



**HAL**  
open science

# Conception intégrée et gestion d'informations techniques: application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage

Frédéric Demoly

## ► To cite this version:

Frédéric Demoly. Conception intégrée et gestion d'informations techniques: application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010. Français. NNT: . tel-00508925

**HAL Id: tel-00508925**

**<https://theses.hal.science/tel-00508925>**

Submitted on 8 Aug 2010

**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.

## **THESE DE DOCTORAT**

**Université de Technologie de Belfort-Montbéliard - UTBM**

Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques - SPIM

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR**

SPECIALITE : MECANIQUE

# **Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage**

présentée et soutenue publiquement par

**Frédéric DEMOLY**

le 16 juillet 2010 devant le jury d'examen :

Président	Prof. Michel TOLLENAERE	Institut National Polytechnique de Grenoble
Rapporteurs	Prof. Alain BERNARD Prof. Luc MATHIEU	Ecole Centrale de Nantes Université Paris Sud XI – IUT de Cachan
Examineurs	Prof. Louis RIVEST Prof. Xiu-Tian YAN M. Hugo FALGARONE	Ecole de Technologie Supérieure de Montréal University of Strathclyde, Ecosse EADS Innovation Works
Directeur de thèse Co-directeur	Prof. Samuel GOMES Dr. Benoît EYNARD	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard Université de Technologie de Compiègne

*« L'éducation ne se borne pas à l'enfance et à l'adolescence. L'enseignement ne se limite pas à l'école. Toute la vie, notre milieu est notre éducation, et un éducateur à la fois sévère et dangereux. »*

**Paul Valéry.**

*A la mémoire de mon papa.*

# Remerciements

Je tenais à remercier tout d'abord les rapporteurs de ma thèse, à savoir Monsieur Alain BERNARD, Professeur des Universités à l'Ecole Centrale de Nantes, et Monsieur Luc MATHIEU, Professeur des Universités à l'Université Paris Sud XI – IUT de Cachan, pour avoir accepté de rapporter les travaux de ma thèse, ainsi que tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir évaluer mes travaux de recherche.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Michel TOLLENAERE pour avoir présidé la soutenance de thèse.

J'adresse toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur Samuel GOMES, Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, pour ses conseils scientifiques et sa confiance absolue en mon égard.

Je remercie également mon co-directeur de thèse, Monsieur Benoît EYNARD, Enseignant-Chercheur HDR à l'Université de Technologie de Compiègne, qui malgré la distance qui nous séparent, a su apporter un regard pragmatique et critique sur les travaux de recherche.

Je remercie les laboratoires SeT équipe ERCOS et M3M équipe INCIS de l'UTBM pour m'avoir accueilli et fourni un environnement adéquat pour réaliser ces travaux.

Je remercie Monsieur Christian SARDA et Madame Isabelle DELPLANQUE de l'entreprise Faurecia Technologies de Contrôle des Emissions (ICT) pour leur confiance et la mise à disposition du projet CATA-FAP, afin de pouvoir expérimenter nos travaux de recherche.

Je remercie Monsieur Olivier BIDAUX de l'entreprise MABI pour sa collaboration dans le projet et la mise à disposition du projet Scrap'air pour illustrer les modèles et les approches proposés.

Je remercie Monsieur Hugo FALGARONE et Monsieur Benoît FRICERO de l'entreprise EADS Innovation Works, pour leur collaboration et leurs critiques en tant qu'experts sur les travaux de recherche effectués, et pour la mise à disposition du projet Airbus A320 Partie Structure et des outils GAIA et ANATOLE.

Je remercie Monsieur Xiu-Tian YAN, Professor at University of Strathclyde, et Monsieur Louis RIVEST, Professeur à l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, pour leur collaboration et la qualité de leurs recommandations dans mes travaux de recherche.

Je tiens à remercier le Conseil Région Franche-Comté pour son soutien financier à l'accomplissement de mes trois années de doctorat.

Je n'oublierai pas toutes les personnes « de l'ombre », principalement Olivier, Bernard et Luis, mais également Lucie, Nadhir et Christophe, qui ont permis la réalisation des différents prototypes de recherche exposés dans la thèse, conduisant à améliorer et valider les modèles et méthodes proposés.

Je ne manquerai pas de remercier les personnes ayant apportées un soutien moral par leur bonne humeur et leur disponibilité, à savoir Emilie, Béatrice, Sylvie, Davy, Samuel, François, Nadhir, Luis, Sébastien et Pascal.

Je tiens à dire un « grand merci » à Pascal pour son efficacité et son coaching sur la communication et tout simplement sur les choses simples de la vie.

Une grande pensée à ma femme Muriel, pour sa patience et son encouragement durant ses trois années, et à mon petit Maxence pour m'avoir donné la force d'aller au terme de ce travail de recherche.

Une dernière pensée, qui est certainement la plus importante, est destinée à mon papa, parti bien trop tôt lors de ma deuxième année de doctorat, qui a travaillé sur les problématiques de nomenclatures produit-process chez PSA sans même avoir eu le temps de m'apporter toute son expérience, à qui je dédie principalement ce travail.

*Frédéric.*

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>iv</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>xv</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>xvi</b>
<b>Liste des symboles</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 . Contexte et problématique</b> .....	<b>5</b>
1. Enjeux industriels .....	7
2. Contexte scientifique .....	10
3. Le Projet de recherche et de transfert de technologie CoDeKF .....	12
4. Problématique et objectifs de nos travaux de recherche .....	14
4.1 Problématique générale.....	14
4.2 Objectifs à poursuivre.....	16
5. Conclusion.....	16
<b>Chapitre 2 . Etat de l’art dans les domaines de la conception orientée assemblage et de la gestion des informations techniques</b> .....	<b>19</b>
1. Introduction.....	21
2. Les concepts de l’ingénierie .....	21
2.1 L’ingénierie intégrée .....	22
2.1.1 Définitions.....	22
2.1.2 Objectifs.....	23
2.2 Conception pour X.....	23
3. Conception pour l’assemblage .....	26
3.1 Objectifs de l’approche DFA .....	26
3.2 Méthodes basées sur l’évaluation qualitative.....	27
3.3 Méthodes basées sur l’évaluation quantitative.....	28
3.3.1 La méthode Hitachi AEM.....	28
3.3.2 La méthode Boothroyd & Dewhurst .....	28
3.3.2.1 Analyse fonctionnelle pour l’élimination/intégration des composants.....	28

3.3.2.2	Analyse des caractéristiques géométriques des composants pour l'affectation des temps d'assemblage .....	29
3.3.2.3	Calcul de l'indice d'efficacité en conception .....	29
3.3.3	La méthode Lucas .....	29
3.3.4	La méthode SONY DAC.....	30
3.3.5	La méthode « House of DFA ».....	31
3.4	Approches intégrées et à base de connaissances .....	31
3.4.1	L'approche « Assembly-Oriented Design ».....	32
3.4.2	L'approche SCOPES .....	33
3.4.3	L'approche AODES.....	34
3.4.4	L'approche de conception proactive pour l'assemblage.....	34
3.4.5	L'approche d'amélioration de l'assemblabilité et de montabilité des produits.....	36
3.4.6	L'approche de conception d'assemblage par les relations.....	37
3.5	Bilan et positionnement.....	38
4.	Définition/planification de la gamme d'assemblage .....	39
4.1	Les approches exactes .....	40
4.1.1	L'approche Bourjault.....	40
4.1.2	L'approche De Fazio & Whitney.....	42
4.1.3	L'approche Homem de Mello & Sanderson .....	43
4.1.4	L'approche Wolter .....	45
4.1.5	L'approche Dini & Santochi.....	45
4.1.6	L'approche Laperrière & ElMaraghy.....	46
4.1.7	L'approche Cittolin .....	47
4.2	Approches métaheuristiques : les algorithmes génétiques .....	48
4.3	Bilan et positionnement.....	52
5.	Gestion du Cycle de vie des Produits.....	52
5.1	Le concept et les objectifs du PLM.....	52
5.2	Gestion des informations produit-process .....	55
5.2.1	Gestion des informations produit .....	55
5.2.2	Gestion des informations process .....	56
5.2.3	Fonctionnalités des systèmes PDM et MPM.....	57
5.3	Modélisation du produit.....	59
5.4	Bilan et positionnement.....	60
6.	Conclusion : nécessité de modèles, méthodes et outils .....	61
<b>Chapitre 3 . Modèle et approches pour une conception proactive orientée assemblage .....</b>		<b>65</b>
1.	Introduction.....	67
2.	Modèle MULTI-Vues Orienté Assemblage (MUVOA) .....	69
2.1	Définition des parties prenantes impliquées et de leur rôle .....	70
2.2	Définition des points de vue et vues .....	70
2.3	Définition du modèle MUVOA .....	72
2.4	Correspondances et flux d'informations entre les vues .....	72
2.5	Conclusion .....	75
3.	Méthode pour une conception proactive orientée assemblage : le cadre méthodologique PASODE .....	78

3.1	Objectifs du cadre méthodologique PASODE.....	78
3.2	Description du cadre méthodologique PASODE.....	78
4.	Définition mathématique de l'algorithme de génération de séquences d'assemblage ASDA.....	82
4.1	Définition des relations du produit via le graphe orienté et la matrice d'adjacence (étapes 1 et 2) .....	84
4.2	Règles de réduction du nombre de composants (étape 3).....	87
4.3	Définition des conditions de stabilité d'un futur sous-assemblage (étape 4) .....	88
4.4	Règles d'identification de sous-assemblages (étapes 5 à 8).....	90
4.5	Règles de vérification de sous-assemblages (étapes 9 à 11).....	92
4.6	Support de décision pour le choix des sous-assemblages admissibles (étape 12) .....	93
4.6.1	Définition du contexte de production.....	93
4.6.2	Critères de décision.....	95
4.7	Règles de concaténation de sous-assemblages retenus (étapes 13 et 14) .....	96
4.8	Définition/génération de la séquence d'assemblage (étape 15) .....	97
4.9	Conclusion .....	100
5.	Evolution de l'algorithme ASDA pour garantir l'assemblabilité du produit.....	100
5.1	Intégration des exigences fonctionnelles .....	101
5.2	Introduction de nouvelles informations sur les relations du produit (étapes 1 et 2).....	104
5.3	Génération de toutes les séquences d'assemblage admissibles (étapes 3 et 4) .....	105
5.4	Vérification de la cohérence des informations (étape 5).....	105
5.5	Emergences des exigences géométriques (étape 6) .....	106
5.6	Evaluation de l'assemblabilité du produit à partir des séquences d'assemblage admissibles (étapes 7 à 9).....	107
5.7	Optimisation multi-objectif des séquences d'assemblage admissibles (étape 10) .....	107
5.7.1	Définition du problème d'optimisation.....	108
5.7.2	Définition des fonctions à optimiser .....	108
5.7.3	Normalisation des données (fonctions).....	110
5.8	Conclusion .....	111
6.	Bilan.....	111

**Chapitre 4 . Approches pour la gestion des informations du couple produit-process en contexte PLM..... 113**

1.	Introduction.....	115
2.	Définition du contexte d'assemblage dans le processus de développement.....	116
2.1	Définition et structuration des informations produit (étape 1).....	118
2.2	Définition et structuration des squelettes d'assemblage.....	120
2.2.1	Interprétation/exploitation des relations du produit .....	120
2.2.2	Description des squelettes d'assemblage.....	120
2.2.3	Allocation et structuration des squelettes d'assemblage .....	121
2.2.4	Définition des repères d'assemblage .....	122
2.2.5	Entités squelettiques issues des relations du produit.....	124
2.2.6	Définition des contraintes entre les entités squelettiques .....	125
2.2.7	Définition des relations entre les squelettes d'assemblage.....	127

2.3	Conclusion .....	128
3.	Gestion des relations du produit dans le contexte du PLM .....	130
3.1	Nécessité d'apporter une meilleure interaction dans la gestion des informations du couple produit-process .....	131
3.2	Extraction des relations du produit.....	132
3.3	Propagation des informations via les vues du modèle MUVOA .....	133
3.4	Introduction d'une application PRM pour la gestion des relations du produit à l'interface des systèmes PDM, MPM, CAO.....	134
3.4.1	Objectif de l'application PRM .....	134
3.4.2	Description des fonctionnalités du système PLM.....	135
3.4.3	Gestion des associations dans les systèmes PLM.....	136
3.4.4	Définition de la liste des relations.....	137
3.5	Conclusion .....	138
4.	Conclusion.....	139

**Chapitre 5 . Développement de l'application PEGASUS et expérimentations industrielles du cadre méthodologique PASODE..... 141**

1.	Introduction.....	143
2.	Application de l'approche ASDA en phase préliminaire du processus de développement .....	145
2.1	Objectifs à atteindre .....	145
2.2	Développements d'une application MATLAB et d'une macro VB CATIA v5 .....	145
2.3	Description du cas d'étude : combiné Catalyseur - Filtre à Particules .....	147
2.4	Approche expérimentée .....	148
2.4.1	Définition du contexte de production.....	148
2.4.2	Modélisation des informations relationnelles .....	149
2.4.3	Identification et choix des sous-assemblages.....	150
2.4.4	Concaténation des sous-assemblages retenus et identification de nouveaux sous-assemblages.....	151
2.4.5	Génération des informations résultantes.....	151
2.5	Conclusion .....	153
3.	Application de l'approche ASDA en considérant l'assemblabilité du produit .....	154
3.1	Objectifs à atteindre .....	154
3.2	Développement de l'application PEGASUS .....	154
3.2.1	Méthode Modèle Vue Vue-Modèle (MVVM).....	154
3.2.2	Spécifications fonctionnelles.....	155
3.2.3	Diagramme de classes .....	156
3.2.4	Diagramme de séquence .....	156
3.2.5	Description des interfaces de l'application PEGASUS.....	159
3.3	Description du cas d'étude : tronçon d'avion de type A320 .....	161
3.4	Approche expérimentée .....	162
3.4.1	Définition des informations relationnelles du produit.....	164
3.4.2	Génération de l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles.....	165
3.4.3	Simulation de tolérancement des séquences d'assemblage admissibles .....	167
3.4.4	Génération des informations résultantes.....	168
3.5	Conclusion .....	168

4.	Application des approches SKL-ACD et PRM.....	169
4.1	Objectifs à atteindre .....	169
4.2	Développement de l'application PEGASUS Assistant CAO dans l'environnement CATIA v5.....	170
4.3	Description du cas d'étude : vanne appartenant à un marteau burineur pneumatique.....	174
4.3.1	Présentation générale .....	174
4.3.2	Description fonctionnelle et technique.....	174
4.4	Approche SKL-ACD et PRM expérimentées.....	176
4.4.1	Description du protocole .....	176
4.4.2	Description détaillée de l'expérimentation.....	177
4.4.2.1	Définition de la nomenclature initiale dans la plateforme ACSP .....	177
4.4.2.2	Définition des relations dans l'application PEGASUS.....	178
4.4.2.3	Définition de la séquence d'assemblage dans l'application PEGASUS et le système NOTIXIA .....	180
4.4.2.4	Mise à jour de la nomenclature produit et de la structure produit dans la plateforme ACSP.....	181
4.4.2.5	Contextualisation des informations du couple produit-process dans PEGASUS Assistant CAO et CATIA v5 .....	182
4.5	Conclusion .....	188
5.	Conclusion.....	188
<b>Chapitre 6 . Conclusion générale et perspectives .....</b>		<b>189</b>
1.	Conclusion générale .....	191
2.	Perspectives de recherche.....	193
2.1	Perspectives à court terme : amélioration du cadre méthodologique PASODE.....	193
2.2	Perspective à moyen terme : approche d'ingénierie ontologique en contexte PLM .....	194
2.3	Perspective à long terme : prise en compte des phases de désassemblage et de recyclage.....	195
<b>Références bibliographiques .....</b>		<b>197</b>
1.	Valorisation des travaux de thèse .....	197
1.1	Revue internationale avec comités de lecture.....	197
1.2	Chapitre d'ouvrage international.....	197
1.3	Conférence internationale avec comités de lecture .....	198
1.4	Colloques nationaux avec comités de lecture .....	198
2.	Références externes.....	198
<b>Glossaire .....</b>		<b>221</b>
<b>Annexes.....</b>		<b>223</b>

