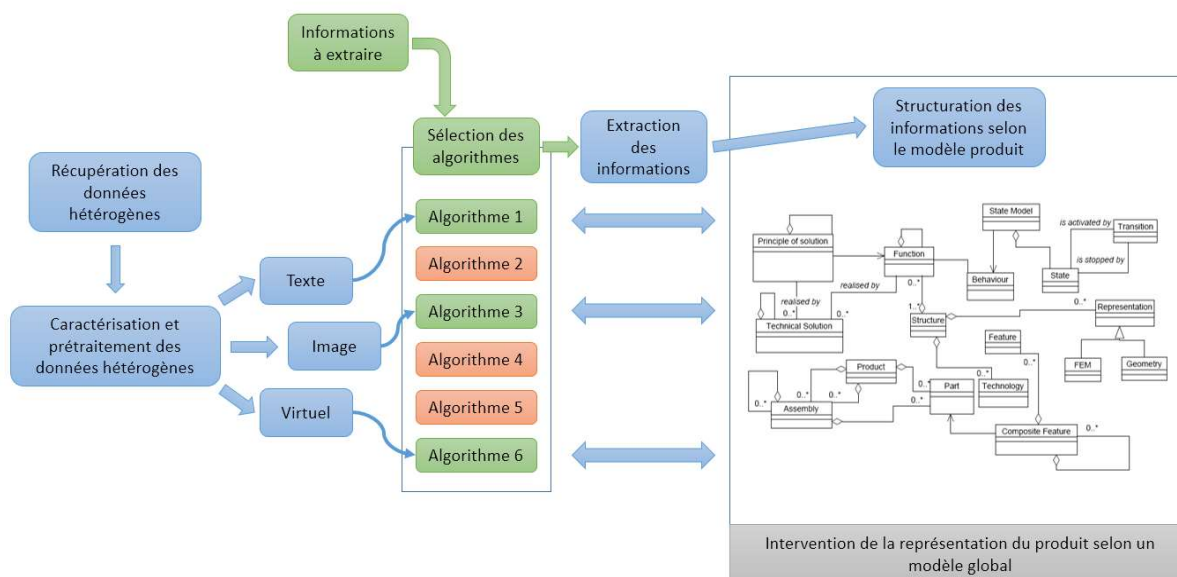


Figure 3.11 – Périmètre de la structure d’informations et connaissances dans la nouvelle méthodologie de rétro-conception

La première représentation à laquelle aboutit le processus de rétro-conception est généralement la représentation physique virtuelle de l’objet analysé. Il est donc tout à fait naturel de construire une première représentation du produit basée sur l’ensemble des informations et connaissances qui permettent de caractériser l’aspect physique (en d’autres termes, structurel) du produit.

Cette première représentation sera la représentation intrinsèque du produit, où seront regroupés les concepts intrinsèques au produit. Sur la base de cette représentation intrinsèque, seront construites d’autres représentations relatives au produit, orientées selon le temps, ou la dimension. Nous pouvons citer comme exemple la représentation conceptuelle du produit, utilisée par les différents métiers de conception, permettant de construire des représentations à des niveaux d’abstraction plus élevés (telles que des représentations fonctionnelles ou comportementales).

Sur la base des propositions faites concernant la représentation du produit dans la rétro-conception, nous identifions un ensemble de concepts qui représenteront donc la base sur laquelle seront formalisées les connaissances produit. Chaque concept identifié correspondra à un ensemble d’informations et connaissances qui permettront de décrire le produit d’une certaine façon. Donc, chaque concept devra être formalisé en un ensemble de connaissances.

Le produit sera représenté par un ensemble de connaissances qui permettent de le décrire. Ces connaissances auront des formes variées, et dépendront du contexte projet.

Dans ce qui suit, après la description de chaque représentation du produit (absolue et relative) nous utilisons le formalisme UML afin de fournir une première structuration des informations et connaissances qui permettent de représenter le produit. La première partie concerne la représentation intrinsèque du produit, alors que la deuxième prend en compte les différentes informations et connaissances pour construire la représentation relative du produit dans la phase de conception et de développement.

Nous nous baserons dans la construction de ces représentations, sur les différents modèles-produit présentés dans l’état de l’art (chapitre II). En effet, il y a plusieurs concepts relatifs à des informations et connaissances qui existent déjà dans l’état de l’art. C’est la structure globale représentée par les différents liens entre ces concepts qui est susceptible de changer.

### 1. Représentation absolue du produit (informations intrinsèques)

#### a. Description de la représentation absolue

La rétro-conception conventionnelle consiste en l’élaboration d’une représentation simplifiée de la forme de l’objet analysé. Cette représentation à laquelle aboutit le processus de rétro-conception, après la digitalisation et la reconstruction surfacique, regroupe les informations de base de l’objet, à savoir son enveloppe physique. Elle peut alors être caractérisée par des éléments géométriques et topologiques.

Généralement, cette représentation permet de décrire l’enveloppe externe de l’objet indépendamment de sa constitution réelle. En conséquence, dans le cas d’un système complexe, une seule enveloppe va être attribuée à plusieurs composants. Pour cela, il serait plus intéressant de traiter chaque composant du système en tant que tel, et de lui attribuer ses propres éléments géométriques et topologiques, et de lui rajouter l’élément « matériel ».

Concernant la conception, la forme physique du produit représente l’intégration des différentes contraintes de chaque métier intervenant dans la conception de celui-ci. Chacune des contraintes auxquelles aboutissent ces métiers, est traduite en termes de contraintes physiques relatives au matériel (matériau), ou bien relatives à la forme (géométrie et topologie). Il serait alors intéressant de prendre en compte ces informations dans la représentation physique du produit de manière à fournir un point commun pour les différentes représentations spécifiques aux métiers intervenant dans la conception.

Cette représentation regroupe donc les informations intrinsèques du produit, c’est-à-dire celles qui permettent de le décrire concrètement quand sa réalisation physique est complétée.

Cette représentation peut être caractérisée par deux entités distinctes relatives à sa description physique :

- L’entité géométrique et topologique
- L’entité physique, ou matière

Les représentations relatives du produit ne seront pas matérialisées dans le produit, mais découlent de cette représentation absolue (représentations pour les métiers de fabrication par exemple), ou permettent de construire cette représentation absolue (représentation pour les métiers de conception par exemple).

#### Modèle-produit : représentation intrinsèque

La représentation intrinsèque représente donc le produit dans sa forme physique, en prenant en compte les informations géométriques relatives à la forme physique, et les informations concernant le matériau relatif à la constitution physique.

Dans la figure 3.12, sont représentées les informations de forme et de constitution physiques et structurées dans un diagramme de classes UML. Chacune de ces classes représente un objet spécifique relatif à un élément ou un ensemble d’éléments d’informations.

La classe principale de ce diagramme est « Artifact ». Elle représente l’artéfact physique unitaire qui représente le composant. Il est tout à fait possible d’associer plusieurs artéfacts physiques dans le but de créer un ensemble d’artéfacts, représenté lui-même par un artéfact. Puisque la représentation absolue du produit est caractérisée par l’entité géométrique, et l’entité physique, alors chaque artéfact sera constitué de deux informations physiques principales : la première est représentée par la classe « Material » et qui permet de regrouper les informations relatives à la matière qui constitue l’artéfact. La deuxième est la classe « FormFeature » qui prend en compte les différentes formes qui constituent la forme globale du produit. Cette classe représente les entités de forme qui remplissent des fonctions élémentaires. Cette classe permettra de créer un lien avec la représentation fonctionnelle, en identifiant les différentes fonctions élémentaires remplies par les entités de forme dans un artéfact. Une spécialisation de cette classe permet de proposer une structure d’information relative aux interfaces de l’artéfact (« Interface »).

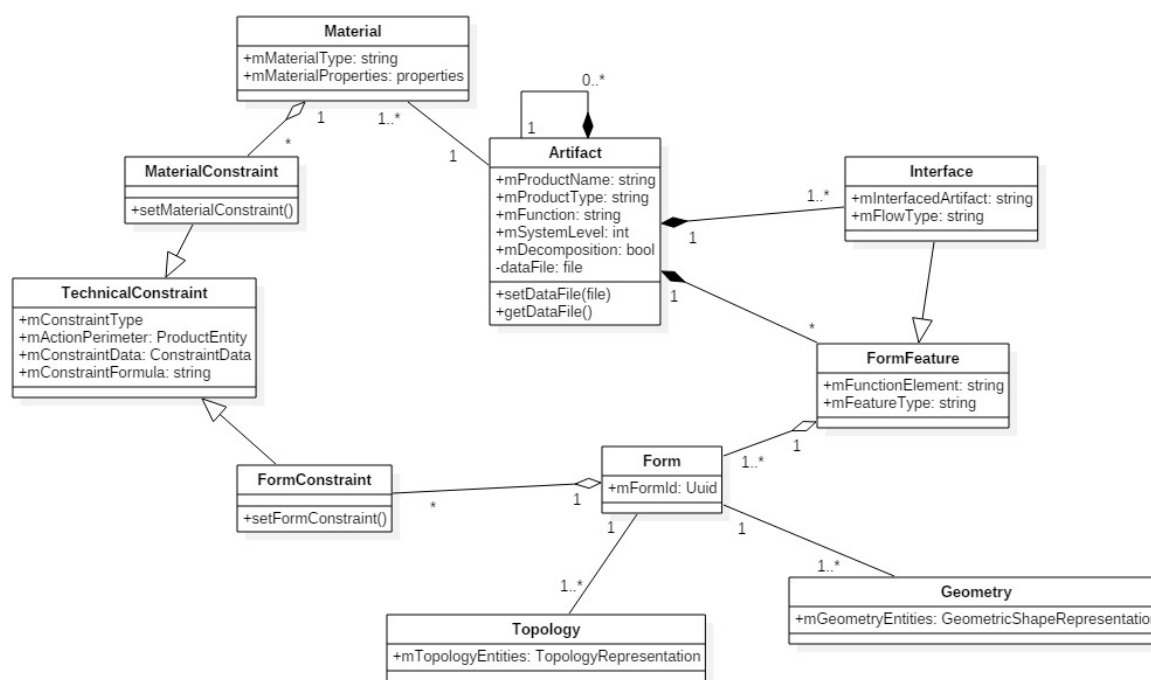


Figure 3.12 – Modèle de connaissances produit intrinsèques

Un troisième élément principal est pris en compte dans ce modèle, et qui est relatif aux différentes contraintes de conception qui seront généralement traduites soit en contraintes matérielles, soit en contraintes de forme. En effet, plusieurs exigences et contraintes de conception peuvent être traduites en termes de forme du produit, ou de contraintes sur la matière. Cet élément est représenté par la classe « TechnicalConstraint » qui se spécialise en « MaterialConstraint » pour les contraintes matérielles, et en « FormConstraint » pour les contraintes de forme. La première classe est reliée à l’élément principal « Material », alors que la deuxième est reliée à la classe « Form » qui permet de représenter les entités géométriques

et topologiques (respectivement la classe « Geometry » et la classe « Topology »). Ces deux entités, vont nous permettre de caractériser implicitement le lien entre le modèle intrinsèque, et les modèles relatifs.

Ce modèle permet de représenter globalement les différentes informations physiques relatives au produit, et constituera une base sur laquelle reposeront plusieurs modèles relatifs aux métiers intervenant dans la conception du produit.

## 2. Représentation relative du produit

### a. Description de la représentation relative

La représentation relative du produit permet d’élaborer des descriptions de celui-ci à des niveaux d’abstraction plus élevés que celle de la représentation absolue décrite précédemment. En effet, si on prend comme exemple la représentation fonctionnelle du produit, celle-ci est une représentation abstraite qui ne peut être construite qu’après une analyse approfondie du produit, en se basant sur des informations et connaissances.

Contrairement à la représentation de base qui permet de décrire le produit à partir d’une simple analyse de la forme, une représentation relative a besoin d’un ensemble de connaissances et d’informations qui lui permettent de fournir une interprétation des informations de forme. Tout cela pour pouvoir construire une représentation à un haut niveau d’abstraction dans un contexte spécifique.

Dans le processus de rétro-conception, la première étape concerne la récupération des données et informations de formes de manière à créer une première représentation physique de bas niveau. En se basant sur cette représentation, il est alors possible de créer des représentations de hauts niveaux en intégrant des connaissances produit.

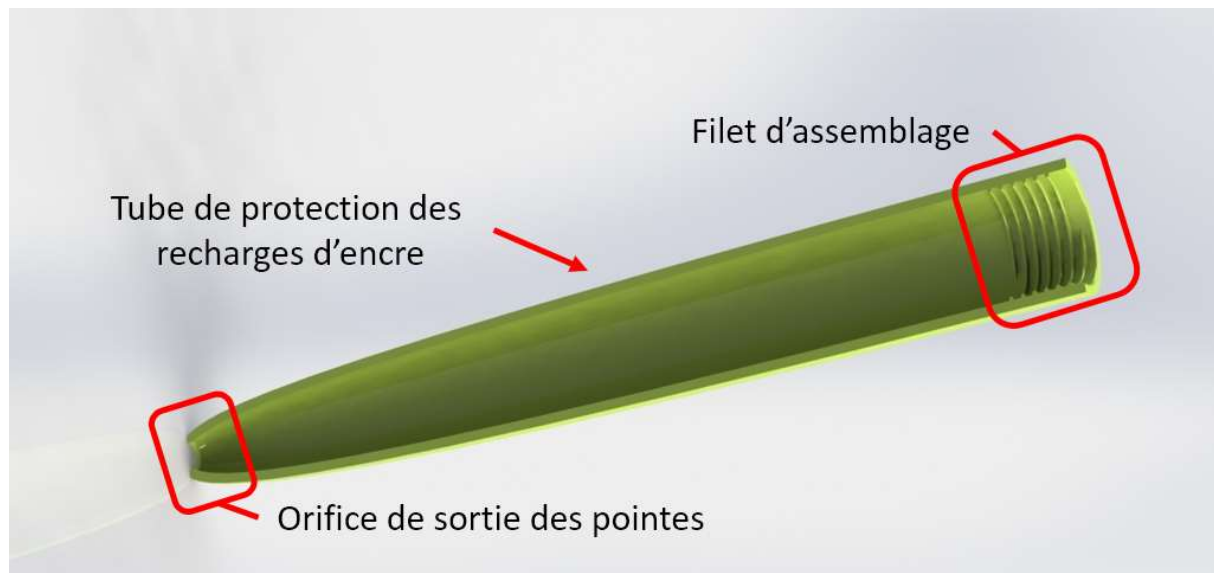


Figure 3.13 – Coupe latérale d’une pièce d’un stylo quatre couleurs [ @CAD Blog ]

Pour illustrer nos propos, prenons comme exemple la pièce d’un stylo quatre couleurs (figure 3.13). Le processus de rétro-conception classique aboutirait à une représentation géométrique du produit à travers la reconstruction surfacique. Cette première représentation ne représente



pas l’objet dans tous ses aspects mais seulement son enveloppe externe. Dans le but de fournir des représentations prenant en compte d’autres aspects du produit, une intégration des connaissances devra être faite pour passer d’une représentation de forme où on ne parle que de géométrie ou de topologie, à une représentation où des entités géométriques sont identifiées par rapport à leurs fonctionnalités.

Le filet d’assemblage de la figure 3.13, correspond à un ensemble de surfaces et de points qui ont une structure spécifique correspondant à une fonction. Dans une représentation structurelle, la fonction relative au filet (assemblage avec un autre composant) n’est pas prise en compte, il nous faut alors une structure d’informations qui prend à la fois les informations géométriques regroupant l’ensemble des points et surfaces de l’entité, mais aussi la fonction qu’elle remplit. Nous verrons plus tard dans le modèle, que c’est la classe « Technicalfunction » qui permet de caractériser la fonction, et le lien qu’elle a avec la structure va permettre de l’identifier comme la fonction du filet.

L’élaboration d’une représentation relative du produit permettra alors de construire dans ce cas, une structure fonctionnelle qui identifie les différentes entités géométriques qui remplissent des fonctions pour répondre à un besoin ou objectif spécifique. Par exemple dans le cas de reconception, il est possible d’utiliser d’autres techniques d’assemblage de la pièce en figure 3.13 avec le système complet (stylo).

#### **Modèle-produit : représentation relative pour la conception**

Le modèle intrinsèque est utilisé comme étant une représentation de base, à un niveau d’abstraction bas. Toutes les autres représentations qui se baseront sur celui-ci seront à des niveaux d’abstraction plus élevés. Donc le but du découpage du modèle-produit a été de permettre la construction de plusieurs représentations relatives sur la base d’une seule représentation commune vers laquelle toutes les informations peuvent être tracées.

Il n’y a pas qu’un seul modèle relatif, mais plusieurs modèles. Et le nombre dépend des différentes représentations orthogonales du produit dont ont besoin les différentes équipes de conception pour pouvoir travailler.

La figure 3.14 représente un modèle relatif qui prend en compte différentes représentations du produit lors de sa conception. On l’appellera modèle-produit relatif pour la conception.

Ce modèle a été développé pour structurer les différentes informations et connaissances relatives à la conception du produit, dans le but de créer un schéma global permettant de tracer les informations du produit à différents niveaux d’abstraction. Dans ce modèle on réutilise un ensemble d’informations et connaissances issues des modèles-produit présentés dans l’état de l’art. De la même manière que pour le modèle intrinsèque, c’est la structure du modèle relative aux liens entre les concepts qui est susceptible de changer. Nous avons essayé de faire sortir dans la structure du modèle-produit la traçabilité entre les différentes entités d’informations à travers les liens entre-elles.

La conception commence par l’identification de l’idée principale et l’élaboration d’une première représentation du produit en termes d’exigences. Cette première représentation est caractérisée par la classe « ScopeStatement » qui n’est autre qu’une liste d’exigences de base



regroupant un ensemble d’exigences élémentaires (la classe « Requirement »). Cette liste d’exigences est alors utilisée pour former une première spécification, celle-ci est caractérisée par la classe « Specification ». Elle se spécialise en spécification fonctionnelle (classe « FunctionalSpecification ») à travers laquelle est définie la structure fonctionnelle qui permet au produit de réaliser les objectifs pour lesquels il a été conçu et de répondre au besoin. Elle se spécialise aussi en spécification technique (classe « TechnicalSpecification ») qui représente des principes de fonctionnement connus, qui permettront la réalisation des fonctions du produit.

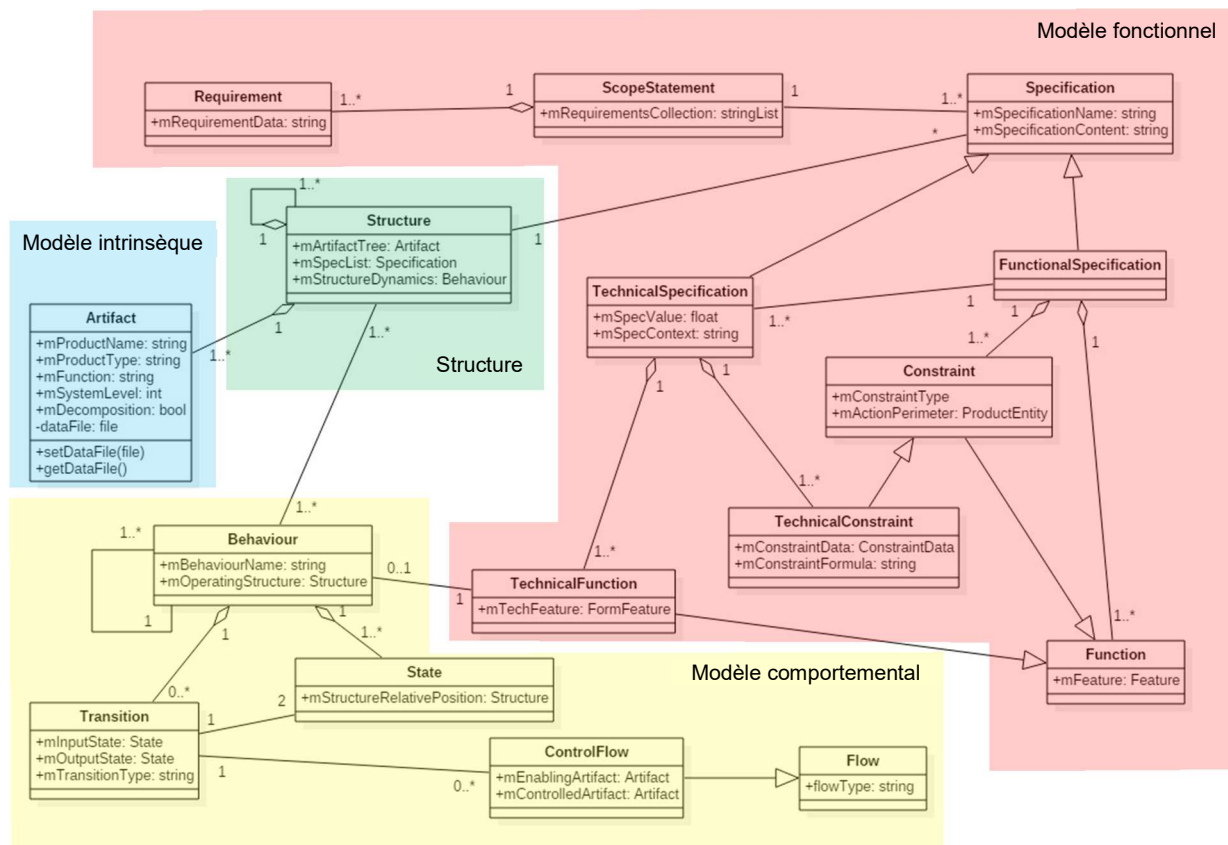


Figure 3.14 – Modèle-produit relatif à la conception

La classe « FunctionalSpecification » regroupe deux classes distinctes pour décrire les fonctions de service remplies par le produit, et les contraintes fonctionnelles qu’il doit subir durant son fonctionnement qui sont respectivement, les classes « Function » et « Constraint ». La classe « TechnicalSpecification » quant à elle se décline en contraintes techniques (la classe « TechnicalConstraint ») et en fonctions techniques (la classe « TechnicalFunction »). Les différences entre les contraintes techniques et fonctionnelles ou encore, les fonctions de service et techniques réside dans le niveau de détail fourni par chacune d’entre elles. En effet, une fonction de service est indépendante de la solution finale, alors que la fonction technique dépend du principe de fonctionnement, et donc de la solution finale pour remplir une fonction de service. De même, les contraintes techniques sont des contraintes fonctionnelles qui sont spécifiques à la solution finale. Cette première partie du modèle de conception concerne le modèle fonctionnel du produit, et regroupe l’ensemble des informations relatives aux fonctions remplies par le produit. Elle nous permet donc de représenter le produit à un niveau d’abstraction élevé puisqu’elle ne contient aucune information détaillée sur la forme physique ou la matière.

Chaque fonction technique « TechnicalFunction » peut être statique ou dynamique, dans le cas où elle est dynamique, on pourra représenter son comportement de manière à capturer toutes les informations relatives à sa dynamique à travers la classe « Behaviour » qui englobe les informations sur le comportement d’une solution technique. La classe « Behaviour » prend en compte les états et transitions qui définissent la dynamique du produit, et sont représentés par les classes « State » pour les états, et « Transition » pour les transitions. Les transitions peuvent être contrôlées ou non par un flux de contrôle, représenté par la classe « ControlFlow » qui hérite de la classe « Flow » et qui elle-même permet de caractériser les différents flux possibles (énergie, matière, signal, etc.). Cette seconde partie décrit le modèle comportemental du produit, et permet de représenter les différentes informations relatives au comportement du produit. Elle permet de faire sortir l’aspect dynamique du produit en caractérisant les différents états et transitions du produit pour réaliser ses fonctions.

La structure quant à elle est représentée par la classe « Structure » seule. En effet, nous avons choisi de mettre en place un modèle-produit intrinsèque pour regrouper toutes les informations relatives à la forme physique du produit (la première représentation à laquelle on accède généralement après la rétro-conception, et aussi une représentation qui ne change pas en fonction des métiers – le produit est toujours le même). Dans notre modèle, elle permet de regrouper les différents sous-modèles du modèle relatif, et permet de mettre en place l’interface avec le modèle intrinsèque.

Dans le processus de conception, c’est le modèle de conception qui est utilisé en premier puisque la forme physique du produit n’est pas encore définie, mais découle des différentes informations relatives aux contraintes, ou fonctions qui permettent de définir le produit.

Dans le processus de rétro-conception, c’est plutôt l’inverse. Le modèle intrinsèque est le premier modèle qui est utilisé afin de représenter la forme de l’objet puis, selon le besoin, d’autres modèles peuvent être construits sur la base de ce modèle, comme par exemple le modèle relatif à la conception, dans le but de créer une représentation globale du produit qui permet de regrouper toutes les informations de conception et de les tracer entre elles.

### **3. Lien entre la représentation absolue et les représentations relatives**

Nous avons présenté dans cette section les deux types de modèles qu’on prendra en compte pour la représentation du produit dans notre méthodologie. La première est la représentation intrinsèque. Elle ne concerne qu’un seul et unique modèle pour prendre en compte les différentes informations physiques du produit. La deuxième est la représentation relative, qui dépend du contexte d’utilisation de la rétro-conception. La représentation relative n’est pas unique, c’est pour cela qu’il est possible d’avoir plusieurs modèles relatifs pour décrire le produit selon le contexte d’utilisation de ces informations, que ce soit pour différents objectifs d’utilisation de la rétro-conception, ou pour différents métiers.

Dans le cas où il est possible d’utiliser des alternatives de représentation du produit, il devient alors pertinent d’utiliser un moyen de sélectionner les représentations dont on a besoin. Cependant, dans ce que nous avons proposé dans cette partie, la gestion de la multi-représentation n’est pas abordée.

Dans la partie suivante, nous introduisons un nouveau concept qui va nous permettre de remédier à la multi-représentation. Ce concept se basera sur les travaux relatifs au modèle intrinsèque et aux modèles relatifs, afin de proposer un moyen de sélection des représentations selon le contexte voulu. Ce concept nous permettra donc de déterminer les informations et connaissances à utiliser selon le contexte métier, mais aussi selon l’objectif de la rétro-conception. En effet, la représentation du produit n’est pas la même en sortie du processus de rétro-conception pour la reconception, ou la refabrication, que pour le reengineering.

#### IV. Conclusion de la partie

Dans cette partie, nous avons identifié l’intérêt d’intégrer une approche basée sur la connaissance afin de proposer une méthodologie globale pour la rétro-conception. Cet intérêt réside d’un côté, dans le besoin d’utiliser des données hétérogènes afin de prendre en compte plusieurs types d’informations possibles sur le produit, et d’un autre côté, dans la nécessité de diversifier les points-de-vue sur le produit dans le but de construire des représentations de celui-ci à des niveaux d’abstraction différents, et pas seulement se restreindre à une représentation géométrique et topologique figée.

L’intégration des connaissances va ainsi nous permettre de proposer une première structure d’informations et connaissances, qui va nous permettre de construire des représentations du produit. De ce fait, nous apportons une première réponse à la deuxième question de notre problématique relative à la structuration des informations. Ainsi, nous pourrions concrètement lier les données hétérogènes et les informations et connaissances du produit, à travers les différents algorithmes d’extraction des informations et connaissances.

Nous avons formalisé la représentation du produit à travers la proposition d’un modèle générique pour représenter les différents points-de-vue relatifs à celui-ci. Pour cela, nous avons voulu faire une comparaison entre le processus de conception classique, et le processus de rétro-conception afin de déduire les différences, et de les impacter sur la description du produit, et donc sur la structuration des connaissances.

Nous sommes arrivés à la conclusion que le modèle-produit pouvait être divisé en plusieurs niveaux d’abstraction. Le premier, étant le plus élémentaire et le plus important, est le modèle intrinsèque, qui permet de représenter le produit dans sa forme la plus concrète (sa forme physique). En se basant sur le premier niveau, plusieurs représentations relatives peuvent être construites dans le but de représenter le produit à des niveaux d’abstraction plus élevés. Cette division est due à la nature du processus de rétro-conception qui doit commencer par l’analyse de l’objet physique, puis de construire au fur et à mesure des représentations de plus en plus abstraites.

Finalement, les représentations du produit que nous proposons sont des sous-parties d’une représentation globale qui prend en compte plusieurs situations possibles du processus de rétro-conception. Un premier axe relatif au changement de situation correspond à la finalité de la rétro-conception. Chaque finalité de la rétro-conception devra construire une représentation qui lui est propre. Ainsi, la reconception d’un produit ne va pas avoir besoin des mêmes

informations que dans la refabrication, ou le reengineering du même produit. Un deuxième axe est quant à lui, relatif au contexte métier, et fait intervenir d’autres formes de représentation relatives. Nous avons présenté dans notre travail le modèle relatif à la conception, mais il est tout à fait possible d’imaginer un modèle relatif au développement du produit, au calcul, ou toute autre représentation du produit construite dans un contexte métier spécifique. Il convient alors de proposer une solution de gestion de cette multi-représentation dans le but de fournir la représentation adéquate au contexte adéquat : c’est ce que nous tâcherons de faire dans la prochaine partie.

# Concept de facettes d’informations pour l’organisation des représentations

Tout au long du cycle de développement du produit, les collaborateurs dans l’entreprise manipulent un ensemble d’informations et connaissances dans le but d’élaborer un produit qui répond aux exigences des clients. Chaque collaborateur devra alors manipuler un ensemble d’informations et de connaissances relatives à son contexte et son domaine d’expertise. Pour cela, il sélectionnera un ensemble d’informations parmi toutes celles qui sont relatives au produit de l’entreprise. Concrètement, cela se traduira par l’utilisation d’un ensemble d’informations qu’il extraira de certains livrables, et qu’il mettra en œuvre dans la réalisation de la tâche qui lui incombe.

En théorie, cet ensemble d’informations dont a besoin le collaborateur est immédiatement fourni. Cependant, en pratique, c’est à l’utilisateur de le construire, et cela n’est pas sans conséquences. En effet, cette opération de constitution de l’ensemble d’informations représente souvent une bonne partie du temps de réalisation de la tâche du collaborateur.

Dans notre définition de la rétro-conception, l’utilisateur n’a pas à passer du temps pour la reconstitution des informations dont il a besoin en sortie du processus. Il serait donc plus pertinent de trouver un moyen de gérer et d’organiser les informations pour l’utilisateur sans qu’il ait à investir un temps conséquent pour réaliser cette tâche « non-productive ». Nous nous sommes donc intéressés à cet ensemble d’informations qui caractérise le point-de-vue d’un collaborateur dans la conception et le développement d’un produit. Cet aspect de l’organisation des informations et connaissances relève de la gestion de la multi-représentation.

Les outils PLM permettent de gérer un grand ensemble d’informations sur le produit durant tout son cycle de vie, mais se résument le plus souvent, à gérer les documents qui sont produits par les différentes équipes de développement dans l’entreprise. Ces outils permettent donc de gérer les modèles en évolution à travers la phase de conception et de développement, de gérer la diversité du produit, et la multi-représentation du produit.

La multi-représentation est primordiale quand il s’agit de regrouper un ensemble d’informations relatives à un point-de-vue, autrement dit, à un domaine d’expertise. Chaque représentation se traduira par un ensemble d’informations structurées de manière à ce qu’elles soient pertinentes dans un contexte d’utilisation précis.

La gestion de la multi-représentation dans le PLM est basée sur l’utilisation d’une description arborescente du produit, afin d’identifier ses différentes configurations. Chaque représentation du produit dans ses différentes configurations est codifiée par un identifiant. Cela ne favorise pas l’accès à l’information puisque l’utilisateur doit récupérer la représentation pour vérifier si celle-ci correspond à son besoin ou non.

Finalement, aujourd’hui, dans les solutions proposées à l’industrie, les problématiques relatives à la gestion de l’information ne sont pas encore abordées dans leur totalité. Il faudra donc

réfléchir à un moyen de simplifier la gestion de l’information dans le but d’améliorer l’accès à celle-ci, et de favoriser la collaboration où la communication des informations est ciblée.

Dans le cas de la rétro-conception, nous avons vu précédemment que l’objectif est de recréer le contexte de l’objet analysé à des niveaux d’abstraction plus élevés. Cela implique de créer des représentations de l’objet regroupant un ensemble d’informations dépendantes du contexte d’utilisation. Ici le contexte sera relatif à deux axes principaux comme identifiés dans la partie précédente (section IV – Conclusion) : un premier axe permettra d’arranger les représentations de la rétro-conception selon l’objectif ou la finalité cherchée par le processus (reconception, refabrication, reengineering), et un deuxième axe, relatif au contexte métier, c’est-à-dire le point-de-vue métier relatif aux informations en sortie du processus de rétro-conception (métier de calcul des structures, de fabrication, de conception, etc.).

## I. Le besoin de gérer un ensemble d’informations contextuelles dans l’élaboration du produit

Dans la rétro-conception, le produit est analysé selon différents points-de-vue dans le but de recréer des descriptions, qui permettent de l’identifier. L’élaboration des représentations du produit à des niveaux d’abstractions différents nécessite de savoir comment sont constituées ces représentations, et en même temps de gérer les informations contextuelles qui composent ces représentations.

Chacun de ces points-de-vue trouve l’ensemble de ses informations dans la description du produit. Donc, le point-de-vue est un ensemble d’informations du produit qui sont reliées entre elles, et qui sont utilisées dans un contexte spécifique. Comme résultat direct, chaque point-de-vue sera lié directement ou indirectement à d’autres points-de-vue du fait de la possibilité de trouver des informations communes. En d’autres termes, l’intersection entre ces ensembles donne un sous-ensemble d’informations communes (figure 3.15).

Il est alors possible de tracer les informations entre les différents points-de-vue, ce qui permettra d’identifier les liens entre eux. En même temps, l’identification de ces liens permettra d’améliorer la collaboration entre les différents métiers, qui manipulent ces différentes représentations du produit.

Il serait donc intéressant de pouvoir gérer les informations contextuelles relatives à un domaine d’expertise, dans le but de créer des représentations du produit qui seraient pertinentes dans le contexte relatif à ce domaine d’expertise.

Cette vision de la gestion des informations et connaissances selon des points-de-vue s’accorde parfaitement à notre proposition initiale relative au modèle-produit. En effet, nous avons choisi de définir le modèle-produit comme étant un ensemble d’informations séparées en plusieurs sous-modèles : un modèle intrinsèque qui représente les informations relatives à la matérialisation du produit, en d’autres termes sa forme et sa constitution, et un ensemble de modèles relatifs qui décrivent le produit selon un contexte d’application spécifique. Dans notre cas, nous avons proposé un modèle relatif au contexte de conception. Mais il reste tout à fait

possible d’intégrer d’autres modèles en les interfaçant avec le modèle intrinsèque de manière à pouvoir cartographier les différents liens entre les informations, et donc entre les représentations.

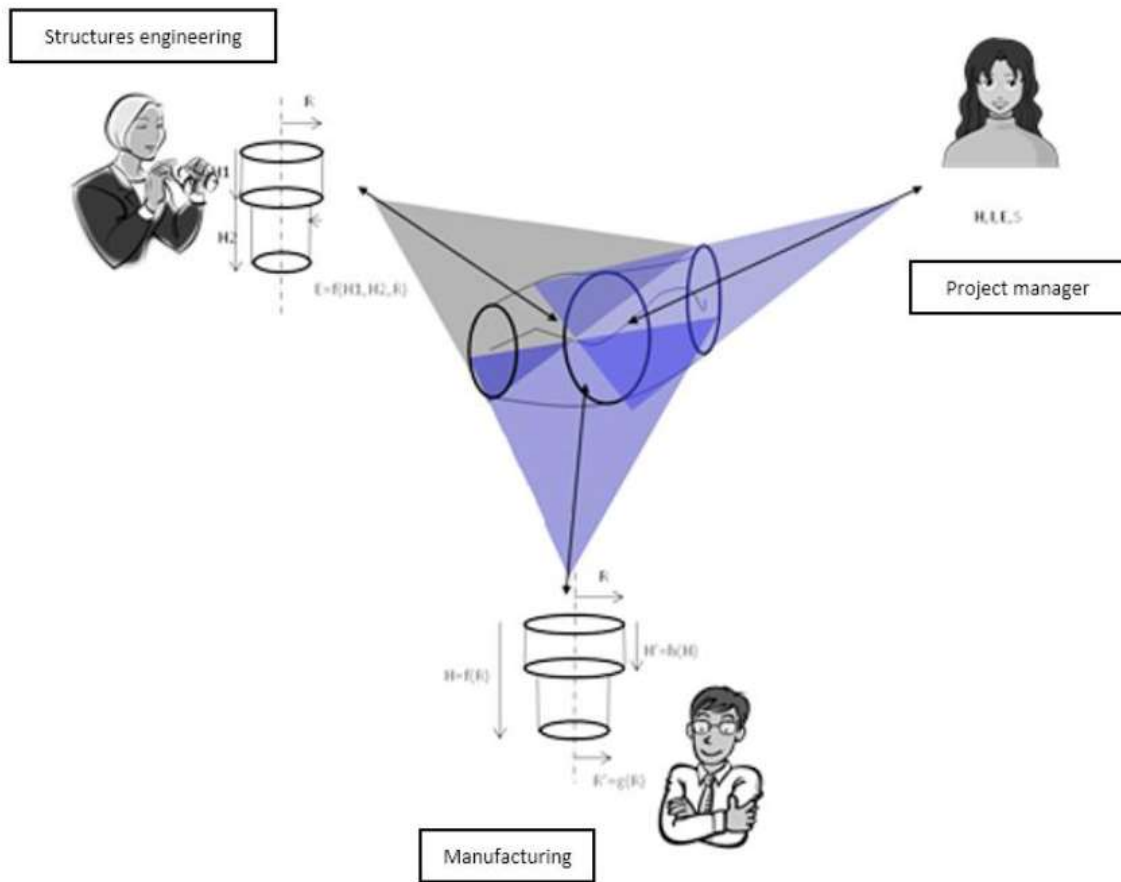


Figure 3.15 – Points-de-vue définis comme une vue et une sélection d’informations à partir d’un ensemble commun [Ouamer-Ali & al. 16]

Dans le but de gérer ces différentes représentations, il est possible d’utiliser une approche relative à la gestion des points-de-vue, en les différenciant grâce à la définition de leurs contextes respectifs. Pour cela, nous aurons besoin de définir ce qu’est le contexte de développement du produit, pour ensuite proposer un modèle qui nous permet de gérer les différentes représentations relatives aux contextes.

Nous parlons de contexte de développement du produit et non pas de rétro-conception du produit, parce que nous nous positionnons par rapport à la fin du processus de rétro-conception, où les informations qui résultent du processus seront utilisées. Nous avons parlé des trois objectifs principaux de la rétro-conception qui sont : la refabrication, le reengineering, et la reconception. Ces trois objectifs interviennent après le processus de rétro-conception certes, mais dans l’objectif de démarrer des processus ascendants qui prennent place dans le processus de conception de produits.

## II. L’élaboration du contexte de développement du produit

En essayant de répondre à la première question, nous nous sommes basés dans notre analyse sur la dichotomie du processus de développement, en le caractérisant d’un point-de-vue dynamique (relatif à une évolution dans le temps), à travers les processus de création et de transformation de l’information, et d’un point-de-vue statique (relatif à l’aspect dimensionnel de l’information), qui représente les états par lesquels passe le produit durant son développement (en d’autres termes les ensembles d’informations en entrées et sorties des processus). Cela nous a permis de mieux caractériser le problème, et d’identifier les paramètres qui permettraient d’élaborer les ensembles d’informations relatifs aux points-de-vues.

Chaque sous-processus du cycle de développement du produit est caractérisé par un ou plusieurs états du produit. Et chacun de ces états représentent un ensemble d’informations caractéristiques, relatives à un point-de-vue donné. On peut constater la présence d’un lien entre la structure d’informations relative à une représentation dans le contexte d’un sous-processus métier, et l’état dans lequel se trouve le produit avant la réalisation de ce sous-processus. Comme résultat, la représentation relative à un domaine d’expertise revient à utiliser une partie des informations du produit pour la construire, il serait donc plus pertinent de construire des modèles-produit sur lesquels seraient basées des représentations de celui-ci, plutôt que de créer des modèles de données basés sur ces représentations, pour après essayer de faire correspondre ces modèles à travers leur interopérabilité, afin d’identifier les relations entre ces représentations.