# Liste des figures

FIG. 1 — Représentation synoptique de l'organisation de la thèse.....	3
FIG. 2 — Méthodologie générale développée dans le cadre du projet CoDeKF [Gomes, 2008] .....	13
FIG. 3 — Modèle Multi-Domains et Multi-Vues [Gomes & Sagot, 2002] .....	14
FIG. 4 — De l'ingénierie séquentielle à l'ingénierie intégrée .....	22
FIG. 5 — Méthode "House of DFA" [Rampersad, 1994].....	31
FIG. 6 — Suppression d'une contrainte de précédence entre deux composants (a) sous- ensemble initial avec contrainte (b) sous-ensemble sans contrainte [De Lit, 2001].....	32
FIG. 7 — Cadre méthodologique de conception orientée assemblage [Zha <i>et al.</i> , 2001] .....	34
FIG. 8 — Approche de conception proactive pour l'assemblage [Barnes <i>et al.</i> , 2004].....	35
FIG. 9 — Démarche d'amélioration de l'assemblabilité et de la montabilité des produits.....	36
FIG. 10 — Cadre méthodologique de conception pour l'assemblage à base de cas.....	38
FIG. 11 — Exemple d'assemblage et du graphe de liaisons fonctionnelles associé.....	41
FIG. 12 — Récapitulatif des relations de précédence associées à l'exemple .....	42
FIG. 13 — Diagramme d'état-transition de l'assemblage .....	43
FIG. 14 — Graphe ET/OU .....	44
FIG. 15 — Répartition des articles intégrant de l'optimisation pour la définition de la séquence d'assemblage optimale [Wang <i>et al.</i> , 2009] .....	49
FIG. 16 — Opérateurs génétiques [Smith & Smith, 2002].....	51
FIG. 17 — Stratégie PLM centrée sur le produit et mettant en avant des méthodologies, des processus et des systèmes d'informations à différentes phases du cycle de vie (BOL : Beginning of Lifecycle, MOL : Middle of Lifecycle, EOL : End of Lifecycle).....	53
FIG. 18 — Cartographie des systèmes d'information parcourant le cycle de vie des produits [Garetti & Terzi, 2007].....	54
FIG. 19 — Interaction entre les parties prenantes impliquées dans la gestion des informations produit-process.....	55
FIG. 20 — Gestion des informations produit-process.....	57
FIG. 21 — Relations existantes entre les systèmes PDM, MPM, CAO et ERP .....	57
FIG. 22 — Cartographie des approches relatives aux domaines de la conception pour l'assemblage et de la définition des séquences d'assemblage en début de cycle de vie des produits.....	61
FIG. 23 — Cartographie des systèmes PLM en début de cycle de vie et positionnement d'un système à l'interface .....	63
FIG. 24 — Représentation synoptique de l'organisation de ce chapitre .....	68
FIG. 25 — SysML Package Diagramme décrivant le méta-modèle de construction des points de vue/vues.....	69

FIG. 26 — Vues et intersections des vues dans le modèle MUVOA.....	73
FIG. 27 — Diagramme UML de classes décrivant notre modèle MULTI-Vues Orienté Assemblage (MUVOA) .....	77
FIG. 28 — Description générale du cadre méthodologique PASODE.....	81
FIG. 29 — Algorithme ASDA dans le cadre méthodologique PASODE .....	82
FIG. 30 — Logigramme décrivant les différentes étapes de l'algorithme ASDA .....	83
FIG. 31 — Graphe orienté $\mathcal{G}$ et la matrice d'adjacence $P_n$ associée .....	86
FIG. 32 — Affectation d'une contrainte de précedence flexible entre les composants de stabilité.....	89
FIG. 33 — Identification du sous-assemblage SA (a) et définition de la matrice compagnon $CM_{SA}$ (b).....	93
FIG. 34 — Temps définissant le Taux de Rendement Synthétique .....	94
FIG. 35 — Graphe contracté (a) et matrice d'adjacence contractée $P * n - k + 1$ (b) considérant le sous-assemblage de dimension k comme un unique composant .....	97
FIG. 36 — Séquence d'assemblage représentée par un arbre d'assemblage (a) et un arbre ordonné (b).....	98
FIG. 37 — Proposition de représentation des états d'assemblage du produit via le graphe orienté et les matrices d'adjacence.....	99
FIG. 38 — Evolution de l'algorithme ASDA dans le cadre méthodologique PASODE .....	101
FIG. 39 — Importance des variations géométriques dans la définition de la séquence d'assemblage [Marguet, 2001] .....	102
FIG. 40 — Evolution de l'algorithme ASDA pour satisfaire les exigences fonctionnelles.....	103
FIG. 41 — Graphe orienté valué $\mathcal{G}$ et la matrice d'adjacence $P_5$ associée intégrant un degré de flexibilité .....	104
FIG. 42 — Matrices d'adjacence $P_5$ pour $\delta = 1$ (a) et $\delta = -1$ en cohérence avec le graphe orienté valué $\mathcal{G}$ avec $n=1$ .....	105
FIG. 43 — Graphe orienté valué $G$ soulignant un assemblage hyperstatique .....	106
FIG. 44 — Représentation synoptique de l'organisation de ce chapitre .....	115
FIG. 45 — Approche SKL-ACD dans le cadre méthodologique PASODE.....	117
FIG. 46 — Logigramme décrivant les différentes étapes de l'approche SKL-ACD .....	118
FIG. 47 — Structure produit définie à partir de la séquence d'assemblage et des états d'assemblage identifiés dans le graphe orienté valué $\mathcal{G}$ .....	119
FIG. 48 — Allocation et structuration des squelettes d'assemblage en cohérence avec la structure produit.....	122
FIG. 49 — Définition du repère d'assemblage pour des assemblages stables .....	124
FIG. 50 — Changement de repère via la réorientation de l'élément de base pour un assemblage instable sur $x$ .....	124
FIG. 51 — Définition d'un modèle squelette minimal .....	126
FIG. 52 — Impact de l'introduction du repère d'assemblage dans le modèle minimal de squelettes .....	127
FIG. 53 — Entités squelettique à l'interface de deux squelettes d'assemblage .....	128
FIG. 54 — Introduction de deux entités pour séparer les deux squelettes d'assemblage de niveaux différents .....	128
FIG. 55 — Périmètre de l'approche PRM dans le cadre méthodologique PASODE.....	130
FIG. 56 — Connexions existantes entre les systèmes PDM, MPM et CAO .....	131
FIG. 57 — Réseaux de composants et d'opérations d'assemblage .....	132

FIG. 58 — Extraction des relations traduisant les intentions de conception et d'assemblage	133
FIG. 59 — Graphe décrivant les dépendances et les flux d'informations entre les vues du modèle MUVOA	134
FIG. 60 — Application PRM à l'interface des systèmes PDM, MPM et CAO	135
FIG. 61 — Interface de l'application prototype développée dans MATLAB, conforme à la vue « contextuelle process » du modèle MUVOA	145
FIG. 62 — Types de fichiers générés par l'application MATLAB	146
FIG. 63 — Extrait de la macro VB développée dans l'environnement CATIA v5 pour concaténer la structure produit existante	147
FIG. 64 — Exemple de combiné Catalyseur - Filtre à Particules	147
FIG. 65 — Graphe orienté $G_{11}$ et matrice d'adjacence $P_{11}$ définis pour le cas industriel	150
FIG. 66 — Sous-assemblages identifiés lors du premier cycle de l'algorithme ASDA	150
FIG. 67 — Sous-assemblages identifiés lors du deuxième et dernier cycle	151
FIG. 68 — Séquence d'assemblage du combiné Catalyseur - Filtre à Particules, issue de l'application prototype MATLAB, et représentée sous la forme d'un arbre d'assemblage	152
Fig. 69 — Structure produit générée par un fichier .catscript dans CATIA v5	153
FIG. 70 — Diagramme de cas d'utilisation de l'application PEGASUS	156
FIG. 71 — Diagramme UML de Classes décrivant le modèle de données implémenté dans l'application PEGASUS	157
Fig. 72 — Diagramme UML de Séquence décrivant le déroulement des actions dans l'application PEGASUS	158
FIG. 73 — Interface d'identification de l'application PEGASUS	159
FIG. 74 — Interface de définition des relations du produit de l'application PEGASUS	160
FIG. 75 — Interface de définition du contexte de production de l'application PEGASUS	160
FIG. 76 — Interface de génération de toutes les séquences d'assemblage admissibles de l'application PEGASUS	161
FIG. 77 — Partie structurelle d'un avion de type A320	161
FIG. 78 — Maximum gap (a) et minimum overlap (b) entre les Upper et Lower Shells considérées comme exigences géométriques à satisfaire pour notre expérimentation	162
FIG. 79 — Implémentation de l'approche ASDA via les outils GAIA, ANATOLE, et PEGASUS	163
FIG. 80 — Définition du graphe orienté associé au tronçon de l'avion dans l'outil GAIA	164
FIG. 81 — Définition des relations cinématiques dans l'application PEGASUS	165
FIG. 82 — Matrice d'adjacence générée par l'application PEGASUS pour le cas d'étude	166
FIG. 83 — Ensemble de toutes les séquences d'assemblage admissibles générées par l'application PEGASUS	166
FIG. 84 — Simulation de tolérancement dans l'outil ANATOLE intégré dans CATIA v5	167
FIG. 85 — Visualisation de la séquence d'assemblage optimale dans l'outil GAIA	168
FIG. 86 — Définition des squelettes d'assemblage par la Macro VB PEGASUS Assistant CAO, développée dans l'environnement CATIA v5	170
FIG. 87 — Définition des entités squelettiques via la macro PEGASUS Assistant CAO	171
FIG. 88 — Extrait de la macro PEGASUS Assistant CAO développée en VB dans l'environnement CATIA v5, pour la définition des entités squelettiques	172

FIG. 89 — Fenêtre de définition des entités squelettiques dans l'application PEGASUS Assistant CAO.....	173
FIG. 90 — Marteau burineur pneumatique Scrap'air (a) et le sous-ensemble « vanne » (b).....	174
FIG. 91 — Diagramme FAST limité aux fonctions techniques associées à la vanne .....	175
FIG. 92 — Implémentation des approches SKL-ACD et PRM dans les systèmes ACSP, NOTIXIA, CATIA v5, PEGASUS, et PEGASUS Assistant CAO .....	176
FIG. 93 — Nomenclature produit initiale, définie dans le module PDM de la plateforme ACSP .....	177
FIG. 94 — Définition des relations entre les composants du produit dans l'application PEGASUS .....	178
FIG. 95 — Génération des séquences d'assemblage admissibles par l'application PEGASUS .....	180
FIG. 96 — Définition des opérations d'assemblage et récupération des liens de précedence dans le système NOTIXIA.....	181
FIG. 97 — Mise à jour de nomenclature produit et de la structure produit.....	181
FIG. 98 — Graphe orienté défini pour la vanne .....	183
FIG. 99 — Emergence des contraintes entre les composants de la vanne.....	183
FIG. 100 — Emergence d'entités squelettiques de la vanne.....	184
FIG. 101 — Graphe des squelettes d'assemblage de la vanne .....	184
FIG. 102 — Graphe minimal des squelettes d'assemblage de la vanne .....	185
FIG. 103 — Repères d'assemblage définis dans CATIA v5, en fonction de la séquence d'assemblage.....	185
FIG. 104 — Graphe minimal des squelettes intégrant les informations issues de la séquence d'assemblage.....	186
FIG. 105 — Définition des entités squelettiques via PEGASUS Assistant CAO dans CATIA v5 .....	187
FIG. 106 — Modèle minimal des squelettes dans CATIA v5.....	187
FIG. 107 — Vue assemblée d'une solution alternative de la vanne tenant compte des fonctions techniques identifiées .....	223
FIG. 108 — Vue éclatée de la solution alternative et nomenclature associée.....	223

# Liste des tableaux

TAB. 1 — Récapitulatif des approches DFX selon les aspects liés aux facteurs de compétitivité et aux phases du cycle de vie des produits.....	25
TAB. 2 — Règles de conception pour l'assemblage [Pahl & Beitz, 1996] [Otto & Wood, 2001] .....	27
TAB. 3 — Fonctionnalités associées aux systèmes PDM et MPM .....	58
TAB. 4 — Entités manipulées par les systèmes PDM et MPM.....	58
TAB. 5 — Typologie des modèles produit.....	60
TAB. 6 — Identification des préoccupations des acteurs métiers via les règles DFA .....	71
TAB. 7 — Correspondance entre les vues et acteurs métiers .....	73
TAB. 8 — Dépendance entre les vues des domaines produit et processus d'assemblage .....	74
TAB. 9 — Points de vue des parties prenantes identifiées .....	76
TAB. 10 — Niveaux d'abstraction des relations du produit .....	85
TAB. 11 — Type de sous-assemblages et les informations associées.....	91
TAB. 12 — Description mathématique de chaque matrice d'adjacence associée à chaque type de sous-assemblage .....	91
TAB. 13 — Critères à optimiser pour l'identification de la séquence d'assemblage optimale .....	108
TAB. 14 — Squelettes d'assemblage définis par les relations cinématiques.....	129
TAB. 15 — Squelettes d'assemblage définis par les relations technologiques .....	129
TAB. 16 — Allocation des vues du modèle MUVOA aux systèmes PLM.....	136
TAB. 17 — Gestion des associations dans l'application PRM.....	137
TAB. 18 — Description des expérimentations industrielles réalisées dans le cadre de ce travail de recherche .....	144
TAB. 19 — Nomenclature du cas d'étude.....	148
TAB. 20 — Nomenclature du cas d'étude.....	162
TAB. 21 — Nomenclature de la solution retenue.....	175
Tab. 22 — Description des différents niveaux d'abstraction des relations du sous-ensemble « vanne » .....	179

# Liste des abréviations

<b>Acronyme</b>	<b>Nom complet</b>
<b>ACSP</b>	<b>A</b> telier <b>C</b> oopératif de <b>S</b> uivi de <b>P</b> rojet
<b>AKC</b>	<b>A</b> ssembly <b>K</b> ey <b>C</b> haracteristic
<b>ANATOLE</b>	<b>A</b> NALyse de <b>T</b> OLerance
<b>ASDA</b>	<b>A</b> ssembly <b>S</b> equences <b>D</b> efinition <b>A</b> lgorithm
<b>BOL</b>	<b>B</b> eginning <b>O</b> f <b>L</b> ifecycle
<b>BOM</b>	<b>B</b> ill <b>O</b> f <b>M</b> aterials
<b>BOR</b>	<b>B</b> ill <b>O</b> f <b>R</b> elations
<b>CAO</b>	<b>C</b> onception <b>A</b> ssistée par <b>O</b> rdinateur
<b>CAPP</b>	<b>C</b> omputer- <b>A</b> ided <b>P</b> rocess <b>P</b> lanning
<b>CoDeKF</b>	<b>C</b> ollaborative <b>D</b> esign and <b>K</b> nowledge <b>F</b> actory
<b>DFA</b>	<b>D</b> esign <b>F</b> or <b>A</b> ssembly
<b>eBOM</b>	<b>e</b> ngineering <b>B</b> ill <b>o</b> f <b>M</b> aterials
<b>EOL</b>	<b>E</b> nd <b>O</b> f <b>L</b> ifecycle
<b>GAIA</b>	<b>G</b> raph <b>A</b> nalysis for the <b>I</b> nterfaces of <b>A</b> ssembly
<b>KC</b>	<b>K</b> ey <b>C</b> haracteristics
<b>mBOM</b>	<b>m</b> anufacturing <b>B</b> ill <b>o</b> f <b>M</b> aterials
<b>MOL</b>	<b>M</b> iddle <b>O</b> f <b>L</b> ifecycle
<b>MPM</b>	<b>M</b> anufacturing <b>P</b> rocess <b>M</b> anagement
<b>MUVOA</b>	<b>M</b> Ulti- <b>V</b> ues <b>O</b> rientée <b>A</b> ssemblage
<b>MVC</b>	<b>M</b> odèle <b>V</b> ue <b>C</b> ontrôleur
<b>MVVM</b>	<b>M</b> odèle <b>V</b> ue <b>V</b> ue- <b>M</b> odèle

<b>PASODE</b>	<b>Proactive ASsembly-Oriented DEsign</b>
<b>PDM</b>	<b>Product Data Management</b>
<b>PEGASUS</b>	<b>Product design Engineering based on Generative Assembly SeqUences planning</b>
<b>PLM</b>	<b>Product Lifecycle Management</b>
<b>PRM</b>	<b>Product Relationship Management</b>
<b>SGDT</b>	<b>Système de Gestion des Données Techniques</b>
<b>SKL-ACD</b>	<b>SKeLeton-based Assembly Context Definition</b>
<b>SysML</b>	<b>System Modeling Language</b>
<b>TPM</b>	<b>Total Productive Maintenance</b>
<b>TRS</b>	<b>Taux de Rendement Synthétique</b>
<b>UML</b>	<b>Unified Modeling Language</b>

# Liste des symboles

Notation	Description
$C$	Ensemble des composants du produit
$R$	Ensemble des relations entre les composants du produit
$D$	Ensemble des directions d'assemblage du produit
$S$	Ensemble de toutes les séquences d'assemblage admissibles
$\mathbb{N}^*$	Ensemble des entiers naturels positifs
$\mathbb{Z}$	Ensemble des entiers relatifs
$\mathcal{G}$	Graphe orienté valué
$P_n$	Matrice d'adjacence
$P^*$	Matrice contractée
$SA$	Sous-assemblage
$CM_{SA}$	Matrice compagnon associée à la matrice du sous-assemblage $SA$
$cv$	Vecteur colonne de la matrice
$n$	Nombre de composants
$m$	Masse du composant (kg)
$T_o$	Limite acceptable du port de charges manuel pour une personne
$CT_o$	Temps de cycle prédéterminé (s)
$Wc$	Work Content (s)
$T_a$	Temps opératoire (s)
$T_i$	Temps non affecté (ressource immobilisée) (s)
$AW$	Available working time per day (s)
$CDOF$	Degré de liberté contraint

$\vee$	Connecteur binaire disjonctif « ou »
$c_s$	Composant d'attachement ou de stabilité
$c_{usure}$	Composant d'usure
$ma_c$	Matériau du composant
$V_X$	Vue correspondante à un point de vue et appartenant au domaine $X$
$X_k$	Ensemble de toutes les permutations des matrices des types de sous-assemblage
$VA_k$	Ensemble de toutes les permutations des variantes
$H_k$	Ensemble de toutes les combinaisons de $k$ éléments pris parmi $C$
$\mathcal{M}_0(\mathbb{N}^*)$	Ensemble des matrices de dimension $k$ dans $\mathbb{N}^*$ associées aux sous-assemblages candidats de $k$ composants
$\mathcal{M}_k(\mathbb{N}^*)$	Ensemble des matrices antisymétriques de dimension $k$ dans $\mathbb{N}^*$ associés aux sous-assemblages candidats de dimension $k$ dans $\mathbb{N}^*$
$\mathcal{M}_{k,n-k}(\mathbb{N}^*)$	Ensemble des matrices compagnon $CM$ de dimension $(k \times n-k)$ associées aux sous-assemblages $SA$ candidats de dimension $k$ dans $\mathbb{N}^*$
$T_T$	design Takt Time
$A$	Temps d'ouverture (s)
$TRS$	Taux de rendement synthétique
$D_{prev}$	Prévision de la demande
$To$	Taux acceptable du port de charges manuel pour une personne
$S$	Ensemble des séquences d'assemblage admissibles
$KC$	Ensemble fini de toutes les exigences géométriques
$\alpha_{i,j}$	Facteur de sensibilité entre le composant $i$ et le composant $j$
$MC$	Capabilité de production
$cs_{KC}$	Taux de satisfaction des $KC$
$N_{SA}$	Nombre de sous-assemblages
$N_{SAp}$	Nombre de sous-assemblages parallèles
$N_{nSA}$	Nombre de niveaux de sous-assemblages
$N_{SAs}$	Nombre de sous-assemblages stables

$N_r$	Nombre de retournements
$T_{seq}$	Temps d'assemblage lié à la séquence d'assemblage (s)
$N_{AKC}$	Nombre de caractéristiques majeures d'assemblage
$x_i^r$	Variable courante mesurée
$\bar{x}_i$	Moyenne arithmétique
$P_i^x$	Pas médian
$x_i^c$	Variable centrée réduite associée à la variable courante
$\mathcal{R}_{co}$	Repère de conception
$\mathcal{R}_{as}$	Repère d'assemblage
$\mathcal{G}_{SKL}$	Graphe des squelettes

# Introduction Générale

Le contexte ultra-compétitif actuel demande aux entreprises de réduire leurs coûts de production et d'améliorer leur productivité, dans les phases de développement des produits. Depuis 2008, la crise financière de niveau mondial a accentué les contraintes existantes pour les entreprises de l'industrie automobile et aéronautique, amenant ainsi une remise en question sur leur organisation et leurs stratégies de Recherche et Développement (R&D). Ce contexte de délocalisation et de sous-traitance de grande envergure, dictées par la baisse des coûts de production, mais aussi d'ingénierie, engendre des problématiques de cohérence et de convergence des flux de composants/sous-ensembles au sein des usines d'assemblage. Développer des produits de plus en plus performants, à des prix toujours plus compétitifs, et selon des délais de plus en plus courts, demande une gestion efficace des processus liés au cycle de vie des produits. Cette récente stratégie de gestion du cycle de vie des produits (*Product Lifecycle Management - PLM*), issue du monde universitaire, propose une gestion intégrée de l'ensemble des informations et des processus liés au produit sur l'ensemble de son cycle de vie, en contexte d'entreprise étendue, allant de la phase de « définition du besoin » jusqu'à la phase de « fin de vie » de celui-ci [CIMdata, 2009] [Stark *et al.*, 2004].

Dans ce cadre, les entreprises doivent mettre en place des programmes R&D afin d'améliorer leurs facteurs de compétitivité<sup>1</sup> : tels que la flexibilité, l'efficacité et la productivité au sein du cycle de vie des produits et plus particulièrement en phase d'ingénierie. Que ce soit dans le secteur automobile ou aéronautique, les entreprises doivent faire face à des problèmes d'organisation liés aux contraintes d'équipes ou de départements délocalisés [Jagdev & Browne, 1998], ainsi qu'aux réseaux d'expertise associés. D'autres difficultés émergent également au niveau culturel et au niveau de l'intégration constante des évolutions des technologies de l'information et de la communication.

Dans un souci de maintenir ces facteurs de compétitivité dans ce contexte complexe, les approches qualifiées d'ingénierie intégrée et concurrente (*concurrent engineering*) [Tichkiewitch, 1994] [Prasad, 1996] voire collaborative [Lu *et al.*, 2007], ont vu le jour, au carrefour des approches de conception variationnelle (conception routinière) et génératives (conception nouvelle) [Deneux, 2002]. Ceci a permis d'intégrer au plus tôt, dans le processus de conception, les contraintes des métiers situés en aval. Les approches de Conception pour l'X (*Design For X - DFX*) [Huang, 1996] ont su apporter leur efficacité dans le contexte de

---

<sup>1</sup> La compétitivité économique est une notion économique qui s'applique à une entreprise, un secteur économique, ou un territoire. Elle désigne la capacité d'une telle entité à fournir et vendre durablement un ou plusieurs biens ou services sur un marché donné en situation de concurrence [Source : Wikipédia].

l'ingénierie concourante par la compression des temps de cycle, l'amélioration de la productivité en ingénierie. Cela a amené la création d'équipes multifonctionnelles et multidisciplinaires embrassant ainsi les aspects liés au cycle de vie des produits.

Ce besoin en efficacité et en flexibilité a déjà été identifié au niveau de l'industrialisation et de la production des produits. Durant plusieurs décennies, l'automatisation des systèmes de production (fabrication/assemblage) a été un objectif majeur pour conduire à la production de masse [GAMA, 1990]. Aujourd'hui, cette stratégie s'est essouffée et a conduit à la rigidité des systèmes, en raison de la perpétuelle demande de produits personnalisés (*engineering-to-order* et *mass customization*). Pour répondre à cette demande en flexibilité causée par la variabilité des produits [Agard, 2002] et des volumes de production [Denker *et al.*, 2009], l'évolution des systèmes de production vers des systèmes dits « Agiles » (*Agile Manufacturing*) et les chaînes d'approvisionnement (*Supply chain*) ont vu le jour. Ce changement a apporté un degré d'automatisation plus faible, mais a l'avantage de répondre, d'une manière plus efficace, aux évolutions des produits, et à la variabilité de la demande [Dolgui & Proth, 2006] [Michalos *et al.*, 2010].

Cette agilité acquise au sein du département de production est devenue une préoccupation majeure au sein du processus de développement. En effet, pour répondre aux appels d'offres (*Request for Quotation – RFQ*), avec des délais de plus en plus courts, les entreprises se doivent d'être réactives dans la phase de pré-développement. Cette agilité nécessite d'intégrer, de manière cohérente et proactive<sup>2</sup>, les métiers couvrant le cycle de vie des produits dès les phases amont du processus de développement, où 70% des coûts de production sont déterminés. Ainsi, l'ingénierie se doit de respecter les exigences fonctionnelles, tout en respectant les exigences d'ordre technique relatives aux métiers situés en aval du processus de développement.

Les travaux de recherche se sont déroulés au sein de l'équipe **INCIS** (Ingénierie Numérique avancée pour la Conception Intégrée de Systèmes mécaniques) animée par *Samuel Gomes* au sein du laboratoire Mécatronique, Méthodes, Modèles et Métiers (**M3M, E.A. 3318**) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (**UTBM**). Cette équipe mène depuis plusieurs années des travaux de recherche dans le domaine de la conception productive de systèmes mécaniques, et de gestion de cycle de vie des produits, intégrant une ingénierie à base de connaissances [Gomes, 2008] [Monticolo, 2008] [Toussaint *et al.*, 2010]. Ces travaux de recherche portent notamment sur l'amélioration des processus routiniers de conception par l'intégration des métiers parcourant le cycle de vie des produits. Ceux-ci ont conduit au développement d'une plateforme PLM, baptisée **ACSP** (Atelier Coopératif de Suivi de Projet), pour expérimenter les différents modèles de recherche proposés.

Cette thèse expose la synthèse de nos travaux de recherche portant sur la conception intégrée et la gestion des informations du couple produit-process. Notre travail propose de mettre en place un modèle et des approches permettant la définition, la structuration, et la propagation des informations liées au produit et à sa séquence d'assemblage. L'objectif est de fournir, aux acteurs métier concernés, un environnement s'interfaçant entre les plateformes de **SGDT** (Système de Gestion des Données Techniques) ou **PDM** (Product Data

---

<sup>2</sup> Le terme proactif est un néologisme issu de l'anglais, qui désigne le fait d'agir avant qu'une situation ne devienne une cause de confrontation ou de crise [Source : Wikipédia].

Management), et les plateformes de **MPM** (Manufacturing Process Management), afin d'apporter une meilleure interaction, gage de cohérence des données produit-process pour la gestion du cycle de vie des produits, et le maintien des facteurs de compétitivité. Le domaine d'application de ce travail de recherche est en relation étroite avec les contraintes industrielles des secteurs automobile et aéronautique, car déployé sur trois cas industriels concrets :

- la conception d'un combiné Catalyseur - Filtre à Particules, pour l'entreprise **FAURECIA Technologies de Contrôle des Emissions (ECT)**<sup>3</sup> ;
- la conception de la partie structurelle d'un avion de type A320, en partenariat avec l'entreprise **EADS (European Aeronautic Defense and Space Company) Innovation Works**<sup>4</sup> ;
- la conception du sous-ensemble « vanne » appartenant à un marteau burineur pneumatique, pour l'entreprise **MABI**<sup>5</sup>.

En conséquence, la thèse est organisée en six chapitres articulés selon le schéma synoptique défini ci-après (FIG. 1), et mettant en évidence notre contribution scientifique à travers les chapitres 3, 4 et 5.

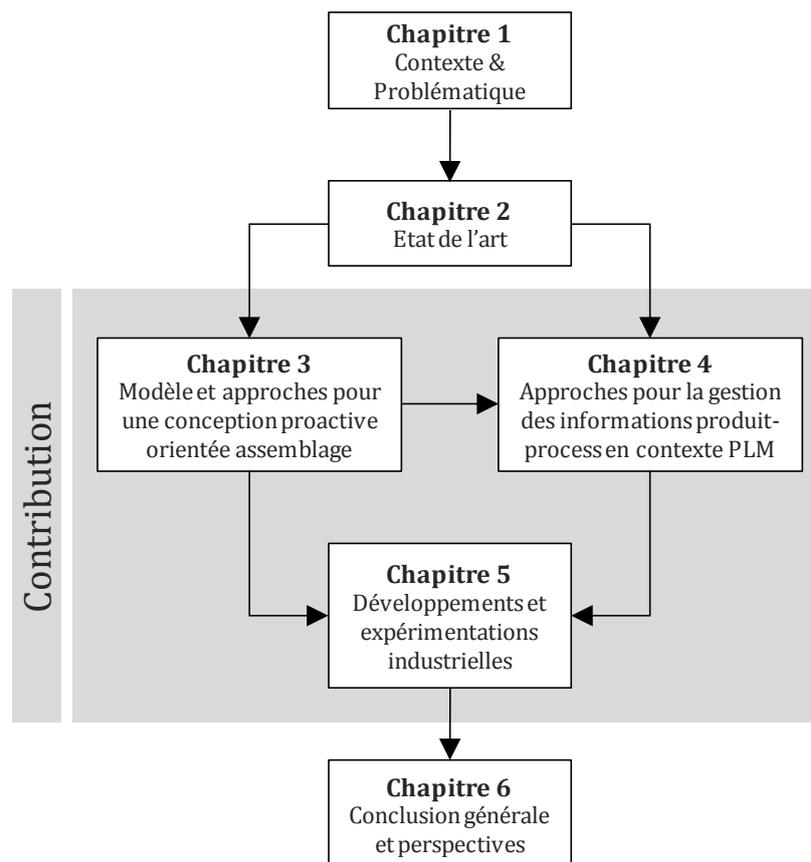


FIG. 1 — Représentation synoptique de l'organisation de la thèse

<sup>3</sup> <http://www.faurecia.fr/>

<sup>4</sup> <http://www.eads.com/>

<sup>5</sup> <http://www.mabi.fr/>

Le **premier chapitre** s'intitulant « *Contexte et problématique* » présente les enjeux industriels et le contexte scientifique, définissant le périmètre et la problématique de nos travaux de recherche.