Donc, ces ensembles d’informations relatifs aux états du produit représentent les contextes locaux du développement de celui-ci : locaux parce qu’ils ne représentent qu’un ensemble d’informations qui caractérisent le produit selon des points-de-vue, et non pas le produit dans sa globalité.

Le produit est représenté de manières différentes selon le besoin des collaborateurs travaillant dans des métiers différents. La représentation du produit est donc relative au point-de-vue adopté par le collaborateur durant le processus de développement du produit. Pour cela, nous identifions la notion de point-de-vue comme étant un ensemble d’informations et de connaissances extraites de l’ensemble global des informations et connaissances du produit. On peut aussi le considérer comme étant un ensemble d’entités informationnelles sélectionnées dans le but d’obtenir un sous-ensemble d’informations partagées [Ouamer-ali & al. 16].

Il est possible de prédéfinir des points-de-vue tels que ceux dans la modélisation d’entreprise (MoDAF et ToGAF [Dijkman, 06]) qui ont pour but de supporter la construction descendante de l’information (approche descendante) dans le sens où chaque point de vue est relativement indépendant des autres. Le travail consiste alors en l’isolement des points-de-vue, qui définissent des frontières sans décrire les règles de transformation de l’information entre chaque couple de points-de-vue.

Le contexte de développement du produit regroupe plusieurs points-de-vue relatifs à celui-ci. Ces points-de-vue permettent de construire une vision locale sur le produit, qui permet d’intégrer les contraintes relatives à son élaboration (besoin du client). La réalisation finale du



produit consistera en l’intégration de tous ces points-de-vue, en veillant à résoudre les conflits possibles lors de l’intégration.

Finalement, le contexte de développement de produit peut être défini en termes de points-de-vue : le contexte de développement global du produit est un ensemble de contextes locaux relatifs à différents points-de-vue adoptés par les experts. Chaque point-de-vue permettra d’élaborer le produit selon un contexte et donc d’intégrer les contraintes de conception localement, pour ensuite élaborer le produit à travers l’intégration de tous les points-de-vue pris en compte.

Le contexte de développement du produit est constitué de deux composantes principales :

- Une composante relative au contexte temporel : le produit est défini dans le temps et a une vie. C’est ce qu’on appelle le cycle de vie du produit.
- Une composante relative au contexte dimensionnel où sont regroupés les différents ensembles d’informations suivants :
  - Les informations intrinsèques au produit : c’est-à-dire les informations qui permettent de décrire le produit réalisé. Elles peuvent être globalement identifiées en matière/matériau (physique) et formes (géométrie et topologie)
  - L’environnement externe du produit dans les différentes phases de son cycle de vie. En effet, l’environnement du produit évolue selon le stade dans lequel est son développement.
  - Les informations relatives au domaine de spécialisation du concepteur du produit. Selon le domaine d’expertise, on ne porte pas le même regard sur le produit. Il va être différent en fonction du domaine dans lequel il est analysé.

Cette vision du contexte de développement va nous permettre, en nous basant sur notre proposition du modèle-produit d’élaborer une méthode de gestion de la multi-représentation qu’on intégrera dans le processus de rétro-conception. De ce fait, à partir d’une structure d’informations, on pourra fournir plusieurs représentations possibles selon les contextes visés.

### III. Le concept de facettes d’informations

Dans le but de fournir une réponse par rapport à la constitution de représentations du produit relatives à différents contextes, nous proposons le concept de facettes d’informations. Notre première motivation a été relative aux manques des concepts, techniques, et méthodes actuelles relatives à l’organisation et la structuration des connaissances. Nous avons constaté que les représentations effectives du produit étaient le point de départ concernant l’élaboration de modèles ou d’outils pour l’aide à la conception. Dans notre vision, la représentation résulte de la construction d’un modèle global intégrant tous les concepts relatifs au produit, et à l’élaboration d’ensembles d’informations relatives à un contexte d’utilisation dans le processus de développement du produit. Chaque ensemble d’informations est alors une représentation qui est relative au point-de-vue adopté par un expert lors de la réalisation d’un processus.

De la même manière, dans la rétro-conception, ce qui compte c’est de récupérer les informations du contexte dans lequel a été développé le produit, et de ce fait créer une représentation qui va

être utilisée dans le but de réintégrer les informations partiellement ou totalement, pour reconstruire tout, ou une partie de l’objet.

Le concept de facettes d’informations est notre réponse par rapport aux manques identifiés dans les autres solutions. Il a été proposé dans le but d’améliorer l’accès à l’information, tout en prenant en compte la collaboration entre les différentes équipes en créant et gérant des points-de-vue (en d’autres termes des présentations). L’idée principale à partir de laquelle a émergé le concept est l’évolution possible de la représentation du produit. Dans l’état de l’art, d’une part, les outils CAO accentuent le travail sur les représentations géométriques et topologiques du produit restreignant ainsi la vision globale du produit à une représentation structurale de bas niveau. D’autre part, les systèmes PLM proposent un cadre qui permet de gérer les informations globale du produit, basé sur la gestion de différents artefacts d’informations d’entreprise (fichiers et livrables) qui, cependant, ne permet pas de créer des représentations spécifiques, ni d’améliorer la collaboration en prenant en compte les entités d’information élémentaires.

A partir de ces observations, on peut imaginer une solution qui regroupe les avantages des deux types de solutions citées précédemment, en intégrant plusieurs représentations du produit à sa description. Ces représentations ne constitueront pas la description du produit, mais seront générées à partir de celle-ci. Le but ultime serait d’améliorer les outils CAO, en les rendant capables d’intégrer différents types d’informations, en se basant sur des modèles de données reliés entre eux, permettant la traçabilité de l’information.

Ce concept permettra de caractériser les points d’entrée et de sortie du processus de rétro-conception, pour faciliter la gestion de ce même processus.

### 1. Définition du concept

La facette est un ensemble d’informations impliquant quatre perspectives principales relatives au développement produit, comme indiqué dans la figure 3.16, et qui sont :

- La perspective « temporelle » (relative au cycle de vie du produit).
- La perspective « produit » (relative aux informations et connaissances du produit – modèle-produit).
- La perspective « métier » (relative aux informations et connaissances métier).
- La perspective « système » (relative à la décomposition systémique du produit).

La facette permet donc la caractérisation statique du produit (état dans lequel se trouve le produit à l’instant T, au regard d’un contexte) qui permet d’élaborer des représentations du produit relatives à un contexte donné).

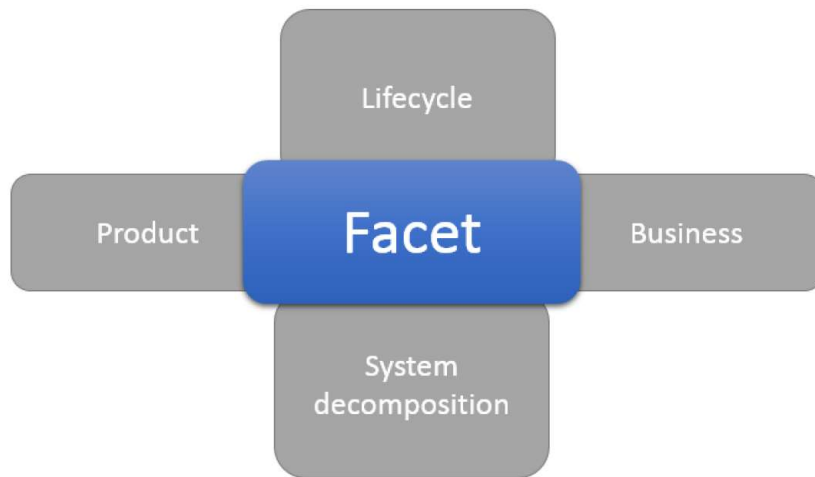


Figure 3.16 – Définition de la facette qui regroupe différentes perspectives

#### a. Le cycle de vie du produit

La perspective « temporelle » permet de définir le niveau de complétude de l'information relative au résultat d'optimisation de la pièce, en d'autres termes, les résultats intermédiaires par lesquels passe le processus d'optimisation.

Le produit passe à travers différents processus distribués entre les différentes phases de son cycle de vie. La notion de temps dans le développement de produit est primordiale puisqu'elle nous permet d'orchestrer l'élaboration du produit, en partant du besoin jusqu'à sa réalisation finale tout en prenant en compte les ressources à disposition et les moyens nécessaires. En prenant en compte le concept du cycle de vie, l'idée de développer un produit a globalement un chemin bien spécifique.

En résumé, le produit passe par différentes phases de vie au cours desquelles sa forme mue jusqu'à sa réalisation physique, sa maintenance, puis sa mise au rebut. Le cycle de vie du produit permet de caractériser cette mue en définissant un cycle par lequel passe le produit durant sa vie. La mue en question concerne l'évolution des états du produit durant sa conception et son développement, de ce fait, elle s'identifie aux différentes transformations de l'information et des connaissances à travers les différents sous-processus qu'on retrouve dans la conception et le développement de produits. Comme résultat, on aura une relation entre les différentes représentations possibles du produit avec ses différentes phases de vie. Finalement, le cycle de vie du produit caractérisera dans le concept de facettes d'informations l'axe temporel de référence.

#### Les modèles-produit

La perspective « produit » permet de regrouper l'ensemble des informations relatives au produit, comme par exemple la structure d'un composant produit (géométrie et matière) avec ses fonctions techniques.

Le modèle-produit est la composante principale du concept de facettes d'informations puisqu'ils regroupent toutes les informations dont on a besoin pour construire des représentations du produit.

Dans notre cas, le recours à un modèle intrinsèque pour représenter les informations physiques du produit, relatives à la forme et à la constitution (matériaux) nous facilite la tâche puisqu’il nous permet de focaliser la construction d’une représentation physique du produit sur laquelle seront construites d’autres représentations relatives.

Les représentations relatives permettent d’intégrer des connaissances de différents domaines d’expertise, et ainsi, de pouvoir créer des représentations spécifiques à des contextes particuliers.

### Les modèles métier

La perspective « métier » permet de regrouper l’ensemble des informations métier qui vont permettre de réaliser le processus métier en question comme par exemple les algorithmes d’optimisation de la masse d’un composant mécanique dans l’analyse de sa structure.

Dans [Kleiner & al. 03] les auteurs ont introduit le concept de contraintes interdisciplinaires dans le but de relier les contraintes de chaque point-de-vue métier au modèle-produit, comme indiqué dans la figure 3.17. Ce concept permet l’interconnexion entre les différentes contraintes de conception relatives aux métiers, en les reliant aux informations intrinsèques au produit, afin d’améliorer la collaboration, tout en facilitant la gestion des conflits.

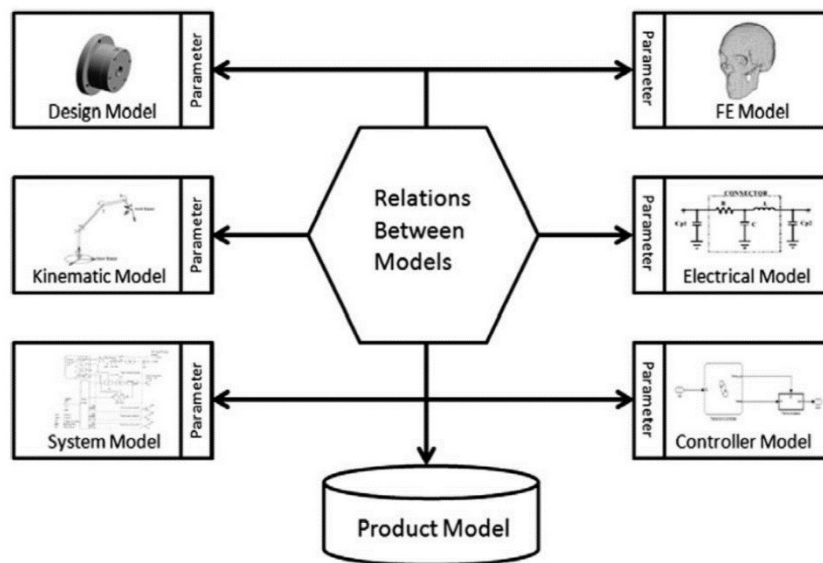


Figure 3.17 – Le concept de contraintes interdisciplinaires [Kleiner & al. 03]

Ce concept permet donc de relier les différentes représentations au modèle-produit. Tous les modèles ont pour base une représentation principale du produit. Nous nous plaçons dans ce contexte pour établir une relation entre le modèle principale (qui n’est autre que le modèle intrinsèque dans notre contexte), avec les modèles relatifs.

### La représentation systémique des produits

La perspective « système » est utilisée ici principalement pour identifier le niveau de décomposition du système en question.

Dans la majeure partie des cas, nous ne traitons pas des produits simples (composants) mais plutôt des produits complexes composés de plusieurs sous-produits. Nous parlons alors d’un

système. La conception et le développement d’un système sont plus complexes que celle d’un composant simple, du fait du nombre de composants qu’il regroupe. Le développement d’un système doit non seulement considérer chaque composant tout seul, mais aussi leur intégration dans un ensemble cohérent, en évitant les conflits qui peuvent conduire à des défauts dans le produit ou, pire encore, présenter des risques aux utilisateurs. De manière simple, le système est éclaté en parties élémentaires développées une à une, puis intégrées dans un environnement global qui est le système.

## 2. Objectif du concept

L’objectif principal du concept de facettes d’informations est de fournir une base conceptuelle permettant de caractériser le produit dans son cycle de vie, et plus spécifiquement dans sa phase de développement. Cette caractérisation permet de définir différentes facettes d’informations (points-de-vue) permettant aux différents acteurs de recevoir les informations qui leurs sont pertinentes dans leurs processus, tout en assurant une bonne traçabilité de l’information. Ce concept permet donc de proposer un niveau d’abstraction supplémentaire, quand il s’agit d’accès à l’information par le collaborateur. Plutôt que de laisser le collaborateur chercher l’information dans un vaste silo de données (systèmes PLM), ce concept lui fournit directement les informations dont il a besoin quand il le faut et de la manière la plus adéquate.

Dans le contexte de la rétro-conception, le concept de facettes d’informations permettra d’organiser les informations et connaissances extraites à partir des données hétérogènes dans le but de fournir une représentation du produit la plus pertinente, comparée au contexte dans lequel se place l’utilisateur. Cela se traduira par un modèle de gestion des informations et connaissances, qui fournit à l’utilisateur les ressources dont il a besoin dans la suite du processus de la rétro-conception. Nous pouvons illustrer ceci par l’exemple de la refabrication du produit, où l’utilisateur aura essentiellement besoin des informations structurelles du produit, associées aux différentes connaissances du métier de la fabrication pour lui permettre de rapidement passer du processus de rétro-conception vers le processus de fabrication de la pièce.

## IV. Formalisation du concept et son utilisation

A partir d’un noyau d’information produit, caractérisé par un modèle-produit qui regroupe l’ensemble des informations et connaissances intrinsèques au produit, on regroupe l’ensemble des modèles métier autour de cette même référence (figure 3.18). Le modèle-produit caractérisera le produit à un niveau d’abstraction bas, tandis que les informations métier permettront d’élaborer des représentations du produit à un niveau élevé, qui ne peuvent être construites sans elles et qui ne peuvent être déduites de la simple analyse géométrique du produit sans les connaissances métier.

Cette représentation en niveaux permettra donc d’identifier les liens entre les représentations du produit (points-de-vue), et les informations intrinsèques au produit. N’importe quel changement qui s’opère au niveau de la représentation pourra ainsi impacter les informations produit qui y sont relatives, et par transitivité, les autres représentations de celui-ci. Donc, nous aurons comme effet de bord une meilleure détection des conflits entre les différentes contraintes émanant des différentes représentations.

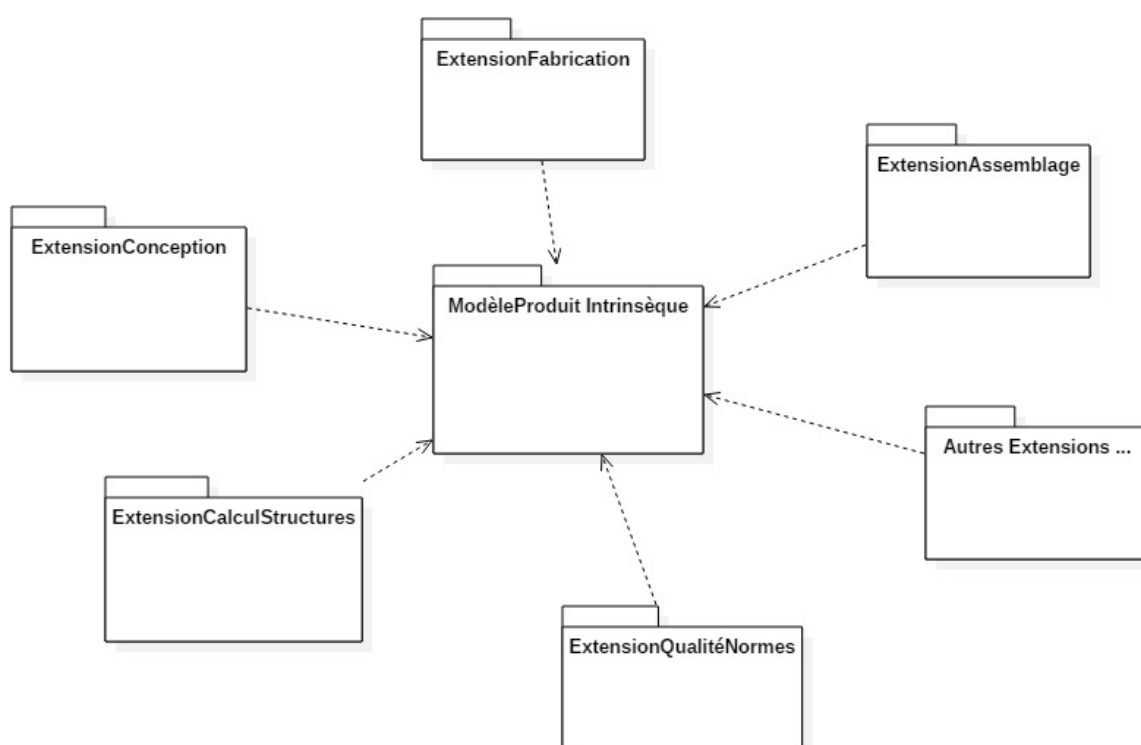


Figure 3.18 – Connections entre les points-de-vue « métiers », et le point-de-vue « produit »

L’intégration de l’ingénierie système interviendra dans la décomposition du système analysé et la reconnaissance des différents composants intervenants dans sa réalisation. En d’autres termes, cette perspective nous permettra d’identifier la structure du système en question, et d’établir sa nomenclature.

Dans le tableau 3.1 ci-dessous, nous pouvons voir quelques exemples de différentes facettes d’informations qui définissent les contextes dans lesquels sont conduits certains processus.

Facets	Product perspective	Business perspective	System perspective	Lifecycle perspective
Fc1	Product Structure	Structural engineering Mass optimization	Gearbox casing	Design
Fc2	Geometry	Thermoplastic molding	Inlet manifold	Manufacturing
Fc3	Topology	Engine architectural design	Engine	Design
...	...	...	...	...

Tableau 3.1 – Quelques exemples de facettes d’informations

Dans notre contexte de rétro-conception, le concept de facettes d’informations peut être utilisé de deux manières différentes.

La première concerne l’objectif final de la rétro-conception. En effet le concept de facettes d’informations permet de construire une représentation relative du produit qui est dépendante de la finalité de la rétro-conception voulue. Nous avons exploré dans l’état de l’art les différentes finalités pour lesquelles la rétro-conception était réalisée. Nous avons pu identifier trois finalités principales qui sont : la reconception, le reengineering, et la refabrication des produits.

La reconception nous permet de reconcevoir le produit en s’appuyant sur une représentation d’un niveau d’abstraction élevé, relative aux exigences et contraintes auxquelles doit répondre le produit. Dans ce cas, la facette sera basée sur les informations fonctionnelles du produit, et le processus de rétro-conception visera ces informations-là en priorité en utilisant les algorithmes d’extraction adéquats, et les données hétérogènes correspondantes.

De la même manière que pour la reconception, le reengineering et la refabrication auront recours au concept de facettes d’informations pour élaborer des représentations qui correspondent à ces deux finalités : des informations comportementales et structurelles pour la première, et des informations purement structurelles pour la deuxième.

De cette façon, le processus de rétro-conception peut être optimisé de manière à atteindre son objectif en se basant sur les données hétérogènes présentes, ainsi que les différents algorithmes d’extraction capables d’être utilisés.

La deuxième concerne les objectifs intermédiaires de la rétro-conception. Le processus global de la rétro-conception est un ensemble de sous-processus qui s’occupent de l’analyse de données sur le produit, et de l’extraction d’informations à partir de ces données. Chacun de ces sous-processus peuvent être considérés comme étant un processus de rétro-conception à part entière, et en fonction de la proximité (ou non) de l’objectif principal de la rétro-conception par rapport aux données en entrée, il peut être décomposé (ou non) en plusieurs sous-processus intermédiaires.

Dans ce cas, la rétro-conception devient un ensemble de sous-processus capables d’être caractérisés de la même manière que le processus principal, à savoir : l’utilisation du concept de facettes d’informations pour déterminer l’état de l’information, et du processus de rétro-conception. Alors, le concept de facettes d’informations devient un outil intéressant dans la formalisation des processus intermédiaires avec les objectifs intermédiaires des sous-processus de rétro-conception. Cela permettra de cartographier les différents sous-processus intervenants dans le processus principal de la rétro-conception.

En résumé, le concept de facettes d’informations peut lui-même être considéré comme une représentation statique quand il s’agit de finalité, mais aussi comme un élément qui définit la dynamique du processus de rétro-conception, où il caractérisera les différents états statiques des sous-processus de rétro-conception qui détermineront à leur tour l’état dynamique global du processus principal de la rétro-conception.

Nous explorerons cette deuxième façon d’utiliser le concept de facettes d’informations dans la partie suivante, qui traitera de l’aspect dynamique (processus) de la méthodologie de rétro-conception proposée. Il nous permettra de bâtir un concept qui caractérise la dynamique du



processus de rétro-conception. Mais avant de pouvoir faire cela, nous aurons besoin de modéliser le concept de facettes d’informations dans le but de l’implémenter dans une solution d’aide à la rétro-conception.

## V. Modélisation du concept de facettes d’informations

A partir de la définition précédente d’une facette, nous pouvons donc proposer un premier modèle permettant de caractériser une facette, et de structurer les différentes informations et connaissances dont on a besoin pour la construire et la gérer.

La figure 3.19 représente le diagramme de classes sous UML du modèle de facettes d’informations. Ce modèle regroupe les différents éléments d’informations de manière à composer une facette.

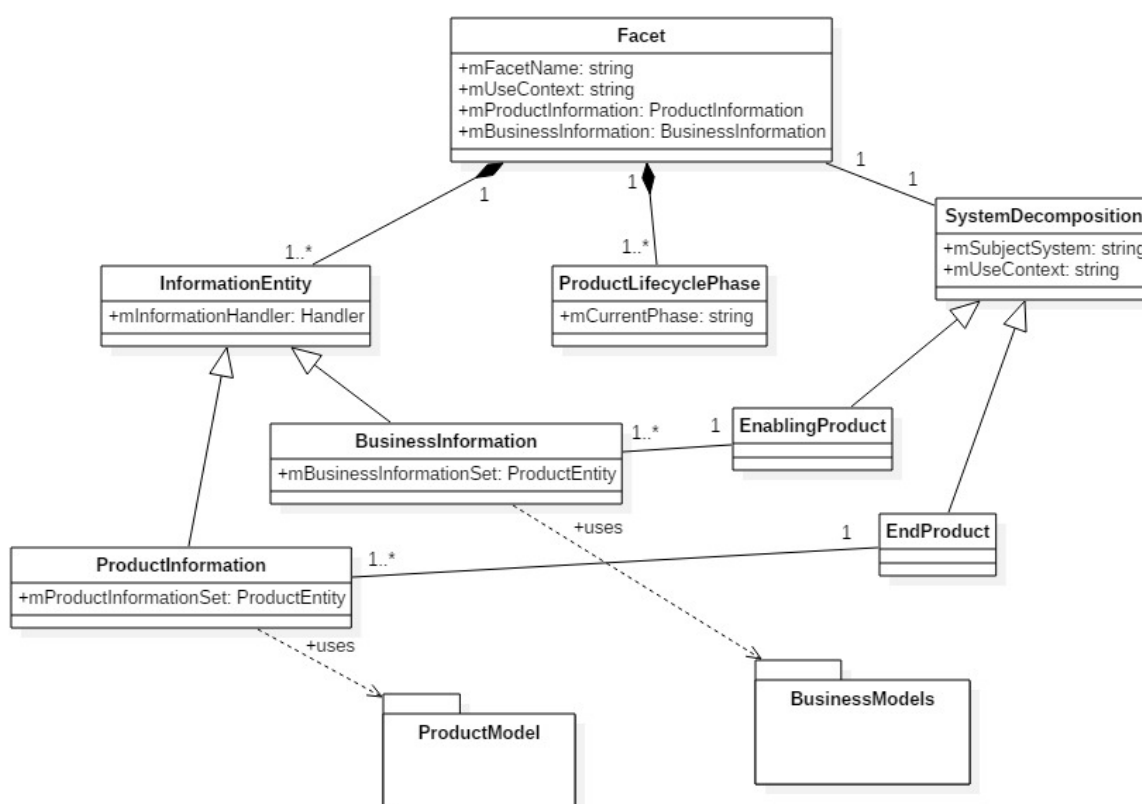


Figure 3.19 – Diagramme de classes du modèle de facettes d’informations

La classe principale du modèle est « Facet » qui, comme son nom l’indique, décrit une facette. Chaque objet correspondant à la classe « Facet » est composé de plusieurs entités d’information, et d’une phase du cycle de vie du produit. Comme expliqué précédemment, le concept de facettes d’informations regroupe un ensemble d’entités d’informations dans le but de créer une représentation spécifique à un contexte. Il est donc tout à fait logique de créer des classes dans le modèle qui gèrent les différents ensembles d’entités selon leurs natures.

Les entités d’informations sont décrites par la classe « InformationEntity » qui regroupe toutes les entités d’informations relatives au produit, ainsi qu’au processus métier dont on a besoin



pour constituer une facette. La classe « InformationEntity » se spécialise d’ailleurs en « ProductInformation » qui permet de faire le lien avec informations du modèle-produit (représenté par le package « ProductModel »). En d’autres termes, le package sera remplacé par le modèles-produit (modèle intrinsèque) afin de faire apparaître ses différentes entités d’informations, et accéder aux différentes informations qu’elles contiennent. La classe « InformationEntity » se spécialise aussi en « BusinessInformation » qui permet de faire le lien avec les informations du modèle métier (représenté par le package « BusinessModels »). De la même manière, le package sera remplacé par les différents modèles relatifs dans le but d’accéder aux entités qu’ils regroupent, et aux informations qu’elles contiennent. (Un schéma global contenant tous les modèles est présenté plus tard – page 130)

Cette partie permet donc de sélectionner les informations dont on a besoin pour constituer une facette, à partir des différentes informations contenues dans les ensembles de description du modèle-produit et du modèle-métier. Pour cela, on utilisera les différents modèles évoqués dans la partie précédente, notamment le modèle intrinsèque et les modèles relatifs, puisque les modèles métier sont des modèles relatifs qui permettent de décrire le produit d’un point-de-vue propre au métier qui l’utilise.

La classe « ProductLifecyclePhase » permet de se placer dans l’échelle temporelle et de caractériser l’état du produit à cet instant dans la vie du produit. Ainsi, si un processus est présent dans plusieurs phases du cycle de vie du produit, la maturité de l’information sur le produit ne sera pas la même (un produit en conception n’est pas au même niveau de maturité qu’un produit en utilisation ou en fin de vie).

La classe « SystemDecomposition » représente la décomposition systémique et, est responsable de la structure des entités d’information de la facette. Sa fonction principale est de caractériser les informations propres à la définition du produit à travers la classe « EndProduct » qui prend en compte les informations sur le produit, et la définition des moyens et ressources utilisables dans le processus pour la transformation des entrées, et cela à travers la classe « EnablingProducts ». Cette décomposition systémique nous permettra de créer des liens entre les informations « produit » et les informations « métier » de manière à fournir un ensemble global d’informations utilisables dans le processus.

## VI. Conclusion de la partie

Dans cette partie nous avons introduit le concept de facettes d’informations qui a pour objectif de gérer les informations et connaissances relatives aux processus de conception et de développement de produits dans le but de gérer la multi-représentation du produit.

Ce concept se base sur l’idée que chaque équipe de travail a une perspective spécifique, différente des autres. Chaque perspective correspond à des informations et connaissances qui constituent le contexte du processus métier relatif à l’équipe, en d’autres termes les entrées et sorties, ainsi que les ressources utilisées pour réaliser le processus.

Une facette est alors constituée de quatre éléments principaux, lui permettant de définir les informations et connaissances du contexte du processus métier.

Le premier élément est relatif à la représentation des connaissances produit à travers la mise en place d’un modèle-produit. C’est ce modèle qui permettra de décrire le produit dans tous ses aspects. Le deuxième élément est relatif à la représentation des connaissances métier des équipes de travail. Pour cela, chaque équipe utilise différents types de connaissances permettant ainsi de réaliser des processus métier différents (conception, fabrication, analyse, optimisation, assurance qualité, etc.). Le troisième élément permet, quant à lui, d’associer les deux premiers éléments en intégrant la notion de système. Le quatrième élément vient jouer le rôle de référence temporelle, en plaçant le curseur chronologique par rapport au cycle de vie du produit. De cette manière, on peut identifier à quel niveau intervient le processus métier visé par la facette correspondante.

Un modèle de gestion de facettes d’informations, basé sur la définition précédente permet de structurer de manière opérationnelle les différents éléments entre eux, et cela afin de créer un niveau d’abstraction supplémentaire où la gestion ne se fait plus au niveau des informations et connaissances, mais plutôt au niveau des facettes d’informations.

Dans le processus de rétro-conception, le concept de facettes d’informations nous permet de caractériser la représentation visée par le processus de rétro-conception.

En fonction de l’objectif visé par la rétro-conception d’un produit, il est possible de réaliser plusieurs opérations en utilisant les résultats issus du processus de rétro-conception. En effet, dans le cas où on vise à réaliser la reconception d’un produit, il est souvent utile de chercher une représentation du produit à un niveau d’abstraction élevé, où la représentation géométrique n’est pas forcément d’utilité. Nous pouvons pour cela imaginer réutiliser les différentes exigences et contraintes qui ont servi à concevoir le produit initialement, en changeant d’implémentation physique ou en améliorant ces exigences. Si dans la même situation l’objectif était de refabriquer le produit, alors les informations sur l’enveloppe physique avec les informations sur les matériaux auraient pu être suffisantes.

Le concept de facettes d’informations vient donc compléter les différentes parties du modèle-produit en lui attribuant un niveau d’abstraction supplémentaire pour ainsi faciliter la gestion des différentes représentations possibles, issues du processus de rétro-conception.

Ainsi, nous avons pu proposer une solution pour mettre en place une approche modulaire de la rétro-conception, où elle peut être utilisée selon les finalités présentées (reconception, refabrication, reengineering). Il est même possible d’utiliser ce concept dans le but d’élaborer des finalités hybrides ou nouvelles. En effet, la modularité offerte par le concept de facettes d’informations nous permet de créer un grand nombre de combinaisons d’informations de manière à convenir à un besoin spécifique, et pas seulement les trois finalités classiques.

Nous avons pu répondre à la deuxième question, relative à la structuration des informations et connaissances dans le processus de rétro-conception en utilisant les différentes parties du modèle-produit traitées dans la partie précédente de ce chapitre.

Nous avons pu aussi proposer une première réponse relative à l’intégration des différents objectifs de rétro-conception afin d’améliorer la méthodologie globale. En résumé, la méthodologie de rétro-conception peut être améliorée de manière globale, en prenant en compte

dans un premier temps l’intégration des connaissances, comme indiqué dans le chapitre de l’état de l’art, mais aussi en prenant en compte les différents objectifs pour lesquels la méthodologie est utilisée.

Nous allons aussi voir dans la partie suivante que l’utilisation du concept de facettes d’informations ne s’arrêtera pas à sa simple implémentation en sortie du processus de rétro-conception, mais peut être utilisé tout au long du processus de manière à cartographier les différents sous-processus auxquels a recours le processus global de rétro-conception.

# Le concept Ki4D pour l’organisation du processus de rétro-conception

Dans la partie précédente, nous avons pu clarifier la problématique relative à la représentation des informations produit d’un point-de-vue statique, et répondu à celle-ci avec la proposition du concept de facettes d’informations. Maintenant, nous nous tournons vers l’aspect dynamique du processus de rétro-conception, où nous explorerons la création et la transformation de l’information et des connaissances.

Le concept de facettes d’informations permet certes de définir les représentations qui résultent de l’aboutissement du processus de rétro-conception selon un objectif spécifique. Il permet aussi de déterminer les différents contextes dans lesquels sont réalisés les sous-processus de rétro-conception des produits, à travers la mise en place de représentations relatives aux contextes de ces sous-processus, qui permet d’avoir une image de l’état dans lequel se trouve le produit. Nous allons voir dans cette partie comment le concept de facettes d’informations peut être utilisé de cette manière.

L’aspect statique évoqué précédemment est relatif à l’image figée de l’état du produit à la sortie du sous-processus, mais aussi caractérisera les entrées du sous-processus suivant. Ainsi, le système préparera la réalisation du sous-processus qui lui incombe en regroupant un ensemble d’informations relatives aux ressources ainsi que les données d’entrée dont il a besoin pour mener à bien son processus. Par exemple, pour la fabrication d’une pièce, le technicien dans l’atelier aura besoin de la gamme d’usinage relative aux opérations à effectuer pour réaliser l’objet, ainsi que les différentes caractéristiques de l’objet, et cela intervient à une phase spécifique de la vie du produit, qui peut être relative au développement comme pour la réalisation d’un prototype physique, ou à la fabrication, pour la réalisation d’un produit final commercialisable.

Le concept de facettes d’informations permet donc de définir les points d’entrée et de sortie des processus, puisqu’ils caractérisent les informations relatives aux ressources nécessaires à la réalisation d’un processus ou d’une activité.

Pour définir une nouvelle méthodologie de rétro-conception, la caractérisation des informations relatives au produit ne suffisent pas à réaliser les tâches relatives à son processus, il faudra donc explorer les différentes transformations de ces ressources afin de pouvoir proposer une vision de cette nouvelle méthodologie qui soit formalisée.

Nous abordons donc dans cette partie la formalisation du processus de rétro-conception du point-de-vue dynamique et proposerons un concept qui nous aidera dans cette démarche de formalisation, et permettra de caractériser ce processus, en explorant les différents sous-processus et activités relatifs à la rétro-conception.

## I. Formaliser le processus de rétro-conception

La rétro-conception classique regroupe un ensemble de techniques qui permettent de capturer la forme d’un objet. Elles sont regroupées en un processus simple permettant de transformer des données brutes issues de la digitalisation de la forme de l’objet à l’aide d’outils spécifiques, en un modèle 3D.

Dans notre définition de la rétro-conception, toutes formes d’informations peuvent être utilisées pour retrouver le contexte dans lequel a été développé le produit. Nous faisons une analogie avec une rétro-conception complètement manuelle, où le rétro-concepteur doit trouver toutes les informations nécessaires à l’élaboration d’un modèle du produit à rétro-concevoir. Il aura donc à lire différents documents relatifs au produit, formels ou informels, retrouver des images qui lui permettent d’avoir une représentation géométrique suivant une perspective, des plan 2D pour retrouver les détails de la géométrie du produit, et toute autre information qui peut être exploitable. Ainsi, la proposition de la nouvelle méthodologie de rétro-conception se verra intégrer de nouveaux types de données et d’informations dans le processus de rétro-conception dans le but de recréer des représentations du produit à un haut niveau d’abstraction.

La nouvelle méthodologie de rétro-conception prendra ainsi en compte différents types de données en entrée du processus, qui seront de natures différentes, ce qui générera autant de processus de rétro-conception que de types de données possibles. En considérant chaque processus relatif à un type de données comme étant un sous-processus d’un processus global de rétro-conception qui permet de prendre en compte différents types de données, on aura alors notre nouvelle méthodologie.

Il est donc nécessaire de formaliser le processus de rétro-conception en termes de sous-processus relatifs à l’analyse de différents types de données. Pour cela, il faudra identifier chaque type de données qui doit être pris en compte, ainsi que les différents traitements possibles afin de réaliser les opérations d’extraction des informations et connaissances pertinentes dans le contexte de rétro-conception.

Dans le même but, il faudra identifier les différentes informations et connaissances relatives à chaque type de données, qui permettront de réaliser les sous-processus de rétro-conception. Ces connaissances joueront le rôle de références qui permettront d’élaborer les représentations du produit à un haut niveau d’abstraction à partir de données brutes. Cela se traduit par la mise en place des couples de formes de représentation avec les différentes entités du modèle-produit, et ainsi identifier dans chaque donnée hétérogène, l’information visée. Nous avons déjà proposé dans les parties précédentes des solutions possibles pour répondre à chacune de ces tâches à réaliser dans l’élaboration de ce nouveau processus de rétro-conception. Dans cette partie, nous intégrerons les différentes solutions proposées pour arriver à un processus global.

### 1. Formalisation relative au produit

La vision de la rétro-conception relative au produit change d’une représentation géométrique du produit, en décrivant sa géométrie et sa topologie, vers une description plus généralisée se basant sur des aspects complémentaires tels que l’aspect fonctionnel ou l’aspect comportemental du produit. Il est alors nécessaire de faire évoluer la vision de la rétro-

conception relative au produit, en intégrant un ensemble de connaissances et d’informations qui permettent d’élaborer cette nouvelle façon de décrire le produit.

Le concept de facettes d’informations présenté précédemment permet de décrire l’objet en utilisant un ensemble d’informations relatives à un contexte spécifique. Il a été construit sur la base d’un ensemble d’informations global permettant de décrire le produit dans le contexte de son développement.

En se basant sur le même ensemble d’informations que celui des facettes d’informations (modèle-produit), il est alors possible de construire une description du produit qui englobe les aspects relatifs au produit, autres que celui de la forme. On pourra ainsi prendre en compte les aspects fonctionnel et comportemental, en plus de l’aspect structurel.

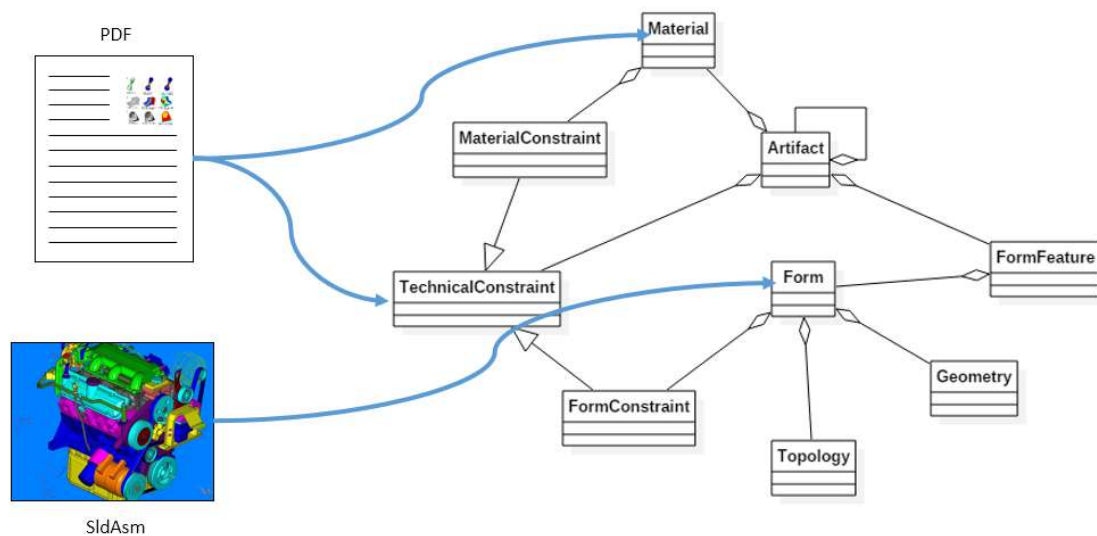


Figure 3.20 – Extraction et structuration des informations à partir des données hétérogènes

L’élaboration de la description du produit à partir des données brutes nécessite l’utilisation de processus d’extraction d’informations, et la construction de représentations du produit à partir d’informations et connaissances qui concordent avec les informations extraites. A l’image de la figure 3.20, il faudra alors utiliser les liens qui permettent de prendre les informations et connaissances pertinentes, extraites à partir des données hétérogènes, et de les structurer selon la description faite du produit.