Le **deuxième chapitre**, « *Etat de l'art dans le domaine de la conception orientée assemblage et de la gestion des informations techniques* », expose les travaux déjà réalisés et ceux toujours en cours, au regard de la problématique posée. Cette problématique se focalise sur les thèmes de la conception pour l'assemblage, de la définition/planification des séquences d'assemblage, et de la gestion du cycle de vie des produits.

Le **troisième chapitre**, « *Modèle et approches pour une conception proactive orientée assemblage* », introduit notre modèle multi-vues, et notre cadre méthodologique de conception proactive orientée assemblage, baptisé **PASODE** (**P**roactive **A**Ssembly-**O**riented **D**Esign). Nous décrivons, de manière détaillée, le modèle proposé, ainsi que les différentes étapes de ce cadre méthodologique, permettant la définition/planification des séquences d'assemblage dès les phases préliminaires du processus de développements des produits.

Le **quatrième chapitre**, « *Approches pour la gestion des informations du couple produit-process en contexte PLM* », présente les approches, appartenant au cadre méthodologique PASODE, qui permettent de définir le contexte d'assemblage à base de squelettes, et de les gérer à l'interface des systèmes de gestion des informations du produit et du process.

Le **chapitre cinq**, « *Développement de l'application PEGASUS et expérimentations industrielles du cadre méthodologique PASODE* », décrit le développement d'une nouvelle application, baptisée **PEGASUS** (**P**roduct design **E**ngineering based on **G**enerative **A**ssembly **S**eqUences planning), comme outil de **P**roduct **R**elationships **M**anagement (**PRM**), support du cadre méthodologique PASODE proposé, et en connexion étroite avec les systèmes PDM, MPM et **CAO** (**C**onception **A**ssistée par **O**rdinateur). Son interaction avec les plateformes PLM, MPM et CAO est décrite, afin de permettre la structuration, la représentation, et les flux des informations entre les acteurs métiers impliqués. Nous illustrons chaque niveau de développement par des applications industrielles. La première expérimentation, avec l'équipementier automobile FAURECIA ECT, porte sur un combiné Catalyseur – Filtre à Particules. La deuxième est conduite en partenariat avec l'entreprise EADS Innovation Works sur un tronçon d'avion de type A320. La dernière application porte sur un marteau burineur pneumatique pour l'entreprise MABI.

Enfin, dans le **dernier chapitre** (chapitre six), sont évoquées les extensions du modèle et du cadre méthodologique proposés, ainsi que les perspectives pouvant être considérées à la suite de ces travaux de recherche.

# Chapitre 1 .

## Contexte et problématique

*« Ce que l'on conçoit bien s'énonce  
clairement, et les mots pour le dire  
arrivent aisément. »*

*Nicolas Boileau.*

### Contenu du chapitre

---

<b>1. Enjeux industriels.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Contexte scientifique.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Le Projet de recherche et de transfert de technologie CoDeKF .....</b>	<b>12</b>
<b>4. Problématique et objectifs de nos travaux de recherche .....</b>	<b>14</b>
4.1 Problématique générale .....	14
4.2 Objectifs à poursuivre .....	16
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>16</b>



## 1. Enjeux industriels

La compétitivité industrielle mondiale s'est considérablement renforcée en raison de la montée de la concurrence internationale des pays à bas coût, mais également avec la diffusion des données, des informations et des connaissances liées aux évolutions des technologies de l'information et de la communication. Ces changements ont entraîné une remise en cause des problématiques industrielles sur le plan organisationnel, ainsi que sur les méthodes de développement et d'industrialisation des produits. De plus, la complexité, la personnalisation des produits et les organisations en entreprise étendue, ont soulevé la nécessité d'agir au niveau de l'ingénierie du produit et du processus d'assemblage.

C'est au début des années 90 que, à l'organisation classique par département autour des métiers, s'est substituée une organisation par projet, amenant ainsi des équipes multifonctionnelles et multidisciplinaires pour développer des produits le plus rapidement possible, à un moindre coût et de bonne qualité. Le premier secteur à avoir été concerné fut le secteur automobile, car intégrant de multiples métiers et disciplines dans le développement de produits [Scheder, 1997]. Des programmes R&D ont alors été mis en place, au niveau de l'ingénierie de conception et de l'industrialisation, pour décloisonner et obtenir une forte connexion entre ces deux départements [Whitney, 1992]. C'est au niveau de l'industrialisation et de la production que les systèmes de production dits « agiles », entrant dans des démarches de « Lean Manufacturing », ont été une révolution pour le maintien de la compétitivité, car apportant un degré de flexibilité en production [Dolgui & Proth, 2006].

En léger décalage avec le secteur automobile, l'industrie aéronautique tend à compenser les retards sur la mise en place de stratégies améliorant la compétitivité en ingénierie. En effet, les méthodes actuelles restent encore empiriques et peu formalisées, impliquant une exploration restreinte des solutions relatives au produit et à sa séquence d'assemblage [Marguet, 2001]. Malgré tout, des entreprises aéronautiques, émergent des besoins en cohérence avec les problématiques de l'industrie automobile autour de l'intégration produit-séquence d'assemblage, ceci afin de permettre l'exploration de toutes les solutions dans les temps d'ingénierie impartis.

Appuyant ces constatations, une étude industrielle a été réalisée sur l'implication des services R&D pour améliorer l'efficacité des processus liés au cycle de vie des produits [Martin-Vega *et al.*, 1995]. Celle-ci a mis en exergue la prise de conscience du potentiel de la conception pour l'assemblage, afin d'intégrer les contraintes d'assemblage, dès les phases amont du processus de développement du couple produit-process.

En effet, aujourd'hui, au vu des nombreux travaux de recherche déjà traités par la communauté scientifique dans le domaine, les difficultés rencontrées pour faciliter l'intégration de ces contraintes d'assemblage se situent plutôt dans les phases amont du processus de développement, particulièrement au niveau système et au niveau technique [Whitney, 2004], et portent sur :

- l'absence d'intégration des données et des informations issues du processus d'assemblage dans le processus de développement des produits ;

- l'imprécision de la définition et de la représentation des informations du couple produit-process ;
- la non exploitation des informations préliminaires de la définition du produit, pour la définition de la séquence d'assemblage ;
- la perte d'efficacité pour allouer/réconcilier les informations du produit aux informations du process, ce qui introduit nécessairement une perte d'informations et de temps ;
- les freins à la propagation des informations pour chaque partie prenante ;
- le manque de maintien de la traçabilité des informations produit-process.

Les approches de conception intégrée et d'Ingénierie Système [INCOSE, 2004] peuvent alors être considérées comme une solution pour faciliter la coopération, la coordination et l'intégration dans les projets de grande échelle. Ce besoin d'amélioration, en terme d'efficacité dans le processus de développement des produits, a été souligné par Subrahmania, où 75% de l'activité du concepteur en entreprise consiste à gérer les informations dans son propre contexte [Subrahmania, 1997]. Dans les secteurs automobile et aéronautique, la conception intégrée du couple produit-process est une préoccupation toujours en vigueur au sein des activités d'études et des méthodes, particulièrement en ce qui concerne l'ingénierie du processus d'assemblage. Cette problématique a reçu beaucoup d'attention au cours des deux dernières décennies avec le développement et l'implémentation de systèmes expert dédiés [Molloy *et al.*, 1998], et de systèmes entrant dans le cadre du **CAPP** (Computer Aided Process Planning) [GAMA, 1990] [Laperrière & ElMaraghy, 1996]. Malgré tout, ces outils n'ont pas su apporter un réel effet bénéfique au sein des entreprises. Les principales raisons de cette non adoption sont :

- l'importance du temps d'ingénierie associé à l'intégration des recommandations résultantes des évaluations ;
- la complexité combinatoire des séquences d'assemblage au regard du nombre de composants du produit [Henrioud, 1989] ;
- la difficulté de définir une séquence d'assemblage robuste, c'est-à-dire tenant compte des contraintes liées au cycle de vie des produits [Westkämper, 2003] ;
- l'aspect séquentiel de la phase de définition de la gamme d'assemblage, à partir de la conception détaillée du produit (une fois la géométrie du produit figée), qui engendre nécessairement des modifications sur le produit [Redford & Chal, 1994].

Dès lors, ces problèmes de complexité, de robustesse, de gestion du produit et de sa séquence d'assemblage conduisent :

- les concepteurs à négliger la prise en compte de ces aspects dans le processus de développement [Barnes *et al.*, 2004] ;
- les gammistes à définir et générer des séquences d'assemblage de manière manuelle, amenant ainsi une vision restreinte, et souvent non optimale, vis-à-vis de l'espace des

solutions, en terme de séquence d'assemblage, et des exigences et des contraintes à satisfaire.

Ce contexte de vision restreinte et hybride des informations produit-process peut être renforcé par les approches de modélisation du produit qualifiées d'« ascendantes » (*Bottom-Up*), couramment utilisées via les systèmes CAO, et considérant la modélisation des composants avant la modélisation de l'assemblage final [Vielhaber *et al.*, 2004]. Dans le contexte de conception routinière (*routine design*), les approches variationnelles (*variational approach*), incluant des éléments génériques (*Template*) et des squelettes paramétrés de conception, ont été mises en place afin de faciliter la réutilisation de composants/sous-ensembles issus de projets déjà réalisés. Ces pratiques actuelles demandent une expertise pointue pour manipuler la quantité importante de paramètres fonctionnels et géométriques issus des métiers parcourant le cycle de vie des produits. Cependant, les relations entre les différents composants du produit et les niveaux de sous-ensembles ne sont représentés qu'une fois ceux-ci conçus de manière détaillée. De ce fait, la modélisation dirigée par les informations relationnelles (*relational design*) doit être supportée par une approche descendante (*top-down*).

Par conséquent, les besoins actuels dans les secteurs automobile et aéronautique, portent sur l'intégration des informations issues de l'ingénierie du processus d'assemblage au sein du processus de développement des produits. De plus, cette intégration doit se réaliser, au cours des phases préliminaires, dans une logique de conception descendante (*Top-Down*) [Whitney, 2004], afin d'avoir la main mise sur les informations fonctionnelles et relationnelles entre les composants, gage de cohérence des données entre ces deux domaines.

En plus de la montée significative du marché des plateformes PDM-PLM, viennent se mettre en place, au sein des grandes entreprises, des plateformes d'Usine Numérique (*Digital Manufacturing*) et de MPM. S'harmonisant avec les fonctionnalités des systèmes PDM et CAO pour la gestion des informations, complémentaires aux informations liées au produit, car issues du process, ces plateformes offrent un environnement adéquat pour des tentatives d'intégration des métiers, et de propagation des informations produit-process [CIMdata, 2008] [CIMdata, 2002] [CIMdata, 2005]. Selon une étude menée par [Gao, 1999], la plupart des entreprises manufacturières considèrent, de manière étroite, les systèmes PDM et CAPP dans le processus de développement des produits. La complexité d'intégration entre ces deux familles de systèmes demande une gestion des nomenclatures (*Bill of Materials - BOM*), associées à l'ingénierie et à l'industrialisation, afin de maintenir la propagation des informations entre les différents départements de l'entreprise [Eynard, 2005]. Enfin, l'adoption générale des technologies informatiques récentes de type Service Web (*Web Services*) et les architectures orientées Services (*Services-Oriented Architectures - SOA*) renforcent la possibilité de réaliser des passerelles « dynamiques » et « agiles » entre les différentes applications métier [Bergsjö *et al.*, 2008], en tenant compte des processus et des contextes dans lesquels les données, les informations et les connaissances sont définies et utilisées [AberdeenGroup, 2005].

En conclusion, les enjeux industriels liés à notre problématique de recherche doivent être abordés sur le plan managérial, systémique et technique, du fait de la complexité des produits intégrant des métiers variés [Whitney, 2004]. Ces enjeux se situent au niveau des plateformes d'ingénierie dédiées à la gestion des données et des informations techniques, tout au long du processus de développement des produits, et entre les différents acteurs métier impliqués et répartis sur plusieurs sites. Nos travaux s'inscrivent dans ce contexte et proposent des éléments

de réponse aux problématiques de gestion intégrée et efficace des données et informations techniques liées au produit et à sa séquence d'assemblage, dès les phases amont du processus de développement de produits mécaniques [Helms, 2002].

## 2. Contexte scientifique

Le contexte scientifique de nos travaux de recherche s'articule autour des problématiques de conception intégrée et de gestion des informations produit-process dans les phases amont du cycle de vie des produits. L'intégration des métiers au sein du processus de développement des produits a suscité de nombreux travaux scientifiques dans les approches de Conception Intégrée et de Conception pour l'X (*Design for X – DFX*), telles que la Conception pour la Fabrication (*Design for Manufacturing – DFM*), la Conception pour l'Assemblage (*Design for Assembly – DFA*), la Conception pour le Désassemblage (*Design for Disassembly – DFD*), etc. [Huang, 1996].

Cette prise en compte des contraintes liées aux aspects du cycle de vie des produits, aujourd'hui effectuée en phase de conception détaillée, demande généralement une évaluation qualitative ou quantitative du produit, et par conséquent, engendre des modifications sur celui-ci. Dans ce contexte, un ensemble de méthodologies de conception pour l'assemblage [Boothroyd & Dewhurst, 1989] [Miyakawa & Ohashi, 1986] [Lucas, 1993] a été proposé pour aider le concepteur à préparer le produit en vue de sa phase d'assemblage.

Malgré des gains significatifs, réalisés suite à la mise en place de ces approches pour soutenir l'ingénierie intégrée, une inefficacité au sein du processus de développement subsiste. Effectivement, ces méthodologies interviennent à la fin de processus de développement, et demandent des modifications, qui selon leur importance, ne sont pas toujours prises en compte par le concepteur, en raison des temps d'ingénierie impartis. Il y a donc ici l'opportunité d'agir à en amont du cycle de vie du produit, dès les étapes de définition de la structure du produit, afin concevoir le produit et sa séquence d'assemblage d'une manière concourante [Zha et al., 2002] et proactive [Barnes et al., 2004].

Cette problématique d'intégration en phase préliminaire [Helms, 2002] nécessite de considérer la phase de définition de séquences d'assemblage, au plus tôt, sans qu'il n'existe encore aucune géométrie définie pour le produit, afin de fournir un référentiel à l'architecte produit dans une logique de conception descendante. De cette façon, en ayant une entière compréhension de la séquence d'assemblage, l'architecte produit pourra travailler avec des informations issues du processus d'assemblage pour fournir un environnement contextualisé destiné aux concepteurs, afin de les guider lors des étapes de définition géométrique du produit.

Dans le domaine de l'industrialisation des produits, la phase de définition de séquences d'assemblage (*Assembly Sequence Planning*) est considérée comme une composante d'entrée des approches de conception des systèmes d'assemblage (*Assembly system design*), et d'équilibrage des lignes d'assemblage (*Assembly Line Balancing*). Cette phase est définie à partir de la conception détaillée des composants du produit. Parmi les nombreux travaux portés sur ce domaine, nous relevons peu de travaux sur la définition de séquences d'assemblage en phases préliminaires, où la géométrie du produit est incertaine. Néanmoins, certains auteurs, comme [Barnes, 1999] et [Mantripragada, 1998], soulèvent l'influence que pourrait avoir la séquence d'assemblage sur le processus de développement, notamment sur les principes de solutions, la structure produit et la modélisation du produit.

Sur la base de nos différentes expériences industrielles, nous avons constaté que la phase de définition de la séquence d'assemblage est traditionnellement réalisée une fois la définition géométrique du produit validée, celle-ci n'a donc pas d'influence sur le processus de développement de celui-ci. En conséquence, pour ce domaine de recherche, nous constatons :

- la non conscience de l'influence de la séquence d'assemblage en conception sur les choix de conception ;
- la non exploitation des informations et des connaissances issues de la séquence d'assemblage pour améliorer le produit ;
- que les questions d'assemblage doivent être introduites tout au long du processus de développement du produit ;
- la difficulté de générer des séquences d'assemblage admissibles face au nombre important de contraintes (type d'assemblage, configuration d'usine, variabilité de la demande, etc.).

Face à ces nombreux constats, nous pensons qu'il est nécessaire de prendre en compte ces problématiques d'assemblage tout au long du processus de développement. Aujourd'hui, l'intégration du spectre des méthodes entrant dans le cadre du DFX à travers la combinaison harmonieuse des approches DFA, DFM, DFD, etc., dans la gestion du cycle de vie des produits, fait partie des challenges actuels du PLM [Wognum & Trappey, 2008] [Westkämper, 2003], plus particulièrement dans les phases préliminaires [Barnes *et al.*, 2004]. De plus, la dynamique des informations et des connaissances industrielles, en contexte PLM, souligne un besoin en modèles et méthodologies pour supporter l'ingénierie intégrée, et donc pour le maintien des facteurs de compétitivité [Eynard, 2005].

Dans ce contexte plus large, la dimension proactive apportée aux approches DFX, et plus particulièrement à l'approche DFA, est un enjeu d'actualité qui suscite l'intérêt auprès des chercheurs, autant sur sa définition que sur son apport. Nous entendons ici, par une approche proactive, un moyen de prendre en compte des informations issues des phases aval au processus de développement, afin de permettre l'émergence de la géométrie du produit. Cette vision qualifiée de conception proactive pour l'assemblage, voire de conception orientée assemblage (*Assembly-oriented design*), tend à renverser les approches traditionnelles considérées comme réactive, car apportant une évaluation sur une géométrie figée et engendrant une reconception du produit. Ainsi, l'assemblage n'est plus considéré comme l'activité d'assembler deux éléments [Whitney *et al.*, 1999], mais plutôt comme un modèle partant d'une description générale à une description détaillée du produit, et permettant de gérer les relations entre les composants à différents niveaux d'abstraction [Zha *et al.*, 2001].

Afin de mieux positionner notre contribution, nous nous intéressons aux travaux réalisés, au niveau national et international, via les principales communautés mobilisées autour des problématiques de conception intégrée du couple produit-process, et de gestion du cycle de vie des produits.

En effet, au niveau national, le réseau **AIP-PRIMECA** (Atelier Inter-établissement de Productique – Pôle de Ressources Informatiques pour la MECAnique) permet de renforcer les

échanges scientifiques entre les jeunes chercheurs et leurs pairs. Le réseau **CONFERE**<sup>6</sup> offre une plateforme d'échange pour les doctorants sur la conception et l'innovation. Les communautés du **GDR-MACS**<sup>7</sup>, et plus particulièrement les groupes de travail **IS3C**<sup>8</sup> et **C2EI**<sup>9</sup>, tendent à créer des synergies sur les problématiques de gestion des processus liés au cycle de vie des produits et de gestion de connaissances industrielles.

Au plan international, différentes communautés travaillent sur notre thématique de recherche. Le **CIRP**<sup>10</sup> (Collège International pour la Recherche en Productique) contribue à la diffusion d'informations scientifiques pour l'amélioration des techniques de production et des méthodologies de conception. La **Design Society**<sup>11</sup> contribue, quant à elle, à développer l'activité de conception et à diffuser les résultats dans ce domaine. L'**ASME**<sup>12</sup> (American Society of Mechanical Engineering) permet l'échange d'expertises sur les domaines de l'ingénierie mécanique. L'**IEEE**<sup>13</sup> (Institute of Electrical and Electronical Engineers) contribue à l'amélioration des fondements scientifiques autour de l'ingénierie, de l'informatique et des technologies de l'information. Le **PLM-IFIP 5.1**<sup>14</sup> (International Federation For Information Processing on Product Lifecycle Management, Working Group 5.1) contribue à consolider la communauté autour du PLM pour créer des synergies, afin de propager ce concept de stratégie dans le monde industriel.

### 3. Le Projet de recherche et de transfert de technologie CoDeKF

A partir des différentes problématiques industrielles et scientifiques soulevées, notre équipe de recherche a proposé la mise en place d'un projet de recherche et de transfert de technologie, baptisé **CoDeKF**<sup>15</sup> (Collaborative Design and Knowledge Factory), qui a vu le jour en 2007. Labellisé par le Pôle de Compétitivité Véhicule du Futur<sup>16</sup>, ce projet, qui a permis le développement des présents travaux de recherche, a pour objectif de fournir des modèles, des méthodes et des outils permettant de réduire les temps de développement des produits mécaniques, tout en améliorant la productivité en conception routinière. A partir de ces objectifs, trois axes de recherche plus spécifiques ont été identifiés et mis en œuvre :

- la gestion des informations au niveau des domaines projet, produit et process ;
- la capitalisation et la réutilisation des connaissances métier en conception ;
- l'émergence d'une géométrie 3D paramétrique.

---

<sup>6</sup> <http://www.confere.org/>

<sup>7</sup> Groupe de Recherche Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes - <http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/>

<sup>8</sup> Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du Cycle de vie produit

<sup>9</sup> Modélisation et pilotage des systèmes de connaissances et de compétences dans les entreprises industrielles

<sup>10</sup> <http://www.cirp.net/>

<sup>11</sup> <http://www.designsociety.org>

<sup>12</sup> <http://www.asme.org/>

<sup>13</sup> <http://www.ieee.org/>

<sup>14</sup> <http://www.ifip-wg51.org/>

<sup>15</sup> <http://www.codekf.org/>

<sup>16</sup> <http://www.vehiculedufutur.com/>

Le projet CoDeKF a comme finalité la mise en œuvre d'une plateforme PLM ACSP et qualifiée d'« apprenante », dont le but est de permettre de concevoir des produits mécaniques tenant compte de règles métier capitalisées dans les projets antérieurs. Ce projet de recherche et de transfert de technologie regroupe :

- 1 industriel pilote : TDC Knowllence ;
- 6 partenaires industriels : MARK IV, TDC Knowllence, INEVA, INCAT, FAURECIA, ZURFLUH-FELLER ;
- 4 partenaires académiques : UTBM, UTT, INSA Strasbourg, Ecole Centrale Lyon.

La méthodologie globale (FIG. 2), développée dans le cadre de ce projet de recherche, peut être représentée comme un ensemble de modèles, tel que le modèle **Multi-Domains** et **Multi-Vues (MD-MV)** [Gomes & Sagot, 2002] représenté par la FIG. 3, et de processus liés via une plateforme PLM [Gomes, 2008] [Gomes *et al.*, 2008], et permettant :

- la gestion intégrée des informations liées au cycle de vie des projets, des produits et des process, afin de générer un squelette structuré, support à la définition de la géométrie du produit ;
- la capitalisation et la réutilisation des connaissances via une ingénierie à base de connaissances, afin de générer une géométrie répondant aux contraintes des métiers parcourant le cycle de vie des produits [Monticolo, 2008].

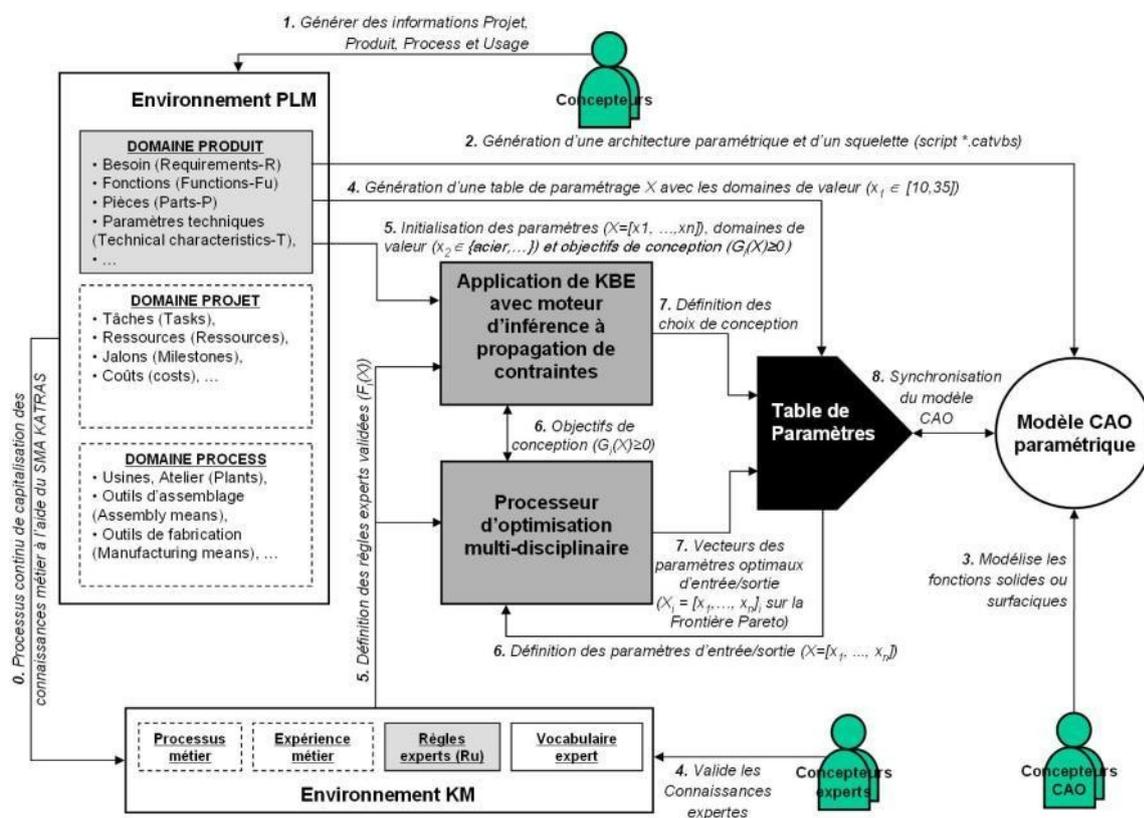


FIG. 2 — Méthodologie générale développée dans le cadre du projet CoDeKF [Gomes, 2008]

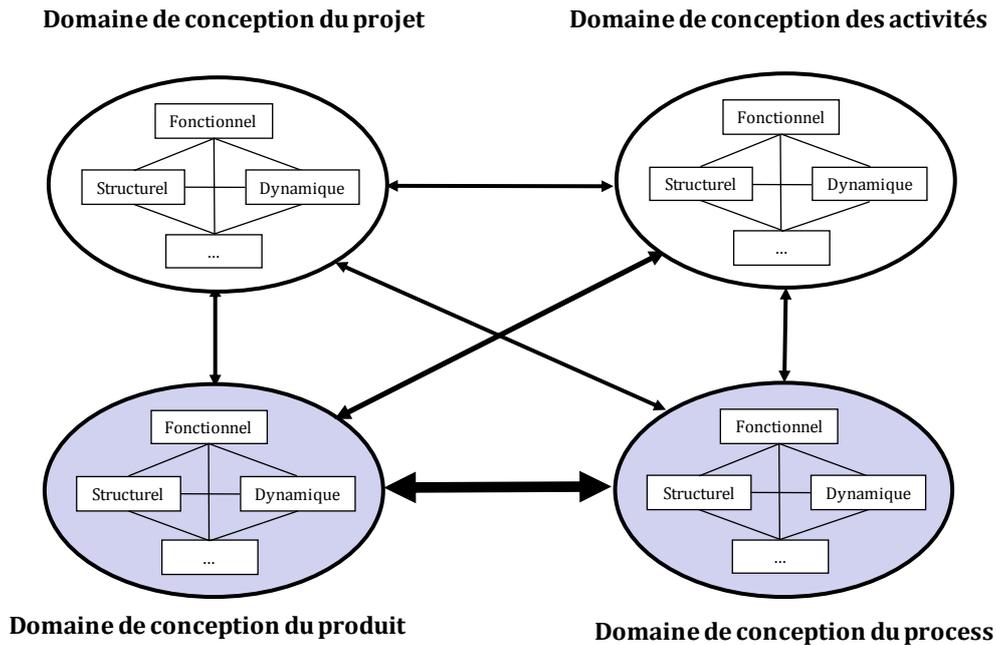


FIG. 3 — Modèle Multi-Domains et Multi-Vues [Gomes & Sagot, 2002]

Cette méthodologie est destinée à réduire les temps consacrés aux activités de conception routinière, en s'interconnectant via les outils participant à la chaîne numérique PLM, tels que les outils de gestion des données techniques, les outils d'ingénierie à base de connaissances (**Knowledge-Based Engineering - KBE**), les outils d'optimisation, les outils de gestion des connaissances (**Knowledge Management - KM**) et les outils de modélisation géométrique.

Notre contribution dans ce projet se situe, de manière plus spécifique, au niveau de la définition et génération des informations parcourant le cycle de vie des produits, et plus particulièrement au niveau du couple produit-process (FIG. 3), via les systèmes PDM et MPM, pour l'émergence d'un environnement contextualisé et contraint dans les systèmes CAO.

## 4. Problématique et objectifs de nos travaux de recherche

Les sections précédentes ont mis en exergue les enjeux industriels et scientifiques associés aux domaines de l'ingénierie du produit et du processus d'assemblage. Pour répondre à ces attentes, nous allons, dans les paragraphes suivants, décrire la problématique de recherche et exposer les objectifs à poursuivre pour y répondre.

### 4.1 Problématique générale

Sur la base des constats effectués précédemment, nous concentrons nos efforts sur l'amélioration des facteurs de compétitivité en ingénierie, par la prise en compte des problématiques d'assemblage dans les phases préliminaires du processus de développement des produits mécaniques. Ainsi, deux phases sont en interaction :

- la phase de définition du produit intégrant la définition de sa structure et sa géométrie ;
- la phase d'industrialisation intégrant la définition de la séquence d'assemblage.

Ce besoin en efficacité et en flexibilité, dans le processus de développement des produits, introduit nécessairement les questions d'intégration et de gestion des informations techniques, dans le contexte du PLM, tout en conservant les temps d'ingénierie impartis. Aujourd'hui, peu de travaux portent sur l'introduction des questions d'assemblage dans le domaine du PLM. Les enjeux actuels dans ce domaine portent sur l'intégration en conception des exigences associées aux métiers couvrant le cycle de vie du produit [Wognum & Trappey, 2008]. Dans les approches de conception pour l'assemblage, les aspects de gestion des informations et des connaissances font partie des challenges à entreprendre pour le développement des futures plateformes d'ingénierie.

De plus, bien qu'ayant obtenu des gains significatifs au niveau industriel, les approches DFA soulèvent des difficultés en ingénierie, telles que :

- l'introduction des approches en phase détaillée ;
- le manque de référentiel dans les évaluations du produit ;
- l'évaluation centrée sur les composants ;
- la difficulté de prendre en compte les revendications issues des évaluations.

Ces constatations sont en lien étroit avec les problématiques de définition/planification de séquences d'assemblage, qui ont fait l'objet de recherches intensives sur les trente dernières années. En effet, les questions de génération, de représentation et d'évaluation des séquences d'assemblage ont été abordées à partir d'une définition complète de la géométrie du produit. De cette manière, il n'y a aucune possibilité d'exploiter les informations issues de la séquence d'assemblage pour orienter ou améliorer la conception du produit. Cependant, prendre en considération cette question, en phase amont et en parallèle au processus de développement, permettrait de garantir l'assemblabilité du produit.