Dans la partie relative à l’intégration des données hétérogènes, nous avons pu identifier le lien entre les données hétérogènes en entrée, et les connaissances et informations du produit structurées selon sa description dans le contexte de la rétro-conception à travers les couples de formes de représentation et les entités d’information produit. Nous verrons plus tard que ce lien sera implémenté par les sous-processus de rétro-conception relatifs à chaque donnée hétérogène.

## 2. Formalisation relative au processus

Après la formalisation relative au produit, il nous faudra formaliser le processus de rétro-conception en identifiant les différents éléments de processus (c’est-à-dire les plus petites

parties du processus qui ne peuvent être subdivisées) et les activités qui composent la rétro-conception.

Pour cela nous nous basons sur les résultats obtenus de la formalisation de la méthodologie de rétro-conception relative au produit. En effet, le processus global de rétro-conception va utiliser un ensemble de données de types différents qui suppose l’intégration de mécanismes d’analyse pour chaque type de donnée. Nous aurons donc un processus de rétro-conception éclaté en sous-processus relatifs à chaque type de donnée intégrée au processus, qui permettront de formaliser des activités de transformation des informations extraites des données brutes.

Donc la formalisation du processus global de la rétro-conception doit pouvoir décrire les différentes opérations relatives à la rétro-conception, tout en prenant en compte le contexte produit. Le processus de rétro-conception sera divisé en autant de parties que d’éléments qui constituent le contexte du produit (figure 3.21).

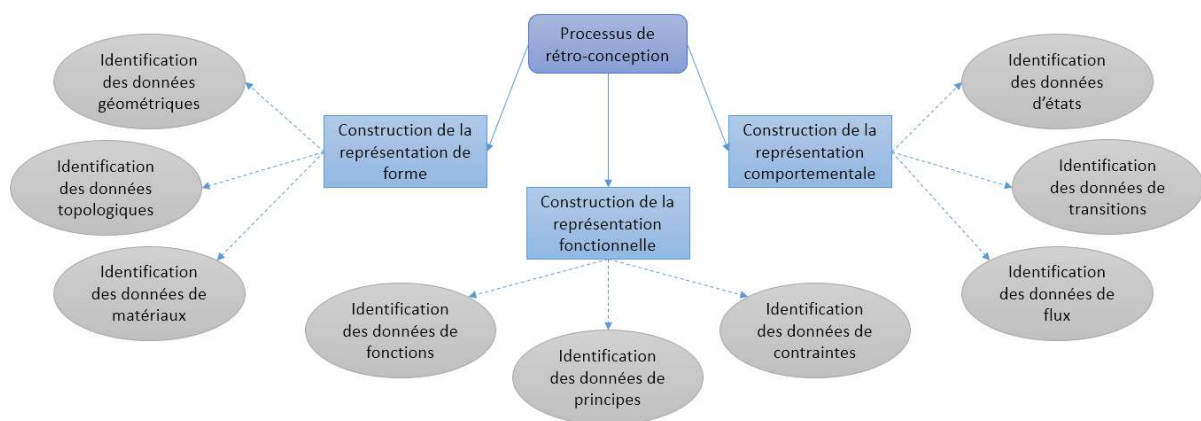


Figure 3.21 – Cartographie des activités du processus de rétro-conception

Dans la partie de l’état de l’art relative à la rétro-conception (p.25), nous avons présenté les objectifs de la rétro-conception, qui sont : la refabrication, la reconception, ou le reengineering. Ces trois objectifs sont les plus communs, mais on peut imaginer l’utilisation de la rétro-conception dans d’autres circonstances. Dans ce cas, l’élaboration du processus de rétro-conception ne se concentrera pas sur des résultats qui correspondront aux objectifs présentés, mais plutôt sur une sortie du processus qui dépendra de la volonté de l’utilisateur d’exploiter un certain nombre de résultats. Pour cela, l’idée de créer un processus de rétro-conception modulaire nous paraît être la solution la plus adéquate, d’autant plus que l’émergence de nouveaux objectifs de la rétro-conception ne mettra pas à mal cette nouvelle méthodologie.

Donc, plutôt que de fournir un processus simple et direct pour la rétro-conception, il faudra fournir un ensemble de sous-processus modulables, et cela dans le but de prendre en compte différentes configurations des résultats de la rétro-conception utilisables dans différents contextes. La modularité de ces sous-processus permettra alors de créer non pas un processus de rétro-conception relatif à un objectif, mais ciblera plusieurs utilisations possibles de la rétro-conception, selon le besoin (figure 3.22).

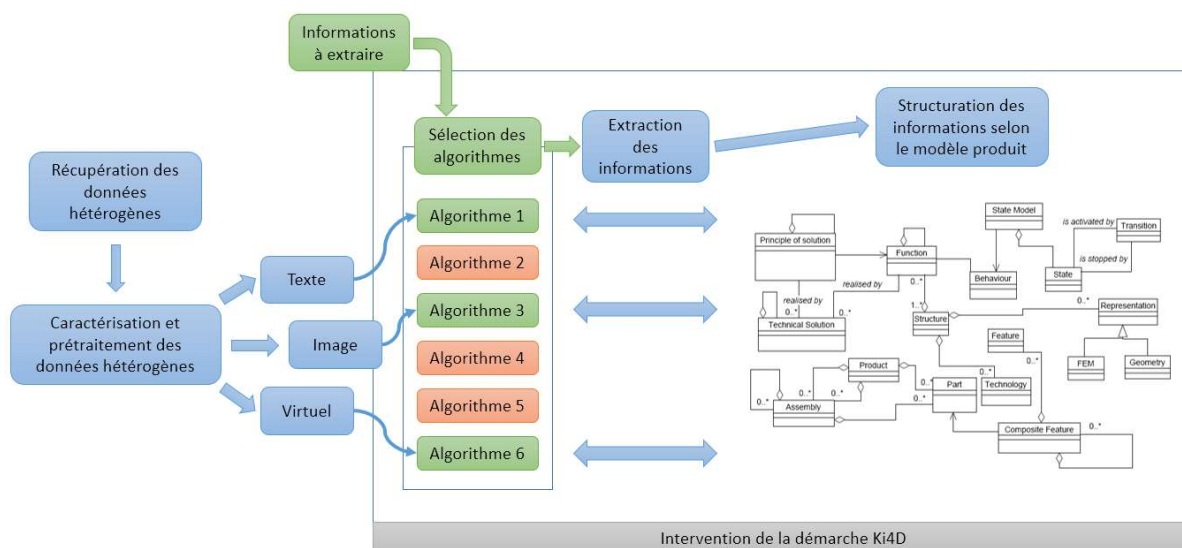


Figure 3.22 – Périmètre de mise en place et d’intervention de la démarche Ki4D dans le processus de rétro-conception

## II. Le concept Ki4D

Selon la définition élaborée dans le chapitre 2, la rétro-conception est le processus d’analyse d’un artefact, qui permet d’identifier les différentes informations et connaissances relatives à celui-ci à travers l’analyse des données de l’artefact, de types et de sources hétérogènes, et l’élaboration de différentes représentations de l’artefact à des niveaux d’abstractions plus élevés, qui permettent de le remettre dans son contexte selon la phase de vie de l’artefact voulue. Plusieurs concepts importants ressortent de cette définition, dont les deux qui vont nous permettre de construire la base de notre démarche de proposition d’une méthodologie de rétro-conception à savoir : les formes de représentation du produit, et les niveaux d’abstraction du produit.

Nous avons précédemment identifié le lien entre les données hétérogènes à la base du processus de rétro-conception, et les connaissances (méta-modèle) relatives à la structuration des informations globales du produit. Ce lien est caractérisé par l’utilisation des formes de représentation pour caractériser les informations et connaissances. Chaque forme de représentation est capable de caractériser en même temps les informations et connaissances relatives au modèle-produit, tout en permettant de caractériser les informations et connaissances qui peuvent être extraites des données hétérogènes.

En parallèle, les niveaux d’abstraction du produit sont relatifs à la construction d’une représentation de celui-ci plus ou moins abstraites. Le produit peut être représenté concrètement à travers l’utilisation d’informations qui permettent de décrire sa forme la plus concrète, c’est-à-dire sa forme. Comme il peut être représenté de manière (la représentation d’un système en boîte noire par exemple). L’identification des différents niveaux d’abstractions dans lesquels peut être représenté un produit permettra alors de caractériser les différentes représentations



relatives à la rétro-conception du produit, et les formes de représentation permettront quant à elles, d’élaborer concrètement les représentations en question.

Le concept Ki4D se base sur les deux concepts présentés ci-dessus, auxquels on a ajouté deux autres concepts qui sont la décomposition systémique, et le cycle de vie du produit afin de le rendre opérationnel. Ce concept nous permettra de décrire le processus de rétro-conception sur la base des niveaux d’abstraction visés, des modes de représentation visés, tout en prenant en compte l’environnement du produit analysé pour réaliser une rétro-conception complète.

Le concept Ki4D permettra de prendre en compte les aspects statiques du processus de rétro-conception en intégrant les informations et connaissances relatives au produit, qui seront décrites grâce à ces quatre concepts, et qui définiront les processus en termes d’entrées / sorties. Il permettra aussi de prendre en compte les aspects dynamiques du processus de rétro-conception en les caractérisant par des couples d’entrées / sorties.

Nous verrons plus tard que le concept Ki4D se base sur le concept de facettes d’informations pour la représentation des contextes des différents sous-processus du processus global de rétro-conception.

### 1. Définition du concept Ki4D

Le concept Ki4D permet d’élaborer un processus global de rétro-conception en le réduisant à des processus élémentaires qui, par leur association permettent de le construire. Il est défini selon deux niveaux d’intervention différents :

- Le premier niveau est relatif à la description du produit : le concept Ki4D permet de construire des descriptions contextuelles du produit qui seront utilisées pour caractériser les entrées et sorties des sous-processus de la rétro-conception.
- Le deuxième niveau est relatif à la décomposition du processus de rétro-conception : le concept Ki4D permet de décomposer le processus de rétro-conception en sous-processus élémentaires, identifiés grâce aux différentes descriptions du produit. Chaque description permet de regrouper un ensemble d’informations qui représentent les ressources utilisées pour l’élaboration d’un sous-processus élémentaire, et ses résultats en sortie.

Le concept Ki4D émerge de la volonté de modulariser le processus de rétro-conception, pour qu’il soit le plus générique possible. Cette modularisation sera effectuée grâce à la décomposition du processus de rétro-conception en sous-processus à un niveau de granularité fin, et à la mise en place d’interfaces modulaires qui permettent d’associer deux sous-processus dans la limite du possible. Il émerge aussi de la volonté de lier les données hétérogènes qui sont utilisées pour l’analyse du produit, à son modèle-produit, et ceci en mettant en place des mécanismes qui permettent d’extraire des informations et connaissances qui seront utilisées dans l’élaboration d’une représentation du produit basée sur le modèle-produit.

### 2. Objectif du concept Ki4D

L’objectif principal du concept Ki4D est de formaliser le processus de rétro-conception relatif à la définition qu’on propose. En adoptant un point de départ spécifique relatif aux données hétérogènes, nous pouvons trouver plusieurs chemins possibles pour réaliser la rétro-conception

d’un produit. Ces chemins dépendront des niveaux d’abstraction et des représentations du produit qui sont visés (en d’autres termes les facettes d’informations du produit qui sont visées), mais surtout des algorithmes d’extraction des informations et connaissances à partir des données hétérogènes.

Le concept Ki4D a pour but de fournir une cartographie des différents processus de rétro-conception en formalisant un espace en quatre dimensions dans lequel sont identifiés les états possibles du produit, ainsi que les transitions qui peuvent être opérées. Dans la figure 3.23, est représenté l’espace relatif au concept Ki4D (en trois dimensions, par souci de simplicité).

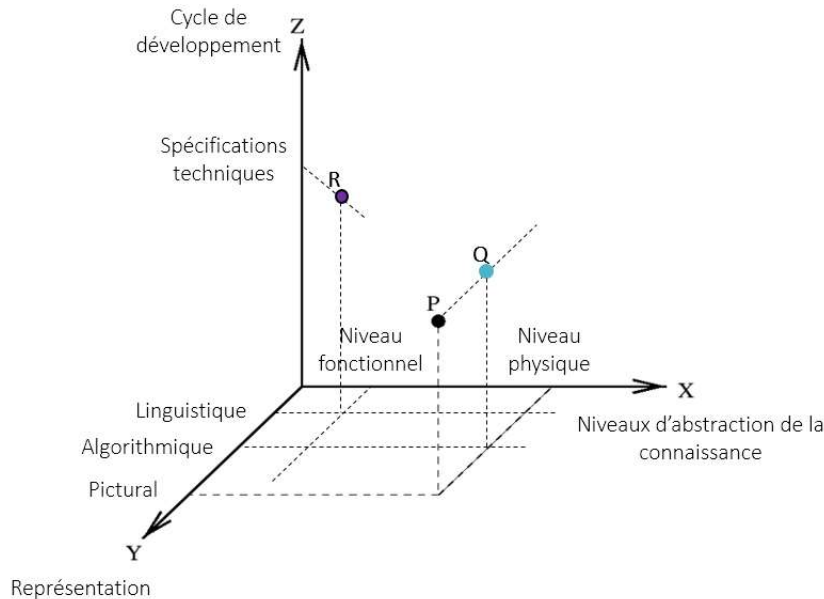


Figure 3.23 – Espace d’informations et connaissances Ki4D avec P, Q et R représentant les différents états du produit

### III. Les concepts relatifs à la démarche de Ki4D

La démarche Ki4D est articulée en deux parties principales pour caractériser le processus de rétro-conception :

- Une partie produit qui permet d’apporter plus de profondeur en caractérisant de manière formelle les opérations à effectuer sur chacune des informations et données hétérogènes qui sont utilisées pour analyser le produit.
- Une partie purement processus, où on détermine les différentes activités et sous-processus qui permettent d’opérer une rétro-conception et de capturer les éléments de contexte dans lequel a émergé le produit analysé.

#### 1. Eléments de produit (statiques)

Les éléments de produit sont des informations et connaissances élémentaires dans le modèle-produit. Elles caractérisent un élément d’information du produit, spécifique à un contexte dimensionnel et temporel. Du fait de sa dépendance au contexte, il serait insignifiant de traiter chaque élément de produit de manière isolée, mais plutôt de les regrouper de manière à créer

une image du contexte pris en compte. De ce fait, chaque élément de produit, associé à d’autres éléments de produit, permettra de construire une représentation contextuelle du produit. C’est le travail du concept de facettes d’informations qui permet de construire ces représentations contextuelles du produit à partir d’un ensemble de concepts déjà présents dans les modèles utilisés par le concept de facettes d’informations pour les construire. Cela se caractérise par l’utilisation du modèle-produit en identifiant les informations relatives à un sous-ensemble de l’ensemble global des concepts contenu dans le modèle-produit. Autrement dit, l’intégration du concept de facettes d’informations qui permettra de caractériser les différentes représentations relatives à chaque étape de la rétro-conception.

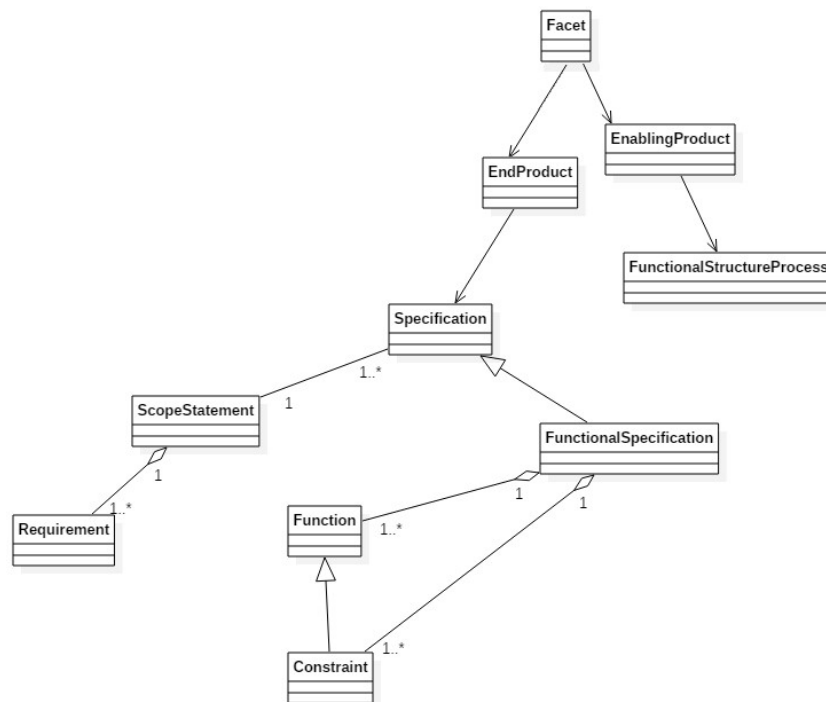


Figure 3.24 – Exemple d’une représentation contextuelle regroupant des éléments d’informations pour une facette du contexte d’élaboration de la structure fonctionnelle d’un produit

Finalement, à partir d’un ensemble de représentations, il est possible de représenter l’évolution du processus de rétro-conception dans le temps en identifiant les différents états par lesquels passe le processus, relatifs à ces représentations. La figure 3.24 permet d’illustrer le cas d’une facette relative à la représentation fonctionnelle du produit.

## 2. Eléments de processus (dynamiques)

Les éléments de produit permettent d’élaborer des représentations pour le processus de rétro-conception, en identifiant les états par lesquels il passe. Entre chaque couple de représentations successives, un ensemble d’activités est réalisé dans le but de passer de la première représentation, à la deuxième : c’est l’élément de processus.

L'élément de processus est donc l'ensemble d'opérations qui permet de changer les représentations, soit en faisant évoluer les informations dans une même représentation, soit en changeant complètement la représentation de départ.

Dans le premier cas, il s'agit de processus permettant d'optimiser les informations déjà présentes et de fournir une représentation encore plus claire du produit (figure 3.25 A vers B).

Dans le deuxième cas, il s'agit de créer une nouvelle information ou connaissance qu'on intègre à l'ensemble d'informations déjà existantes pour élaborer une nouvelle représentation (figure 3.25 B vers C).

Les éléments de processus décrivent donc les étapes élémentaires par lesquelles passe le processus de rétro-conception, et pour chaque élément de processus, est identifié un ensemble de tâches et d'activités qui permettent de passer d'une représentation à une autre.

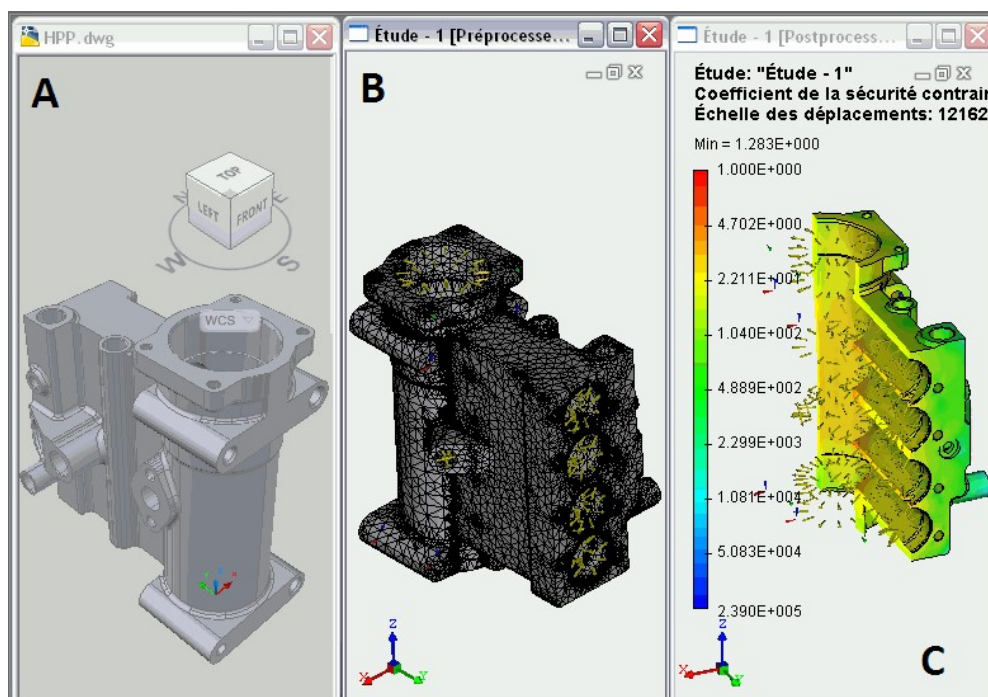


Figure 3.25 – (A vers B) : Evolution d'une représentation géométrique du produit à travers la création d'un maillage. (B vers C) : Nouvelle représentation en éléments finis – Adapté de [ @AutoFEM ]

### 3. L'espace 4D

Le nom Ki4D vient de la volonté de formaliser et de cartographier les processus dans l'espace 4D construit sur la base des concepts de niveaux d'abstraction, de modes de représentation, de décomposition systémique, et de cycle de vie du produit. L'espace 4D regroupe donc quatre axes principaux orthogonaux relatifs à chacun des concepts précédents, qui permettent de caractériser l'état de l'information à l'entrée et à la sortie d'un processus (voir figure 3.23).

#### a. Définition de l'espace 4D

L'espace 4D est donc composé de 4 axes principaux qui permettent de caractériser l'état de l'information et de la connaissance en entrée et sortie des sous-processus élémentaires de la

rétro-conception. Ces quatre axes sont : les niveaux d’abstraction, la décomposition systémique, le cycle de vie du produit, et les formes de représentation.

#### *Niveaux d’abstraction*

Le premier axe représente les niveaux d’abstractions du produit dans le cycle de développement. Cet axe caractérise des groupes d’éléments dans le modèle-produit permettant d’élaborer une représentation du produit à un niveau d’abstraction donné.

La prise en compte des niveaux d’abstraction détermine le niveau dans lequel intervient le processus par rapport à l’analyse d’une donnée en entrée. Prenons comme exemple la reconception d’un système pour illustrer cela : comme défini précédemment, la reconception vise à concevoir un produit à partir de fonctions déjà existantes, en d’autres termes, réutiliser une analyse fonctionnelle d’un produit déjà existant pour élaborer un autre produit qui répond au même besoin d’utilisation, mais qui est construit dans un contexte différent. Dans ce cas, on aura donc besoin des informations fonctionnelles du premier produit pour effectuer la reconception. Cela ne peut être possible qu’en ayant reconstruit la représentation correspondante grâce à la rétro-conception fonctionnelle du produit.

Concrètement, les niveaux d’abstraction concernent les différentes entités d’information qu’on peut retrouver dans un modèle-produit. On peut alors choisir le niveau détail avec lequel nous construisons cet axe. Il est possible d’utiliser des niveaux représentant des sous-ensembles (Fonctionnel, Comportemental, Structurel). Il est aussi possible d’utiliser chaque entité d’information représentée par une classe comme étant une valeur de l’axe du niveau d’abstraction. Une combinaison d’un groupe d’informations et des entités distinctes comme étant des valeurs de l’axe peut être prise en compte.

#### *Décomposition systémique*

Le deuxième axe représente la décomposition du système. Les modèles relatifs au triptyque FBS permettent de décrire le produit en soi, mais ne prennent pas en compte l’environnement de ce produit. Dans la majeure partie des cas, les produits analysés dans la rétro-conception sont des systèmes plus ou moins complexes, et donc composés de plusieurs sous-systèmes ou composants. Il nous faut donc un moyen de décrire le produit sur la base du triptyque FBS, comme étant un ensemble de sous-produits qui eux-mêmes sont décrits sur la base du même triptyque.

Nous avons déjà défini la décomposition système dans le concept de facettes d’informations, qui n’est autre qu’un moyen d’organiser les différents sous-systèmes et composants qui constituent un système pour le construire. Cette organisation s’opère à plusieurs niveaux, notamment au niveau de l’organisation du projet qui est responsable de l’élaboration du système, mais aussi l’organisation structurelle des sous-systèmes et composants pour arriver à construire le système afin qu’il soit opérationnel et qu’il réponde au besoin pour lequel il a été créé.

Nous avons aussi exploré certains concepts de l’approche systémique des produits en évoquant les produits finaux et les produits capacitants. Dans notre méthodologie de rétro-conception,

nous nous contenterons de l’utilisation du concept des produits finaux qui nous permettront de structurer le produit en termes de sous-systèmes et composants.

Donc, l’utilisation de l’approche système nous permettra d’élaborer un moyen de décrire le produit sur la base du triptyque FBS comme étant un ensemble de sous-systèmes et composants décrits sur la même base.

#### *Cycle de vie du produit*

Le troisième axe représente le cycle de vie du produit. Dans la majeure partie des cas, la rétro-conception tentera de reconstruire une représentation d’un objet physique déjà existant. En termes de contexte de développement du produit, celui-ci correspond au moins au contexte de sa mise en production. En d’autres termes, le produit analysé correspondra au moins, à la représentation la plus aboutie du produit que le bureau d’études ait élaboré. Il correspondra au moins à cette représentation parce que le produit peut changer après l’élaboration de cette représentation (comme par exemple, le changement non répertorié de certains paramètres lors de la fabrication ou de la maintenance).

Le cycle de vie du produit dresse une échelle temporelle qui permet de caractériser les informations d’une manière chronologique. Cet axe caractérise donc les éléments produit dans le temps. Il permet de déterminer la temporalité de l’information, mais aussi le degré de maturité de l’information. Ceci peut être nécessaire dans le but d’étudier les changements opérés sur le produit au cours du temps, et de caractériser les décisions qui ont conduit à ces changements.

Les trois premiers axes sont relatifs aux informations du produit telles que dans le modèle-produit défini dans le concept de facettes d’informations. Nous pouvons donc constater, que l’approche Ki4D est relative à l’utilisation du concept de facettes d’informations associé aux modes de représentation qu’on verra plus loin. Le concept de facettes d’informations permet de définir la structure d’information que doit produire le processus de rétro-conception, alors que les modes de représentation permettent de structurer le lien entre la facette, et les données hétérogènes pour une intégration des informations extraites de ces données.

#### *Formes de représentation*

Le quatrième axe concerne la forme de représentation des informations et connaissances. La prise en compte des formes de représentation dans la démarche de rétro-conception nous permet non seulement de décortiquer les données hétérogènes analysées, mais en plus, de fournir une classification des différentes connaissances selon leurs formes de représentation. Les formes de représentation permettent de créer une passerelle entre les données hétérogènes et les informations et connaissances produit qui sont structurées dans le modèle-produit. C’est la raison principale de l’utilisation de ce concept dans la démarche Ki4D, puisqu’elle a pour but de lier les données hétérogènes au modèle-produit à travers leur intégration, tout en décrivant le processus de rétro-conception avec un niveau de granularité lui permettant d’être exhaustif.

Les modes de représentation sont au nombre de cinq comme décrit dans [Horváth & al. 02] : la représentation algorithmique (expressions mathématiques, algorithmes), la représentation linguistique (textes, communication verbale), la représentation picturale (vidéos, photos, croquis, tableaux, diagrammes, dessins), la représentation symbolique (schémas logiques,



graphes, modèles), la représentation virtuelle (modèles de réalité virtuelle, prototypes virtuels, CAO, animations, simulations).

Dans notre démarche, il y a trois modes de représentation principaux qui sont identifiés comme étant pertinent, et qui vont permettre de lier les données hétérogènes. Ces modes sont relatifs aux types de données informatiques qui vont canaliser l’information produit :

- Le mode textuel sera relatif aux modes linguistiques et algorithmiques puisque les deux modes auront tendance à être retranscrit dans cette forme-là.
- Le mode pictural regroupera aussi le mode symbolique. Cela est possible car les représentations symboliques sont souvent sous la forme de schémas ou plan pris en compte comme des images.
- La représentation virtuelle reste la même et ne change pas. Elle caractérisera toutes les représentations virtuelles ou digitales relatives au produit.

L’association des modes de représentation avec les niveaux d’abstraction permettra de définir l’état de l’information et de la connaissance du produit à un instant T du cycle de vie du produit.

#### a. Objectif de l’espace 4D

Avec l’ensemble des points représentant les états des informations en entrée et sortie des processus, et l’ensemble des transitions possibles représentant les différents processus permettant d’opérer une rétro-conception, l’objectif principal de l’espace 4D est de proposer un cadre conceptuel qui permet d’aboutir à l’élaboration d’un moteur de workflow pour la rétro-conception.

Ce moteur de workflow reposera sur un algorithme qui aura pour objectif de générer un ensemble d’activités élémentaires pour réaliser le processus de rétro-conception. Le choix relatif aux activités élémentaires dépend du contexte de rétro-conception, et donc des quatre composantes de l’espace 4D à savoir : les niveaux d’abstractions pour chaque état du processus de rétro-conception, les formes de représentation en entrée et en sortie, le cycle de vie produit en question, et le niveau système correspondant.

Ce moteur de workflow ne sera pas figé, mais pourra changer selon la demande de l’utilisateur, et en fonction de ses objectifs et des ressources fournies au départ. Cet espace 4D donne, donc, une image des différents états possibles par lesquels doit passer le processus de rétro-conception, qui se traduit par les différents sous-processus (processus élémentaires) qui le constituent.

Il faut garder à l’esprit que l’utilisation de l’espace 4D dans sa totalité n’est ni possible, ni envisageable du fait de l’incompatibilité de certains sous-processus. En d’autres termes, il y aura certains chemins dans l’espace 4D qui ne seront jamais empruntés.

#### Utilisation de l’espace 4D

L’espace 4D est donc composé de 4 aspects relatifs à l’état d’un produit dans la rétro-conception. Chaque axe représente un degré de liberté dans l’espace du processus de rétro-conception. Comme résultat, on aura :

- Des points discrets qui déterminent les états du produit (informations des facettes d'informations)
- Des vecteurs entre chaque paire de points qui représentent les éléments de processus.

L'espace 4D peut alors être décrit géométriquement (figure 3.26) :

- Description géométrique ponctuelle de l'espace (les points P, Q et R).
- Description géométrique vectorielle de l'espace (les vecteurs entre les points, PQ, et QR).

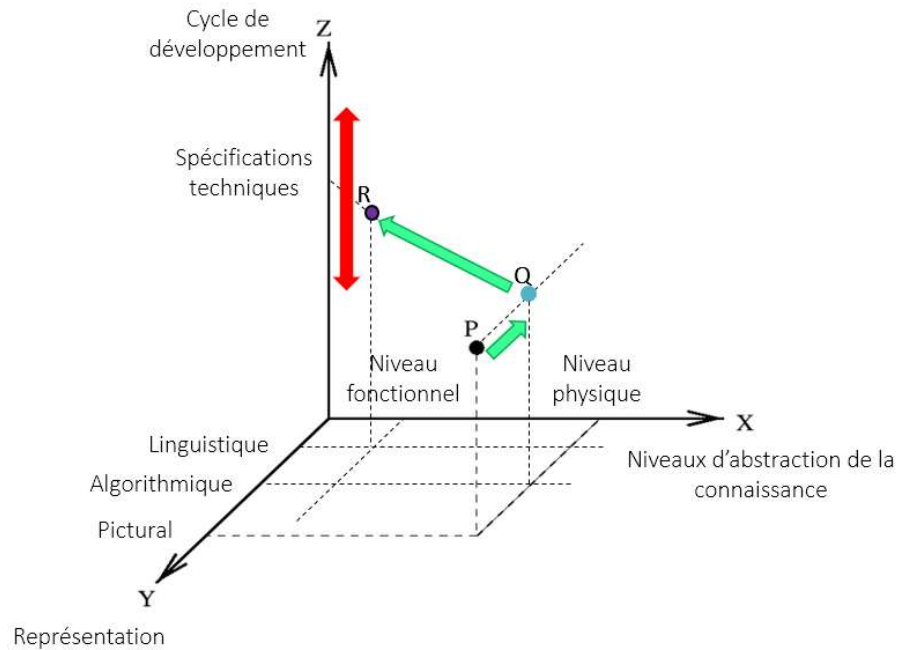


Figure 3.26 – Utilisation de l'espace Ki4D pour le processus de rétro-conception

L'espace 4D étant défini, son utilisation sera semblable à celle de l'espace euclidien, où chaque état relatif à un point sera représenté par ses coordonnées, et chaque élément de processus relatif à un vecteur aura donc une représentation vectorielle. Dans la figure 3.26 cela se traduira par :

$$P = (\text{Pictural}, \text{Physique}, \text{Spécification technique}, \text{Composant } x)$$

$$Q = (\text{Pictural}, \text{Algorithmique}, \text{Spécification technique}, \text{Composant } x)$$

$$\overrightarrow{PQ} = \overrightarrow{OQ} - \overrightarrow{OP} = \text{Transition de l'état } P \text{ à l'état } Q$$

Cette description permettra donc d'identifier les processus comme étant des transitions entre des points spécifiques. L'utilisation du vecteur sera relative à l'utilisation des points représentant les états d'entrée et de sortie du processus. Ainsi l'équation du vecteur  $\overrightarrow{PQ}$  ne fait qu'illustrer la correspondance entre les états et le processus. Il n'y a pas de calcul vectoriel à faire sur la base des coordonnées des points P et Q, mais plutôt une utilisation de ces coordonnées comme ressources dans le processus.

L'espace 4D sera alors utilisé comme étant un espace caractérisant le processus de rétro-conception. L'utilisateur qui fournit des données d'entrée définira par cette action les points de



départ du processus de rétro-conception. L'utilisateur définira aussi les données en sortie du processus de rétro-conception relatives à l'objectif de la rétro-conception (reconception, refabrication, etc.), ce qui permettra d'avoir les points de sortie. Ayant obtenu les points d'entrée et de sortie, les vecteurs représentant le processus de rétro-conception seront identifiés. Il ne reste plus qu'à générer les résultantes correspondantes aux vecteurs du processus par le moteur de workflow, afin de réaliser le processus de rétro-conception du produit étudié.

#### Travail du moteur de workflow

Le moteur de workflow a pour objectif de générer un workflow de rétro-conception qui dépend du contexte. Dans le but de réaliser le processus de rétro-conception, il nous faudra donc déterminer quel workflow adopter avant de commencer les opérations. Le travail du moteur de workflow est relatif à la description faite pour l'utilisation de l'espace 4D. Nous pouvons le décrire suivant les points suivants :

1. Au chargement des données hétérogènes, le moteur de workflow définira les coordonnées des points d'entrée et des points de sortie :
  - Les points d'entrée correspondent aux différentes données hétérogènes. Pour chacune de ces données, le moteur de workflow identifiera les coordonnées relatives aux quatre axes de l'espace 4D (semblables aux coordonnées des points P, Q, et R).
  - Les points de sorties correspondent aux différentes entités d'informations de la facette choisie par l'utilisateur.
2. Après la définition des coordonnées de chaque point, le moteur de workflow explore les différents chemins possibles. Cette identification dépendra impérativement des algorithmes d'extraction. En effet, chaque algorithme d'extraction représente une et une seule flèche entre deux coordonnées spécifiques de l'espace. En d'autres termes, le moteur de workflow fera une correspondance entre les différents points en entrée, et les différents points pris en compte (qui correspondent aux points par lesquels peuvent passer les algorithmes d'extraction).
3. Le moteur de workflow choisira le chemin optimal selon lequel il diminuera le temps de recherche dans les données hétérogènes, ou il maximisera les informations en sortie.
4. Après le choix du chemin, le processus de rétro-conception est réalisé.

L'espace 4D ayant un ensemble de points et de vecteurs assez conséquents, nous pouvons remarquer que le développement de chaque algorithme d'extraction pour générer les processus relatifs à chaque vecteur en devient fastidieux, puisqu'il faudra développer autant d'algorithme que de vecteurs. Cependant, il y a deux niveaux dans lesquels opèrent les algorithmes d'extraction :

- Le premier niveau est générique et est relatif à la forme de représentation de l'information. En effet, il y a de grandes familles de solutions qui permettent de faire l'extraction des informations et connaissances (traitement du langage naturel pour le texte, la vision d'ordinateurs pour les images et le virtuel).
- Le second niveau est spécifique et concerne l'adaptation de ces grandes familles de solutions à un contexte d'application spécifique (traitement du langage naturel avec étiquetage morpho-syntaxique pour l'identification des structures de phrases, et extraction des fonctions et contraintes, vision d'ordinateur avec identification de la

forme tridimensionnelle d’un objet à partir d’images bidimensionnelles, reconstruction volumique à partir d’un nuage de points, etc.).

Enfin, le moteur de workflow se basera sur un modèle de données global, qui intègre chacun des modèles que nous avons proposé précédemment, en plus du modèle de la méthodologie de rétro-conception : le modèle Ki4D.

## IV. Modélisation du concept Ki4D

L’utilisation du concept Ki4D passera par la réalisation d’un modèle de données capable de prendre en compte les concepts de base présentés précédemment, c’est-à-dire :

- Les différents modèles de données de base : modèle-produit, modèles métier, décomposition systémique du produit, et le cycle de vie du produit, regroupés dans le modèle de facettes d’informations.
- Le modèle de données relatif aux données hétérogènes.

Nous pouvons voir dans la figure 3.27, le diagramme de package qui regroupe tous les modèles utilisés dans le processus de rétro-conception. « Ki4DModel » est le package principal qui représente le modèle du processus de rétro-conception (nous verrons plus tard ce package plus en détail). Ce package utilisera deux autres packages qui sont « InputDataPackage » qui est relatif au modèle des données hétérogènes en entrée du processus de rétro-conception, et « FacetModelPackage » qui prend en compte toutes les représentations produit utilisées dans le processus. Le modèle de facette fait appel au package « ProductModelPackage » qui prend en compte le modèle intrinsèque du produit, avec toutes les informations permettant de caractériser sa forme physique et ses constituants. Le modèle de facette fait aussi appel au package « BusinessModelPackage » qui prend en compte les différents modèles métier qui interviennent dans le cycle de conception du produit, et permettent d’agrémenter le produit avec des informations métier afin de créer de nouvelles représentations spécifiques. Enfin, le package « DesignModelPackage » est là pour illustrer les modèles métier à travers le modèle de conception vu précédemment.

Ce modèle global permettra de gérer les informations et processus relatifs à la rétro-conception d’un produit. Donc ce modèle du concept Ki4D représentera une couche d’abstraction élevée dans le système d’information responsable de la rétro-conception des produits.

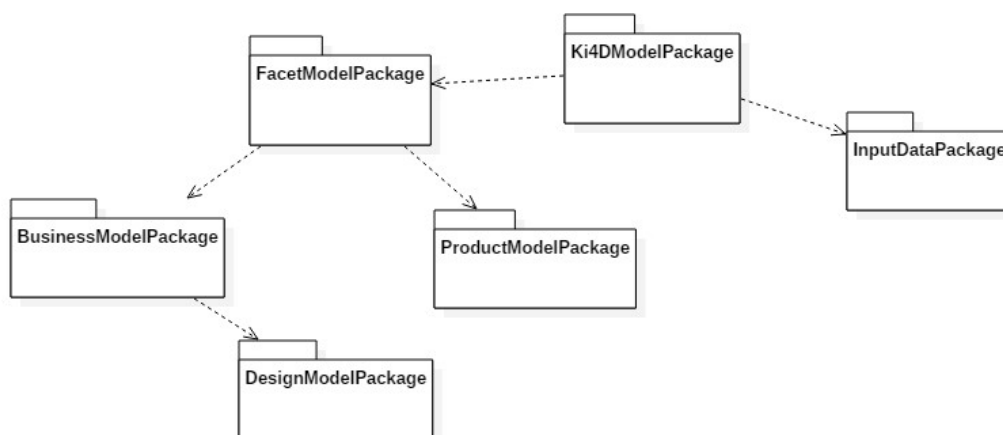


Figure 3.27 – Diagramme de package du modèle global pour le processus de rétro-conception

### 1. Modélisation du processus (Gestion de la rétro-conception)

De la même manière que la modélisation produit, la modélisation processus représentera une couche d’abstraction dans l’architecture du système d’information. Cette couche d’abstraction se situera à un niveau plus haut par rapport à la modélisation produit puisqu’elle va utiliser les éléments produit pour élaborer la rétro-conception.

Afin de proposer un modèle générique qui prend en compte les différents aspects du processus de rétro-conception, nous nous basons sur le modèle de processus de [Gzara, 00], auquel on ajoute une extension pour la rétro-conception. Cette extension comportera les différents modèles proposés jusque-là, en y rajoutant certaines classes pour permettre la gestion du processus de rétro-conception.

La figure 3.28 représente le modèle du processus de rétro-conception qui caractérise la démarche Ki4D. Le processus de rétro-conception commence avec la création d’un projet de rétro-conception qui identifie les besoins pour lesquels le processus va être réalisé. Le projet est représenté par la classe « RcProject ».

Dans chaque projet de rétro-conception, il est possible de réaliser plusieurs itérations de manière à se rapprocher le plus possible de l’objet analysé, soit en rajoutant de l’information, soit en la modifiant. C’est pour cette raison que la classe « RcProject » peut contenir plusieurs processus de rétro-conception, décrits par la classe « RcProcess ». Le processus de rétro-conception est alors représenté comme étant l’ensemble d’activités qui permettent de créer une résultante globale, selon les données utilisées dans l’analyse. Pour cela, la classe « RcActivity » regroupe toutes les activités que l’on peut réaliser dans le processus de rétro-conception, allant du prétraitement (avec la classe « DataPreprocessor » qui a la même que dans le modèle des données hétérogènes), à l’opération d’extraction d’information (avec la classe « InfoExtraction »), puis la recherche dans la base de données des composants (avec la classe « DbRequest »). Ces trois classes sont des spécialisations de la classe « RcActivity », et permettent de caractériser les différents vecteurs qui constituent la résultante du processus de rétro-conception.

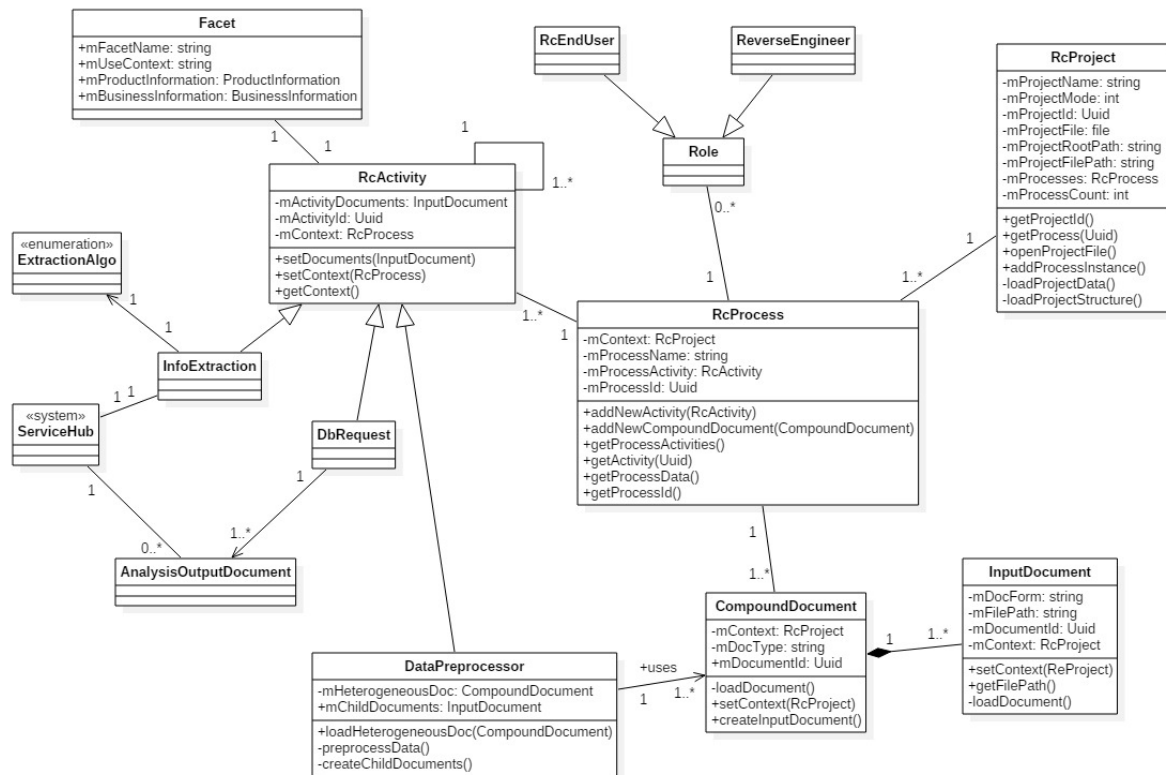


Figure 3.28 – Modèle processus du concept Ki4D

Toutes les classes d’activités auront accès à la facette visée par le processus de rétro-conception, et qui est définie par l’utilisateur, qui dans notre solution sera le rétro-concepteur (classe « ReverseEngineer »). L’utilisateur normal n’aura pas les mêmes privilèges que le rétro-concepteur qui n’est autre que la personne qui gère le projet de rétro-conception.

La classe « InfoExtraction » aura accès à un hub de services qui regroupe tous les algorithmes d’extraction des informations. Le système n’aura qu’à y envoyer un message en ciblant l’algorithme qu’on veut utiliser au hub, et après traitement, le hub renverra une réponse sous forme de fichiers de données extraites. L’énumération a pour objectif d’identifier les différents algorithmes d’extraction qui existent.

Finalement, la classe « DbRequest » permettra d’envoyer des requêtes à la base de données des composants dans le but d’effectuer une recherche de composants ou systèmes qui seraient similaires à celui qui est analysé dans le processus de rétro-conception, et cela dans le cas où le système sera couplé à une base de données pour effectuer des recherches de composants.

## 2. Modèle global

En se basant sur tous les modèles présentés dans ce manuscrit, et sur le diagramme de package, nous pouvons alors présenter le modèle global sur lequel reposera la nouvelle méthodologie de rétro-conception (Figure 3.29). C’est sur la base de ce modèle que sera implémentée la solution d’aide à la rétro-conception que nous présenterons dans le prochain chapitre.

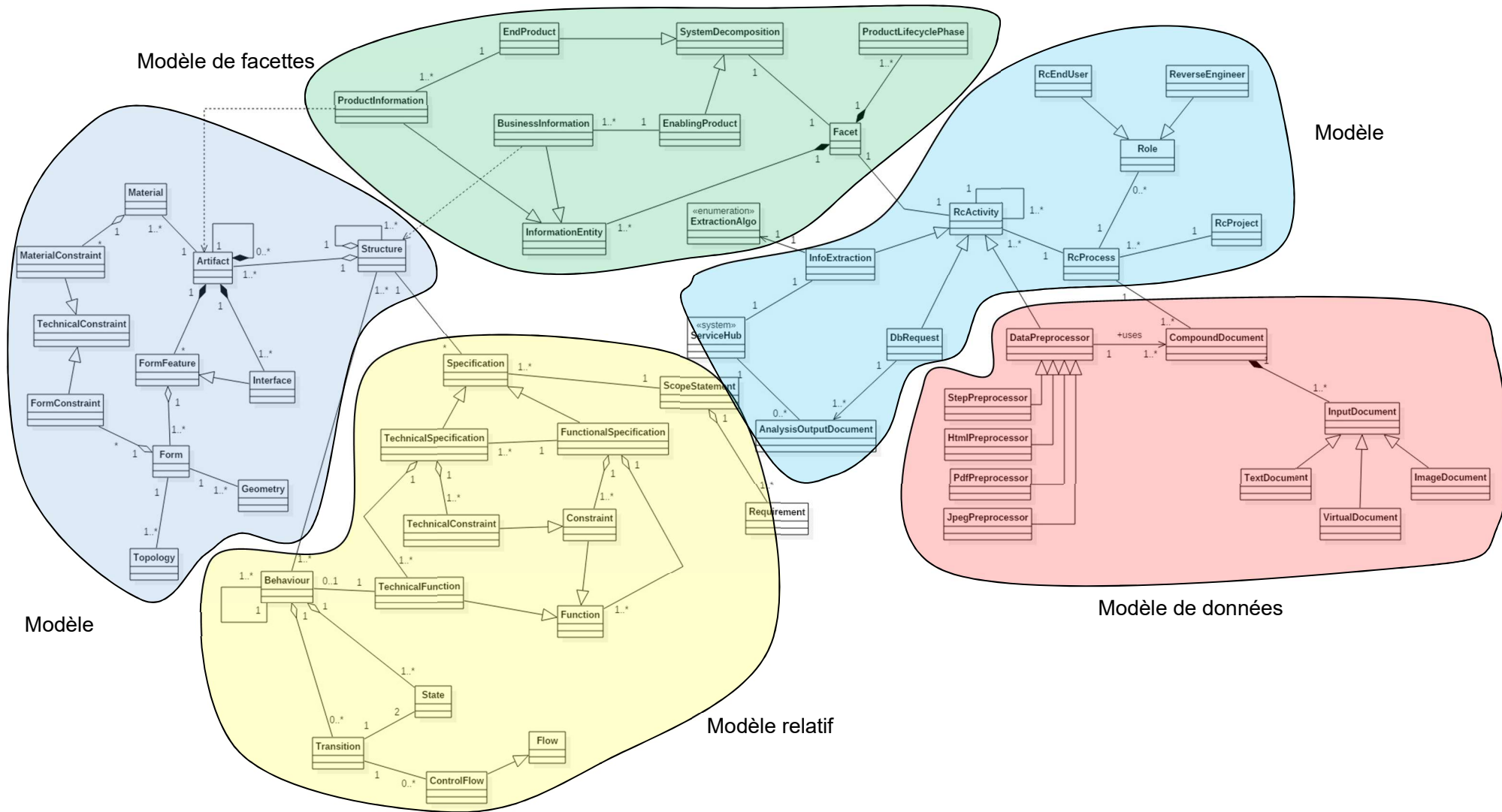


Figure 3.29 – Modèle global détaillé de la démarche Ki4D

## V. Conclusion de la partie

Cette dernière partie nous a permis de présenter le concept Ki4D qui a pour but la gestion du processus global de la nouvelle méthodologie de rétro-conception. Ce concept se base sur la gestion des données hétérogènes et leur prétraitement, ainsi que sur le concept de facettes d'informations, qui lui permet de caractériser les états de chaque sous-processus qui participe à l'élaboration du processus global de la rétro-conception.

Le concept Ki4D consiste en l'utilisation d'un espace 4D pour décrire l'état des informations produit relatif à un processus donné. Chaque processus a besoin de ressources ainsi que de données en entrée pour être réalisé. A travers le concept de facettes d'informations, ces ressources sont identifiées et caractérisées selon :

- Les informations « produit » représentant le premier axe de l'espace 4D sont regroupées en représentations de différents niveaux d'abstraction, et prenant en compte, deux types de descriptions : la première est intrinsèque au produit, la deuxième est relative (modèles métier).
- La décomposition système qui représente le deuxième axe, permet d'identifier quelles sont les informations relatives au produit, et quelles sont les informations relatives au métier, et permet aussi de détailler la hiérarchisation structurelle du produit.
- Les phases du cycle de vie du produit, représentant le troisième axe, apportent une vision temporelle dans laquelle sont placés les différents processus de conception et de développement de produit.
- Le quatrième axe est relatif à la forme de représentation utilisée pour décrire un ensemble d'informations traité dans le processus. C'est dans ce dernier axe qu'est identifié le lien entre les données hétérogènes et les entités d'information relatives au produit.

Ce concept permet de construire une méthodologie de rétro-conception qui est : modulaire, hétérogène, et basé sur les connaissances. La modularité de la méthodologie est abordée dans notre travail dans le but de fournir un processus de rétro-conception qui est en réalité un processus d'analyse du produit afin de construire une représentation de celui-ci qui dépend du contexte cherché. Concrètement, cette modularité est achevée en décomposant le processus de rétro-conception en différents sous-processus. Chaque sous processus peut-être représenté de deux manière différentes : une première statique grâce à l'identification des entrées/sorties du processus, une deuxième dynamique grâce aux différentes opérations du sous-processus pour effectuer la transition entre l'état d'entrée, et l'état de sortie. Le concept de facettes d'informations nous permet de construire les représentations statiques. Quant aux représentations dynamiques, elles sont caractérisées par les différents algorithmes de traitement de l'information. La méthodologie de rétro-conception est hétérogène parce qu'elle utilise un ensemble de données hétérogènes qui caractérisent les produit, et intègre des perspectives relatives aux différents aspects du produit : fonctionnel, structurel, comportemental. L'utilisation des données hétérogènes nous permet de construire des représentations plus complètes du produit, et de viser plusieurs objectifs et finalités. L'utilisation des connaissances

à un premier niveau relatif à la structuration des informations du produit, et à un deuxième niveau possible pour l’identification et l’extraction des informations pertinentes, permet à cette méthodologie basée sur le concept Ki4D d’être considérée comme basée sur les connaissances.

Finalement, il sera possible d’utiliser plusieurs façons relatives à des workflows possibles pour réaliser la rétro-conception du produit analysé. Cela dépendra des données hétérogènes en entrée du processus de rétro-conception, mais aussi de l’intégration des différents algorithmes d’extraction des informations et connaissances intégrées au processus global.







C’est le modèle des données hétérogènes qui permet cette considération. En effet, le modèle prend en compte les différentes données hétérogènes et permet d’identifier les différentes formes de représentation des informations dans ces données. Ensuite, on analyse les données hétérogènes en entrée à travers un processus de prétraitement, qui permet d’isoler les informations de différentes formes élémentaires, et on utilise un processus d’extraction qui permet d’extraire ces informations.

C’est à travers le processus d’extraction qu’un lien est réalisé avec la représentation du produit. En effet, chaque algorithme d’extraction des informations à partir des données hétérogènes va être utilisé pour extraire un certain type d’information relatif à une entité d’information (fonction, structure, spécification, etc.). Le résultat de l’algorithme d’extraction sera automatiquement chargé dans l’entité d’information correspondante.

#### **Intégration des connaissances produit plus complète**

Ce point d’amélioration est une conséquence directe de la reconsidération faite du processus de rétro-conception, ainsi que de l’utilisation de différents types de données en entrée. La rétro-conception classique utilisait une description physique du produit, sans y intégrer des informations complémentaires telles que la structure fonctionnelle, ou le comportement dynamique du produit.

Dans le but d’exploiter les données hétérogènes le plus possible, mais surtout, d’établir des représentations à des niveaux d’abstraction plus élevés, il a fallu intégrer des connaissances produit relatives à plusieurs aspects de celui-ci, tels que les spécifications, les contraintes, les états, etc.

Ces représentations ont pour but de fournir des ensembles d’informations qui sont utilisés pour remplir des objectifs de reconception, de refabrication, ou de reengineering, ou tout autre objectif selon le besoin de l’utilisateur. C’est le concept de facettes d’informations qui permet de construire ces différentes représentations du produit. Il se base sur les entités d’information du modèle-produit pour construire ces différentes représentations.

Le modèle-produit est finalement un moyen de structurer les différentes informations issues des données hétérogènes.

#### **Structuration du processus de rétro-conception de façon modulaire**

Le concept Ki4D proposé dans ce manuscrit permet de gérer la rétro-conception en termes de sous-processus relatifs à différentes entités d’informations produit, ou à différentes formes de représentation des informations dans les données hétérogènes.

Le modèle UML du concept Ki4D a été développé dans le but de fournir un moteur de workflow prenant en compte ces sous-processus de façon modulaire, et de traiter le processus global de la rétro-conception comme étant la résultante des sous-processus locaux. Chaque sous-processus est décrit de manière statique en termes d’états d’entrées/sorties caractérisés par le modèle de facette, permettant ainsi de construire des représentations du produit correspondant à ces états. Il peut être aussi décrit d’une manière dynamique en utilisant les différents algorithmes d’extraction et d’analyse des informations issues des données hétérogènes.

Chacun des sous-processus dépendra des données hétérogènes en entrée, mais aussi des entités d’informations utilisées dans le modèle-produit.

## 2. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé plusieurs concepts qui ont pour but d’améliorer le processus de rétro-conception afin de proposer une nouvelle méthodologie. Dans un premier temps, nous avons identifié comment le processus de rétro-conception devait être amélioré, en proposant un ensemble d’activités prenant en compte différents types de données en entrée, d’analyser les informations, selon chaque type, puis de prendre en compte les informations et connaissances pertinentes dans le but de les intégrer à une nouvelle représentation du produit.

La partie relative à l’intégration des données hétérogènes avait pour but d’identifier les mécanismes qui nous permettaient, à partir de données de sources et de formes hétérogènes, d’extraire différents types d’informations relatifs aux produits. Après une première prospection, nous avons pu identifier deux formes de représentation de l’information relatives aux données en entrée : la première est la représentation formelle qui est relative à la forme dans laquelle est utilisée la donnée (structure de données, ex. PDF), et la deuxième est la représentation conceptuelle, qui elle, permet d’isoler les différentes informations dans la donnée en différentes données de types élémentaires (données textuelles, données picturales, données algorithmiques). De l’association de ces représentations avec les entités d’informations utilisées dans le modèle-produit a émergé le lien entre les données hétérogènes et le modèle-produit, qui plus tard sera caractérisé par des processus d’extraction, d’identification et d’intégration.

Ensuite, nous avons présenté un modèle-produit qui concordait avec notre objectif d’amélioration du processus de rétro-conception, en proposant une nouvelle façon d’agrèger les informations : le modèle-produit n’est plus considéré comme un seul modèle, mais plutôt l’association de plusieurs modèles métiers à un modèle-produit qui décrit de manière intrinsèque la forme physique, et la matière du produit. Pour cela, nous avons modélisé les informations intrinsèques dans le modèle intrinsèque du produit, et avons proposé un modèle complémentaire pour décrire les différentes représentations par lesquelles passe le produit durant sa phase de conception (le passage entre idée et prototype numérique).

Après cela, nous avons identifié un écart entre le modèle-produit, et les processus en général. Nous avons voulu apporter une solution modulaire pour la rétro-conception, et la considérer comme étant un ensemble de processus modulaires qui nous permettraient de créer différentes représentations selon le besoin. Pour cela, nous avons proposé le modèle de facette de manière à pouvoir identifier le lien entre le modèle-produit, et les différents processus de rétro-conception. Ce concept prenait en compte le modèle-produit, auquel il ajoute celui de décomposition systémique, et de phase du cycle de vie du produit. De cette manière, l’état des informations et connaissances dans lequel se trouve le produit, avant la réalisation d’un processus est défini. Le modèle-produit peut donc être utilisé pour la rétro-conception.

Nous avons finalement proposé un modèle de processus basé sur le concept Ki4D, dans le but de fournir une description du processus de rétro-conception, tout en y intégrant le modèle de facette pour décrire l’état des informations et connaissances du produit, qui nous servira de base pour structurer les informations et connaissances selon l’objectif, et le modèle relatif aux

données hétérogènes en entrée du processus afin d’extraire les informations pertinentes dans le processus de rétro-conception.

Dans la suite, nous proposons un cas d’étude utilisé pour illustrer le processus de rétro-conception proposé à travers l’instanciation des modèles.

Chapitre IV – Cas d'étude –  
Démonstrateur

Dans le but de démontrer notre démarche, nous avons eu recours à deux cas d'étude distincts. Le premier est un cas d'étude sur un produit simple dans un contexte de reconception, afin de démontrer de manière simple le fonctionnement de notre démarche. Ce premier cas d'étude a pour sujet un stylo à quatre couleurs qui nous permettra d'illustrer notre démarche globale de rétro-conception dans l'objectif de réaliser des modifications des exigences et contraintes sur le sujet.

Le deuxième cas d'étude prend en compte un produit un peu plus complexe dans un contexte de reengineering. Ce deuxième cas d'étude a pour sujet l'attelage mobile d'un moteur monocylindre. Nous étudierons donc la rétro-conception dans ce cas, dans le but de réaliser des modifications des contraintes techniques et de l'optimisation. Il s'agira donc de faire un reengineering en changeant certains paramètres structurels pour répondre à un objectif spécifique d'optimisation.

Nous avons choisi de ne pas démontrer la rétro-conception pour la refabrication du produit. En effet, la refabrication étant l'objectif de rétro-conception le plus utilisé (et correspondant à la rétro-conception conventionnelle), cela reviendra à faire une rétro-conception purement géométrique du produit.

Finalement, nous avons développé un logiciel démonstrateur pour illustrer concrètement comment la méthodologie de rétro-conception basée sur la démarche Ki4D pouvait être implémentée dans un système d'aide à la rétro-conception.

## I. Présentation du démonstrateur

Nous avons construit un démonstrateur dans le but d'implémenter les différents modèles développés sur la base de la démarche Ki4D, et de montrer que le travail de la rétro-conception peut être regroupé dans un workflow global qui prend en compte un nombre de données hétérogènes en entrée.

L'architecture logicielle de ce démonstrateur est basée sur le patron de conception MVC qui est une architecture basée sur trois couches différentes :

- Une couche « Modèle » qui englobe l'ensemble des modèles de données utilisés par l'application. C'est la couche au plus bas niveau de l'architecture logicielle.
- Une couche « Vue » qui représente l'interface avec l'utilisateur (IHM), et c'est la couche au plus haut niveau de l'architecture logicielle.
- Une couche « Contrôleur » qui permet de communiquer entre les deux couches « Modèle » et « Vue ». Souvent, elle permet d'implémenter les processus métiers.

Elle consiste en une partie modèle et une partie contrôleur représentées par les couches internes de l'architecture du démonstrateur, qui intègre les différents modèles de données développés. Une autre partie relative à la vue représentée par l'interface graphique montre comment est censé interagir l'utilisateur avec le système d'aide à la rétro-conception.

### 1. Architecture du démonstrateur

L'architecture du démonstrateur a été construite sur la base d'une architecture en trois couches distinctes (figure 4.1):

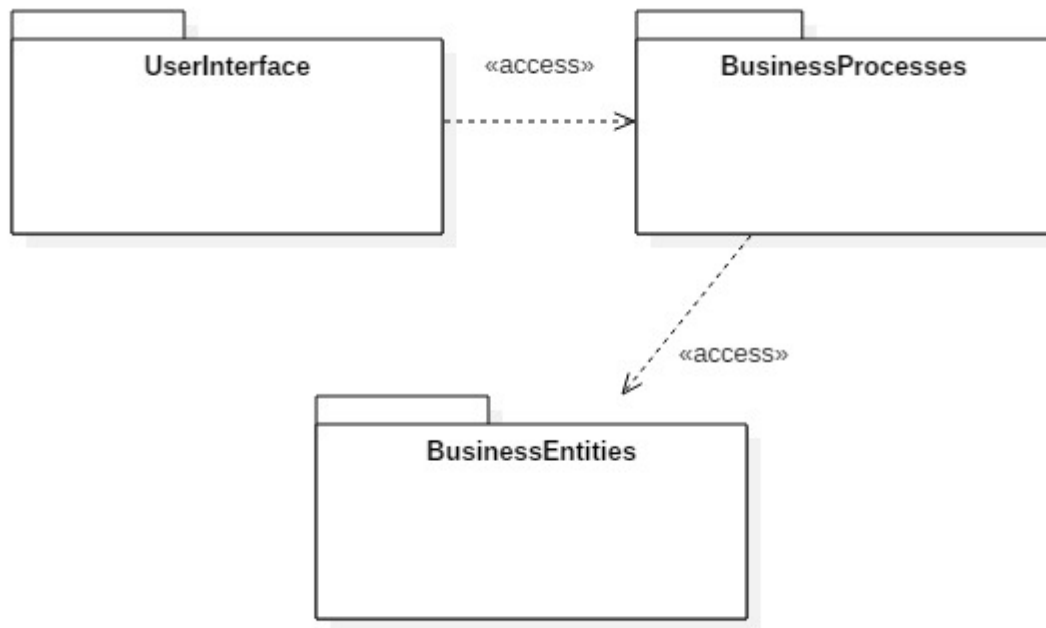


Figure 4.1 – Diagramme de package du démonstrateur

La première couche est relative à l'interface graphique, et c'est la couche visible du démonstrateur. Dans le diagramme de packages, c'est le package « UserInterface » qui regroupe toutes les classes qui permettent de construire l'interface graphique. Ce package accède au package « BusinessProcesses » et permet de créer un lien entre l'interface graphique et les contrôleurs des processus.

La deuxième couche est la couche contrôleur, qui regroupe les différentes classes de contrôle qui permettent de contrôler la communication entre la couche relative à la vue et la couche relative aux modèles. Elle permet donc de réaliser le processus relatifs à la rétro-conception de manière opérationnelle. Dans le diagramme de packages, c'est le package « BusinessProcesses » qui regroupe les classes responsables de la gestion des processus métiers (rétro-conception). De la même manière que pour l'interface graphique, ce package accède au package « BusinessEntities » dans le but d'utiliser les modèles nécessaires à la réalisation du processus de rétro-conception.

La troisième couche est la couche modèle, qui regroupe l'ensemble des modèles qui sont utilisées par le processus de rétro-conception. Elle est représentée par le package « BusinessEntities » dans le diagramme de package (figure 4.1). Elle permet donc d'englober les différentes structures de données, et dans notre cas le modèle-produit et le modèle de facettes d'informations. Elle regroupe l'ensemble des entités d'informations utilisées par le processus de rétro-conception..

## 2. Interface du démonstrateur

L'interface du démonstrateur est assez simple d'utilisation. Elle a été construite dans le but de simplifier la tâche aux utilisateurs lors de la rétro-conception. Elle décrit le processus de rétro-conception d'une manière assez simple (figure 4.2).

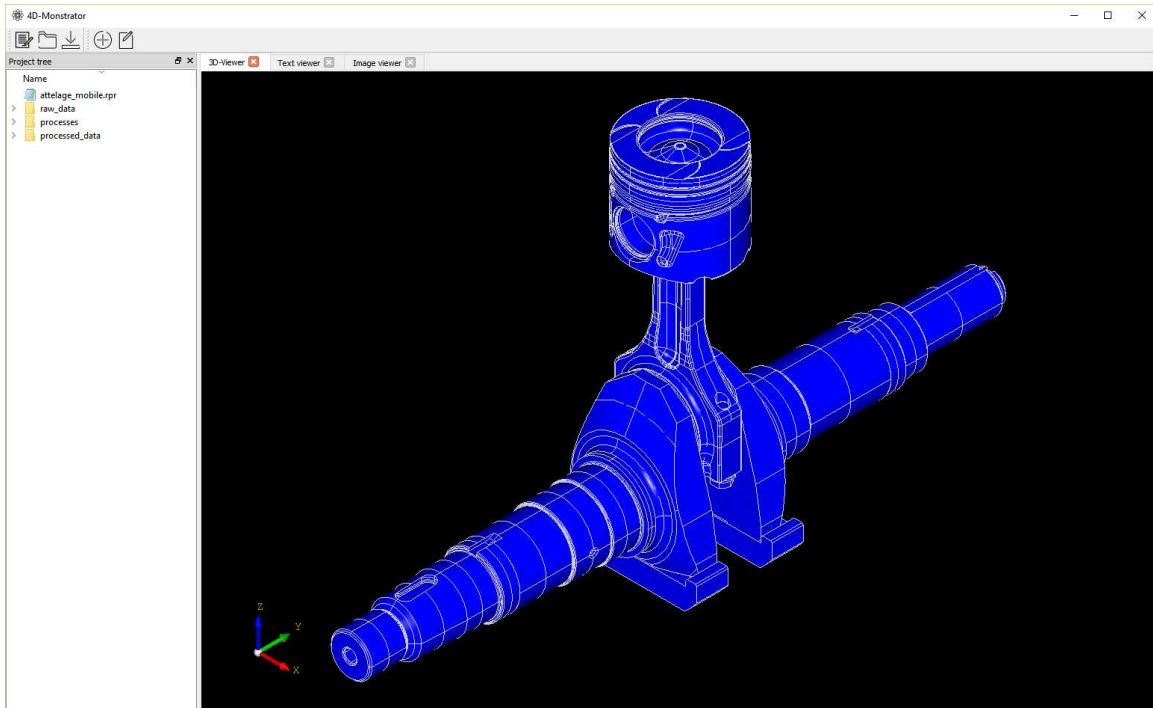


Figure 4.2 – Interface du démonstrateur de la démarche Ki4D – vue virtuelle

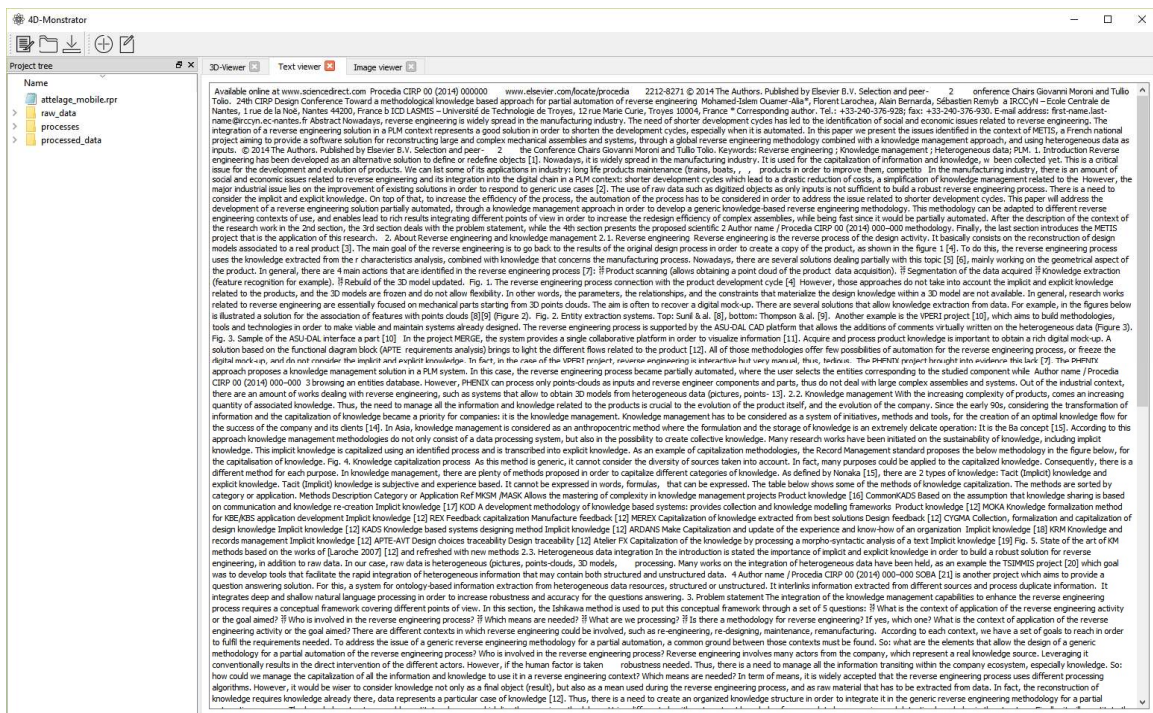


Figure 4.3 – Interface du démonstrateur de la démarche Ki4D – vue textuelle



Nous avons mis en place un dock à gauche pour simplifier la navigation dans les données hétérogènes et dans tout le projet de rétro-conception. Nous avons mis en place 3 types de vues relatives aux différentes formes de représentation : une vue virtuelle (3D viewer) (figure 4.2), une vue textuelle (figure 4.3), et une vue picturale (figure 4.4).

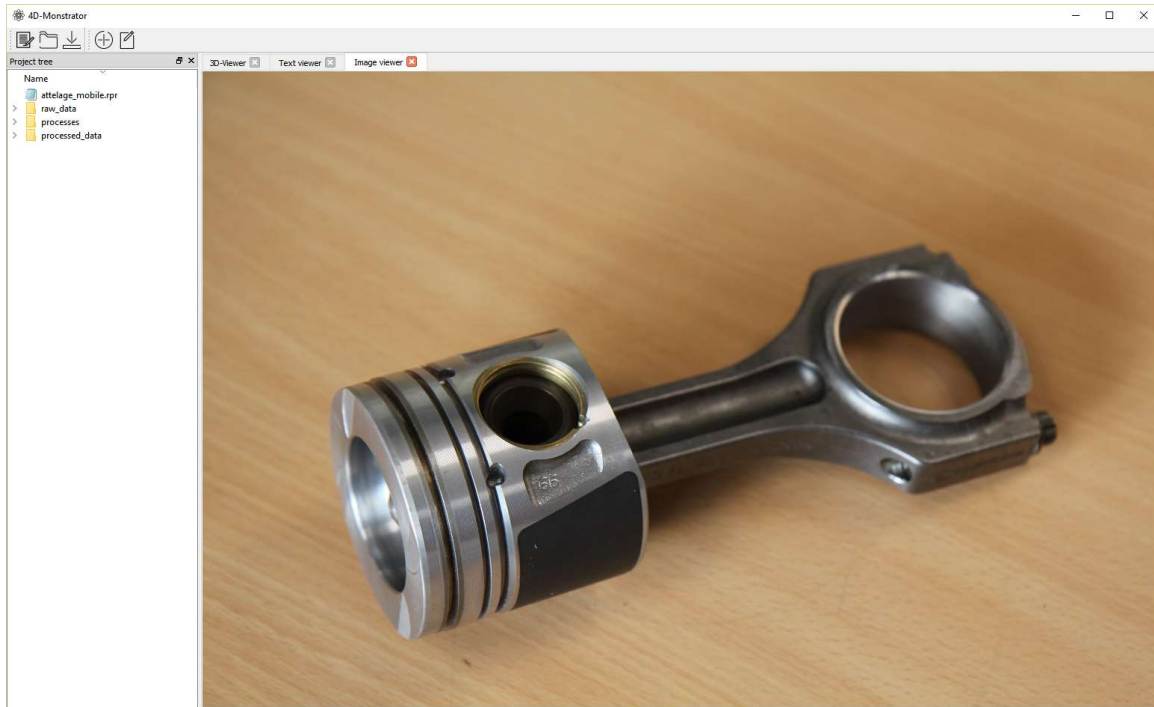


Figure 4.4 – Interface du démonstrateur de la démarche Ki4D – vue picturale

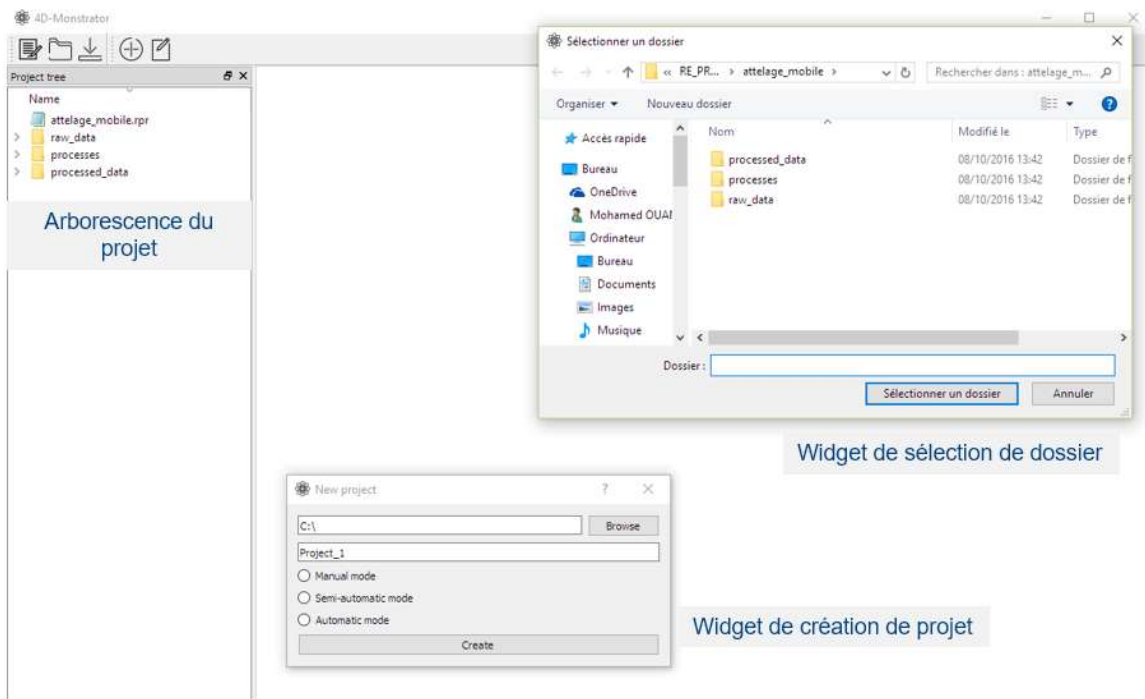


Figure 4.5 – Création d'un projet de rétro-conception dans le démonstrateur



Nous pouvons voir dans la figure 4.5 l'utilisation du démonstrateur dans le but de créer un nouveau projet. La création d'un nouveau produit permet d'instancier la classe « RcProject » du modèle Ki4D, et ainsi créer l'environnement dans lequel sera manipulé le projet. Toutes les données hétérogènes avant et après prétraitement peuvent être trouvées dans l'arborescence du projet.

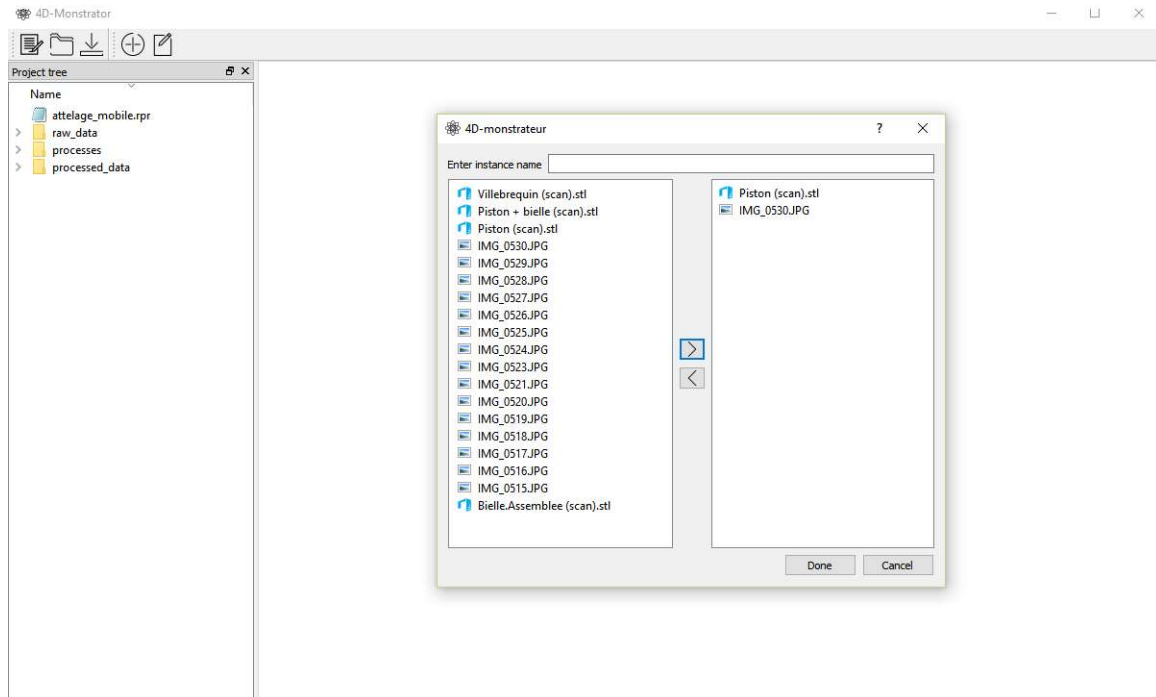


Figure 4.6 – Sélection des données hétérogènes dans le démonstrateur

Dans la figure 4.6 est illustrée la création d'une instance du processus de rétro-conception. Cette étape correspond à l'instanciation de la classe « RcProcess » du modèle Ki4D, et permet de regrouper les données hétérogènes relatives à une instance du processus. En effet, dans cette étape nous avons choisi parmi les différentes données chargées dans le projet de rétro-conception, celles qui correspondent au processus que nous cherchons à réaliser. Par exemple, dans le cas d'une rétro-conception de la spécification fonctionnelle, nous pouvons omettre certaines données hétérogènes (notamment les modèles 3D), et ne choisir que des données textuelles.