En conséquence, l'introduction d'une approche dite « proactive » ou « orientée » se voit être une solution pour considérer les questions d'assemblage tout au long des phases de développement du produit. Cette vision de conception descendante sera supportée par la définition de la séquence d'assemblage. De ce fait, il y aura l'opportunité d'exploiter les informations et les connaissances provenant de la séquence d'assemblage pour définir, non seulement la structure du produit, mais également la géométrie de celui-ci, permettant donc d'obtenir un produit cohérent selon le point de vue de l'industrialisation.

C'est la raison pour laquelle, nos travaux de recherche qui se focalisent sur la problématique de « **la conception proactive pour l'assemblage en contexte PLM** » proposent des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Comment prendre en compte la définition de séquences d'assemblage dans les phases préliminaires du processus de développement des produits ?
- Comment interpréter/exploiter/gérer les informations issues de la séquence d'assemblage pour apporter des informations contextualisées à l'architecte produit et au concepteur ?

## 4.2 Objectifs à poursuivre

A partir de cette problématique, en lien avec les enjeux industriel et scientifique décrits précédemment, la contribution majeure de cette thèse peut être résumée de la manière suivante :

*Proposer une approche de conception et de gestion des informations techniques intégrant, dès les phases amont du cycle de vie, les problématiques d'assemblage du produit.*

Cet objectif à poursuivre se décline nécessairement en plusieurs étapes. La première étape est de proposer un modèle qualifié de multi-vues permettant la définition, la propagation et la traçabilité des informations produit-process entre les acteurs métiers impliqués.

La deuxième étape est de proposer une approche permettant de prendre en compte les phases de définition de séquences d'assemblage lors des phases préliminaires du processus de développement des produits.

Le troisième est de vérifier l'assemblabilité du produit, c'est-à-dire si le produit est fonctionnellement cohérent d'un point de vue assemblage. En d'autres termes, l'objectif est de trouver la séquence d'assemblage, parmi l'ensemble des séquences d'assemblage admissible, qui permet de satisfaire, de manière optimale, les exigences géométriques du produit.

La quatrième étape est de définir un modèle géométrique à base de squelettes, considéré comme un modèle contextualisé, piloté par l'architecte produit, et destiné au concepteur, traduisant les informations relationnelles et les contraintes issues de la séquence d'assemblage définie en amont.

La cinquième étape consiste à gérer les relations du couple produit-process, afin d'avoir une meilleure interaction entre les informations du produit et les informations du process. Cette gestion des relations de manière indépendante aux systèmes PLM existants nécessite l'introduction d'une nouvelle application permettant d'orchestrer les flux d'informations produit-process.

La dernière étape est de proposer une implémentation des algorithmes mathématiques dans une application logicielle, s'interconnectant aux plateformes d'ingénierie existantes (PDM, CAO et MPM), afin d'anticiper l'impact des choix de conception sur le processus d'assemblage, et ainsi maintenir une cohérence dans la gestion des informations du produit et de sa séquence d'assemblage.

## 5. Conclusion

Nous avons, dans ce chapitre, décrit d'une manière générale les enjeux industriels et scientifiques permettant de formuler notre problématique de recherche. Les enjeux actuels soulignent le besoin de travailler sur plusieurs domaines connexes, tels que l'ingénierie et l'industrialisation, afin de pouvoir prendre en compte les problèmes d'assemblage au plus tôt au sein du processus de développement.

Dans le chapitre suivant, nous présentons un état de l'art des travaux scientifiques, qui portent sur les thèmes majeurs de notre problématique, à savoir l'ingénierie intégrée, la conception orientée assemblage, la définition des séquences d'assemblage, et la gestion du cycle de vie des produits.



# Chapitre 2 .

## Etat de l'art dans les domaines de la conception orientée assemblage et de la gestion des informations techniques

*« Le désir d'originalité est le père de tous les emprunts, de toutes les limitations. Rien de plus original, rien de plus « soi » que de se nourrir des autres. »*

*Paul Valéry.*

### Contenu du chapitre

---

<b>1. Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>2. Les concepts de l'ingénierie .....</b>	<b>21</b>
2.1 L'ingénierie intégrée.....	22
2.2 Conception pour X.....	23
<b>3. Conception pour l'assemblage .....</b>	<b>26</b>
3.1 Objectifs de l'approche DFA.....	26
3.2 Méthodes basées sur l'évaluation qualitative.....	27
3.3 Méthodes basées sur l'évaluation quantitative.....	28
3.4 Approches intégrées et à base de connaissances.....	31
3.5 Bilan et positionnement .....	38
<b>4. Définition/planification de la gamme d'assemblage .....</b>	<b>39</b>
4.1 Les approches exactes.....	40
4.2 Approches métaheuristiques : les algorithmes génétiques.....	48
4.3 Bilan et positionnement .....	52
<b>5. Gestion du Cycle de vie des Produits .....</b>	<b>52</b>
5.1 Le concept et les objectifs du PLM .....	52

5.2	Gestion des informations produit-process .....	55
5.3	Modélisation du produit.....	59
5.4	Bilan et positionnement .....	60
<b>6.</b>	<b>Conclusion : nécessité de modèles, méthodes et outils .....</b>	<b>61</b>

## 1. Introduction

Ce chapitre expose l'étude des travaux de recherche, qui ont été conduits et qui sont en cours de réflexion, en lien avec la problématique énoncée dans le chapitre précédent. Ainsi, nous mettons l'accent sur les travaux relatifs à la conception orientée assemblage intégrant les aspects de définition des gammes et de gestion des données techniques du couple produit-process. De ce fait, le paragraphe 2 met en exergue les principaux concepts de l'ingénierie, notamment ceux de l'ingénierie intégrée et du Design for X. De manière plus spécifique, le paragraphe 3 fait état des approches dans le domaine de la conception pour l'assemblage. Le paragraphe 4 reporte les travaux de recherche sur la définition des séquences d'assemblage associées au produit. Enfin, le dernier paragraphe (5.) décrit les approches de gestion des données techniques et de gestion du cycle de vie des produits. Cet état de l'art permet de délimiter le périmètre de notre contribution, et ainsi d'apporter un référentiel scientifique pour mieux positionner nos travaux de recherche.

## 2. Les concepts de l'ingénierie

L'évolution actuelle du marché est caractérisée par les temps de développement des produits et de production associés. Ainsi, pour rester compétitives, les entreprises devront minimiser ces temps, tout en conservant la qualité demandée du produit. Cette nécessité d'agir au niveau de l'ingénierie va introduire les notions de concurrence, de simultanéité, d'intégration voire de collaboration [Lu *et al.*, 2007] au sein du processus de développement des produits.

Nous allons introduire brièvement la typologie des méthodes de conception, pour ensuite se focaliser sur les concepts de l'ingénierie intégrée et de la conception pour X. Les méthodes de conception de produits ont fait l'objet d'abondants travaux de recherche, depuis plus de 40 ans [Hubka & Eder, 1988], notamment sur les aspects de phases [Pugh, 1990] [Aoussat, 1990] [Ulrich & Eppinger, 2000] [Ullman, 2003] [Pahl & *et al.*, 2007], d'activités et de domaines [Gero, 1990] [Andreasen, 1991] [Suh, 1998]. Aujourd'hui, une typologie a été reconnue par l'ensemble de la communauté liée à ce domaine, celle-ci met en avant deux classes de résolution de problème d'ingénierie [Durruvu *et al.*, 1989] [Deneux, 2002] :

- la *conception prédéfinie* ou *variationnelle* qui intègre la *conception routinière* et la *reconception*. Il s'agit de reconcevoir un objet technique où le concept est déjà connu, en général sur la base d'un nouveau cahier des charges, et pour lequel existent déjà de nombreux produits concurrents et expériences passées ;
- la *conception nouvelle* ou *générative* qui intègre la *conception innovante* et la *conception créative*. Il s'agit de concevoir et d'inventer un produit ou un process pour la première fois, sans aucun cas de référence existants, ni aucune expérience passée réussie qui permettrait de s'inspirer pour copier, de reconcevoir ou d'améliorer des solutions existantes.

## 2.1 L'ingénierie intégrée

Dans un souci d'efficacité en ingénierie, et pour faire face à l'enchaînement séquentiel des activités liées au cycle de vie des produits, une vision globale de développement est apparue à la fin des années 80 sous différentes appellations telles que l'ingénierie intégrée [Andreasen & Hein, 1985] [Tichkiewitch *et al.*, 1995], simultanée [Bocquet, 1998], distribuée [Brissaud & Garro, 1996], concourante [Sohlenius, 1992] (*Concurrent Engineering - CE*), voire collaborative [Li *et al.*, 2005] [Li & Qiu, 2006] [Lu *et al.*, 2007] (FIG. 4). Initialement développée au Japon puis reprise aux États-Unis, cette vision du processus d'ingénierie reste encore un sujet d'actualité. Nous parlerons au cours de ce paragraphe d'ingénierie intégrée pour désigner les problématiques liées aux facteurs de compétitivité, mais également aux préoccupations et contraintes venant des métiers situés en aval du processus de développement [Prasad, 1996], et à la mise en parallèle des activités dans le processus de développement des produits [Eppinger *et al.*, 1997].

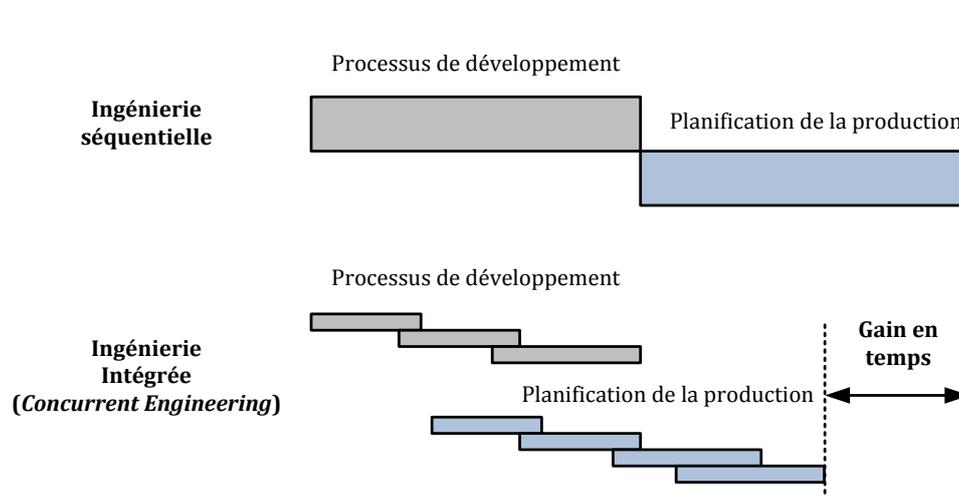


FIG. 4 — De l'ingénierie séquentielle à l'ingénierie intégrée

### 2.1.1 Définitions

Parmi les nombreux travaux de recherche portant sur l'ingénierie intégrée, nous relevons une première définition établie par [Winner *et al.*, 1988], qui souligne l'exécution parallèle des activités de conception produit-process par l'intégration de nouvelles préoccupations liées aux activités situées en aval du processus de développement :

*« Concurrent Engineering is a systematic approach to the integrated, concurrent design of products and their process, including their manufacturing and support. This approach is intended to cause the developers, from the outset, to consider all elements of the product life-cycle from design through dispatch, including quality, cost, schedule and user requirements ».*

Dès lors, ce concept a été affiné et défini plus précisément par d'autres auteurs, tels que :

- « *Concurrent Engineering aims at decreasing the costs and time to market and at improving the quality of the product by carrying out parallel activities which are usually done in a sequence* » [Sohlenius, 1992] ;
- « *Concurrent engineering is generally recognized as a practice of incorporation various life-cycle values into the early stage of design. These values include not only the product's primary functions but also its esthetics, manufacturability, assembly, serviceability, and recyclability* » [Ishii et al., 1993] ;
- « *La notion de conception intégrée inclut l'intégration du cycle de vie du produit pendant la phase de conception par l'intégration de l'ensemble des acteurs devant à court ou moyen terme intervenir dans l'histoire de ce produit* » [Tichkiewitch, 1995].

Nous soulignons un défi toujours d'actualité qui est d'intégrer, dès que possible, dans la phase de développement du produit, les contraintes liées au cycle de vie de celui-ci. Ce rapprochement fait partie intégrante de la stratégie actuelle de gestion du cycle de vie des produits.

### 2.1.2 Objectifs

Les processus industriels, par exemple dans le secteur automobile, ont été pensés traditionnellement de façon séquentielle, et ont engendré des situations couramment appelées « over-the-wall » [Vasilash, 1990]. Cela signifie qu'il existe des barrières entre les différents départements et services de l'entreprise, notamment entre le bureau d'études et le bureau des méthodes [Whitney, 1992]. L'ingénierie intégrée a apporté des éléments de réponses à ces problèmes, en proposant un cadre nouveau, idéal pour le processus de développement des produits. Parmi ces objectifs, nous pouvons relever l'amélioration de la qualité [Yeh, 1992], la minimisation des coûts [Miles & Swift, 1992], la réduction des temps de développement [Burman, 1992], l'amélioration de la flexibilité, ainsi que l'augmentation de la productivité et de l'efficacité. Pour relever les objectifs de l'ingénierie intégrée, les approches se sont orientées vers la coopération et la coordination entre les équipes multifonctionnelles et pluridisciplinaires [Ranky, 1994], afin de considérer les interactions entre les différentes préoccupations couvrant le cycle de vie des produits. Ce premier défi, qui consiste à travailler en équipes projet, se voit accompagné d'un second objectif, souligné par [Sapuan et al., 2006], qui est la mise en œuvre de :

- méthodologies telles que les approches QFD (*Quality-Functional Deployment*) ou DFX (*Design for X*) ;
- systèmes d'information (CAO, GDT, etc.) permettant d'opérationnaliser les méthodes proposées, et d'obtenir une véritable implémentation de cette nouvelle vision.

## 2.2 Conception pour X

Résultant d'une prise de conscience de l'importance de l'impact des décisions prises en amont, au sein du processus de développement sur les métiers situés en aval, le concept de conception pour X (*Design for X - DFX*) a émergé à la fin des années 50 [Matousek, 1957]

[Niebel & Baldwin, 1957] [Everhart, 1960] [Pech, 1973]. En effet, le DFX est un ensemble de méthodologies qui ont pour objectif d'améliorer la conception par la sensibilisation des concepteurs au regard d'objectifs et préoccupations variés [Huang, 1996] [Kuo *et al.*, 2001]. De ce fait, le DFX est considéré comme une des approches les plus efficaces permettant de mettre en œuvre une logique d'ingénierie intégrée.

De manière plus précise, les approches DFX sont des méthodes de conception, où « X » caractérise un point de vue lié aux facteurs de compétitivités, aux métiers intervenants dans le processus de développement, mais également aux phases du cycle de vie du produit, tels que la fabrication (*Design for Manufacture – DFM*), l'assemblage (*Design for Assembly – DFA*), le désassemblage (*Design for Disassembly – DFD*), etc. (TAB. 1).

Chaque approche DFX regroupe un ensemble d'informations, de connaissances, de procédures, d'analyses, de mesures et de recommandations à exploiter en vue de mieux préparer le produit selon le facteur ou le métier X. Ainsi, le concepteur peut concevoir le produit tout en ayant conscience de l'impact de celui-ci selon la caractéristique ou le métier X [Benhabib, 2003].