## II. Premier cas d'étude : reconception d'un stylo 4 couleurs

### 1. Objet étudié

L'objet étudié est un simple stylo à quatre couleurs (figure 4.7). Nous l'avons choisi pour sa simplicité : c'est un assemblage qui ne contient que quelques composants, qui eux-mêmes ont des géométries simples à représenter et à reconstruire, en plus du fait qu'il ne présente pas une structure fonctionnelle complexe.

L'objet est donc un système composé de plusieurs pièces remplissant différentes fonctions élémentaires. Le but étant de retrouver le contexte global dans lequel a été conçu le produit, en

fixant comme objectif l'utilisation directe de ces informations dans le but de reconcevoir une partie de l'objet étudié.



Figure 4.7 – Objet étudié pour la démonstration : stylo 4 couleurs

Pour réaliser la rétro-conception de l'objet en question, nous utiliserons un ensemble de données hétérogènes que nous avons obtenu de plusieurs sources différentes. Dans notre cas, la source principale reste la recherche d'informations sur internet, nous nous contenterons donc de certaines données dont on ciblera le type.

## 2. Données hétérogènes pour l'analyse

Le stylo sera donc rétro-conçu à l'aide d'un ensemble de données qu'on retrouve sur l'objet de différents types.

Nous nous sommes donc restreints à utiliser un ensemble de données de types différents afin de démontrer la démarche Ki4D sur l'ensemble de ces données, et en même temps pour simplifier l'exemple.

Nous avons choisi les données principales suivantes (Annexe – Figures A.7 à A.10) :

- Une fiche produit au format PDF retrouvée sur internet.
- Une page HTML sur le site de l'entreprise qui produit le stylo.
- Des photos de l'objet en question sous format jpeg.
- Un fichier STEP pour illustrer la forme physique.

Nous n'avons pas cherché la complétude des informations utilisées dans le processus de rétro-conception, mais plutôt une démonstration de comment les informations peuvent être extraites à partir de ces types de données (représentations opérationnelles).

Pour chacune de ces données un traitement manuel a été effectué, mais il est possible d'utiliser des algorithmes et des mécanismes d'extraction d'informations.

Cela n'a pas été fait parce que le travail demandé par le développement de ces modules sort du scope de notre travail de recherche (algorithmes).

### 3. Objectif de la rétro-conception du stylo 4 couleurs

#### a. Objectif

Nous utilisons notre processus de rétro-conception pour analyser le produit dans le but de construire une représentation de celui-ci. L'objectif principal que nous nous sommes fixés pour ce cas d'étude est de pouvoir utiliser les informations issues de l'analyse du produit dans le but de créer une représentation utilisable dans le cadre de la reconception de certains de ses composants.

La rétro-conception pour la reconception est un processus qui permet de récupérer les informations concernant l'aspect fonctionnel du produit. Il nous faudra alors construire une représentation fonctionnelle du produit à partir des données hétérogènes.

Le processus de rétro-conception dans ce cas d'étude aura pour objectif de construire une facette qui regroupe l'ensemble des informations fonctionnelles du produit. Cela permettra de contrôler le processus de rétro-conception et cibler les informations dont nous avons besoin pour créer cette facette. A partir de là, nous auront la représentation du produit qui nous permettra de faire la reconception du produit.

#### Facette de sortie du processus

Le stylo est composé de 15 composants dont 6 qui sont différents (figure 4.8):

- 4 x tube à encre.
- 4 x bouton poussoir.
- 4 x ressort de rappel.
- Un tube supérieur pour regrouper les tubes à encre avec les boutons poussoirs.
- Un guide de tubes à encre.
- Un tube inférieur pour la préhension.

L'objectif que nous nous sommes fixés dans ce cas d'étude est :

- La reconception du tube inférieur pour intégrer une fonction antiglisse (grip).
- L'ajout d'une fonction lampe au stylo en changeant la structure le moins possible.
- La réduction de l'encombrement de la partie inférieure pour améliorer la préhension.

Afin de réaliser les différents changements des composants visés du stylo, il nous faudra constituer une représentation du produit en sortie du processus de rétro-conception. Pour cela, nous constituons une facette d'informations qui regroupe les informations dont nous avons besoin pour reconcevoir les composants visés.

Cette facette va être composée de :

- La spécification fonctionnelle du stylo (les différentes fonctions du stylo).
- La structure des pièces visées.
- Le comportement dynamique du stylo.

La spécification fonctionnelle va regrouper les fonctions réalisées par le produit, et permettra donc d'intégrer les différentes fonctions identifiées pour l'amélioration des composants visés, en

faisant en sorte qu'il n'y ait pas de conflit avec ce qui existe déjà par rapport aux pièces qui ne changeront pas.

La structure des pièces visées permettra d'identifier les différentes interfaces que celles-ci ont avec les autres pièces qui ne changeront pas, et de les intégrer directement aux nouveaux composants. Le comportement pourra dans ce cas servir à définir l'espace géométrique dans lequel vont être conçus certains composants.

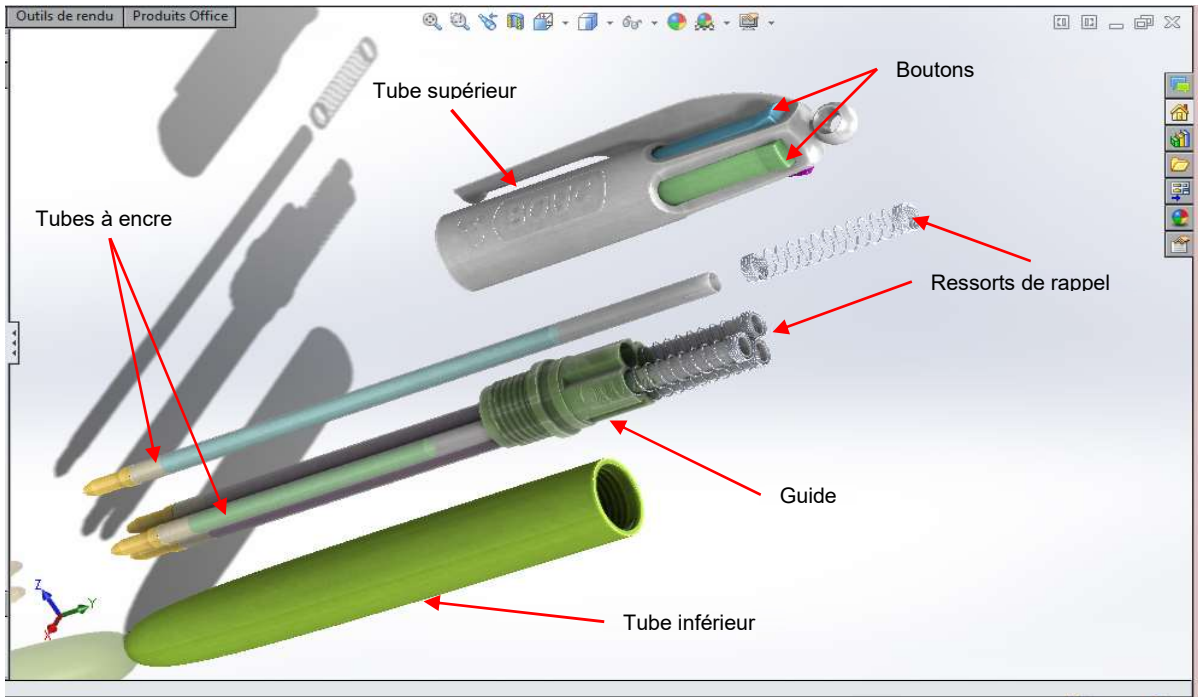


Figure 4.8 – Nomenclature du stylo 4 couleurs

#### 4. Méthodologie de rétro-conception – Rétro-Conception Assistée par Ordinateur

Dans cette partie, nous allons montrer le processus de rétro-conception basé sur la démarche Ki4D, illustré par le cas d'étude présenté précédemment, et implémenté dans une solution informatique qui est notre démonstrateur.

Nous nous baserons aussi sur nos hypothèses de départ concernant la base de données des composants et des algorithmes d'extraction des informations et connaissances à partir des données hétérogènes.

##### a. Etapes du processus de rétro-conception

Afin de récupérer la représentation du stylo dans le but de le reconcevoir, le processus de rétro-conception s'appuie sur un ensemble d'activités qui permet d'extraire les informations indispensable à la construction de la représentation à partir des données hétérogènes.

Nous pouvons décrire le processus de rétro-conception dans ce cas à travers trois activités principales (Figure 4.9) :

- L'extraction des données textuelles : activité 1.
- L'extraction des données structurelles : activité 2.
- A partir des données structurelles et textuelles, extraire le comportement du produit : activité 3.

Notre méthodologie nous permet de préparer ces activités à travers le prétraitement des données hétérogènes, et l'instanciation de la facette pour regrouper les informations à extraire. Donc, pour ce cas d'étude, nous verrons les différentes étapes allant de l'utilisation des données hétérogènes jusqu'à la constitution du résultat.

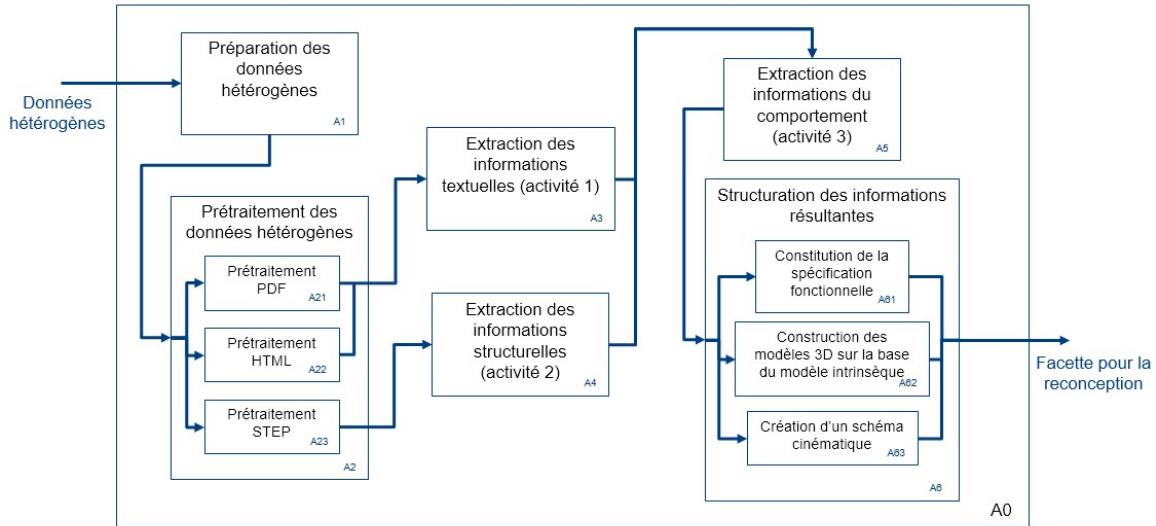


Figure 4.9 – Activités du processus de rétro-conception dans le cas d'étude

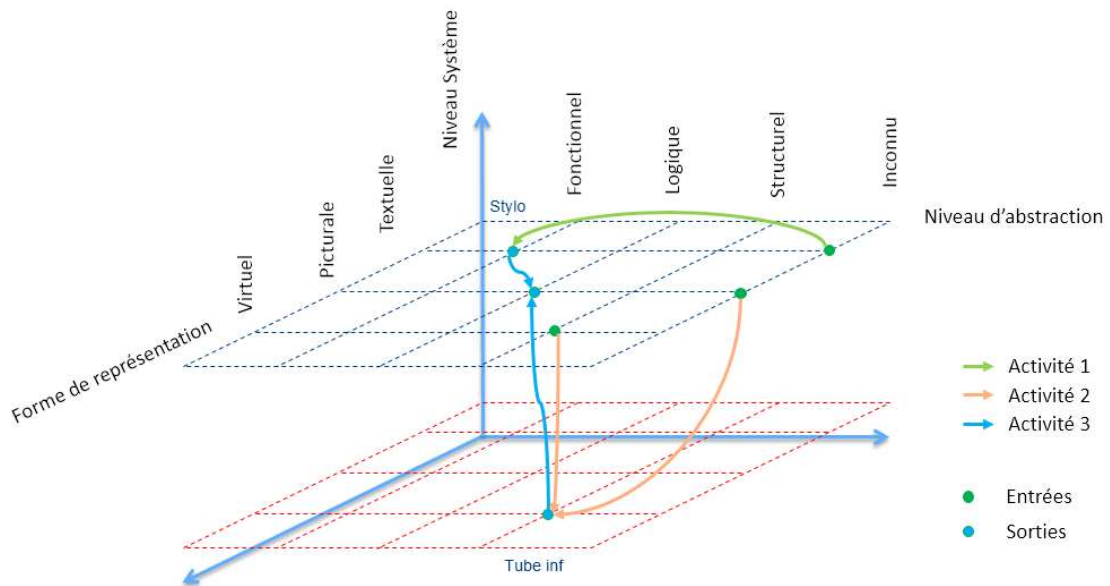


Figure 4.10 – Schéma de l'espace 4D pour l'exemple de la reconception du stylo

Le système de rétro-conception est construit de manière à pouvoir signaler tout manque susceptible d'arriver dans le processus. Cela est possible tout simplement grâce que retours reçus des différents algorithmes d'extraction. Si à la structuration des informations une des entités d'informations faisant partie de la facette de sortie est vide, alors le système signale un manque d'informations. Dans ce cas le système demandera à l'utilisateur d'analyser les retours des algorithmes d'extraction, ou d'ajouter des données hétérogènes.

Il faut aussi signaler que le rétro-concepteur reste celui qui prend les décisions. Il a toujours un œil sur le processus de rétro-conception, et c'est lui qui valide les résultats, qu'ils soient intermédiaires ou finaux.

La figure 4.10 illustre le schéma de l'espace 4D avec les différents points correspondant aux états intermédiaires du processus de rétro-conception, et les flèches correspondant aux différentes activités.

Le moteur de workflow dans ce cas de rétro-conception génère cinq points d'entrée relatifs aux différentes données hétérogènes :

- P1(PDF) = (Inconnu, Texte, Stylo, Conception)
- P2(PDF) = (Inconnu, Pictural, Stylo, Conception)
- P3(HTML) = (Inconnu, Textuel, Stylo, Conception)
- P4(HTML) = (Inconnu, pictural, Stylo, Conception)
- P5(STEP) = (Structure, Virtuel, Stylo, Conception)

Il génère aussi quatre points de sortie relatifs à la facette :

- P6(Facette) = (Fonction, Textuel, Stylo, Conception)
- P7(Facette) = (Structure, Virtuel, TubeInf, Conception)
- P8(Facette) = (Structure, Virtuel, TubeSup, Conception)
- P9(Facette) = (Comportement, Pictural, Stylo, Conception)

Le workflow résultant sera :

- Activité 1 : P1,P3 vers P6
- Activité 2 : P2, P4, P5 vers P7, P8
- Activité 3 : P6, P7, P8 vers P9

#### Données hétérogènes

L'intégration des données hétérogènes passe par la préparation et le prétraitement de ces données dans le but d'en extraire les informations et connaissances pertinentes à l'intégration. Nous avons proposé un modèle pour consolider ce processus de préparation, et ainsi fournir des informations de traitement plus simples à utiliser. Ainsi, chaque donnée hétérogène en entrée du processus de rétro-conception se verra être représentée selon ce modèle.

Dans la figure 4.11, est illustrée une instance du modèle de données hétérogènes pour le fichier PDF contenant la fiche descriptive du produit. Le fichier chargé dans le système sera toujours considéré comme fichier composé (« CompoundDocument »), et dépendamment de sa structure, il pourra être décomposé dans l'étape de prétraitement ou non.

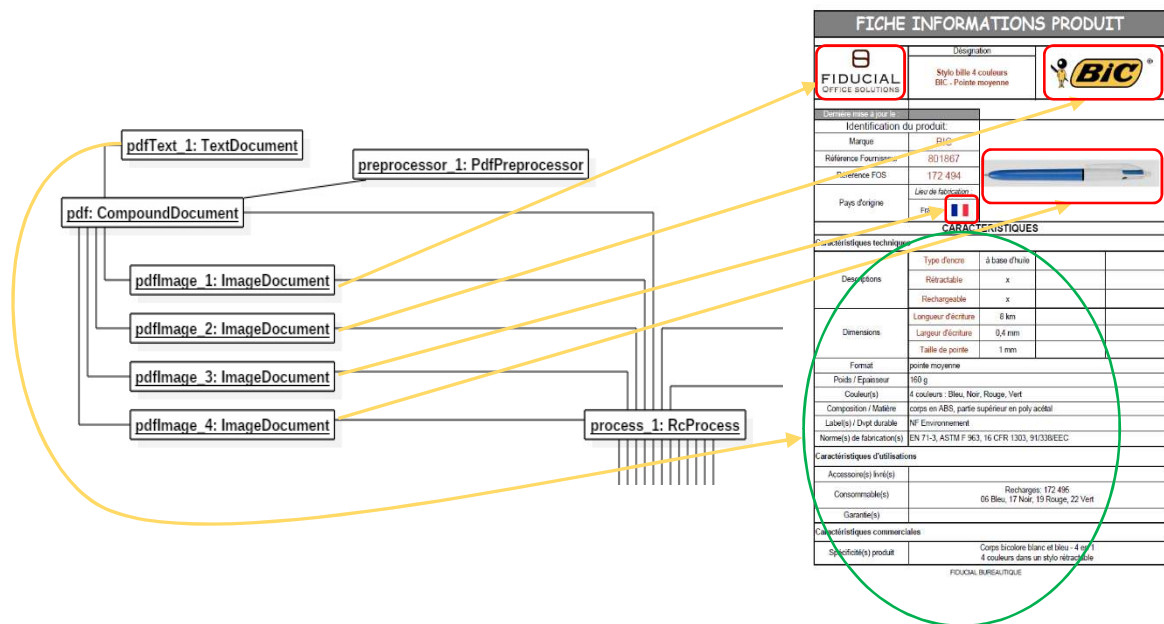


Figure 4.11 – Fraction du diagramme d’objets montrant l’instanciation du modèle pour les données hétérogènes – exemple du fichier PDF

La figure 4.11 fait partie d’un diagramme d’objet plus grand représentant les quatre données hétérogènes prises en compte dans notre démonstration. Par soucis de clarté d’illustration, nous avons mis le diagramme complet dans l’annexe. De même pour tous les diagrammes incomplets suivants.

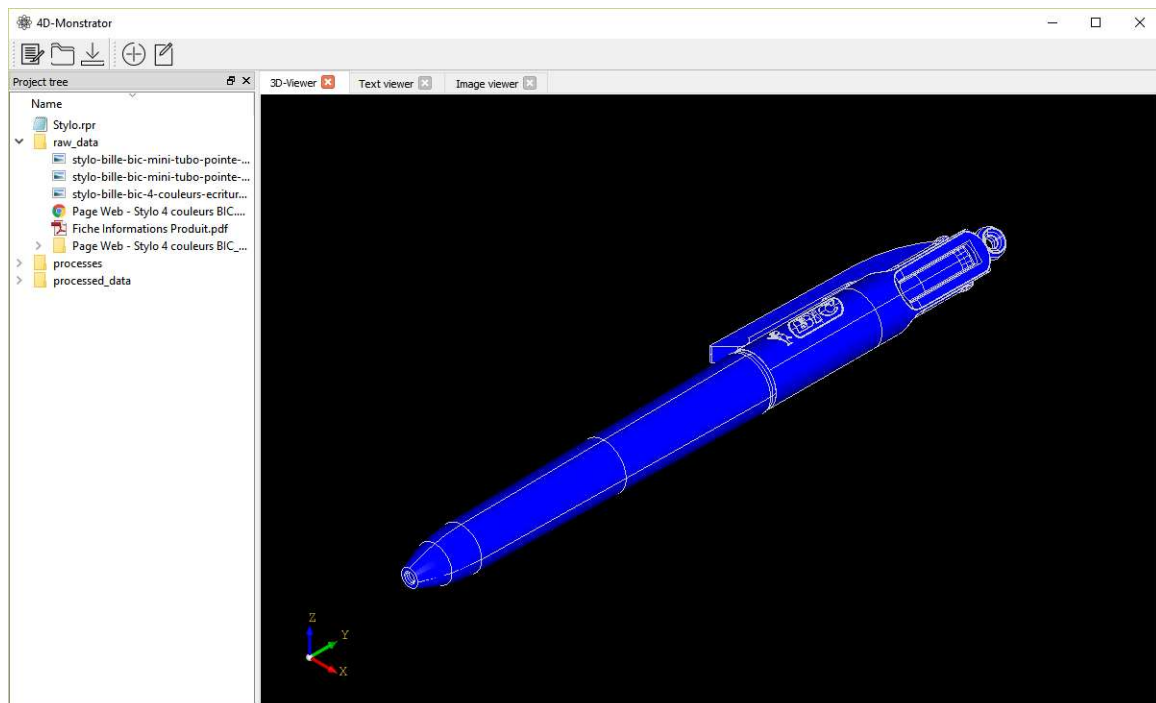


Figure 4.12 – Chargement des données hétérogènes du stylo (Démonstrateur)

La figure 4.12 montre le résultat du chargement des données hétérogènes dans le démonstrateur. L’arborescence du projet est mise à jour, et il est alors possible d’afficher les différents fichiers des données hétérogènes, en utilisant les vues du démonstrateur décrites précédemment. Une



évolution envisageable du démonstrateur est l'intégration d'outils de modification des données afin de cibler plus précisément les informations pour l'extraction.

### Prétraitement des données hétérogènes

L'étape de prétraitement des données hétérogènes est responsable de la simplification des représentations des informations. En effet, il est possible d'avoir des fichiers contenant plusieurs formes de représentation d'informations. Dans le but d'en tirer le maximum, nous les séparons en plusieurs formes de représentations simples. Cette étape est nécessaire, puisqu'elle permet de simplifier les opérations d'extraction d'informations. Les algorithmes d'extraction vont traiter des données de formes simples (non composées) alors, il nous faut préparer les données pour les algorithmes d'extraction.

Dans la figure 4.11, on peut voir que le fichier PDF est séparé en plusieurs parties distinctes : Quatre documents images et un document texte. Cela reviendrait à séparer les différentes images, du texte que contient le fichier. Concrètement, cela reviendrait à mettre un fichier qui regroupe toutes les informations textuelles, et mettre chaque image dans un fichier séparé, tout en gardant la trace de ces informations.

Dans la figure 4.11 à droite, on voit les objets correspondant aux données de formes différentes extraites à partir du prétraitement du fichier PDF. Chacune de ces données sera séparée en un fichier distinct pour préparer le travail des algorithmes d'extraction.

Cette opération suit le processus de prétraitement des données hétérogènes illustré par le diagramme de séquence de la figure 4.13 (pour le fichier HTML dans ce cas).

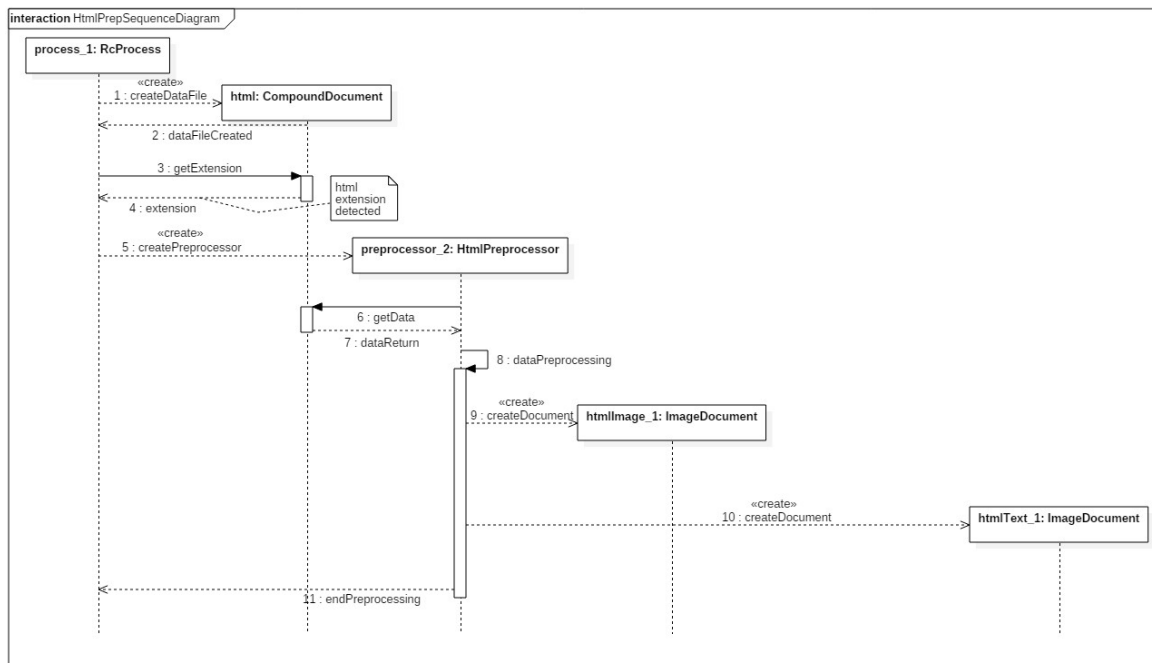


Figure 4.13 – Diagramme de séquence du processus de prétraitement (HTML)

A la demande de l'utilisateur, le document composé en entrée est traité par l'objet « preprocessor\_2 » spécialisé dans le prétraitement des fichiers HTML, après avoir reconnu le



type de fichier. Il permettra de faire l'extraction des informations textuelles (« htmlText\_1 ») et des informations picturales (« htmlImage\_1 »).

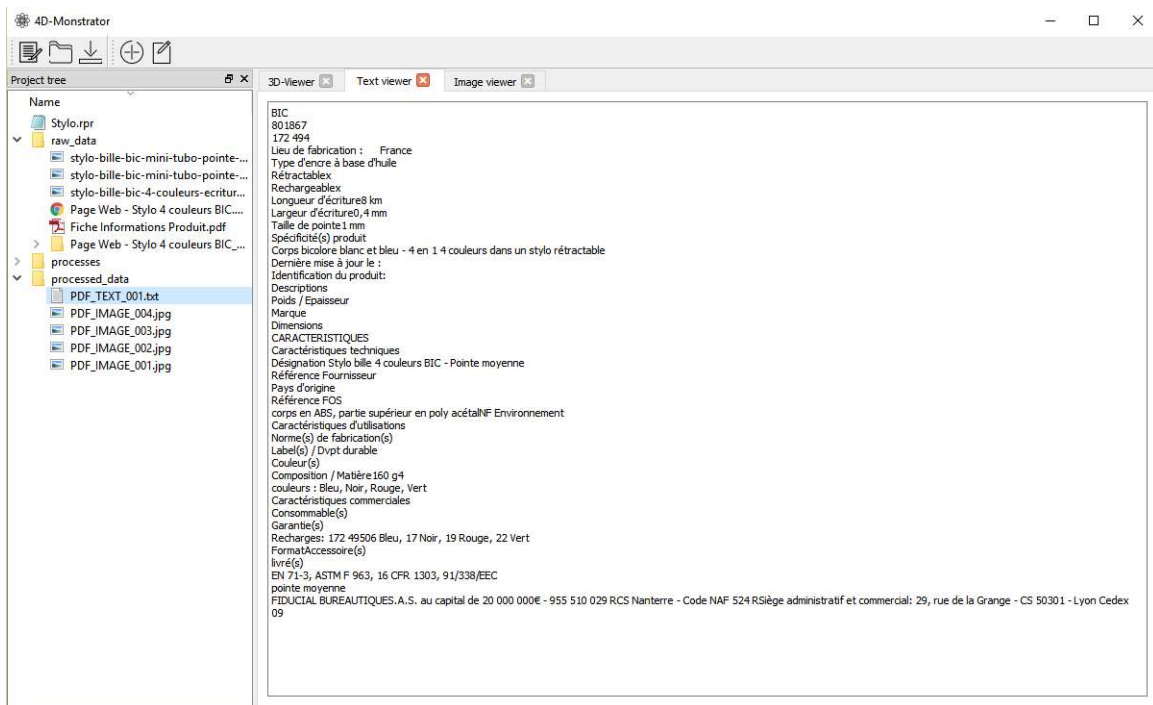


Figure 4.14 – Prétraitement des données hétérogènes du stylo effectué

La figure 4.14 montre le résultat du prétraitement des données hétérogènes. Nous pouvons voir que le fichier PDF est divisé en cinq parties : une partie textuelle, et quatre parties picturales. A partir de ces données élémentaires, nous procéderons à l'extraction des informations grâce à l'utilisation des algorithmes d'extraction.

### Extraction des informations et connaissances

L'étape d'extraction d'informations et connaissances ne relève pas de notre responsabilité, néanmoins, l'interfaçage avec le système d'information doit être construit de manière à rendre possible l'intégration des algorithmes pour l'extraction des connaissances.

Dans le modèle de la démarche Ki4D, il y a une partie du modèle de données que nous proposons qui est responsable de l'interface avec les algorithmes d'extraction. L'architecture que nous proposons étant orientée services, nous avons alors opté pour un hub principal dans lequel circulent les informations de manière à y envoyer les requêtes d'extraction d'informations visant les algorithmes d'extraction. C'est à travers la classe représentant le système externe « ServiceHub » que les messages vers les services d'extraction d'informations et connaissances seront envoyés.

Cependant, il nous faudra préparer ces informations de manière à pouvoir cibler les services adéquats, tout en prenant en compte la structuration ultérieure des informations résultantes de l'extraction.

Dans le diagramme de séquence représenté dans la figure 4.15, nous pouvons voir comment se déroule le processus d'extraction des informations et connaissances à partir des données hétérogènes prétraitées.

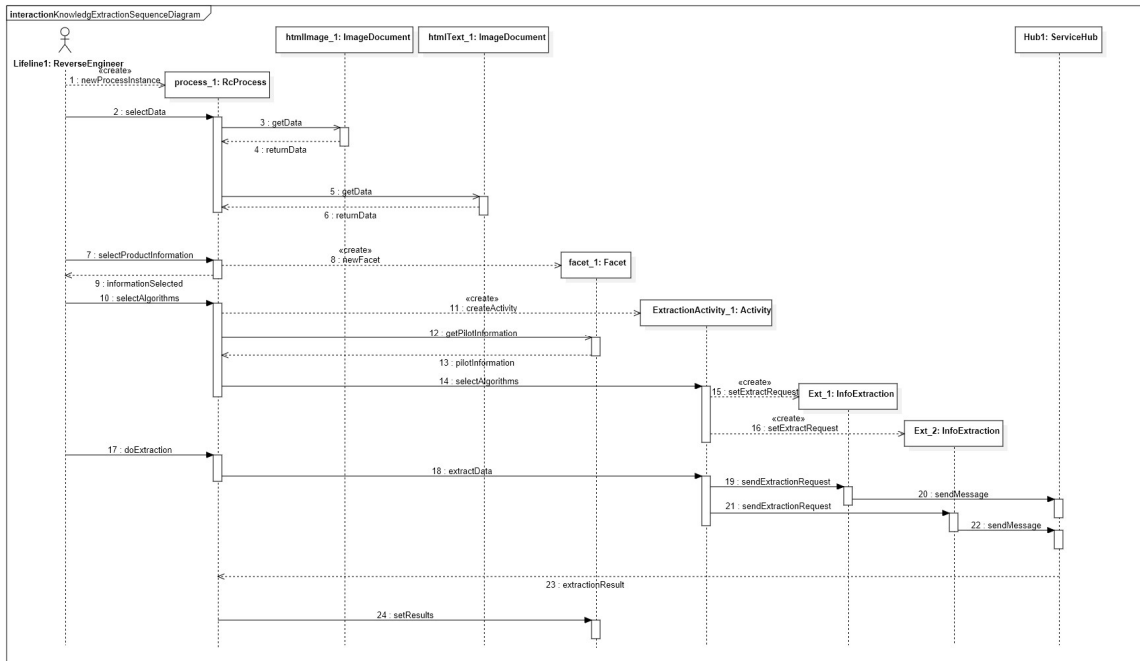


Figure 4.15 – Diagramme de séquence montrant le processus d'extraction des informations et connaissances – exemple des données du fichier HTML

En ayant pris l'exemple du fichier HTML, nous pouvons voir les deux documents représentant les informations de formes élémentaires (textuelle, et picturale).

L'utilisateur commence par sélectionner les entités d'information qui lui sont pertinentes en sortie du processus de rétro-conception (« selectProductInformation »). Cette opération se traduira par la création d'une facette (« facet\_1 ») et de l'attribution des entités d'information pertinentes. Concrètement, cette opération de sélection se fera à travers le choix des entités dans une liste déroulante, et les différentes entités qu'on retrouvera dans la liste seraient les entités du modèle-produit et des modèles métier.

Après la sélection des entités, l'utilisateur procédera à la sélection des algorithmes d'extraction. Selon le mode de fonctionnement, cette opération peut être manuelle ou automatique. Le fonctionnement manuel permettra à l'utilisateur de sélectionner dans une liste, les algorithmes qu'il veut qu'ils soient utilisés, et qui correspondent aux données à analyser. Le fonctionnement automatique utilisera les différents algorithmes qui correspondent à chaque type de donnée, et à chaque entité d'information (par exemple, l'utilisation d'un algorithme de traitement du langage naturel, avec un ensemble de prédicats relatifs à l'entité fonction). Après la définition de la liste des algorithmes à utiliser, on instancie une activité d'extraction dans laquelle on regroupe tous les messages à envoyer dans le hub « ServiceHub » afin de cibler les différents algorithmes d'extraction choisis, et cela à travers l'utilisation des tâches d'extraction d'informations « InfoExtraction ».

### Intégration des données hétérogènes

Après avoir préparé les données hétérogènes, et les avoir envoyées aux différents services qui s'occupent de l'extraction d'informations et de connaissances, vient l'étape d'intégration effective des résultats issus de l'extraction.

D'un côté, avec la sélection des entités d'informations produit, l'utilisateur a déjà défini les informations qui sont recherchées dans les données hétérogènes pour compléter le processus de rétro-conception. Alors l'étape d'intégration s'appuiera sur ce choix pour structurer les informations issues de l'extraction, dans la bonne structure d'information.

Dans la figure 4.16, le « ServiceHub » renvoie une réponse quant à l'extraction des informations à partir des messages envoyés par le système. Chaque service (spécifique à un algorithme) devra alors renvoyer un message après l'opération d'extraction, statuant sur l'état du processus qui peut trouver ou non des informations pertinentes dans les données qu'on lui a envoyé. Sachant que chaque service sera spécifique à une entité d'information, alors la structuration sera plus amplement simplifiée, puisqu'elle fera correspondre chaque résultat provenant d'un algorithme avec l'entité qui lui correspond. On obtiendra alors une instance du modèle de facette avec les informations issues du processus d'extraction (figure 4.15)

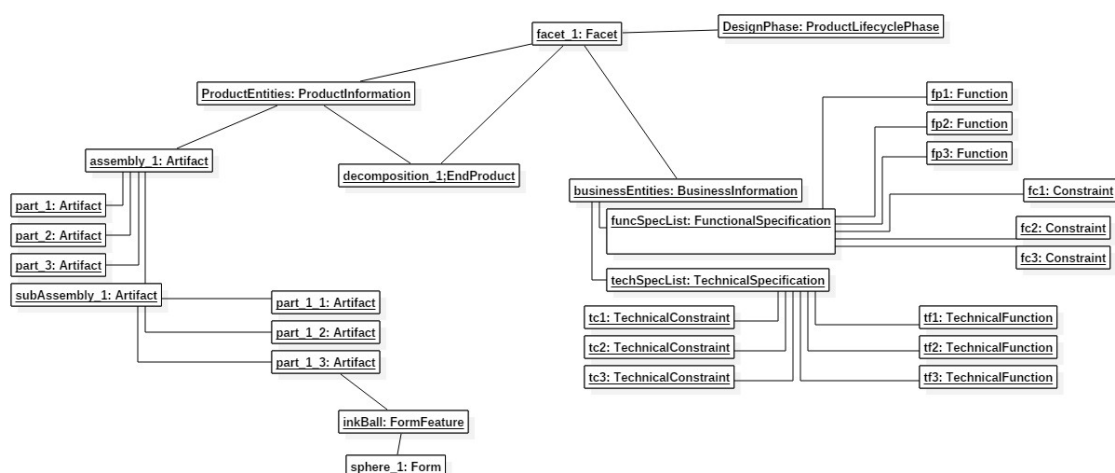
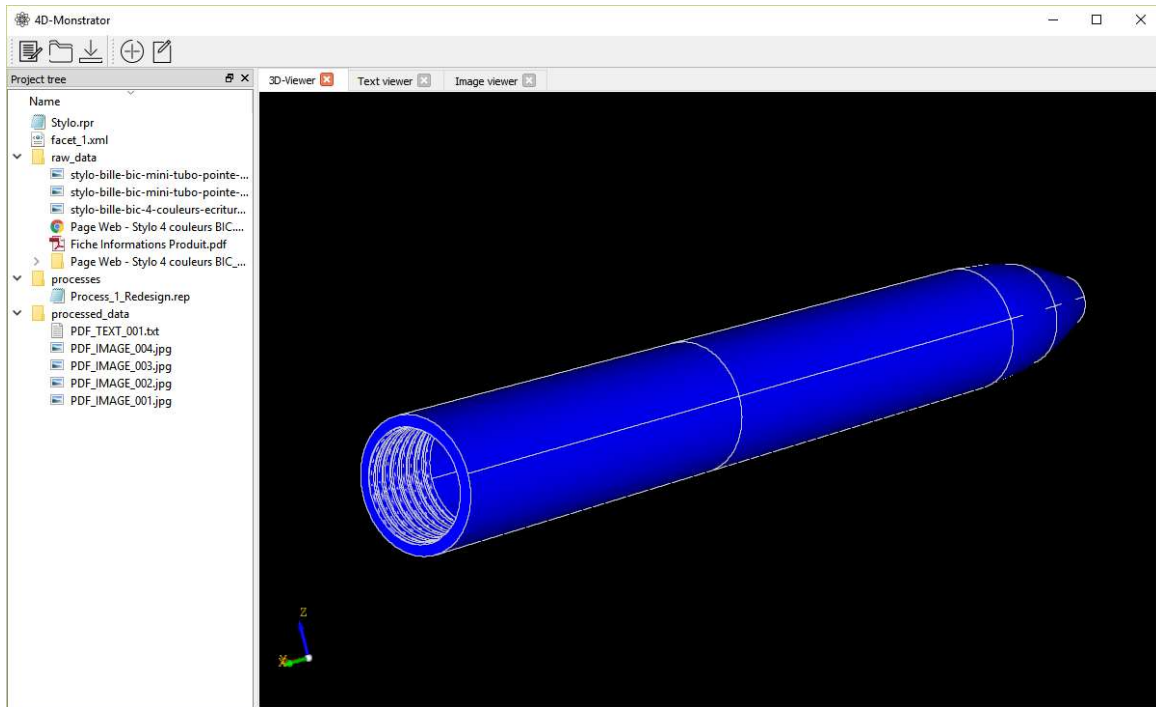


Figure 4.16 – Instance du modèle de facette avec les informations extraites à partir des données hétérogènes, et utilisation du modèle-produit (intrinsèque) et du modèle métier de conception

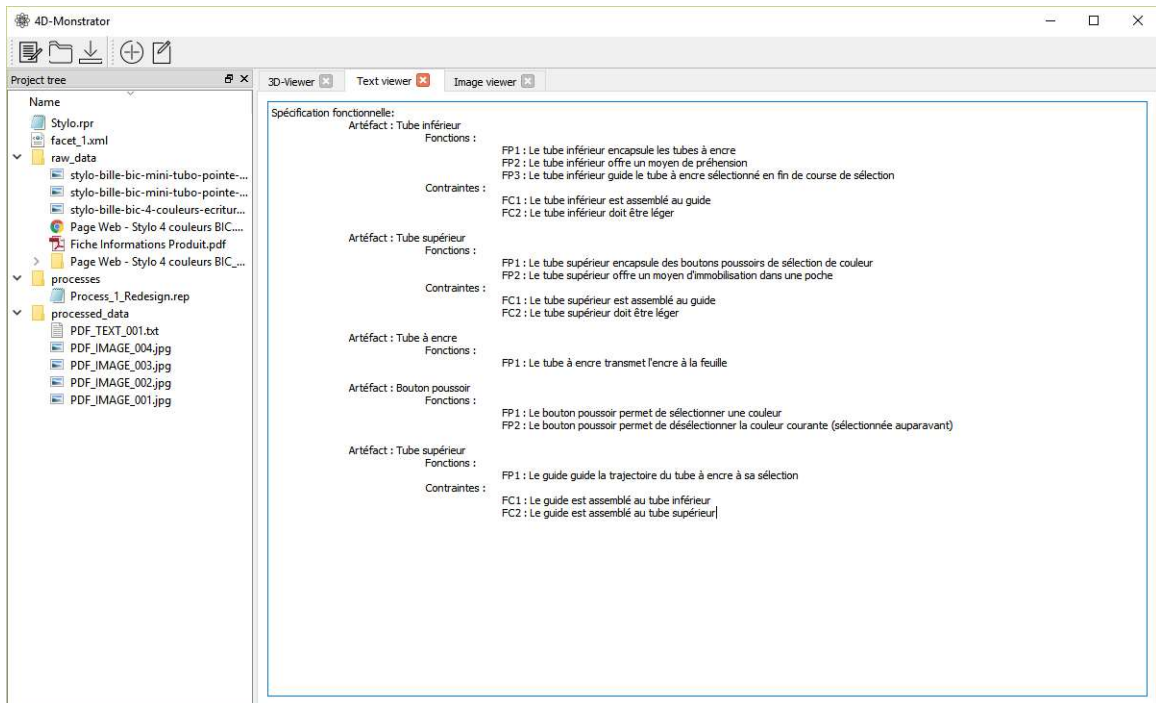
La figure 4.17 montre les résultats obtenus à la fin du processus de rétro-conception. La première image illustre la représentation géométrique du tube inférieur du stylo, avec un texte concernant les informations sur les interfaces (figure 4.17 – A). Cette première structure permettra de procéder à la reconception du tube inférieur du stylo en gardant les informations qui ne changeront pas, en d'autres termes ses interfaces.