En résumé, la tendance actuelle pour les approches DFX [Holt & Barnes, 2009] consiste à :

- élargir les préoccupations à intégrer au sein du processus de développement des produits. Bien que les approches DFX ont su apporter leur efficacité pour implémenter l'ingénierie intégrée, la dynamique des marchés demande d'élargir ces approches par la prise en compte de nouvelles contraintes telles que les chaînes d'approvisionnement, les propriétés affectives du produit, voire les exclusions sociales ;
- ne plus considérer les différentes approches de manière isolée. En effet, des conflits peuvent émerger suivant l'orientation des objectifs de conception, il y a donc un besoin de gérer les compromis en conception [Huang *et al.*, 2000] [Huang, 2002]. Dans ce contexte, [Boothroyd *et al.*, 1994] ont proposé une approche de conception hybride appelée **DFMA** (**D**esign for **M**anufacture and **A**ssembly) ;
- intégrer ces approches dès que possible, c'est-à-dire dès les phases amont du processus de développement du couple produit-process. L'implication actuelle des approches DFX se limite aujourd'hui plutôt en phase de conception détaillée du produit, une fois les caractéristiques géométriques du produit spécifiées.

Parmi les nombreuses méthodologies associées au concept du DFX, la section suivante fait état des divers travaux de recherche dans le domaine de la conception pour l'assemblage.

TAB. 1 — Récapitulatif des approches DFX selon les aspects liés aux facteurs de compétitivité et aux phases du cycle de vie des produits

<b>Orientation</b>	<b>Type d'approche</b>	<b>Objectif</b>	<b>Support</b>
Cycle de vie du produit	Design for manufacture and assembly	Réduire les coûts de production	Guide de conception Vérification de la faisabilité : fabrication/assemblage Critères : coûts de fabrication/assemblage
	Design for end-of-life	Réduire l'impact environnemental	Vérification de la faisabilité Critère : impact environnemental du produit en fin de vie
	Design for disassembly	Réduire les temps/coûts	Vérification de la faisabilité : séquences de désassemblage Critères : coûts/temps de désassemblage
	Design for recycling	Augmenter le nombre de composants à recycler	Guide de conception Critère : taux de recyclabilité
	Design for supply chain	Réduire les coûts des chaînes d'approvisionnement	Critères : coûts de la chaîne, qualité, niveau de collaboration, risque
Facteurs de compétitivité	Design for environment (Eco design)	Réduire l'impact environnemental	Guide de conception Critère : impact environnemental à travers l'analyse du cycle de vie (LCA, Eco-indicateurs, etc.)
	Design for quality	Augmenter la satisfaction du client	Critères : benchmarking, priorités des exigences géométriques en fonction des exigences client
	Design for maintainability	Réduire les coûts de maintenance	Critère : coûts de maintenance (MTBF, Cost-based FMEA)
	Design for cost	Réduire les coûts	Critères : coûts estimés
	Affective design	Augmenter la satisfaction émotionnelle	Critère : réactions affectives (emotional design, Kansei engineering, etc.)
	Inclusive design	Réduire les exclusions sociales	Critère : conception pour les enfants, les populations vieillissantes, les personnes handicapées, etc.

### 3. Conception pour l'assemblage

Parmi les approches DFX, où « X » caractérise un point de vue au regard des phases du cycle de vie du produit, la conception pour l'assemblage (*Design For Assembly - DFA*) est une des composantes qui a suscité le plus d'intérêt avec les approches de conception pour la fabrication (*Design for Manufacture -DFM*), auprès des chercheurs et des industriels, au cours de ces 30 dernières années. Regroupant un ensemble d'informations, de connaissances, de procédures d'analyse et de recommandations, l'approche DFA vise à préparer le produit en vue de son assemblage futur. Ce paragraphe décrit, d'une manière générale, les objectifs et les principes de la démarche de conception pour l'assemblage, et d'une manière plus détaillée, les approches scientifiques associées.

#### 3.1 Objectifs de l'approche DFA

Introduite dans les années 70, le DFA a pour objectif d'apporter, au concepteur, une vision et une compréhension sur les difficultés d'assemblage futures du produit, lors des phases de conception détaillée. Ayant obtenue des gains significatifs dans les entreprises [Boothroyd *et al.*, 1994] [Deisenroth *et al.*, 1992] [Erixon, 1998], cette approche permet ainsi au concepteur, d'anticiper et d'apporter des modifications sur le produit, en tenant compte des contraintes issues du métier de l'assemblage. L'objectif principal du DFA est de minimiser les coûts d'assemblage du produit. Ces coûts peuvent être exprimés de la manière suivante [De Lit, 2001] :

$$C = \sum_{i=1}^{n_{op}} C_{op_i} + \sum_{j=1}^{n_{res}} C_{idle_j} = \sum_{i=1}^{n_{op}} \rho_i t_i + \sum_{j=1}^{n_{res}} \tilde{\rho}_j \tilde{t}_j \quad (2.1)$$

Avec	<p><math>C</math> représente les coûts associés à l'assemblage du produit</p> <p><math>C_{op}</math> est le coût de l'opération <math>i</math></p> <p><math>C_{idle}</math> est le coût de la ressource non affectée <math>j</math></p> <p><math>n_{op}</math> est le nombre d'opérations d'assemblage à effectuer</p> <p><math>n_{res}</math> est le nombre de ressources</p> <p><math>\rho_i</math> le ratio (coût/seconde) de la ressource (opérateur ou équipement) exécutant l'opération <math>i</math></p> <p><math>\tilde{\rho}_j</math> le ratio (coût/seconde) de la ressource (opérateur ou équipement) non affectée à l'opération <math>j</math></p> <p><math>t_i</math> les temps opératoires associés à la ressource</p> <p><math>\tilde{t}_j</math> les temps inexploités</p>
------	---

Nous pouvons en déduire que, pour diminuer les coûts d'assemblage du produit, il faudra :

- réduire le nombre d'opérations d'assemblage  $n_{op}$  à effectuer ;
- diminuer les temps opératoires  $t_i$  et les temps inexploités  $\tilde{t}_j$  ;
- diminuer le ratio  $\rho_i$ .

Etant fortement liés aux choix de conception et par conséquent au produit à assembler, ces trois sous objectifs peuvent être réalisés à travers :

- la réduction du nombre de composants du produit ;
- la standardisation des composants et des procédés d'assemblage ;
- la simplification des opérations d'assemblage.

Au regard de ces objectifs, énoncés ci-dessus et des moyens pour y parvenir, nous allons présenter, dans les sections suivantes, les divers travaux de recherche dans ce domaine. Selon les états de l'art proposés par [Defaux, 1989], [Schepacz, 1991], [Redford & Chal, 1994] et [Stone *et al.*, 2004], les approches DFA recensées peuvent être classées selon leur niveau de granularité en information et leur degré d'automatisation en trois catégories :

- les approches basées sur l'évaluation qualitative ;
- les approches basées sur l'évaluation quantitative ;
- les approches intégrées et à base de connaissances.

### 3.2 Méthodes basées sur l'évaluation qualitative

Cette section présente les travaux scientifiques initiaux, considérant l'approche DFA comme un ensemble de règles génériques de conception (*Best Practices* ou *DFA guidelines*), répondant aux objectifs du DFA par la standardisation, la simplification et la structuration du produit. Les premiers travaux ont été portés par [Andreasen *et al.*, 1983] [Andreasen *et al.*, 1985] sur un guide de conception des composants du produit, intégrant des règles de structuration et de sélection des procédés d'assemblage.

TAB. 2 — Règles de conception pour l'assemblage [Pahl & Beitz, 1996] [Otto & Wood, 2001]

No.	Règles DFA
1	Réduire le nombre de composants par la définition de composants multifonctionnels
2	Éliminer les éléments de fixation
3	Standardiser les composants (réduire le type de composant)
4	Minimiser l'utilisation de composants flexibles, petits, pointus, coupants, etc.
5	Architecture intégrale vs. Modulaire
6	Permettre aux sous-ensembles fonctionnels d'être contrôlés indépendamment
7	Minimiser le poids des composants
8	Privilégier les sous-ensembles stables
9	S'assurer que le produit a un composant de base sur lequel les composants peuvent s'y ajouter
10	Faciliter la manipulation
11	Faciliter l'insertion (auto-positionnement)
12	Minimiser les directions d'insertion
13	Utiliser des composants symétriques (sinon forcer l'asymétrie)
14	Fournir des features d'orientation
15	Utiliser la gravité pour insérer les composants (axe z)
16	Assurer l'accessibilité et la vision pour l'opérateur
17	Vérifier la compatibilité des matériaux
18	Éliminer les ajustements
19	Utiliser les principes cinématiques
20	Choisir la technologie d'assemblage optimale

Un enrichissement de ces règles de conception a été proposé par [Otto & Wood, 2001], pour améliorer le produit lors de la phase de conception détaillée (TAB. 2). Constatant que la majorité des approches DFA interviennent sur un produit détaillé ou fini, [Redford & Chal, 1994] ont évoqué leur intérêt pour introduire des recommandations dès les phases préliminaires de conception.

### 3.3 Méthodes basées sur l'évaluation quantitative

#### 3.3.1 La méthode Hitachi AEM

La méthode proposée par l'entreprise HITACHI, et baptisée « **A**ssembly **E**valuation **M**ethod (**AEM**) [Miyakawa & Ohashi, 1986], a pour objectif d'identifier et d'évaluer les difficultés de conception au regard des problèmes d'assemblage (manuel, automatique et robotisé), par l'introduction de deux indicateurs portant sur l'assemblabilité (E) et le coût d'assemblage (K) du produit. Il est à noter, que seules les opérations d'insertion et de fixation sont considérées pour l'évaluation, les opérations d'approvisionnement et de manipulation n'intervenant pas [Ohashi *et al.*, 1985]. Cette méthode se base principalement sur une règle, dans laquelle « chaque composant est autorisé à avoir un unique mouvement au cours du processus d'assemblage ». Dans le cas où le produit nécessite des directions d'insertion différentes de l'axe vertical (axe z), des pénalités sont alors affectées aux opérations d'insertion, amenant indirectement des pénalités sur les opérations de fixations associées [Suzuki *et al.*, 2001].

#### 3.3.2 La méthode Boothroyd & Dewhurst

Développée par [Boothroyd & Dewhurst, 1983] [Boothroyd *et al.*, 1994] à University of Massachusetts et University of Rhodes Island, la méthode DFA est celle qui a été la plus répandue au niveau industriel et exploitée au niveau scientifique, que ce soit pour les assemblages manuels, automatiques et robotisés. S'appuyant sur des données empiriques issues de l'étude de nombreux projets industriels, la méthode proposée consiste à évaluer l'assemblabilité du produit, d'une manière formelle et quantitative, lors de la phase de conception détaillée. L'objectif de l'approche est de simplifier le produit par la réduction du nombre de ses composants et de l'utilisation de composants standard. Cette évaluation porte principalement sur :

- l'analyse fonctionnelle des composants du produit en vue de leur élimination/intégration potentielle ;
- l'analyse des caractéristiques géométriques influentes pour chaque composant, afin d'affecter les temps de manipulation et d'insertion, issus des tables d'estimation **MTM** (**M**otion-**T**ime-**M**easurement method) ;
- le calcul d'un indice d'efficacité en conception.

##### 3.3.2.1 Analyse fonctionnelle pour l'élimination/intégration des composants

Afin de savoir quel composant est candidat à l'élimination, trois questions sont posées au concepteur :

- est-ce que le composant a un mouvement relatif par rapport aux composants déjà assemblés avec qui il est en contact physique ?
- est-ce que le composant doit être composé d'un matériau différent de celui des composants connexes ?
- est-ce que le composant devra faire l'objet d'une maintenance future ?

Dans le cas où la réponse à ces trois questions est négative, le composant est alors candidat à l'élimination ou à l'intégration.

### 3.3.2.2 Analyse des caractéristiques géométriques des composants pour l'affectation des temps d'assemblage

Les temps d'assemblage associés aux opérations de manipulation et d'insertion sont étroitement liés aux caractéristiques géométriques des composants du produit. Ainsi, la symétrie, la longueur, l'épaisseur, le poids, etc., sont des paramètres considérés comme influents. Pour chaque configuration de paramètres, un temps de manipulation et d'insertion sera alors affecté au composant.

### 3.3.2.3 Calcul de l'indice d'efficacité en conception

Basée sur les critères énoncés dans les paragraphes précédents, la méthode de Boothroyd & Dewhurst calcule un indice d'efficacité en conception  $E$ , en tenant compte du temps total d'assemblage du produit, et du nombre minimal de composants, c'est-à-dire les composants répondant à la fonction principale du produit :

$$E = \frac{3 \times \text{Nombre minimal de composants}}{\text{Temps total d'assemblage}} \times 100 \quad (2.2)$$

Le produit est alors considéré comme « facilement assemblable » si son indice d'efficacité  $E$  est supérieur à 60%. Dans le cas inverse, le concepteur doit effectuer des modifications sur le produit, portant soit sur le nombre de composants, soit sur les caractéristiques géométriques des composants. Bien que le fait que cette approche ait été largement employée dans le secteur industriel, celle-ci montre des faiblesses pour les assemblages complexes, notamment sur l'aspect de structuration du produit en sous-ensembles. Les assemblages complexes sont, en effet, des assemblages intégrant des sous-assemblages, etc., intégrant de nombreux composants, et par conséquent offrent, de manière limitée, l'opportunité de reconcevoir des composants.

### 3.3.3 La méthode Lucas

Issue d'une collaboration, dans les années 80, entre l'entreprise Lucas Engineering et University of Hull, la méthode proposée et baptisée « Lucas » [Swift, 1989], est similaire à l'approche proposée par Boothroyd & Dewhurst. Celle-ci vise à :

- la réduction du nombre de composants du produit ;
- l'analyse de la géométrie de chaque composant pour le processus d'assemblage.

Cette analyse se base sur un diagramme (*Process Flow Chart*) qui illustre la séquence d'assemblage et alloue des points de pénalité sur les problèmes potentiels d'assemblage dus à la conception. Ces pénalités sont utilisées pour le calcul de trois indices d'assemblabilité, appelés **MOP (Measure Of Performances)**, et liés aux sous-analyses suivantes :

- une analyse fonctionnelle du produit permettant d'identifier les composants répondant à la fonction principale du produit (groupe *A*), et les composants répondant aux fonctions contraintes et techniques (groupe *B*). L'indice MOP « Design Efficiency » est alors calculé :

$$MOP \text{ "Design Efficiency"} = \frac{A}{(A + B)} \quad (2.3)$$

D'un point de vue fonctionnel, cet indicateur devra être supérieur à 60% pour garantir une bonne efficacité.

- une analyse sur les opérations de manipulation (assemblage manuel) et de préhension (assemblage automatique), permettant de calculer un indice appelé MOP « Handling ratio », décrit par un index associé « Handling index », issu d'une base de temps opératoires, divisé par le nombre de composants appartenant au groupe :

$$MOP \text{ "Handling Ratio"} = \frac{\text{Handling index}}{\text{Number of parts } A} \quad (2.4)$$

Ainsi, un assemblage correct demande un ratio inférieur à 2,5.

- une analyse sur les opérations de fixation permettant de calculer un indice appelé MOP « Fitting ratio », décrit par un index « Fitting index », divisé par le nombre de composants appartenant au groupe *A* :

$$MOP \text{ "Fitting Ratio"} = \frac{\text{Fitting index}}{\text{Number of parts } A} \quad (2.5)$$

En conséquence, un assemblage correct demande un ratio inférieur à 2,5.