La deuxième image illustre la représentation textuelle relative à la spécification technique du stylo. Dans l'objectif de reconcevoir le stylo, on part de cette liste de fonctions, à laquelle on intègre les différentes autres fonctions (deux dans notre cas : ergonomie du tube inférieur, et

l'intégration d'un lampe). Puis nous procédons en utilisant des méthodes et outils de conception classique pour arriver à fabriquer le nouveau produit amélioré.



(A)



(B)

Figure 4.17 – Résultats de l'intégration des données dans le démonstrateur (cas du stylo)

### Recherche de correspondances

L'étape de recherche de correspondances n'a pas été intégrée au démonstrateur vu qu'elle n'a pas été explorée dans notre travail. Néanmoins, il est possible d'illustrer comment cette étape peut être réalisée dans le cadre de notre travail.

Jusque-là, nous avons présenté le processus de rétro-conception arrivant à l'intégration des données hétérogènes en passant par l'extraction des informations et connaissances. A partir de cette étape, il est possible d'utiliser les informations de deux manières :

- La première est l'utilisation directe des informations dans la structure d'informations constituée par la facette, pour créer une nouvelle représentation du produit.
- La deuxième est l'utilisation des informations dans la facette dans le but de rechercher des représentations identiques ou équivalentes dans une base de données de composants et de systèmes.

Dans le premier cas, cela est synonyme avec la fin du processus de rétro-conception avec la restitution des informations dans la facette. Dans le deuxième cas, cela signifie que la fin du processus de rétro-conception se fera à travers la proposition (dans la mesure du possible) d'une représentation du produit, similaire ou identique à ce qui a été extrait des données hétérogènes.

Le processus de recherche est assez simple dans l'ensemble. A partir des informations dans la facette, le système constitue une requête pour récupérer les informations similaires qu'on retrouve dans la base de données des composants.

Finalement, dans le cas où des informations sur des composants similaires sont retrouvées, la base de données renvoie une réponse au système avec les composants correspondants. Il est possible d'avoir plusieurs réponses similaires à la requête, il revient alors à l'utilisateur de choisir les informations qui lui conviennent. De cette manière, il pourra récupérer des représentations pertinentes beaucoup plus rapidement qu'en utilisant les informations issues de l'extraction directement, et c'est là l'objectif d'automatiser une partie du processus de rétro-conception.

## III. Deuxième cas d'étude : reengineering de l'attelage mobile d'un moteur monocylindre

### 1. Objet étudié

L'objet étudié dans ce deuxième cas d'étude est un moteur monocylindre Diesel, et plus précisément son attelage mobile (piston, bielle, vilebrequin) comme montré dans la figure 4.18. C'est le modèle qui nous a permis de développer notre démarche.

C'est un assemblage qui contient trois ensembles de pièces distinct : le premier ensemble représenté par le piston, le deuxième par la bielle, et le troisième par le vilebrequin.

Les trois ensembles constituent un système qui remplit différentes fonctions. Le but étant de retrouver le contexte global dans lequel a été conçu le moteur, en fixant comme objectif l'utilisation directe de ces informations dans le but de faire du reengineering dans le but d'améliorer certaines matérialisations des fonctions du système.

Il est à noter que dans le but de simplifier le cas d'étude, nous avons omis d'intégrer les différentes vues concernant les diagrammes d'objets, montrant l'instanciation des différents modèles. Ceci est dû à la complexité de description des instances des différents modèles que nous avons développé pour représenter l'assemblage en question. En effet, ceci implique une grande quantité d'informations à gérer.

Pour réaliser la rétro-conception de l'objet en question, nous utiliserons un ensemble de données hétérogènes que l'on a obtenu de plusieurs sources différentes. Un premier ensemble de données provient du scan 3D des pièces. Nous utiliserons aussi des photos qui ont été prises par les membres de l'équipe responsable du projet de rétro-conception. Finalement, nous avons récupéré une fiche technique avec certaines caractéristiques techniques du système.

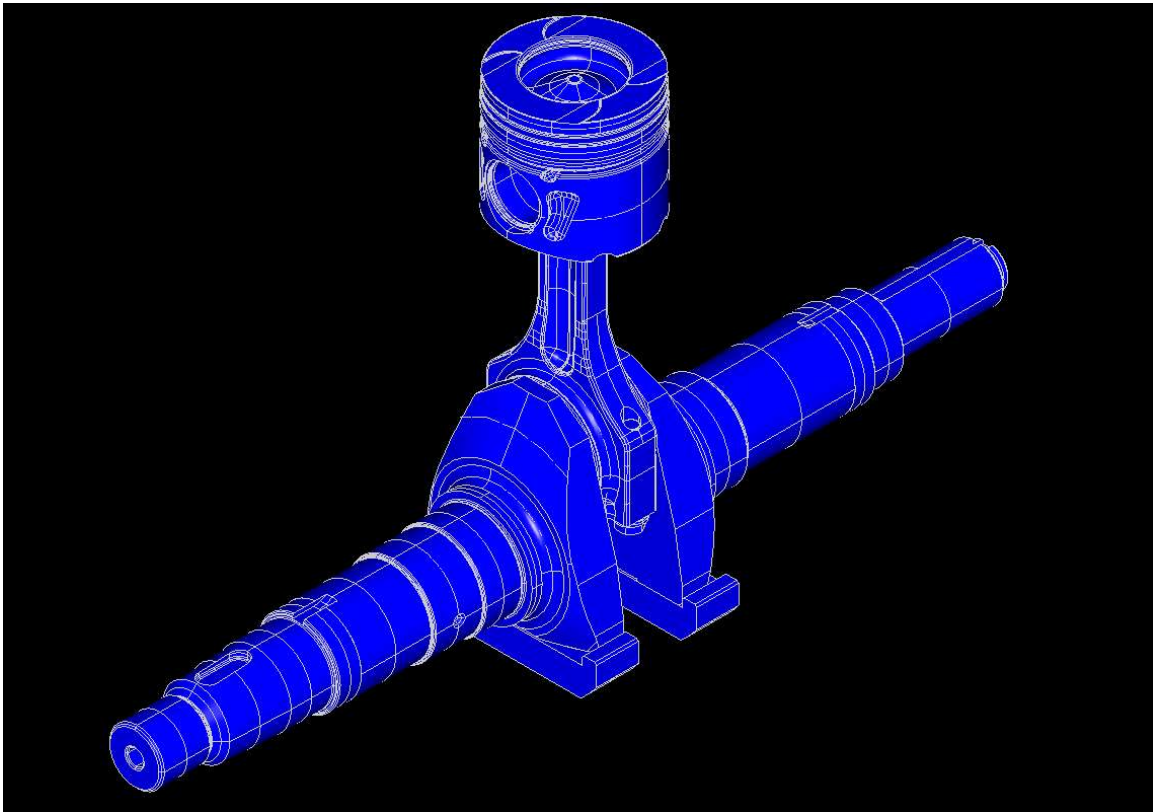


Figure 4.18 – Objet étudié pour la démonstration : attelage mobile d'un moteur monocylindre Diesel.

## 2. Données hétérogènes pour l'analyse

L'attelage mobile sera rétro-conçu sur la base d'un ensemble de données qu'on retrouve sur l'objet de différents types. Nous avons choisi les données principales suivantes (Annexe – Figures A.11 à A.17) :

- Des nuages de points issus de scans des pièces du système.
- Des images prises des différents composants du système.
- Un fichier textuel représentant la fiche technique du système.

De la même façon que pour le stylo, nous n'avons pas cherché la complétude des informations utilisées dans le processus de rétro-conception, mais plutôt une démonstration de comment les

informations peuvent être extraites à partir de ces types de données (représentations opérationnelles). Aussi, pour chacune de ces données, un traitement manuel a été effectué, mais il est possible d'utiliser des algorithmes et des mécanismes d'extraction d'informations.

### 3. Objectif de la rétro-conception de l'attelage mobile

#### a. Objectif

Dans le processus de rétro-conception du monocylindre nous analyserons le produit dans le but de construire une représentation de celui-ci qui doit correspondre au contexte de reengineering. Donc, l'objectif principal que nous nous sommes fixés pour ce cas d'étude est de pouvoir utiliser les informations issues de l'analyse du produit dans le but de créer une représentation utilisable dans le cadre du reengineering de certains des composants du système.

La rétro-conception pour le reengineering est un processus qui permet de récupérer les informations concernant l'aspect structurel du produit qui correspond aux entités de conception (entités technologiques). Il nous faudra alors construire une représentation structurelle du produit qui prend en compte les entités technologiques visées par le reengineering, et cela à partir des données hétérogènes.

Le processus de rétro-conception dans ce cas d'étude aura pour objectif de construire une facette qui regroupe l'ensemble des informations structurelles du produit. Cela permettra de contrôler le processus de rétro-conception et cibler les informations dont nous aurons besoin pour créer cette facette. A partir de là, nous aurons la représentation du produit qui nous permettra de faire le reengineering du produit.

#### Facette de sortie du processus

Le moteur est constitué de plusieurs composants qu'on regroupe en 3 ensembles (figure 4.19):

- Un ensemble relatif au piston avec : piston, axe de piston, deux jonc d'arrêt.
- Un ensemble relatif à la bielle : tête de bielle, pied de bielle, demi-coussinets, vis de fixation.
- Un ensemble relatif au vilebrequin : le vilebrequin, demi-coussinets.

L'objectif que nous nous sommes fixés dans ce cas d'étude est :

- Le changement de la géométrie du bol du piston (optimisation du swirl).
- Optimisation de la structure de la bielle, du point-de-vue de la vibration et de la masse.

Afin de réaliser les différentes optimisations des composants visés du moteur, il nous faudra constituer une représentation du produit en sortie du processus de rétro-conception. Pour cela, nous constituons une facette d'informations qui regroupe les informations dont nous avons besoin pour procéder à l'amélioration des composants visés (reengineering).



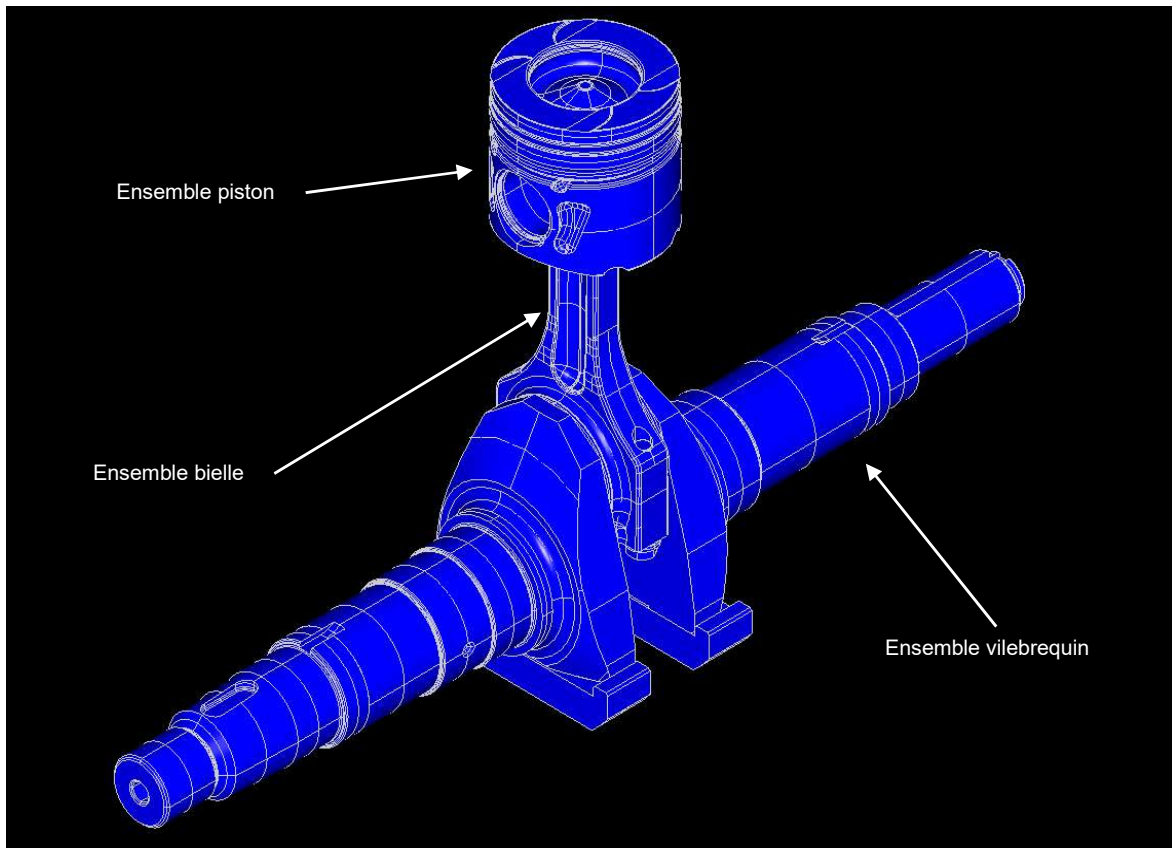


Figure 4.19 – Nomenclature de l'attelage mobile du moteur monocylindre Diesel

Cette facette va être composée de :

- La structure du produit (le modèle intrinsèque en entier).
  - Cibler la structure du bol de piston.
  - Cibler la structure de la bielle.

La structure des pièces visées permettra de créer des représentations géométriques pouvant être utilisées dans des processus de calcul et de simulation, pour ainsi procéder à l'optimisation des entités technologiques, ou des caractéristiques visées. Cette représentation géométrique intégrera des informations concernant les entités technologiques visées, qu'on récupérera des données hétérogènes.

#### 4. Méthodologie de rétro-conception

##### a. Etapes du processus de rétro-conception

Le processus de rétro-conception dans ce cas s'appuie sur un ensemble d'activités qui permettent d'extraire les informations indispensables à la construction de la représentation géométrique augmentée des entités technologiques, à partir des données hétérogènes.

Nous pouvons décrire le processus de rétro-conception dans ce cas à travers trois activités principales (Figure 4.20) :

- L'extraction des données textuelles : activité 1.
- L'extraction des données structurelles : activité 2.



- A partir des données structurales et textuelles, extraire le comportement du produit : activité 3.

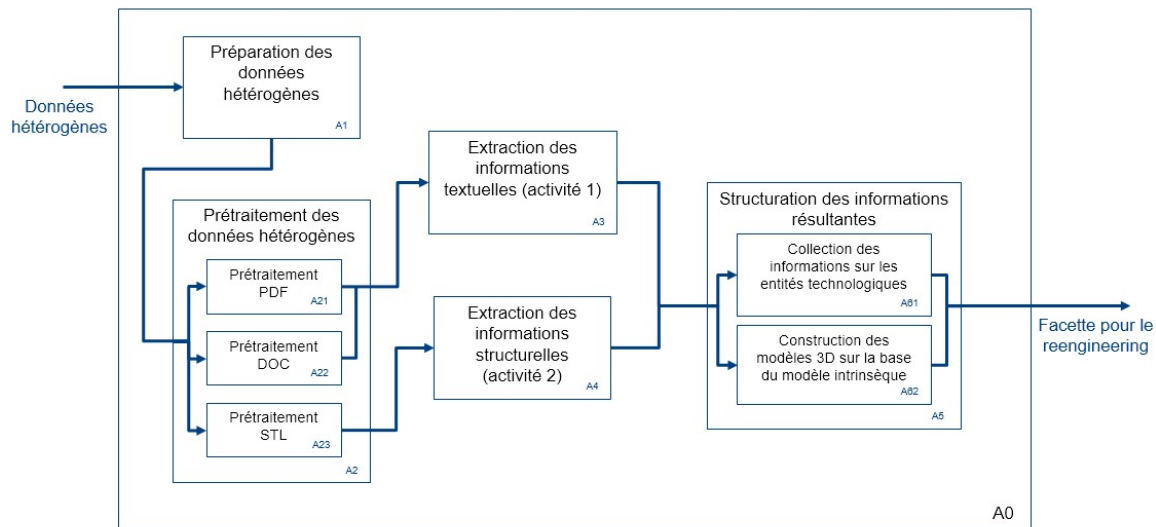


Figure 4.20 – Activités du processus de rétro-conception pour le reengineering

Notre méthodologie nous permet de préparer ces activités à travers le prétraitement des données hétérogènes, et l'instanciation de la facette pour regrouper les informations à extraire. Donc, pour ce cas d'étude, nous verrons dans l'ensemble, les différentes étapes allant de l'utilisation des données hétérogènes jusqu'à la constitution du résultat.

La figure 4.21 représente le schéma 4D correspondant au processus de rétro-conception du moteur. Il regroupe l'ensemble des points correspondants aux données en entrée du processus, ainsi que les différents sous-processus qui correspondent aux flèches entre les points.

Le moteur de workflow dans ce cas de rétro-conception génère cinq points d'entrée relatifs aux différentes données hétérogènes :

- P1(STL) = (Structure, Virtuel, Bielle, Conception)
- P2(STL) = (Structure, Virtuel, Piston, Conception)
- P3(JPEG) = (Structure, Pictural, Bielle, Conception)
- P4(JPEG) = (Structure, Pictural, Piston, Conception)
- P5(PDF) = (Structure, Textuel, Moteur, Conception)

Il génère aussi deux points de sortie relatifs à la facette :

- P6(Facette) = (Structure, Virtuel, Piston, Conception)
- P7(Facette) = (Structure, Virtuel, Bielle, Conception)

Le workflow résultant sera :

- Activité 1 : P1,P3, P5 vers P6
- Activité 2 : P2, P4, P5 vers P7

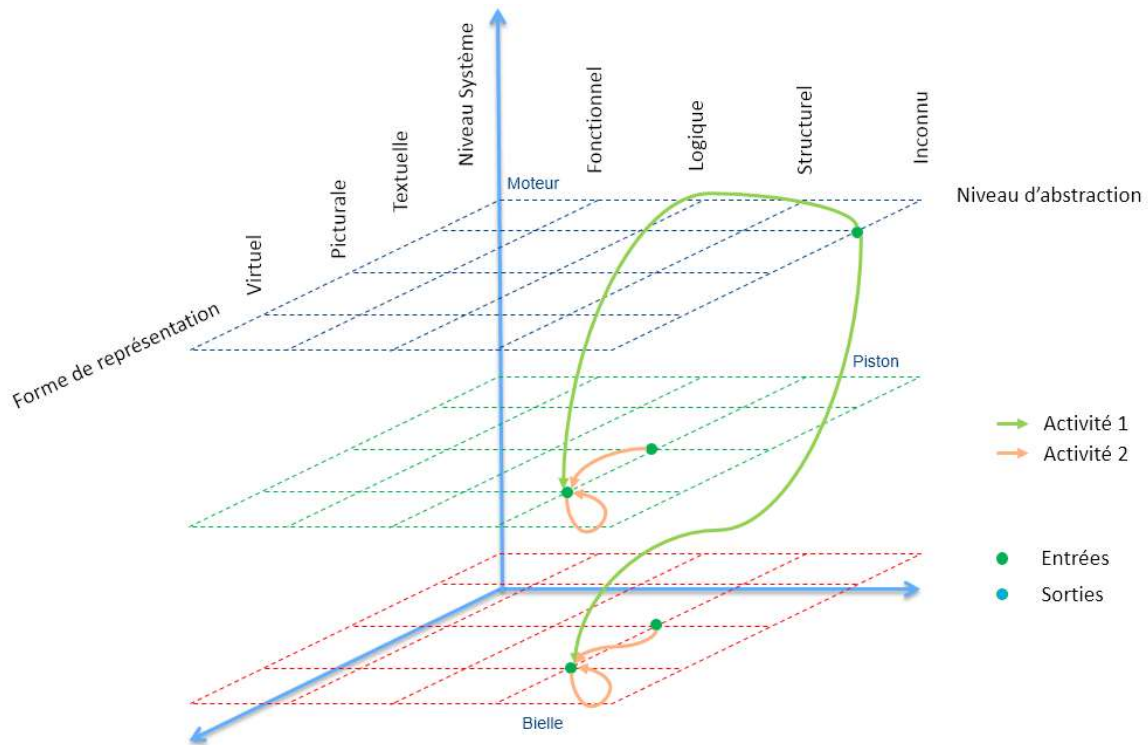


Figure 4.21 – Schéma de l'espace 4D pour l'exemple du reengineering du moteur

### Données hétérogènes

De la même manière que pour le stylo, nous commencerons par l'utilisation des données hétérogènes en les prétraitant pour les préparer à l'extraction des informations.

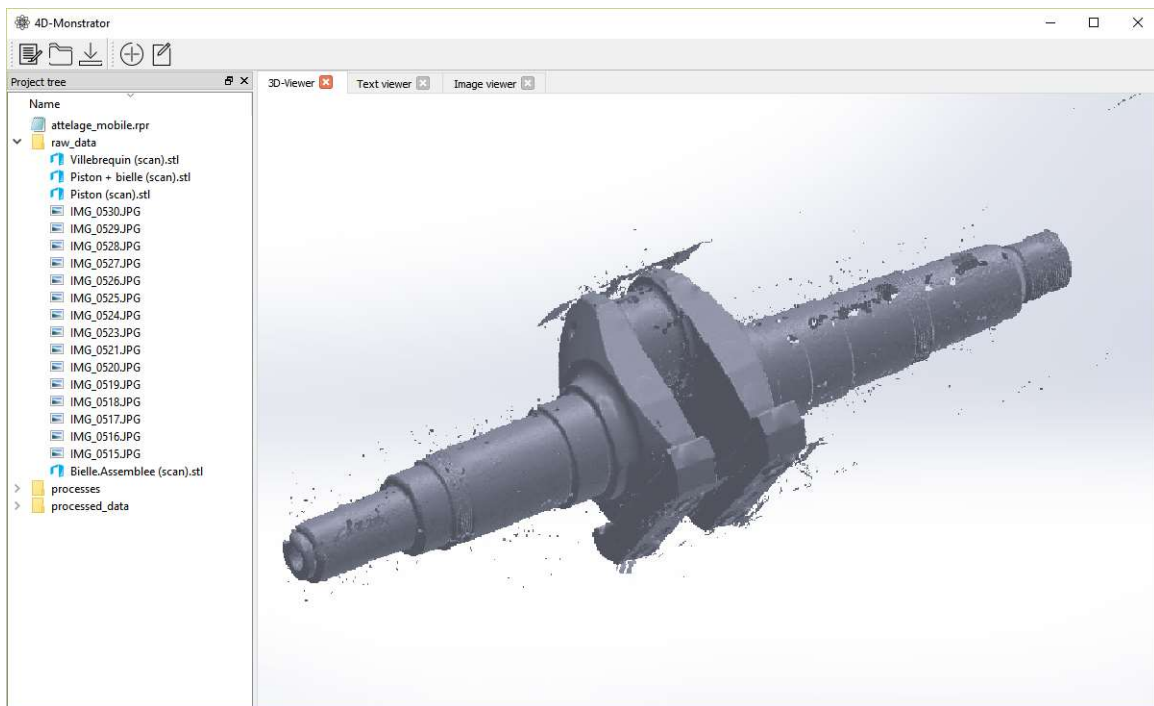


Figure 4.22 – Chargement des données hétérogènes du moteur (Démonstrateur)

La figure 4.22 montre le résultat du chargement des données hétérogènes du moteur dans le démonstrateur, avec la mise à jour de l'arborescence du projet.

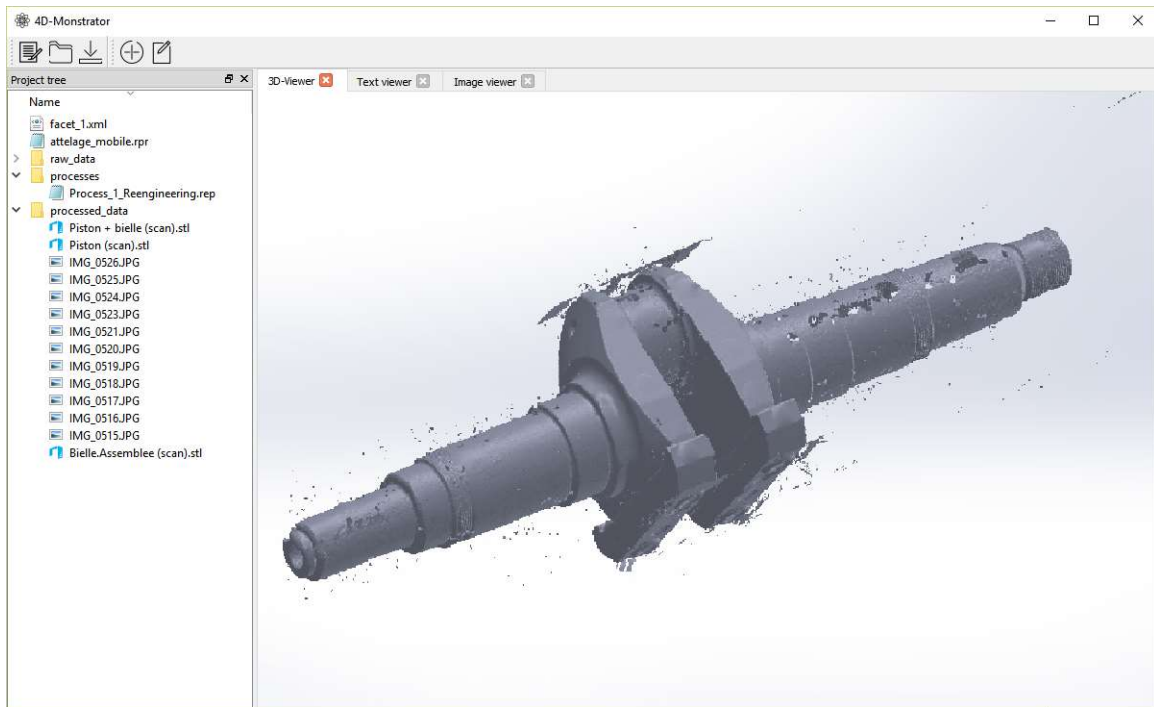


Figure 4.23 – Prétraitement des données hétérogènes du stylo effectué (Démonstrateur)

#### Prétraitement des données hétérogènes

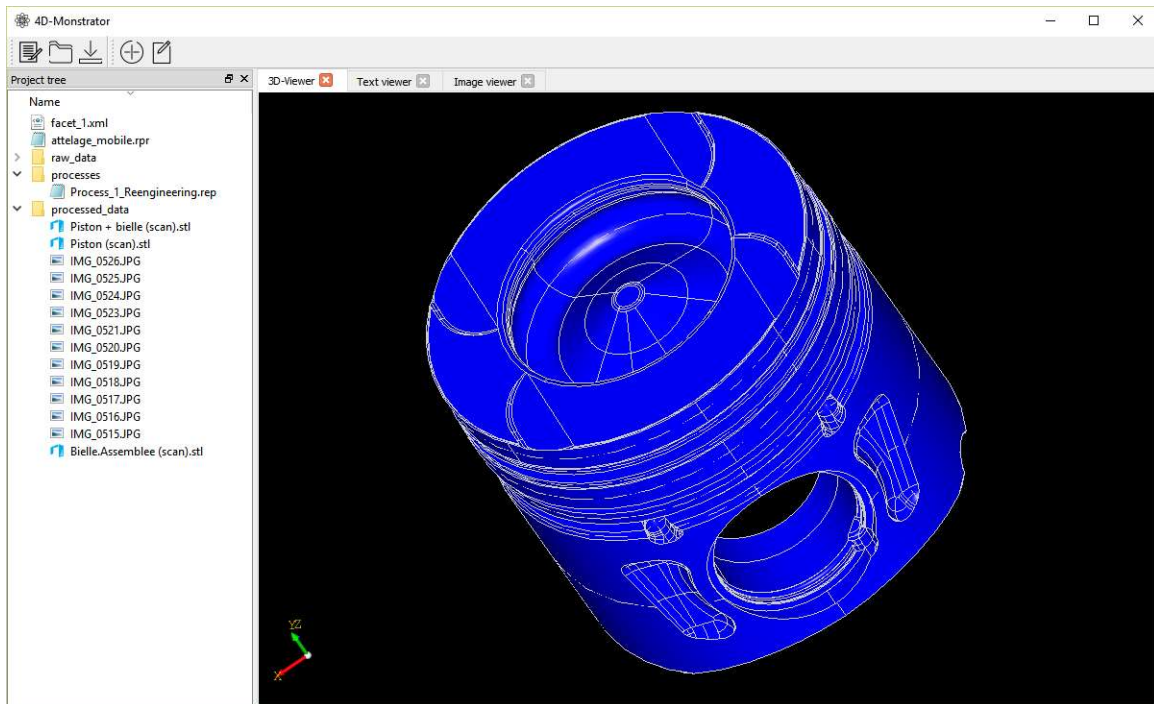
Dans le cas du moteur, le prétraitement des données hétérogènes va surtout permettre de nettoyer les nuages de points du bruit, et de combler les différentes lacunes du maillage résultant du fichier \*.stl.

La figure 4.23 illustre le résultat du prétraitement dans le démonstrateur. La figure montre un maillage qui n'est pas prétraité, ceci est dû à l'absence d'un algorithme de prétraitement de fichiers \*.stl dans notre démonstrateur.

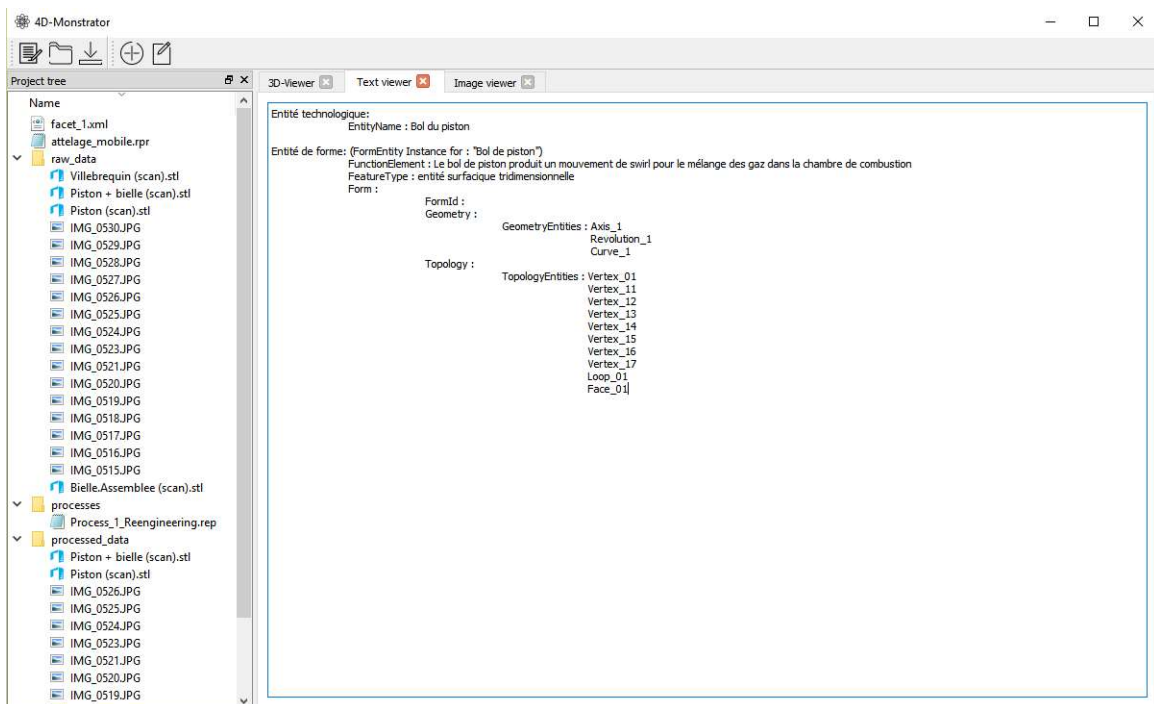
##### a. Extraction des informations et connaissances et intégration des données hétérogènes

Cette étape dans le cas du moteur peut être effectuée en utilisant certains algorithmes de rétro-conception classique, notamment avec d'un côté la reconstruction volumique des pièces, et d'un autre côté, l'extraction d'informations textuelles dans le but de les fusionner avec la reconstruction géométrique, et de fournir une représentation prenant en compte les entités technologiques des pièces.

Le résultat final sera un modèle 3D (figure 4.24 - A) de la pièce augmenté des informations sur les entités géométriques du piston (figure 4.24 - B). De cette manière, le reengineering de la pièce est rendu possible puisqu'une représentation géométrique de la pièce a été récupérée, et les paramètres des entités visées récupérés.



(A)



(B)

Figure 4.24 – Résultats de l'intégration des données dans le démonstrateur (cas du moteur) (Démonstrateur)

## IV. Synthèse

Dans ce cas d'étude, nous avons illustré comment la démarche que nous proposons peut être implémentée.

Dans la première partie, nous avons vu l'analyse des données hétérogènes avec le prétraitement de celles-ci en vue de préparer l'extraction des informations pertinentes pour la reconception du stylo. L'utilisation de ces données d'analyse a permis de générer un workflow de rétro-conception spécifique à ce contexte d'étude, et ainsi, avec les informations relatives à la facette sélectionnée, de générer les opérations à réaliser en vue de compléter l'analyse.

Dans la seconde partie, nous avons pu voir comment le processus d'extraction était réalisé. Ainsi, les différentes informations et connaissances qui sont extraites des données hétérogènes sont structurées dans le modèle-produit. Cette correspondance est possible grâce aux algorithmes d'extraction qui permettent de cibler les entités d'informations du modèle-produit lors de l'extraction.

La première partie nous a permis d'illustrer les réponses apportées aux deux premières questions de la problématique, relatives à l'intégration des données hétérogènes et la structuration des connaissances. La deuxième partie nous a permis d'illustrer la réponse à la troisième question de la problématique relative à la méthodologie globale de rétro-conception.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé un cas d'étude pour illustrer la nouvelle démarche de rétro-conception basée sur l'utilisation de données hétérogènes comme données d'analyse dans le but de fournir plusieurs représentations du produit possibles.

Le premier cas d'étude est un cas simple qui a été choisi de manière à faciliter la compréhension de la démarche en mettant en place différents diagrammes d'objets pour instancier les modèles, ainsi qu'une représentation opérationnelle de chaque activité du processus de rétro-conception.

Le deuxième cas d'étude est présenté de manière à montrer l'étendue de notre nouvelle démarche de rétro-conception, et ainsi voir les différentes possibilités offertes par la nouvelle démarche.

Nous avons aussi développé un démonstrateur par lequel nous avons tenté de fournir un premier prototype de système utilisant la nouvelle démarche de rétro-conception. Cependant, il manque encore plusieurs fonctions importantes pour pouvoir effectuer un processus de rétro-conception complet, basé sur cette démarche. En effet, la partie relative aux différents algorithmes d'extraction a été laissée de côté puisqu'ils n'ont pas été développés dans notre méthodologie de rétro-conception.

Le projet ANR-METIS repose sur le travail proposé relatif à la démarche Ki4D. En effet, il regroupe deux travaux de thèse dans un seul projet : nos travaux sur la méthodologie de rétro-conception dans le contexte d'utilisation des données hétérogènes, et les travaux de [Bruneau, 2016] sur l'extraction des informations et connaissances géométriques à partir de données

virtuelles. ANR-METIS permet de prendre en compte des objets complexes dans un environnement industriel multi-métiers. C'est pour cette raison que notre démarche aborde l'aspect multi-représentations d'un côté pour répondre à l'environnement industriel multi-métiers.

# Chapitre V – Discussions et conclusion

## I. Conclusion

Dans ce manuscrit, nous avons présenté notre nouvelle démarche de rétro-conception appelée : Ki4D. Cette nouvelle démarche de rétro-conception résulte d'un travail de recherche dans l'optique de répondre à une problématique identifiée dans le contexte industriel.

La rétro-conception qui est une méthodologie couramment utilisée pour refabriquer des produits, a évolué depuis son apparition, et a atteint un niveau d'intégration non négligeable dans le processus de conception des produits. Beaucoup d'entreprises ont maintenant recours au scan 3D des produits dans différents contextes : la maintenance de produits à longue durée de vie, l'évolution des produits, la réutilisation de produits, etc. Cependant, l'intégration du processus de rétro-conception dans l'écosystème de l'entreprise reste assez restreinte, et ne concerne qu'une partie du produit, et donc une partie des processus et de l'organisme de l'entreprise : ce ne sont pas tous les processus qui peuvent utiliser les résultats de la rétro-conception, et pas n'importe quel opérateur a accès à ce processus.

Il est alors temps que la rétro-conception évolue dans le but de s'intégrer d'une manière performante et durable dans le processus de conception, et ainsi présenter un outil puissant dans l'économie de l'information. C'est dans cette optique que s'est inscrit notre travail de recherche, détaillé par ce manuscrit.

Dans le but d'apporter une première vision à cette évolution de la rétro-conception, et d'imaginer les futures solutions capables de s'intégrer à l'écosystème de l'entreprise, nous avons identifié le contexte actuel de l'industrie afin de dégager une problématique relative à l'évolution de la rétro-conception.

Nous avons pu identifier un nouvel apport possible dans la rétro-conception en considérant le processus de rétro-conception comme étant un processus d'analyse plutôt qu'un processus de refabrication de produits. Pour cela, au lieu de considérer le processus comme étant un ensemble d'activités basées sur la reconstruction géométriques du produit, nous nous sommes plutôt concentrés sur l'aspect analytique global du processus, et l'intégration de plusieurs types et formes d'informations, de sources différentes. Nous avons aussi considéré l'utilisation de connaissances dans le but de fournir des structures de données robustes, mais aussi dans le but de construire des systèmes d'interprétation des informations.

Notre problématique s'est résumée alors à trois questions principales, qui sont :

1. Comment intégrer les informations issues des données hétérogènes dans notre processus, dans le but de créer des représentations de niveaux d'abstraction élevés ?
2. Quelle stratégie utiliser pour construire et structurer les représentations du produit analysé dans le processus de rétro-conception ? Comment l'intégrer dans le processus de rétro-conception. ?
3. Comment le processus de rétro-conception peut-il être amélioré de manière globale ?

Nous avons alors proposé plusieurs solutions dans le but de répondre partiellement à la problématique, en répondant à chaque question, et une solution globale à travers l'intégration de toutes les solutions proposées dans le but de répondre totalement à la problématique. Nous présentons alors chacune de ces solutions dans son contexte d'apparition et de développement.



**Question 1 :**

***Comment intégrer les informations issues des données hétérogènes dans notre processus, dans le but de créer des représentations de niveaux d'abstraction élevés ?***

Dans le but de répondre à la première question de la problématique, nous avons proposé un processus d'analyse de données hétérogènes et un modèle de données relatif aux données d'entrée du processus de rétro-conception.

Nous nous sommes basés pour ces propositions sur le concept des représentations conceptuelles relatives à la forme que prennent les informations et connaissances lors de leur communication, et sur la représentation formelle qui concerne les documents dans leur forme réelle (fichiers, données CAO, spécifications, etc.)

Le processus d'analyse des données hétérogènes permet de prétraiter les données hétérogènes dans le but de les préparer à l'opération d'extraction d'informations. Cette opération permet de décomposer les représentations formelles en représentations conceptuelles. Ceci est dû au fait que les algorithmes élémentaires d'extraction analysent les informations sous une seule forme (algorithmes pour du traitement du langage naturel, pour de la vision d'ordinateur, etc.). Les algorithmes d'extraction permettront plus tard de retrouver les informations pertinentes dans toutes les représentations conceptuelles analysées.

Cependant, les résultats obtenus qui doivent être utilisés plus tard dans un contexte spécifique, doivent être structurés pour cela. Alors, il nous faudra une structure d'informations qui nous permet d'organiser les différentes informations extraites à partir des données hétérogènes, et de former des représentations à des niveaux d'abstraction élevés. Ça sera le travail du modèle-produit.

Le modèle de données proposé relatif aux données hétérogènes permet d'implémenter le processus d'analyse des données hétérogènes, en assurant la prise en compte des représentations conceptuelles, et le prétraitement des données hétérogènes.

**Question 2 :**

***Quelle stratégie utiliser pour construire et structurer les représentations du produit analysé dans le processus de rétro-conception ? Comment l'intégrer dans le processus de rétro-conception. ?***

Dans le but de structurer les informations et connaissances issues du processus d'extraction d'informations à partir des données hétérogènes, nous avons décidé d'utiliser les modèles-produit. L'avantage principal des modèles-produit est qu'ils regroupent un ensemble d'informations couvrant les différents aspects du produit, et ceci dans le but d'élaborer une représentation globale du produit. Dans notre cas, nous avons cherché à développer une méthodologie de rétro-conception qui sera implémentée plus tard en une solution d'aide à la rétro-conception. La multitude de modèles-produit existants dans l'état de l'art représentés sous le formalisme UML, et la facilité d'application (en comparaison avec les ontologies sous OWL

par exemple) nous a poussé à choisir cette solution. Nous avons alors proposé un modèle-produit qui correspond au contexte de rétro-conception.

Le contexte de réalisation de la rétro-conception est différent du contexte de réalisation de la conception. La conception démarre d'une idée qui évolue jusqu'à l'élaboration du produit final, alors que la rétro-conception démarre du produit final dans sa représentation physique pour ensuite en extraire des représentations plus abstraites.

Nous avons donc proposé un modèle intrinsèque qui correspond à la représentation physique du produit, et cela pour deux raisons : la première est relative au contexte de réalisation de la rétro-conception. Puisqu'elle démarre d'une représentation physique, alors le modèle intrinsèque représente une première étape dans le processus de rétro-conception. La deuxième est relative à la traçabilité des informations des autres représentations par rapport à la représentation physique du produit. En effet, tous les travaux réalisés durant la conception convergent vers une représentation physique, alors c'est à partir de la représentation physique qu'on pourra réaliser les représentations à des niveaux d'abstraction plus élevés dans le cas de la rétro-conception.

Nous avons aussi proposé la notion de modèle relatif pour caractériser les représentations à des niveaux d'abstraction plus élevés, et élaboré un modèle relatif pour la conception. Ce modèle propose une structure relative à un contexte métier, et ne peut donc être utilisé que dans un contexte spécifique. Ce sont les modèles relatifs qui permettront aux différents acteurs de l'entreprise d'accéder à la rétro-conception. Ces modèles viennent s'interfacer avec le modèle intrinsèque pour réaliser la traçabilité avec les informations intrinsèques.

Cependant, nous pouvons maintenant nous retrouver avec une multitude de représentations, et de modèles correspondants. Nous avons alors réfléchi à une solution qui nous permettrait de gérer la multi-représentation, et avons proposé le concept de facettes d'informations.

Ce concept a pour objectif principal de gérer la multi-représentation du produit, en se basant sur la caractérisation du contexte de développement du produit. Ce concept permet de décrire le contexte de développement à travers quatre composantes : le modèle intrinsèque, les modèles relatifs, la phase du cycle de vie du produit, et la décomposition systémique.

Ce concept a été développé initialement pour gérer la multi-représentation, mais il s'est avéré efficace dans la caractérisation des processus.

**Question 3 :**

***Comment le processus de rétro-conception peut-il être amélioré de manière globale ?***

Nous avons proposé un processus d'analyse des données hétérogènes, et nous avons développé des modèles dans le but de structurer les informations extraites des données hétérogènes. Nous avons aussi remédié à la multi-représentation du produit : la nouvelle méthodologie de rétro-conception est quasiment prête.

Les deux premières questions de la problématique sont des réponses spécifiques à la troisième question. Le processus de rétro-conception peut être amélioré en utilisant des données hétérogènes dans le processus, et en structurant les informations extraites à partir de ces

données, à l'aide d'un modèle produit. Cependant, ces questions permettent de répondre à la réalisation de l'aspect statique de la méthodologie de rétro-conception.

Dans le but de fournir une méthodologie de rétro-conception globale, il nous faut répondre à la réalisation de l'aspect dynamique de la méthodologie de rétro-conception : le processus.

Pour cela, nous avons proposé la démarche Ki4D, qui est une démarche processus qui englobe le modèle de facettes d'informations avec les modèles-produit, et qui tient compte de l'analyse des données hétérogènes avec son modèle. En effet, cette démarche a été développée dans le but de fournir un processus de rétro-conception qui permet de répondre à n'importe quel contexte dans lequel est réalisé la rétro-conception.

Nous avons défini la rétro-conception comme étant un processus d'analyse. Ce processus peut alors être utilisé pour des finalités diverses telles que : la reconception, le reengineering, ou la refabrication. Chaque finalité nécessite une représentation adéquate du produit, et à cela répond le modèle de facettes d'informations qui s'occupe de la multi-représentation. Cependant, le processus de rétro-conception doit être optimisé dans le but d'aboutir à la finalité cherchée par l'utilisateur. En plus de cela, l'utilisation des différents algorithmes d'extraction peut être complexe (en comparaison avec le processus simple de la rétro-conception classique).

La démarche Ki4D a alors permis de construire un modèle de processus sur lequel se base un moteur de workflow. Ce moteur de workflow permet de générer un processus spécifique au contexte d'analyse de l'utilisateur. Il choisira les différents algorithmes d'extraction selon les objectifs cherchés, mais aussi, selon les données hétérogènes en entrée.

Finalement, la démarche Ki4D et le moteur de workflow constituent la réponse ultime à la troisième question de notre problématique, et permettent de construire une nouvelle méthodologie de rétro-conception avec un périmètre d'action plus élargi, bien qu'il subsiste un manque relatif aux différents algorithmes d'extraction.

## II. Discussions

Notre proposition permet de couvrir un ensemble de situations, et de répondre à un ensemble de questions relatives à la problématique globale. Cependant, il subsiste quelques manques qu'il serait pertinent de souligner afin d'explorer les différentes perspectives qui peuvent déboucher sur des travaux complémentaires à celui que nous avons fait, mais en même temps de répondre à certaines lacunes de la présente proposition.

C'est dans cette optique que nous détaillons ici les différents points sujets à discussions et qui peuvent conduire à des améliorations, et des élaborations plus avancées de notre proposition.

### 1. Liens des données hétérogènes et du modèle-produit

Le premier point est relatif au lien entre les données hétérogènes et celles du modèle-produit. En effet, nous avons pu identifier comment nous pouvons lier les données hétérogènes et les entités d'information du modèle-produit (à travers les algorithmes d'extraction, en ayant recours aux représentations conceptuelles et formelles), cependant, la réalisation effective de ce lien suppose le développement de tous les algorithmes d'extraction des informations et

connaissances, et de leur intégration dans le système d'aide à la rétro-conception, qui n'est pas faite ici.

Donc un premier point d'amélioration est d'envisager le développement des algorithmes d'extraction et leur intégration dans ce système.

## 2. Modélisation des connaissances

Le deuxième point est relatif à l'implémentation et l'utilisation du modèle-produit. Nous avons proposé un modèle produit sous forme de sous modèles qui sont regroupés selon le contexte recherché. La quantité d'informations et le nombre d'entités intégrées au modèle global peuvent constituer un frein lors de l'implémentation. En effet, la gestion du modèle global peut être rendue difficile dans ce cas-là.

Il est aussi relatif à l'utilisation des modèles de connaissances dans un contexte d'objets complexes à analyser. En effet, les modèles-produit que nous proposons ne permettent de répondre que partiellement à ce contexte, avec l'utilisation de la décomposition systémique du produit. Une amélioration possible est la prise en compte des objets complexes dans notre méthodologie et ce en ajoutant, une extension au modèle global pour la gestion des assemblages complexes.

## 3. Concept de facettes d'informations

Le modèle de facettes d'informations exige au préalable, l'élaboration des différents modèles d'informations sur lesquels il repose. Ces modèles représentent une complexité en plus dans l'élaboration d'un système de gestion des facettes d'informations. Il s'agira de traiter le modèle de facettes d'informations comme étant une association dynamique des informations. Cette association dynamique est en contraste avec les types d'associations déjà existantes :

- Association multi-modèles statique où il y a plusieurs modèles qui sont liés de manière statiques, qui sont simple à gérer mais perdent une des caractéristiques principales recherchées par le concept de facettes d'informations (traçabilité de l'information entre différents points de vues et modèles)
- Association uni-modèle statique où les informations sont réunies dans un seul modèle, avec une complexité d'élaboration très importante, mais qui prend en compte la traçabilité de l'information).

Finalement, l'élaboration du modèle de facettes d'informations sera dépendante du contexte de son déploiement (dans un même domaine plusieurs personnes ou organisations tendent à avoir des avis et points-de-vues différents...)

## 4. Concept Ki4D

Il est possible de faire évoluer l'espace 4D. Pour cela, il faut prévoir son évolution au niveau conceptuel, mais aussi au niveau opérationnel. L'évolution de l'espace avec l'intégration d'un nouvel axe déterminera le passage d'un espace à 4 dimensions à un autre axe de 5 dimensions, où le premier représente une projection du second

L'évolution des axes déjà existants grâce à l'intégration de nouvelles données discrètes s'identifiera à un niveau de détail plus élevé dans les processus élémentaires, où certains vecteurs dans l'ancien système deviennent des résultantes dans le nouveau.

# Références bibliographiques

**[@Appstate]**

[historymatters.appstate.edu/sites/historymatters.appstate.edu/files/egyptchariots\\_000.pdf](http://historymatters.appstate.edu/sites/historymatters.appstate.edu/files/egyptchariots_000.pdf)

**[@AutoFEM]** [www.autofem.com/fr/](http://www.autofem.com/fr/)

**[@CAD Blog]** [jelucad.over-blog.com/2015/06/stylo-4-couleurs.html](http://jelucad.over-blog.com/2015/06/stylo-4-couleurs.html)

**[@Maillage]**

[ensiwiki.ensimag.fr/index.php/Victorien\\_Mamet:\\_G%C3%A9n%C3%A9ration\\_de\\_maillages\\_et\\_diagrammes\\_de\\_Vorono%C3%AF](http://ensiwiki.ensimag.fr/index.php/Victorien_Mamet:_G%C3%A9n%C3%A9ration_de_maillages_et_diagrammes_de_Vorono%C3%AF)

**[@Romains]** [sites.google.com/site/navigationdanslantiquite/les-navires-dans-l-antiquite/quinqueremes-carthaginoises-et-romaines](http://sites.google.com/site/navigationdanslantiquite/les-navires-dans-l-antiquite/quinqueremes-carthaginoises-et-romaines)

**[@Toophan]** <http://armamentresearch.com/iran-unveils-toophan-3-anti-tank-guided-weapon-at-baghdad-arms-expo/>

**[Agathos & al. 07]** Agathos, A., Pratikakis, I., Perantonis, S., Sapidis, N., & Azariadis, P. (2007). 3D mesh segmentation methodologies for CAD applications. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(6), 827-841.

**[Alavi & al. 01]** Alavi, M., & Leidner, D. E. (2001). Review: Knowledge management and knowledge management systems: Conceptual foundations and research issues. *MIS quarterly*, 107-136.

**[Alsène & al. 03]** E. Alsène, M. Gamache, et M. Lejeune, Gestion des savoirs et des compétences, une articulation possible, mais limitée, 1<sup>er</sup> Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel, Vers l'articulation entre compétences et connaissances, Nantes, 12-13 décembre 2002.

**[Ameri & al. 05]** Ameri, F., & Dutta, D. (2005). Product lifecycle management: closing the knowledge loops. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(5), 577-590.

**[Ammar-Khodja & al. 06]** Ammar-Khodja, S., Perry, N., & Bernard, A. (2008). Processing knowledge to support knowledge-based engineering systems specification. *Concurrent Engineering*, 16(1), 89-101.

**[Ammar-Khodja, 07]** Ammar-Khodja, S. (2007). Processus d'aide à la spécification et à la vérification d'application d'ingénierie à base de connaissances expertes (Thèse, Nantes).

**[Angele & al. 98]** Angele, J., Fensel, D., Landes, D., & Studer, R. (1998). Developing knowledge-based systems with MIKE. *Automated Software Engineering*, 5(4), 389-418.

**[ARDANS S.A.S]** Ardans, S. A. S. Eléments d'appréciation et d'analyse d'une base de connaissance: l'expérience industrielle d'Ardans. *Atelier aide à la Décision à tous les Etages (AIDE)*.

- [Attali, 95] Attali, D. (1995). *Squelettes et graphes de Voronoi 2D et 3D* (Thèse, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER—GRENOBLE).
- [Aussenac, 89] Aussenac-Gilles, N. (1989). Conception d'une méthodologie et d'un outil d'acquisition de connaissances expertes (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- [Bachimont, 04] B. Bachimont, Arts et sciences du numérique : Ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne, 2004.
- [Baral, 03] Baral, C. (2003). *Knowledge representation, reasoning and declarative problem solving*. Cambridge university press.
- [Basso & al. 05] Basso, K., Margolin, A. A., Stolovitzky, G., Klein, U., Dalla-Favera, R., & Califano, A. (2005). Reverse engineering of regulatory networks in human B cells. *Nature genetics*, 37(4), 382-390.
- [Belloy, 94] Belloy, P. (1994). Intégration des connaissances métier dans la conception: un modèle pour les pièces mécaniques. Application à l'usinage et à l'estampage(Doctoral dissertation).
- [Benmahamed & al. 05] Benmahamed, D., Ermine, J. L., & Tchounikine, P. (2005, April). From MASK Knowledge Management methodology to learning activities described with IMS-LD. In *Biennial Conference on Professional Knowledge Management/Wissensmanagement* (pp. 165-175). Springer Berlin Heidelberg.
- [Benouamer & al. 97] Benouamer, M. O., & Michelucci, D. (1997, May). Bridging the gap between CSG and Brep via a triple ray representation. In *Proceedings of the fourth ACM symposium on Solid modeling and applications* (pp. 68-79). ACM.
- [Bernard & al. 07] Bernard, A., Laroche, F., Ammar-Khodja, S., & Perry, N. (2007). Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56(1), 143-148.
- [Bernard & al. 08] Bernard, A., & Tichkiewitch, S. (Eds.). (2008). *Methods and tools for effective knowledge life-cycle-management* (Vol. 11). Berlin: Springer.
- [Bernard & al. 09a] Bernard, A., Laroche, F., Sébastien, R., & Durupt, A. (2010). New trends in Reverse-Engineering: Augmented-Semantic models for redesign of existing objects. *Ouvrage collectif Reverse-Engineering*, 27-pages.
- [Bernard & al. 09b] Bernard, A., Laroche, F., & Da Cunha, C. (2009). Models and methods for knowledge formalisation in a PLM context. In *3rd International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems CMSM'2009* (pp. 9-pages).
- [Bhatt, 01] Bhatt, G. D. (2001). Knowledge management in organizations: examining the interaction between technologies, techniques, and people. *Journal of knowledge management*, 5(1), 68-75.



- [Boggs & al. 99] Boggs, W., & Boggs, M. (1999). *Mastering UML with Rational Rose*. San Francisco, California, USA: Sybex.
- [Bonjour & al. 02] E. Bonjour et M. Dulmet, Articulation entre pilotage des systèmes de compétences et gestion des connaissances, 1<sup>er</sup> Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel, Vers l'articulation entre compétences et connaissances, Nantes, 12-13 décembre 2002.
- [Bourne, 97] Bourne, C. (1997). Catégorisation et formalisation des connaissances industrielles. In J.-M. Fouet (Coord.), *Connaissances et Savoir-faire en entreprise*, Hermès, p. 179-197.
- [Braganza, 04] Braganza, A. (2004). Rethinking the data–information–knowledge hierarchy: towards a case-based model. *International Journal of Information Management*, 24(4), 347-356.
- [Brunelière & al. 14] Brunelière, H., Cabot, J., Dupé, G., & Madiot, F. (2014). Modisco: A model driven reverse engineering framework. *Information and Software Technology*, 56(8), 1012-1032.
- [Candlot & al. 06] Candlot, A. (2006). *Principes d'assistance à la maîtrise d'ouvrage pour la modélisation et l'intégration d'expertise* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN)).
- [Chandrasegaran & al. 12] Chandrasegaran, S. K., Ramani, K., Sriram, R. D., Horváth, I., Bernard, A., Harik, R. F., & Gao, W. (2013). The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. *Computer-aided design*, 45(2), 204-228.
- [Chikofsky & al. 91] Chikofsky, E. J., & Cross, J. H. (1990). Reverse engineering and design recovery: A taxonomy. *IEEE software*, 7(1), 13-17.
- [Cho & al. 03] Cho, J. H., & Song, S. M. H. (2003). Three-dimensional shape reconstruction from images by shape-from-silhouette technique and iterative triangulation. *KSME international journal*, 17(11), 1665-1673.
- [Collobert & al. 08] Collobert, R., & Weston, J. (2008, July). A unified architecture for natural language processing: Deep neural networks with multitask learning. In *Proceedings of the 25th international conference on Machine learning* (pp. 160-167). ACM.
- [Corbel, 97] Corbel, J. C. (1997). *Méthodologie de retour d'expérience: démarche MEREX de Renault*. Hermès, 129.
- [Dalton, 98] Dalton, G. (1998). Reverse engineering using laser metrology. *Sensor Review*, 18(2), 92-96.
- [Davis & al. 93] Davis, R., Shrobe, H., & Szolovits, P. (1993). What is a knowledge representation? *AI magazine*, 14(1), 17.

- [De Luca & al. 06] De Luca, L., Véron, P., & Florenzano, M. (2006). Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach. *Computers & Graphics*, 30(2), 160-176.
- [Delest & al. 07] Delest, S., Boné, R., & Cardot, H. (2007, March). Etat de l'art de la segmentation de maillage 3D par patches surfaciques. In *GTMG'07: Groupe de Travail en Modélisation Géométrique* (pp. 171-185).
- [Dhuieb & al. 16] Dhuieb, M. A., Laroche, F., & Bernard, A. (2016). Context-awareness: a key enabler for ubiquitous access to manufacturing knowledge. *Procedia CIRP*, 41, 484-489.
- [Dorst & al. 05] Dorst, K., & Vermaas, P. E. (2005). John Gero's Function-Behaviour-Structure model of designing: a critical analysis. *Research in Engineering Design*, 16(1-2), 17-26.
- [Durupt & al. 09] Durupt, A., Remy, S., Ducellier, G., & Guyot, E. (2009, July). A new reverse engineering process, the combination between the knowledge extraction and the geometrical recognition techniques. In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on* (pp. 1367-1372). IEEE.
- [Durupt, 10] Durupt, A. (2010). Définition d'un processus de rétro-conception de produit par intégration des connaissances de son style de vie (Doctoral dissertation, Troyes).
- [Durupt & al. 13] Durupt, A., Remy, S., Bricogne, M., & Troussier, N. (2013). PHENIX: product history-based reverse engineering. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 6(3), 270-287.
- [Ermine & al. 96] Ermine, J. L., Chaillot, M., Bigeon, P., Charreton, B., & Malavieille, D. M. (1996). Méthode pour la gestion des connaissances. *Ingénierie des systèmes d'information, AFCET-Hermès*, 4(4), 541-575.
- [Ermine, 99] Ermine, J. L. (1999). La gestion des connaissances, un levier de l'intelligence économique. *Revue d'intelligence économique*, (4), 98-111.
- [Fenves & al. 04] Fenves, S. J. (2001). *Core Product Model for Representing Design Information*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- [Fisher, 14] Fisher, A. (2014). Cloud and cloud-shadow detection in SPOT5 HRG imagery with automated morphological feature extraction. *Remote Sensing*, 6(1), 776-800.
- [Foufou & al. 05] Foufou, S., Fenves, S. J., Bock, C., Rachuri, S., & Sriram, R. D. (2005). A Core Product Model for PLM with an illustrative XML implementation. In *International Conference on Product Lifecycle Management*.
- [Gelfond & al. 02] Gelfond, M., & Leone, N. (2002). Logic programming and knowledge representation—the A-Prolog perspective. *Artificial Intelligence*, 138(1), 3-38.
- [Gero, 90] Gero, J. S. (1990). Design prototypes: a knowledge representation schema for design. *AI magazine*, 11(4), 26.

- [Gero & al. 04] Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2004). The situated function–behaviour–structure framework. *Design studies*, 25(4), 373-391.
- [Gomes & al. 91] Gomes, A. J., & Teixeira, J. G. (1991). Form feature modelling in a hybrid CSG/BRep scheme. *Computers & graphics*, 15(2), 217-229.
- [Gomez Perez & al. 99] Gómez-Pérez, A., & Benjamins, R. (1999). Overview of knowledge sharing and reuse components: Ontologies and problem-solving methods. IJCAI and the Scandinavian AI Societies. CEUR Workshop Proceedings.
- [Grundstein, 02] Grundstein, M. (2002, December). De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue. In *1er Colloque du groupe de travail Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel*, Nantes.
- [Grundstein, 09] Saad, I., Grundstein, M., & Rosenthal-Sabroux, C. (2009). Une méthode d'aide à l'identification des connaissances cruciales pour l'entreprise. *Systèmes d'information & management*, 14(3), 43-78.
- [Gzara, 00] Gzara, L. (2000). Les patterns pour l'ingénierie des systèmes d'information produit. These de doctorat, Institut national polytechnique, Grenoble, France, Grenoble, France.
- [Häming & al. 10] Häming, K., & Peters, G. (2010). The structure-from-motion reconstruction pipeline—a survey with focus on short image sequences. *Kybernetika*, 46(5), 926-937.
- [Hayes-Roth & al. 94] Hayes-Roth, F., & Jacobstein, N. (1994). The state of knowledge-based systems. *Communications of the ACM*, 37(3), 26-39.
- [Hirz & al.13] Hirz, M., Dietrich, W., Gfrerrer, A., & Lang, J. (2013). Integrated computer-aided design in automotive development. *Book*. <http://books.google.com/books>.
- [Horváth & al.02] Owen, R., & Horváth, I. (2002, April). Towards product-related knowledge asset warehousing in enterprises. In *Proceedings of the 4th international symposium on tools and methods of competitive engineering, TMCE* (Vol. 2002, pp. 155-70).
- [ISO 15489] International Standard Organization: Information and documentation – records management.
- [Kleiner & al. 03] Kleiner, S., Anderl, R., & Gräß, R. (2003). A collaborative design system for product data integration. *Journal of engineering design*, 14(4), 421-428.
- [Kumar & al. 13] Kumar, A., Jain, P. K., & Pathak, P. M. (2013). REVERSE ENGINEERING IN PRODUCT MANUFACTURING: AN OVERVIEW. *DAAAM International Scientific Book*, 665-679.
- [Labrousse, 04] Labrousse, M. (2004). Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise (Doctoral dissertation, Nantes).
- [Labrousse & al. 08] Labrousse, M., & Bernard, A. (2008). FBS-PPRE, an enterprise knowledge lifecycle model. In *Methods and tools for effective knowledge life-cycle-management* (pp. 285-305). Springer Berlin Heidelberg.

- [Laroche, 07] Laroche, F. (2007). Contribution à la sauvegarde des Objets techniques anciens par l'Archéologie industrielle avancée. Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode inter-disciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine technique et industriel (Thèse, Ecole Centrale de Nantes (ECN); Université de Nantes).
- [Lavoué & al. 05] Lavoué, G., Dupont, F., & Baskurt, A. (2005). A new CAD mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis. *Computer-Aided Design*, 37(10), 975-987.
- [Lee & al. 00] Lee, K. H., & Woo, H. (2000). Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping. *Computers & Industrial Engineering*, 38(1), 21-38.
- [Lee & al. 01] Lee, K. H., Woo, H., & Suk, T. (2001). Data reduction methods for reverse engineering. *The International journal of advanced manufacturing technology*, 17(10), 735-743.
- [Lin & al. 09] Lin, L. F., Zhang, W. Y., Lou, Y. C., Chu, C. Y., & Cai, M. (2011). Developing manufacturing ontologies for knowledge reuse in distributed manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, 49(2), 343-359.
- [Malvache & al. 93] Malvache, P., & Prieur, P. (1993, October). Mastering corporate experience with the Rex method. In *Proceedings of ISMICK (Vol. 93, pp. 33-41)*.
- [Mitani & al. 04] Mitani, J., & Suzuki, H. (2004, August). Making papercraft toys from meshes using strip-based approximate unfolding. In *ACM transactions on graphics (TOG) (Vol. 23, No. 3, pp. 259-263)*. ACM.
- [Mizoguchi & al. 06] Mizoguchi, T., Date, H., Kanai, S., & Kishinami, T. (2006, July). Segmentation of scanned mesh into analytic surfaces based on robust curvature estimation and region growing. In *International Conference on Geometric Modeling and Processing (pp. 644-654)*. Springer Berlin Heidelberg.
- [MOKA] Managing Engineering Knowledge, MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Application, Edited by Melody Stokes for the MOKA Consortium, 2001.
- [Müller & al. 93] Müller, H. A., Orgun, M. A., Tilley, S. R., & Uhl, J. S. (1993). A reverse-engineering approach to subsystem structure identification. *Journal of Software Maintenance: Research and Practice*, 5(4), 181-204.
- [Musuvathy & al. 05] Musuvathy, S. R., Johnson, D. E., Germain, H. J. D. S., Cohen, E., Xu, C., Riesenfeld, R. F., & Henderson, T. C. (2005, January). Integrating multiple engineering resources in a virtual environment for reverse engineering legacy mechanical parts. In *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (pp. 1149-1158)*. American Society of Mechanical Engineers.
- [Nartz & al. 02] Nartz, O., Bernard, A., Ris, G., & Remy, S. Rétro-conception d'un bouchon de radiateur de Delahaye 135.

- [Nielson, 00] Nielson, G. M. (2000). Volume modelling. In *Volume Graphics* (pp. 29-48). Springer London.
- [Noel & al. 04] Noël, F., Roucoules, L., & Teissandier, D. (2005). Specification of product modelling concepts dedicated to information sharing in a collaborative design context. In *Advances in integrated design and manufacturing in mechanical engineering* (pp. 135-146). Springer Netherlands.
- [Noel & al. 08] Noël, F., & Roucoules, L. (2008). The PPO design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(2), 139-145.
- [Nonaka & al. 98] Nonaka, I., & Konno, N. (1998). The concept of "ba": Building a foundation for knowledge creation. *California management review*, 40(3), 40-54.
- [Nowak & al. 04] Nowak, P., Rose, B., Saint-Marc, L., Callot, M., Eynard, B., Gzara-Yesilbas, L., & Lombard, M. (2004, April). Towards a design process model enabling the integration of product, process and organization. In 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME (pp. 5-7).
- [Ouamer-Ali & al. 14] Ouamer-Ali, M. I., Laroche, F., Bernard, A., & Remy, S. (2014). Toward a methodological knowledge based approach for partial automation of reverse engineering. *Procedia CIRP*, 21, 270-275.
- [Ouamer-Ali & al. 15a] Ali, M. I. O., Laroche, F., Remy, S., & Bernard, A. (2015, March). Structuration de la connaissance dans le cadre de la rétro-conception de systèmes mécaniques. In *Colloque de l'AIP PRIMECA-Avril 2015-La Plagne*.
- [Ouamer-Ali & al. 15b] Ouamer-Ali, M. I., Laroche, F., Remy, S., & Bernard, A. (2015, October). Knowledge and Information Structuring in Reverse Engineering of Mechanical Systems. In *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management* (pp. 418-427). Springer International Publishing.
- [Ouamer-Ali & al. 16] Facet Based Approach for the Management of Information multi points-of-view in product modelling (CAD&App) – Accepted.
- [Pahl & Beitz, 13] Pahl, G., & Beitz, W. (2013). Engineering design: a systematic approach. Springer Science & Business Media.
- [Papadakis & al. 98] Papadakis, V. M., Lioukas, S., & Chambers, D. (1998). Strategic decision-making processes: the role of management and context. *Strategic management journal*, 19(2), 115-147.
- [Parsaei & al. 12] Parsaei, H. R., & Sullivan, W. G. (Eds.). (2012). *Concurrent engineering: contemporary issues and modern design tools*. Springer Science & Business Media.
- [Perry & al. 08] Perry, N., & Ammar-Khodja, S. (2010). A knowledge engineering method for new product development. *Journal of Decision Systems*, 19(1), 117-133.

- [Prieto, 99] Prieto, F. (2000). *Métrie assistée par ordinateur: Apport des capteurs 3 D sans contact* (Thèse).
- [ProDes, 03] Product design: techniques in reverse engineering and new product development. (Livre – 2003)
- [Reddy & al. 15] Reddy, E. J., Sridhar, C. N. V., & Rangadu, V. P. (2015). Knowledge Based Engineering: Notion, Approaches and Future Trends. *American Journal of Intelligent Systems*, 5(1), 1-17.
- [Remy, 04] Remy, S. (2004). Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes à l'aide d'un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique (Doctoral dissertation, Nancy 1).
- [Rosenman & al. 98] Rosenman, M. A., & Gero, J. S. (1998). Purpose and function in design: from the socio-cultural to the techno-physical. *Design Studies*, 19(2), 161-186.
- [Ruth, 02] Aguilar-Saven, R. S. (2004). Business process modelling: Review and framework. *International Journal of production economics*, 90(2), 129-149.
- [Scete & al. 02] Scete, M. E., & Doyle, J. C. (2002). Reverse engineering of biological complexity. *Science*, 295(5560), 1664-1669.
- [Schreiber & al. 93] Schreiber, G., & Wielinga, B. (1993). *KADS: A principled approach to knowledge-based system development* (Vol. 11). Academic Press.
- [Schreiber & al. 94] Schreiber, G., Wielinga, B., de Hoog, R., Akkermans, H., & Van de Velde, W. (1994). CommonKADS: A comprehensive methodology for KBS development. *IEEE expert*, 9(6), 28-37.
- [Skarka, 06] Skarka, W. (2007). Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(5), 677-690.
- [Sokovic & al. 06] Sokovic, M., & Kopac, J. (2006). RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1), 398-403.
- [Sorkine & al. 02] Sorkine, O., Cohen-Or, D., Goldenthal, R., & Lischinski, D. (2002, October). Bounded-distortion piecewise mesh parameterization. In *Proceedings of the conference on Visualization'02* (pp. 355-362). IEEE Computer Society.
- [Sowa, 99] Sowa, J. F. (1999). Knowledge representation: logical, philosophical, and computational foundations.
- [Studer & al. 98] Studer, R., Benjamins, V. R., & Fensel, D. (1998). Knowledge engineering: principles and methods. *Data & knowledge engineering*, 25(1), 161-197.
- [Sudarsan & al. 05] Sudarsan, R., Fenves, S. J., Sriram, R. D., & Wang, F. (2005). A product information modeling framework for product lifecycle management. *Computer-aided design*, 37(13), 1399-1411.

- [Szykman, & al. 01] Szykman, S., Sriram, R. D., & Regli, W. C. (2001). The role of knowledge in next-generation product development systems. *Journal of computing and information Science in Engineering*, 1(1), 3-11.
- [Terzi & al. 05] Terzi, S., Cassina, J., & Panetto, H. (2006). Development of a metamodel to foster interoperability along the product lifecycle traceability. In *Interoperability of Enterprise Software and Applications* (pp. 1-11). Springer London.
- [Thompson & al. 99] Thompson, W. B., Owen, J. C., Germain, H. D. S., Stark, S. R., & Henderson, T. C. (1999). Feature-based reverse engineering of mechanical parts. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 15(1), 57-66.
- [Tixier, 01] B. Tixier, La problématique de la gestion des connaissances, ingénierie des connaissances, rapport de recherche N° 01.9, 2001. <http://www.sciences.univ-nantes.fr/irin/Vie/RR/indexGB.html>
- [Torrance & al. 09] Torrance, R., & James, D. (2009). The state-of-the-art in IC reverse engineering. In *Cryptographic Hardware and Embedded Systems-CHES 2009*(pp. 363-381). Springer Berlin Heidelberg.
- [Torrance & al. 11] Torrance, R., & James, D. (2011, June). The state-of-the-art in semiconductor reverse engineering. In *Proceedings of the 48th Design Automation Conference*(pp. 333-338). ACM.
- [Urbanic & al. 06] Urbanic, R. J., ElMaraghy, H. A., & ElMaraghy, W. H. (2008). A reverse engineering methodology for rotary components from point cloud data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(11-12), 1146-1167.
- [Várady & al. 97] Várady, T., Martin, R. R., & Cox, J. (1997). Reverse engineering of geometric models—an introduction. *Computer-Aided Design*, 29(4), 255-268.
- [Várady & al. 07] Várady, T., Facello, M. A., & Terék, Z. (2007). Automatic extraction of surface structures in digital shape reconstruction. *Computer-Aided Design*, 39(5), 379-388.
- [Vieira & al. 05] Vieira, M., & Shimada, K. (2005). Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing. *Computer aided geometric design*, 22(8), 771-792.
- [VPERI] VPERI (2003). Army research office virtual parts engineering research initiative, <http://www.cs.utah.edu/gdc/Viper/Collaborations/VPERI-Final-Report.pdf>.
- [Wang, 10] Wang, W. (2010). *Reverse engineering: Technology of reinvention*. CRC Press.
- [Weiss & al. 02] Weiss, V., Andor, L., Renner, G., & Várady, T. (2002). Advanced surface fitting techniques. *Computer Aided Geometric Design*, 19(1), 19-42.
- [Weyrich & al. 04] Weyrich, T., Pauly, M., Keiser, R., Heinzle, S., Scandella, S., & Gross, M. (2004, June). Post-processing of scanned 3D surface data. In *Eurographics symposium on point-based graphics* (Vol. 4, pp. 85-94).

**[Wood & al. 01]** Wood, K. L., Jensen, D., Bezdek, J., & Otto, K. N. (2001). Reverse engineering and redesign: Courses to incrementally and systematically teach design. *Journal of Engineering Education*, 90(3), 363.

**[Woodwark, 86]** Woodwark, J. R. (1986). Generating wireframes from set-theoretic solid models by spatial division. *Computer-Aided Design*, 18(6), 307-315.

**[Ye & al. 08]** Ye, X., Liu, H., Chen, L., Chen, Z., Pan, X., & Zhang, S. (2008). Reverse innovative design—an integrated product design methodology. *Computer-aided design*, 40(7), 812-827.

**[Yoshiyoka & al. 04]** Yoshioka, M., Umeda, Y., Takeda, H., Shimomura, Y., Nomaguchi, Y., & Tomiyama, T. (2004). Physical concept ontology for the knowledge intensive engineering framework. *Advanced Engineering Informatics*, 18(2), 95-113.

**[Zack, 99]** Zack, M. H. (1999). Managing codified knowledge. *MIT Sloan Management Review*, 40(4), 45.



# Annexes

## **La rétro-conception conventionnelle**

La rétro-conception est donc l'activité qui permet d'analyser un objet physique de manière à pouvoir récupérer les informations qui ont permis son élaboration conceptuelle à travers la phase de conception, et son élaboration physique à travers la phase de fabrication. C'est le processus qui permet de découvrir les principes technologiques d'un composant ou un système à travers l'analyse de sa structure [Lee & al. 01].

La rétro-conception dans un contexte mécanique commence par l'acquisition des données géométriques en utilisant différentes techniques et méthodes d'acquisition reposant sur différentes technologies.

Ces données et informations sont ensuite récupérées, pour être analysées et traitées en plusieurs étapes. Ces étapes de traitement permettront de passer d'un ensemble de données brutes à un modèle 3D global du produit analysé.

Globalement, le processus de rétro-conception se décompose comme suit :

- Acquisition des données géométriques (mesure et numérisation).
- Conditionnement des données :
  - Echantillonnage.
  - Filtrage des bruits.
- Fusion des parties de la donnée géométrique
- Segmentation et ajustement des surfaces.
- Création du modèle 3D.

Dans la suite, nous allons voir à quoi correspond chaque tâche et quels sont les méthodes et outils pour les réaliser.

### 1. Acquisition des données géométriques

La rétro-conception conventionnelle commence par l'acquisition des données géométriques à l'aide d'outils spécifiques. Il est possible d'utiliser différents types d'outils afin d'extraire les informations géométriques à partir de l'objet physique, comme les outils conventionnels de la métrologie (pied à coulisse, micromètre, etc.). Cependant, la rétro-conception conventionnelle est toujours associée à la digitalisation des objets à l'aide d'un outillage avancé tel que les scanners 3D ou encore les Machines de Mesure de Coordonnées (CMM). Nous pouvons voir dans la figure A.1 une synthèse des outils utilisés pour la digitalisation des objets.

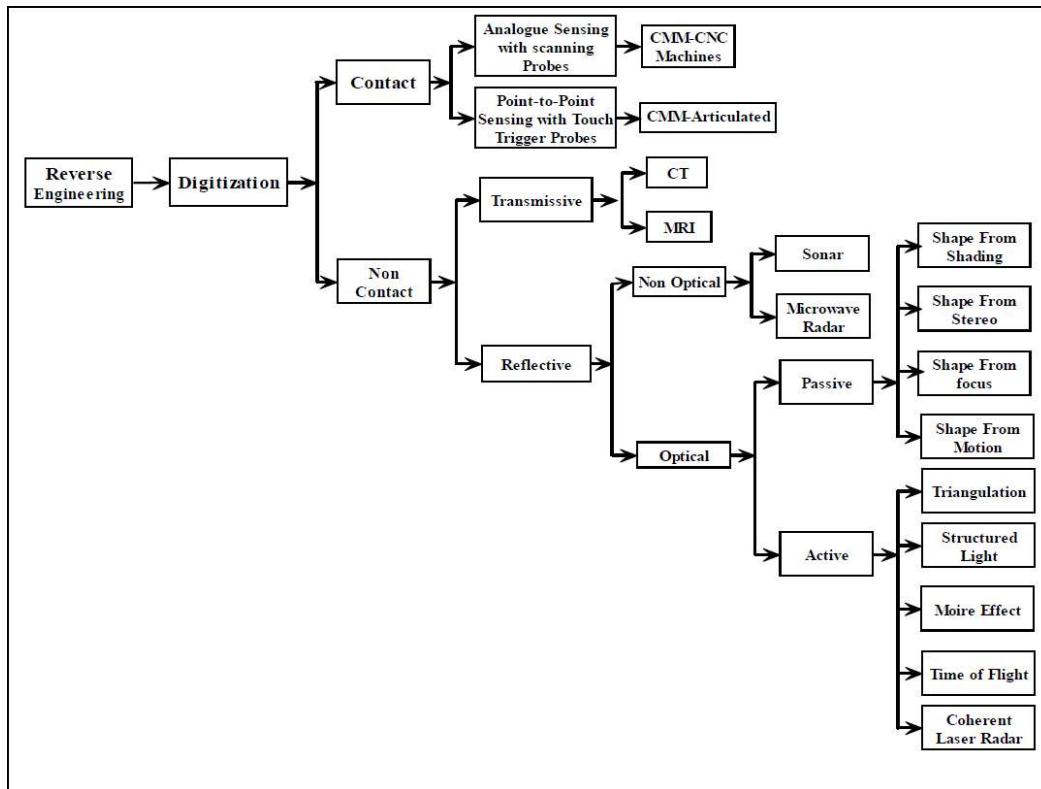


Figure A.1 – Synthèse des différentes technologies de digitalisation d’objets [Kumar & al. 13]

Nous pouvons donc constater qu’il y a plusieurs types d’outils basés sur des technologies qui permettent de récupérer les données géométriques de l’objet avec ou sans contact entre l’objet et l’outil, de manière passive ou active, etc. Le choix de l’outil dépendra de la volonté de l’utilisateur et de son contexte d’utilisation [Bernard & al. 07].

Le processus d’acquisition des données géométriques à l’aide de ces outils permettra de générer un ensemble de données appelé nuage de points qui caractérise l’enveloppe géométrique de l’objet en contact avec l’outil d’analyse (Laser, palpeur, etc.) [Remy, 04]. Ce nuage de points est donc un ensemble de points relatif à un système de coordonnées qui permet de capturer la géométrie de l’objet. Cependant, son utilisation directe en tant que données engendre des lenteurs d’utilisation dues au grand nombre de points récupérés. Pour cette raison, on choisira toujours de le transformer de manière à ce que la géométrie puisse être exploitée sans encombre [Nartz & al. 02].

## 2. Reconstruction surfacique

La reconstruction surfacique permet d’exploiter le nuage de points, qui représente une donnée brute, en élaborant des représentations géométriques plus élaborées à travers le maillage dans un premier temps, qui permettra ensuite à des algorithmes de segmentation ou d’extraction d’entités d’identifier la topologie du produit. Pour ce faire, le nuage de points devra être prétraité à travers l’échantillonnage des points dans le nuage, et le filtrage des bruits dus aux erreurs relatives au matériel de digitalisation.

### a. Echantillonnage

L'échantillonnage est l'étape dans laquelle le nuage de points est allégé de manière à ce qu'on conserve un nombre de points minimum qui permette d'exploiter efficacement la géométrie extraite. Par exemple dans [Nartz & al. 02], on échantillonne le nuage de points en ne conservant que les points situés à 0.5mm les uns des autres.

### Filtrage des bruits

Lors de l'acquisition des données à l'aide des outils cités précédemment, il est possible de générer des bruits qui peuvent entraîner la corruption des données. Ces bruits sont dus à différentes raisons parmi lesquelles nous pouvons citer les suivantes [Weyrich & al. 04], [Prieto, 99] :

- limitations physiques des capteurs, mouvement des objets lors des scans,
- réflexions sur des surfaces de l'objet qui peuvent générer des points en dehors de la surface de l'objet,
- trous dans l'objet,
- ou encore des objets texturés (création de fantômes de l'objet).

La suppression de ces bruits est effectuée grâce à l'utilisation de filtres en profondeur sur les nuages de points.

### Maillage

Dans le but d'exploiter les nuages de points récupérés lors de l'acquisition des données géométriques, et prétraités (échantillonnage et filtrage des bruits), un maillage 3D est créé à partir de ce nuage de points.

Le maillage est une technique qui permet de créer un ensemble de faces en 3D à partir des coordonnées des nuages de points. Selon [Delest & al. 07], « ils entrent dans la catégorie de modélisation surfacique qui offre une représentation plus ou moins complexe d'un objet et qui est très adaptée à la conception de formes ». Le maillage 3D fait donc partie des techniques de modélisation surfacique. Il existe d'autres formes de modélisation : la modélisation filaire [Woodwark, 86], et la modélisation volumique [Nielson, 00].

Il existe plusieurs algorithmes pour créer un maillage 3D à partir d'un nuage de points. Le plus connu est l'algorithme de triangulation de Delaunay qui consiste en la création d'un maillage 3D triangulaire respectant le critère de Delaunay qui veut que les cercles circonscrits aux triangles qui forment le maillage ne contiennent aucun sommet [Delest & al. 07]. Il y a aussi, le diagramme de Voronoï qui permet de générer un maillage surfacique sur la base d'un nuage de points où chaque point du nuage est délimité par une surface [Attali, 95] (figure A.2).

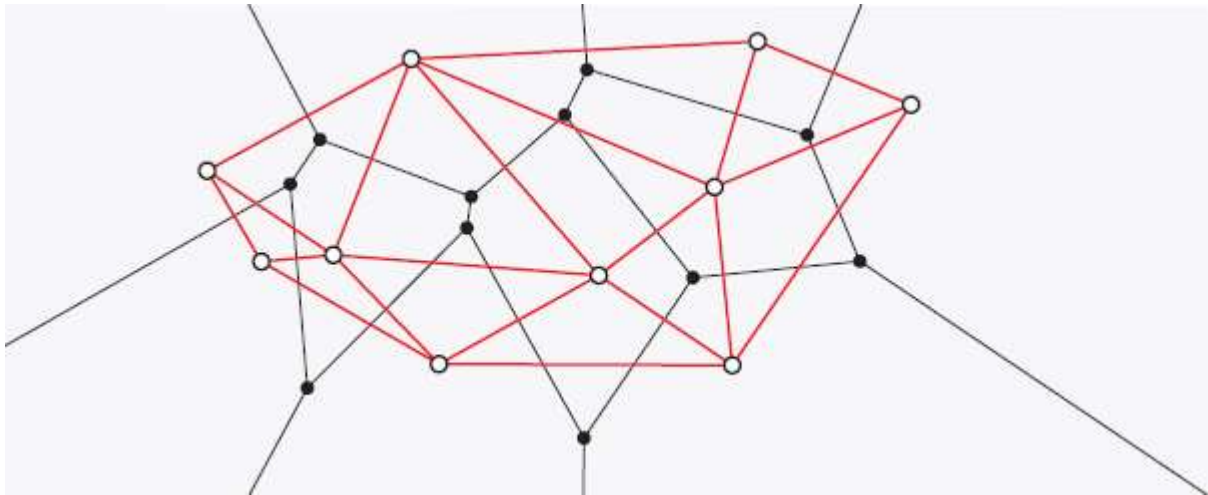


Figure A.2 – Points en blancs : triangulation de Delaunay. Points en noirs: diagramme de Voronoï [Maillage]

Cette technique permettra donc de récupérer un modèle 3D surfacique qui représentera la géométrie de l'objet et permettra de procéder aux traitements suivants, tout en facilitant l'utilisation de la donnée acquise d'un point de vue computationnel.

### 3. Segmentation et ajustement des surfaces

La segmentation est une des parties les plus importantes dans le traitement des données géométriques. Selon [Duruapt, 10], la segmentation est un processus qui vise à séparer un maillage 3D en zones de courbures homogènes au regard d'un critère, ou de variations régulières, « elle peut être également vue comme une opération qui permet de constituer des sous-ensembles logiques dans la donnée ». En somme, la segmentation permet de séparer la donnée en la partitionnant en un ensemble d'ensembles de points qui représentent des parties de l'objet analysé [Delest & al. 07].

#### a. Techniques de segmentation

Plusieurs techniques et méthodes ont été développées qui permettent de segmenter le maillage obtenu. Voici quelques-unes de ces méthodes :

- Segmentation par croissance de régions : Cette méthode permet de faire croître un élément germe au sein du maillage [Delest & al. 07], tout en vérifiant l'uniformité de la région obtenue (représentée par un point, un triangle un sommet, un ensemble de points ou de pixels ou de triangles) selon un critère de forme [Duruapt, 10]. Il existe plusieurs algorithmes proposés dans la littérature qui permettent de faire ce type de segmentation [Mitani & al. 04], [Sorkine & al. 02], [Lavoué & al. 05], [Mizoguchi & al. 06] et [Vieira & al. 05]. Dans la figure A.3, nous pouvons voir quelques exemples de segmentation de maillages 3D en utilisant la segmentation par croissance de régions proposée par [Lavoué & al. 05].
- La ligne de partage des eaux (LPE) : Cette méthode de segmentation qui est beaucoup utilisée dans la segmentation des images 2D, considère le graphe à partitionner comme étant un relief où les sommets sont positionnés à une certaine hauteur comme sur la figure A.4 [Delest & al. 07]. On simule ensuite une inondation sur ce relief qui sera

donc plongé dans l'eau et entrainera la formation d'un bassin d'eau. La rencontre de deux bassins entraine la création d'une ligne de partage des eaux.

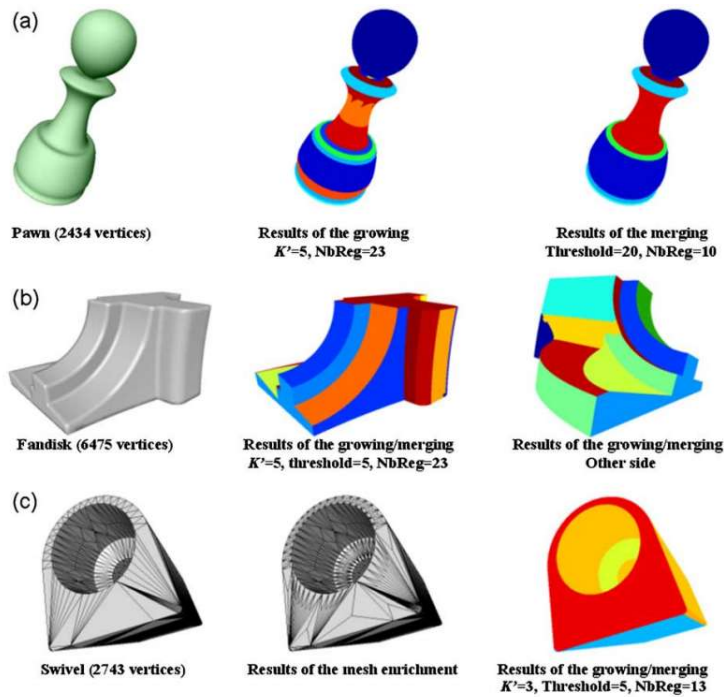


Figure A.3 – Exemples de segmentation à l'aide d'algorithmes de croissance de régions [Lavoué & al. 05]

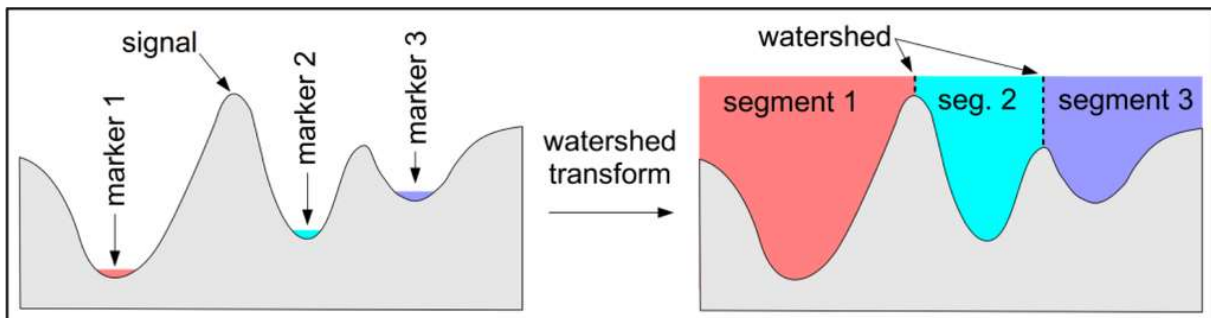


Figure A.4 – Illustration de la technique de Ligne de Partage des Eaux [Fisher, 14]

L'ajustement des surfaces quant à lui permet de trouver la surface d'un certain type qui est la mieux ajustée à un ensemble de points [Várady & al.98], à travers une classification qui permet de décider à quel type de surface appartient chaque ensemble de points du nuage (cylindre, plan, cone, etc.). Pour les simples surfaces, cet ajustement peut être fait directement durant la segmentation. Cependant, pour les surfaces gauches, le processus est plus complexe. Dans [Weiss & al. 02] est proposé un algorithme pour l'ajustement des surfaces gauches (figure A.5).

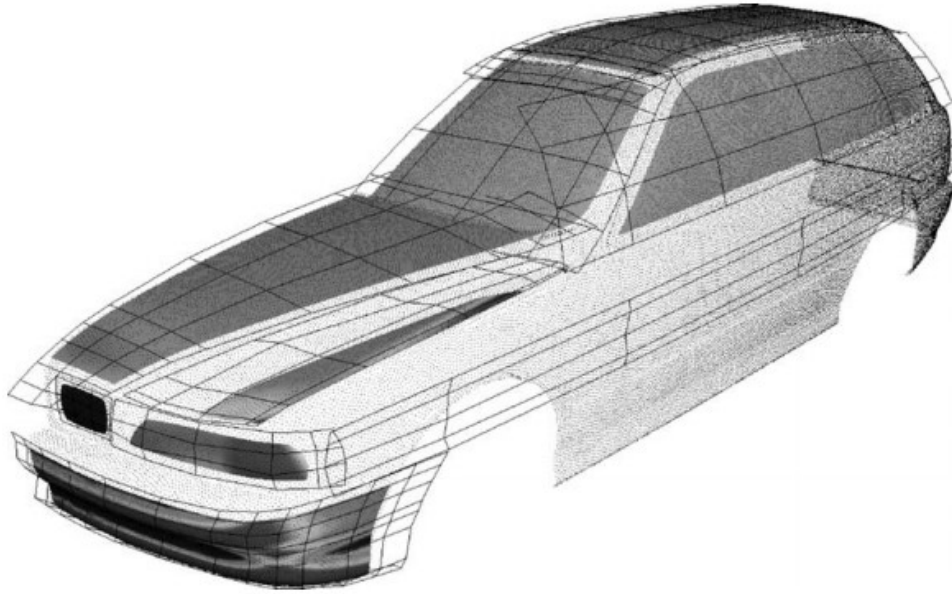


Figure A.5 – Surfaces ajustée sur régions du nuage de points colorées [Weiss & al. 02]

Dans [Varady & al. 98] on note que la segmentation et l'ajustement des surfaces ne peuvent pas être réalisées dans un ordre séquentiel (segmentation puis ajustement), mais plutôt suivant des méthodes itératives ou en sollicitant l'aide d'un utilisateur à travers des approches interactives.

#### 4. Création du modèle 3D (modélisation des solides)

Les données récupérées lors de l'étape d'acquisition ont été traitées et segmentées, cependant, leur utilisation ultérieure nécessite de ces données qu'elles soient sous une forme manipulable par des solutions CAO/FAO/CAE. Les objets sont représentés sous forme de solides. En effet, les modèles 3D sont manipulés en tant que solides. Il y a deux façons de représenter les solides : la représentation par les bords (B-rep, ou boundary representation), et la géométrie de construction de solides (CSG, ou Constructive Solid Geometry). La première représente le volume de l'objet en termes des surfaces du bord (frontière) de l'objet, alors que la deuxième consiste en la représentation d'un solide grâce à l'association de géométries simples à l'aide d'opérateurs booléens [Gomes & al. 91], [Benouamer & al. 97].



## **Méthodes de capitalisation des connaissances**

### 1. MKSM / MASK

La méthode MKSM a émergé dans le but de maîtriser la complexité d'un système de connaissances à travers une méthodologie d'analyse [Ermine & al. 96]. C'est une méthode qui permet d'analyser des systèmes de connaissances « *dans le but de rendre ces systèmes intelligibles à ceux qui en sont les acteurs, afin qu'ils puissent mettre eux-mêmes en place leur propre système de connaissances* » [Ermine & al. 96]. En d'autres termes, elle permet de décrire les systèmes de connaissances dans le but de les formaliser.

Cette méthode est construite sur la base de trois hypothèses théoriques. Les deux premières hypothèses sont : le triangle sémiotique qui représente un système de signes observé selon trois niveaux indissociables (signe, signifiant, signifié), et le triangle systémique, qui représente un système général observé selon trois points-de-vue indissociables (ontologique, phénoménologique, et génétique). La troisième hypothèse qui découle des deux premières, est la perception globale qu'on peut avoir : chacun des points-de-vue de la première hypothèse peut être décomposé selon les trois points-de-vue de la deuxième hypothèse. Il en résulte un ensemble de neuf points-de-vue qui permettent de décomposer le système de connaissances.

En se basant sur ces neuf points-de-vue, la méthode MKSM propose une démarche de modélisation des connaissances en utilisant cinq modèles différents, permettant chacun de modéliser une sous partie du système de connaissances. Nous trouvons alors, le modèle du système de référence qui permet d'identifier et caractériser les connaissances et les flux cognitifs d'un système, en d'autres termes, elle définit et délimite le système. Le modèle du domaine permet quant à lui de caractériser le périmètre de l'ensemble des processus. Le modèle d'activité permet d'analyser l'activité du système qui produit ou utilise les connaissances en les plaçant dans le cadre d'une utilisation opérationnelle. Le modèle des concepts et le modèle des tâches permettent de décrire la connaissance, où le premier détaille les connaissances statiques, alors que le deuxième détaille les connaissances dynamiques.

La méthode MKSM avec les cinq modèles qu'elle propose permet de cartographier les connaissances d'une organisation en ciblant et en capitalisant les connaissances dans le but de le gérer. Cette méthode a évolué pour devenir MASK [Benmahamed & al. 05], où l'ensemble des modèles a évolué avec le rajout de trois modèles (modèle historique, modèle temporel, et modèle du patrimoine) et en retirant le modèle du système de référence.

### 2. CommonKADS

La méthodologie CommonKADS est une extension de la méthodologie KADS (Knowledge Acquisition Design System) [Schreiber & al. 93] qui consiste essentiellement en l'élaboration d'une collection de modèles dans le but de capitaliser les connaissances de l'entreprise [Schreiber & al. 94]. Chacun des modèles élaborés sera alors utilisé dans la réalisation d'un système à base de connaissances (KBS). On suppose que le développement des systèmes à base de connaissances implique la construction d'un ensemble de modèles pour la résolution de problèmes, dans son organisation concrète et le contexte d'application. Elle ne concerne pas seulement des connaissances d'experts, mais inclut aussi les différentes caractéristiques concernant la façon dont est intégrée cette connaissance, et comment elle est utilisée dans



l'environnement organisationnel. Les différents modèles sont alors un moyen de capturer les différentes sources et types d'exigences dans des situations réelles [Studer & al. 98].

Dans CommonKADS, on distingue six modèles différents [Schreiber & al. 94] : le modèle d'agent, qui généralement peut être humain ou un système logiciel, concerne la spécification des capacités de chaque agent impliqué dans l'exécution d'une tâche. Le modèle de communication, permet de spécifier les différentes interactions entre agents. Le modèle d'organisation, permet de décrire la structure organisationnelle dans laquelle sera installé le système à base de connaissances, tout en spécifiant les différentes fonctions exécutées par chaque unité organisationnelle. Le modèle de tâche, permet de décrire une hiérarchie de tâches à exécuter dans une unité organisationnelle, tout en identifiant les différents agents responsables de leurs exécutions. Le modèle d'expertise, permet de capitaliser les connaissances relatives à la résolution de problèmes en prenant en compte trois types de connaissances différents correspondants chacun respectivement à une vue statique, une vue dynamique et une vue fonctionnelle. Le modèle de conception, permet de spécifier l'architecture du système.

Les quatre premiers visent à modéliser l'environnement organisationnel, alors que les deux derniers expriment les aspects fonctionnels et non-fonctionnels du système à base de connaissances.

Cette méthodologie a une approche ascendante où les connaissances sont capitalisées grâce à des modèles prédéfinis qui permettent de capturer les connaissances propres à l'entreprise, et de réaliser un système à base de connaissances.

### 3. MOKA

MOKA (**M**ethodology and software tools **O**riented to **K**nowledge-based Engineering Applications) est le nom donné à un projet de recherche (une partie du programme ESPRIT) sur la formalisation d'une méthodologie de capitalisation et de réutilisation des connaissances [MOKA]. Son but est de :

- Fournir des formes de représentation des connaissances d'un produit et son processus de conception, ainsi que les méthodes pour sa capitalisation.
- Fournir une base pour les applications informatiques dans l'aide à la capitalisation, la représentation, et la gestion des connaissances.
- Rendre possible ultérieurement, l'automatisation des solutions basées sur les connaissances.

MOKA suppose la structuration des connaissances dans un objectif de représentation et de stockage des connaissances. Ces processus sont effectués à deux niveaux, au moyen de deux modèles de connaissances, respectivement le modèle formel et le modèle informel [Perry & al. 08]. Le premier est supposé assez simple à comprendre par un utilisateur non expérimenté, facilitant ainsi la communication avec lui. Le second suppose un plus grand formalisme de représentation des connaissances, et il est conçu comme un modèle de connaissances formel qui peut être directement utilisé pour la création du système KBE. Par conséquent, le modèle formel est une sorte de format neutre de la base de connaissances.

Ici nous verrons le modèle informel, puisque le modèle formel permet de caractériser les connaissances de manière précise et est au cœur de la modélisation des connaissances, alors que le modèle informel est plutôt axé sur la capitalisation des connaissances.

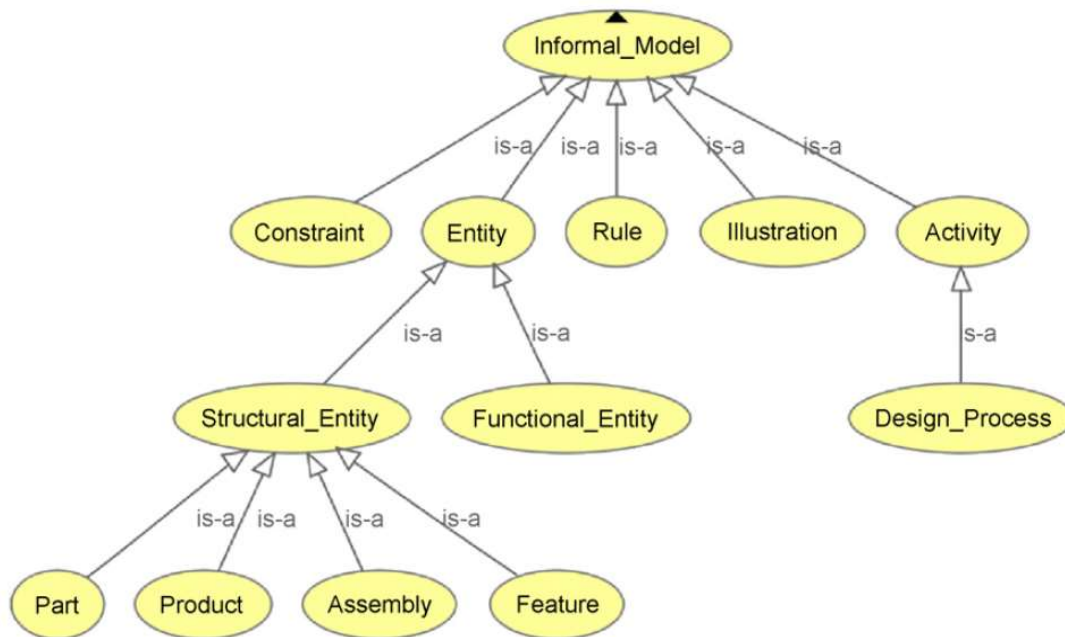


Figure A.6 – Modèle informel de la méthodologie MOKA [Skarka, 06]

Le modèle informel couvre cinq aspects différents qui sont regroupés sous l'acronyme ICARE (figure A.6) : Illustration, Contrainte, Activité, Règle, Entité. A chacun de ces aspects correspond un formulaire détaillé qui permet d'identifier les différentes connaissances relatives à l'aspect en question. Par exemple, l'aspect entité va pouvoir regrouper les connaissances relatives à trois types d'entités : une entité structurelle relative à la structure du produit (composants, assemblages, etc.), une entité fonctionnelle relative aux fonctions du produit, et une entité produit.

Nous verrons dans la partie suivante le modèle formel, et plus précisément le modèle permettant de structurer les connaissances relatives au produit.

#### 4. Synthèse

Ainsi, chacune des méthodes explorées précédemment sera apte à être utilisée dans un contexte adéquat. Dans le tableau suivant (tableau 3.2), nous élaborons une synthèse des différentes techniques et méthodes de capitalisation des connaissances selon leurs contextes d'application.




Dans le cadre de notre travail de recherche, nous nous orientons vers la deuxième partie concernant la modélisation des connaissances. En effet, l'amélioration du processus de rétro-conception dans notre cas, suppose l'utilisation d'un méta-modèle qui regroupe des informations relatives au produit ou au processus. Nous allons voir dans la suite qu'il existe une multitude de modèles qui permettent de décrire des produits ou des processus selon plusieurs aspects. Nous nous baserons donc sur l'utilisation de ces modèles déjà existant afin d'en adapter les concepts dans le but de les utiliser dans un système d'information pour la rétro-conception. Cette première partie, qui est relative à la capitalisation des connaissances, pourra consolider

nos choix de modélisation, mais ne sera pas utilisée pour élaborer des modèles de connaissances.

Méthode	Description	Utilisation	Objectif	Référence
MKSM / MASK	Permet la maîtrise de la complexité dans les projets de gestion des connaissances	Connaissances produit	Créer une mémoire d'entreprise	[MKSM] [MASK]
CommonKADS	Basé sur l'hypothèse que le partage des connaissances est basé sur la communication et la recréation des connaissances	Connaissances non spécifiques	Création d'un système à base de connaissances	[CommonKADS1]
KOD	Fournit un cadre conceptuel permettant de capitaliser et de modéliser les connaissances	Connaissances produit	Création d'un système à base de connaissances	[KOD]
MOKA	Méthode de formalisation des connaissances pour la conception d'outils à base de connaissances	Connaissances produit / processus (ingénierie)	Conception d'un outil à base de connaissances	[MOKA]
REX	Méthode qui permet de prendre en compte les retours d'expériences	Connaissances produit (ingénierie)	Capitalisation des retours d'expériences	[REX]
MEREX	Basée sur le retour d'expérience pour la capitalisation des connaissances extraites des meilleures solutions	Connaissances produit (ingénierie)	Capitalisation des meilleures solutions	[MEREX]
CYGMA	CYcle de vie et Gestion des Métiers et des Applications – capitalisation des connaissances	Connaissances industrielles	Constitution du bréviaire de connaissances d'une entreprise	[CYGMA]
ARDANS Make	Structurer, formaliser, diffuser et valoriser les savoir-faire de l'entreprise	Connaissances non spécifiques	Capitalisation d'un patrimoine de savoir-faire	[ARDANS]
KRM	Enregistrement des archives d'entreprise et capitalisation des connaissances	Connaissances non spécifiques	Créer une mémoire d'entreprise	[KRM]

Tableau A.1 – Méthodes et outils de capitalisation des connaissances, adapté de [Ouamer-Ali & al. 14]

**Données hétérogènes pour la démonstration**

FICHE INFORMATIONS PRODUIT			
	Désignation		
	Stylo bille 4 couleurs BIC - Pointe moyenne		
Dernière mise à jour le :			
Identification du produit:			
Marque	BIC		
Référence Fournisseur	801867		
Référence FOS	172 494		
Pays d'origine	Lieu de fabrication :		
	France 		
<b>CARACTERISTIQUES</b>			
<b>Caractéristiques techniques</b>			
Descriptions	Type d'encre	à base d'huile	
	Rétractable	x	
	Rechargeable	x	
Dimensions	Longueur d'écriture	8 km	
	Largeur d'écriture	0,4 mm	
	Taille de pointe	1 mm	
Format	pointe moyenne		
Poids / Epaisseur	160 g		
Couleur(s)	4 couleurs : Bleu, Noir, Rouge, Vert		
Composition / Matière	corps en ABS, partie supérieur en poly acétal		
Label(s) / Dvpt durable	NF Environnement		
Norme(s) de fabrication(s)	EN 71-3, ASTM F 963, 16 CFR 1303, 91/338/EEC		
<b>Caractéristiques d'utilisations</b>			
Accessoire(s) livré(s)			
Consommable(s)	Recharges: 172 495 06 Bleu, 17 Noir, 19 Rouge, 22 Vert		
Garantie(s)			
<b>Caractéristiques commerciales</b>			
Spécificité(s) produit	Corps bicolore blanc et bleu - 4 en 1 4 couleurs dans un stylo rétractable		

FIDUCIAL BUREAUTIQUE

Figure A.7 – Fiche d'informations sur le stylo 4 couleurs

**BIC**

A PROPOS DE BIC | NOS PRODUITS | DÉVELOPPEMENT DURABLE | FINANCE | ACTUALITÉS | NOS MÉTIERS

produits BIC® ont été choisis dans le monde depuis que vous êtes connecté à BICWorld.com

## Fiche produit

**NOS PRODUITS**

CATALOGUE

- NOUVEAUTÉS
- TOUT
- PAPETERIE
- BRIGUETS
- RASOIRS

NOTRE PROCESSUS DE FABRICATION

Rapport Annuel

Rapport De Développement Durable

**BIC 4 COULEURS™**

Le stylo bille ultra-pratique : 4 stylos en 1

**Principaux bénéfices:**

- En sélectionnant l'un des boutons poussoirs, on obtient la couleur d'encre désirée - bleue, noire, rouge ou verte
- Encre de qualité, séchage rapide et écriture douce
- Bille en carbure de tungstène, parfaitement sphérique et très résistante
- Corps bleu opaque: pointe moyenne 1 mm, largeur de trait 0,4 mm
- Corps orange opaque: pointe fine 0,7 mm, largeur de trait 0,35 mm

**Avantages environnementaux**

- Dure longtemps : longueur d'écriture 2 à 3 kilomètres
- Léger : conçu et fabriqué avec juste ce qu'il faut de matière première
- Rechargeable
- Produit sans PVC

Coloris disponibles : ● ● ● ●

Ce produit est disponible en : Europe, Proche et Moyen Orient, Afrique, Amérique du Nord, Océanie, Amérique latine et Asie

Acheter les recharges sur [amazon.fr](https://www.amazon.fr) (tapez "bic recharge")

J'aime Partager 69 personnes aiment ça. Soyez le premier de vos amis.

Contactez-nous | FAQ | Alertes e-mail | Plan du site | Protection des données | Mentions légales | Cookies | Autres Sites

Twitter | LinkedIn | YouTube | Facebook J'aime | Partager 1232

Figure A.8 – Page HTML décrivant le stylo sur le site du fabricant



Figure A.9 – Images du produit

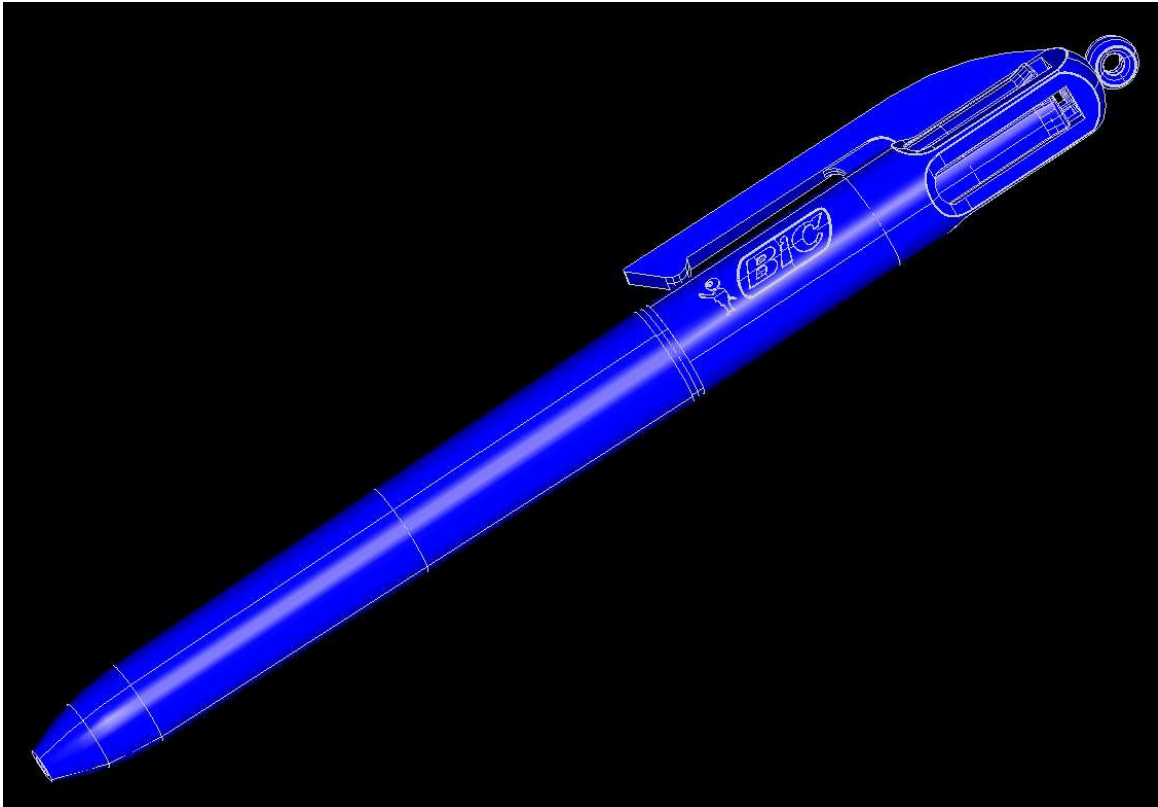


Figure A.10 – Fichier STEP du stylo 4 couleurs



Figure A.11 – Numérisation 3D de la bielle assemblée (STL)



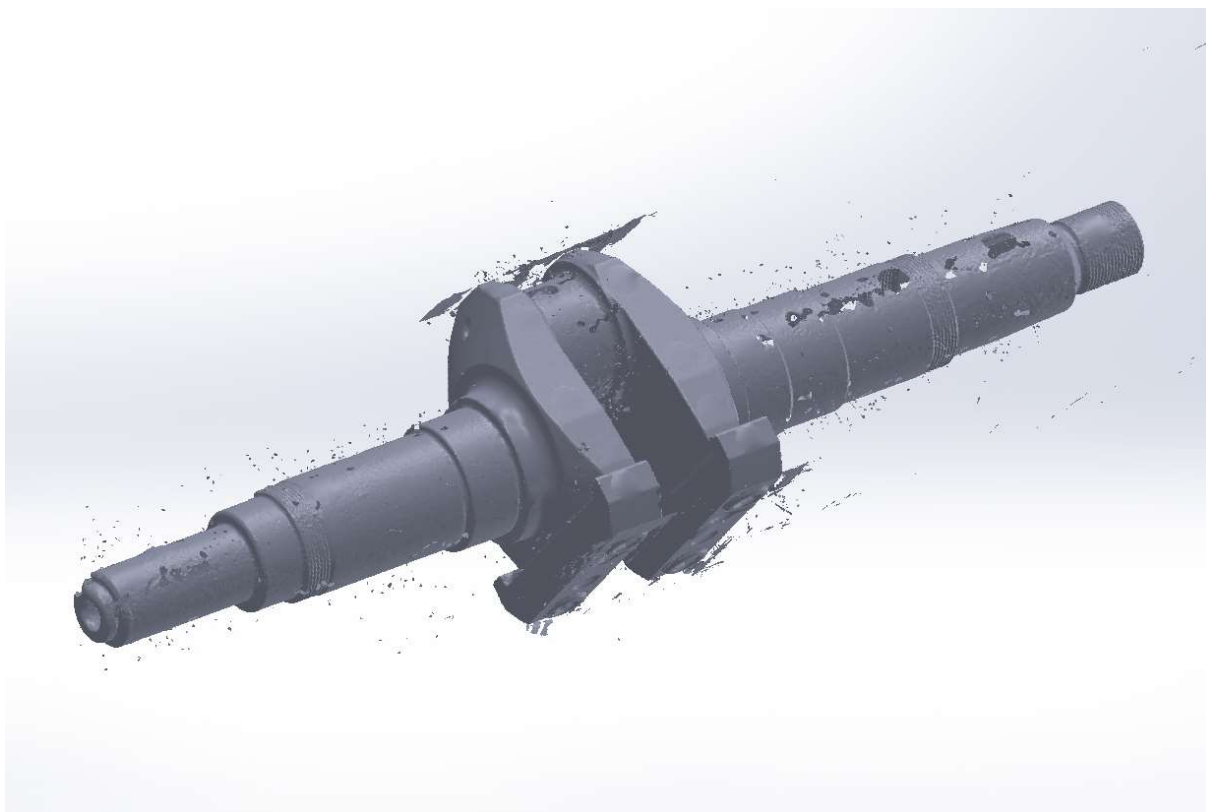


Figure A.12 – Numérisation 3D du vilebrequin (STL)



Figure A.13 – Numérisation 3D du piston (STL)



Figure A.14 – Numérisation 3D de l'assemblage piston bielle (STL)



Figure A.15 – Photo du piston





Figure A.16 – Photo de la bielle assemblée



Figure A.17 – Photo du vilebrequin (STL)

# Thèse de Doctorat

Mohamed OUAMER-ALI

## Proposition d'un modèle-produit liant la maquette numérique aux données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique

Proposal of a product model linking the digital model to heterogeneous data from a large mechanical assembly

### Résumé

La rétro-conception est une activité de plus en plus utilisée dans l'industrie manufacturière qui, en réutilisant des composants ou des sous-systèmes déjà existants, permet de réduire le temps de développement des produits.

Cette activité telle qu'on la connaît repose essentiellement sur la capture de la forme du produit, en étudiant sa topologie et sa géométrie. Cependant, l'aspect de forme seul, ne permet pas une intégration optimale dans ces nouveaux projets. Alors, le recours à la représentation du produit sous d'autres aspects complémentaires à celui de la forme est intéressant.

Dans notre travail de recherche, nous proposons une nouvelle façon de faire la rétro-conception, en utilisant un ensemble de données hétérogènes qui peuvent représenter le produit. Ces données sont de types différents : elles peuvent être textuelles, picturales, ou virtuelles, et représentent le produit selon des aspects différents, tels que les fonctions, la structure, ou la dynamique (comportementale). Pour cela, nous proposons dans un premier temps une démarche d'intégration de ces données hétérogènes à travers une analyse détaillée qui permet d'identifier les informations pertinentes à intégrer, pour ensuite aboutir à une démarche qui permet de faire le lien entre ces données analysées, et le modèle produit qui intègre différents aspects du produit, tout cela dans le but de construire une représentation sémantiquement plus riche qu'une simple représentation géométrique.

### Mots clés

Rétro-conception, intégration des données hétérogènes, gestion des connaissances, modèle-produit.

### Abstract

Reverse engineering is an activity that is more and more used in manufacturing industry, which consists on the reuse of already existing components, parts, or subsystems in order to reduce product development time and cost, and reach the market as soon as possible.

This activity is generally known as one that is based essentially on the capture of the product's physical form, by analyzing its geometry and topology. However, the only form aspect of the product doesn't allow an optimal integration in those new projects. Thus, the use of higher levels of abstraction representations of the product based on complementary aspects is interesting.

In our research work, we are proposing a new way of doing reverse engineering, by using a set of heterogeneous data that represent the product. This set of data is composed of different types of data: textual data, pictorial data, or virtual data; and can represent different aspects of the product such as: functions, structure, or behavior.

In order to formalize this approach, we first propose a heterogeneous data integration approach through a detailed analysis in order to identify relevant pieces of information to integrate, and then end up at linking these pieces of information to a product model that gathers different perspectives of the product. All of this is done in order to build a semantically richer representation of the product than the classical geometric representation.

### Key Words

Reverse Engineering, heterogeneous data integration, knowledge management, product model.