### 3.3.4 La méthode SONY DAC

Issue d'une problématique industrielle au sein de l'entreprise SONY, Yamigawa a proposé la méthode **SONY DAC (Design for Assembly Cost-effectiveness)** [Yamagawa, 1988], qui est basée sur une trentaine d'exigences et règles de conception pour préparer le produit à l'assemblage automatique, et notamment aux opérations de manipulation et de fixation. De ce fait, plusieurs indicateurs peuvent être identifiés :

- l'efficacité en assemblage ;
- les temps d'assemblage ;
- le nombre de composants et le nombre d'éléments de fixation ;
- les temps d'assemblage par composant.

Bien que cette méthode ait apporté des gains significatifs pour l'entreprise SONY, elle reste, néanmoins, adaptée uniquement à l'assemblage automatique et ne tient pas compte de la séquence d'assemblage du produit.

### 3.3.5 La méthode « House of DFA »

Rampersad a introduit la méthode « House of DFA » [Rampersad, 1994] [Rampersad, 1995], basée sur des règles de conception et sur les principes de l'approche QFD [Hauser & Closing, 1988], pour simplifier les opérations d'assemblage des produits mécatroniques (FIG. 5).

Cette méthode est constituée de sept étapes, dont deux (5 et 6) sont à remplir par le concepteur. Les autres phases introduisent des données et des informations permettant l'analyse du produit. Plus précisément, l'étape (1) décrit les différentes sous-opérations d'assemblage annexées par des facteurs d'impact sur le processus d'assemblage. L'étape (2) permet de décrire les propriétés aux niveaux produit, composant et processus, telles que le poids, l'épaisseur, la résistance à l'insertion, etc. Des matrices permettent, en phases (3) et (4), de mettre en relation les différentes propriétés, afin d'évaluer la complexité du produit d'un point de vue assemblage. La phase (7) recueille, quant à elle, les résultats de l'analyse par le biais d'indicateurs de complexité. Il est à noter que, dans cette approche, la prise en compte de la séquence d'assemblage, tout comme les recommandations pour la reconception du produit, ne sont pas mentionnées.

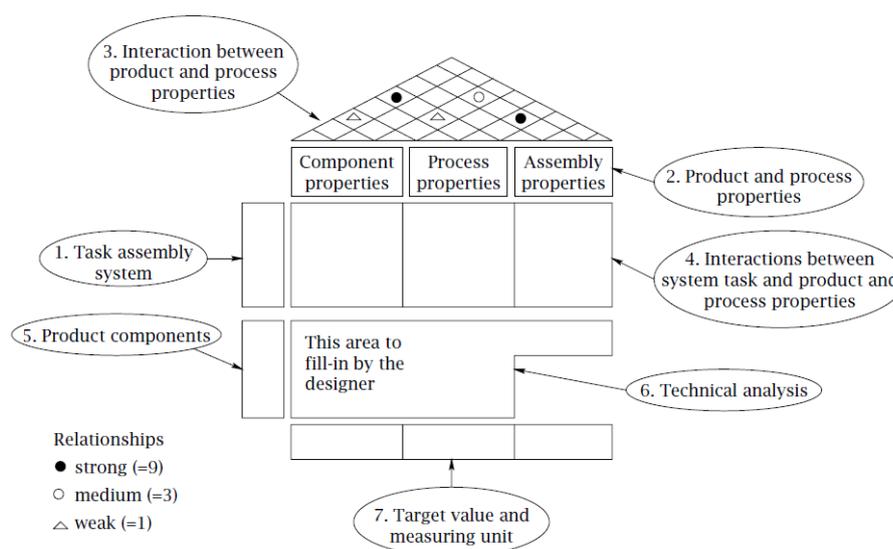


FIG. 5 — Méthode "House of DFA" [Rampersad, 1994]

## 3.4 Approches intégrées et à base de connaissances

Au delà des approches décrites ci-dessus, l'évolution vers des approches intégrées au processus de développement et à la définition des gammes d'assemblage a été une préoccupation majeure, dans ce domaine, au cours de cette dernière décennie [Zha *et al.*, 1998]. Tout d'abord, les approches à base de connaissances (*Knowledge-based approach*) ont permis une meilleure intégration, en conception, des connaissances et des contraintes

issues du métier de l'assemblage. Basées sur de l'Intelligence Artificielle (IA)<sup>17</sup> via des systèmes Expert [O'Grady *et al.*, 1988], ces approches offrent la possibilité de concevoir selon les points de vue fabrication et assemblage (*Design for Manufacturing and Assembly – DFMA*), en apportant des recommandations au concepteur [Chang, 1990] [Daahub & Abdalla, 1999]. Les approches intégrées dans les environnements CAO ont également été une solution pour extraire et exploiter les données issues des modèles 3D des composants du produit. Cette extraction se réalise par la reconnaissance de caractéristiques/entités géométriques (*features*), associées aux composants et à leurs relations, mais également par la détection de symétrie, le calcul du centre de gravité, etc. [Swift, 1989].

Dans le secteur aéronautique, le projet européen **FEAST** (**FEatures-based ASsembly Techniques**) [Bordegoni, 1995] a introduit la notion de caractéristiques d'assemblage (*assembly feature*), visant à supporter l'activité de conception routinière d'assemblage, et permettant ainsi de maintenir une cohérence entre les points de vue fonctionnel, structurel et géométrique. Nous allons, ci-dessous, décrire les principales approches qui sont appliquées dans le domaine de la conception intégrée du couple produit-process.

### 3.4.1 L'approche « Assembly-Oriented Design »

L'équipe de Daniel E. Whitney, du laboratoire CAD LAB<sup>18</sup>, au **Massachusetts Institute of Technology (MIT)** aux Etats-Unis, a fait partie des premiers à s'intéresser aux problématiques d'assemblage du produit au sein du processus de développement [Whitney, 2004]. Les premiers travaux, qui ont fait l'objet d'une collaboration avec le **Charles Stark Draper Laboratory**<sup>19</sup> (**CSDL**) [De Fazio *et al.*, 1999], ont porté sur l'amélioration et la rationalisation du produit, au regard des problématiques d'assemblage et de fabrication [Whitney *et al.*, 1988]. En particulier, cette amélioration vise à supprimer les contraintes de précéden- ce entre les composants (FIG. 6) via une analyse de la séquence d'assemblage. Un algorithme génétique est utilisé, afin de générer les divers sous-assemblages réalisables, tout en minimisant le nombre de mouvement des composants dans la séquence d'assemblage.

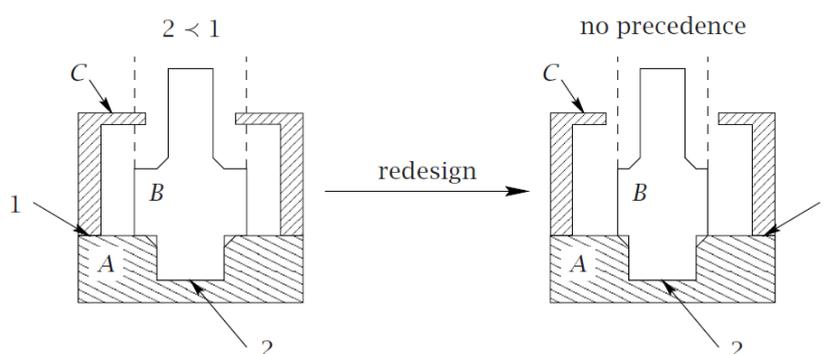


FIG. 6 — Suppression d'une contrainte de précéden- ce entre deux composants (a) sous-ensemble initial avec contrainte (b) sous-ensemble sans contrainte [De Lit, 2001]

<sup>17</sup> L'Intelligence Artificielle est la « recherche de moyens susceptibles de doter les systèmes informatiques de capacités intellectuelles comparables à celles des êtres humains » [La Recherche, janv. 1979, vol.10, p. 61]

<sup>18</sup> <http://cadlab.mit.edu/>

<sup>19</sup> <http://www.draper.com/>

Sur la base de ces travaux, Mantripragada a proposé une approche de conception orientée assemblage (*Assembly-Oriented Design*), qui vise à capturer les intentions de conception et ainsi fournir un cadre méthodologique de conception descendante [Mantripragada, 1998]. Intervenant dès les phases amont du processus de développement, cette approche met en exergue l'identification et la cascade des caractéristiques majeures (*Key Characteristics*) au sein de la structure du produit. Ces caractéristiques sont ensuite exploitées pour la modélisation et le contrôle des propagations des variations géométriques du produit par l'utilisation de modèles « Etat-Transition » (*State Transition models*) [Mantripragada & Whitney, 1999].

### 3.4.2 L'approche SCOPES

Au sein de l'Université Libre de Bruxelles (ULB), Pierre De Lit et Alain Delchambre ont proposé, via le projet européen SCOPES (Systematic COncurrent design of Products, Equipments and control Systems) [Delchambre, 1996], une approche permettant de considérer, de manière concourante, le DFA et la définition de la gamme d'assemblage. La méthode est décomposée en cinq évaluations :

- *une analyse de la structure produit* : dans le contexte de la famille de produit et de la modularisation, cette analyse a pour objectif de standardiser les composants, sous-ensembles au regard des aspects fonctionnels des produits ;
- *une analyse sur les opérations de manipulation* : cette analyse introduit des entités de conception facilitant la manipulation des composants et des sous-ensembles pour les assemblages manuels, automatiques et robotisés ;
- *une analyse pour les opérations de préhension* : cette analyse fait intervenir des règles de vérification des composants ou sous-ensembles pour leur préhension, en considérant les paramètres influents, tels que la géométrie, l'enveloppe et le poids ;
- *une analyse pour les opérations d'insertion* : cette analyse vise à vérifier la facilité de positionner et d'insérer les composants, et propose des améliorations de conception ;
- *une analyse pour les opérations de fixation* : cette analyse conduit au choix du procédé de fixation optimal, en tenant compte des exigences de l'assemblage et propriétés du process.

Ces évaluations indépendantes peuvent être effectuées au sein du processus de développement. La plupart de ces analyses s'appliquent sur une géométrie du produit et utilisent une base de données, afin de proposer des éléments d'amélioration.

Cette approche offre le potentiel de fournir une véritable intégration entre la définition du produit et du processus d'assemblage. Cependant, cette opportunité n'a pas suffisamment été exploitée, puisque la séquence se définit toujours après la phase de conception détaillée du produit.

### 3.4.3 L'approche AODES

Zha *et al.* à Nanyang Technological University of Singapore, ont développé une approche de conception orientée assemblage afin d'intégrer, d'une manière concourante, la conception du produit et la définition de sa gamme d'assemblage. Basée sur des critères de coût et de productivité, cette approche considère les questions de définition de séquences, d'implantation des systèmes d'assemblage, d'allocation des tâches, etc. L'approche proposée peut intervenir dès la phase conceptuelle et continuer en phase de conception détaillée du produit. Les auteurs mettent en évidence la nécessité d'un système expert en lien avec une approche à base de connaissances utilisant les réseaux de Petri [Zha *et al.*, 1999]. Ce système est contrôlé par un Framework d'agents informatiques permettant la coopération et la mise en relation des connaissances issues de diverses sources. La méthodologie s'appuie sur la combinaison des algorithmes de parcours en largeur (*Breadth-first search*), et en profondeur (*Depth-first search*), afin de générer des séquences admissibles, ainsi que sur de la logique floue (*fuzzy logic*) pour sélectionner la séquence d'assemblage optimale.

Suite à ces travaux prometteurs, cette approche a été adaptée au contexte de conception descendante [Zha *et al.*, 2001]. De ce fait, le système expert de conception orientée assemblage, baptisé **AODES** (**A**ssembly-**O**riented **D**esign **E**xpert **S**ystem), a été développé, afin de permettre au concepteur de définir, analyser et modifier le produit tout au long du processus de développement. Le système AODES proposé pose des questions à l'utilisateur au cours du processus, afin d'apporter une aide à la décision (FIG. 7).

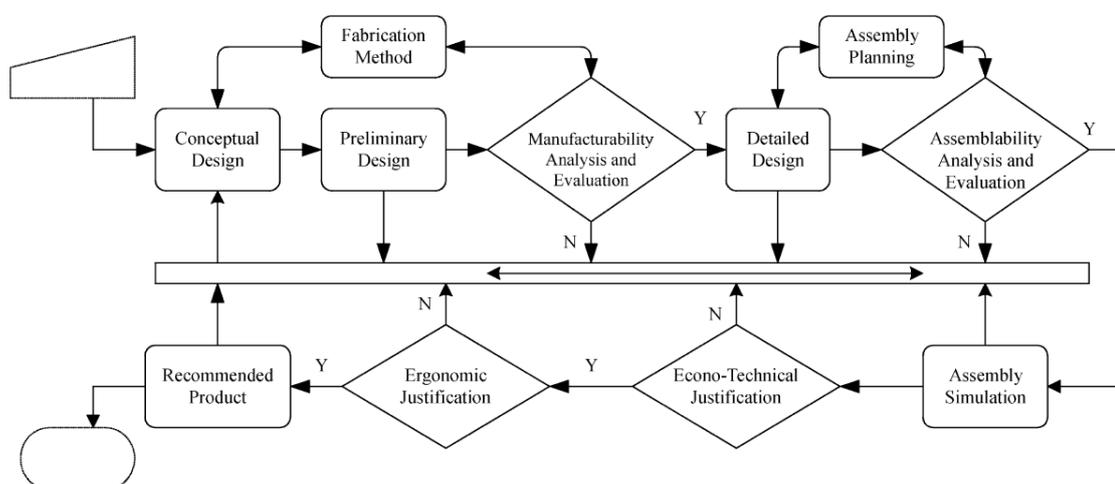


FIG. 7 — Cadre méthodologique de conception orientée assemblage [Zha *et al.*, 2001]

### 3.4.4 L'approche de conception proactive pour l'assemblage

Plus récemment, les projets OPHIR & THE DESIGNER'S SANDPIT<sup>20</sup>, menés par Graham Jared de Cranfield University et Ken Swift de University of Hull au Royaume-Uni, se sont positionnés dans le domaine de la conception orientée assemblage, afin de diminuer les temps de développement des produits [Dagleich *et al.*, 2000]. Ces projets partent du constat, que la plupart des approches DFA interviennent sur une géométrie figée du produit, et par

<sup>20</sup> <http://www.hull.ac.uk/MAPP/sandpit/content/history/Ophir.htm>

conséquent, considèrent ces approches comme « réactives », car engendrant des modifications sur le produit.

Ainsi, leur préoccupation a été de développer une approche dite « proactive », visant à évaluer le produit dès les phases amont du processus de développement [Barnes, 1999]. Les premiers travaux, inscrits dans le projet OPHIR, ont proposé une intégration du DFA au sein d'un environnement CAO, afin de souligner les problèmes d'assemblage dans la phase de modélisation du produit [Barnes *et al.*, 2004]. Cette intégration a introduit des méthodes de génération de séquences d'assemblage via les modèles 3D [Barnes *et al.*, 1997], mais également des raisonnements géométriques [Jared *et al.*, 1994] permettant de calculer les degrés de symétrie des composants [Jared *et al.*, 2000] [Tate, 2000].

Les travaux, inscrits dans le projet THE DESIGNER'S SANDPIT [Tate *et al.*, 2000], ont été dans la continuité des travaux précédents. Ceux-ci ont porté sur une évaluation et une intégration, plus en amont, dès les phases préliminaires, des problématiques d'assemblage du produit [Rodriguez-Torro *et al.*, 2004]. Amener les problématiques d'assemblage du produit avant que celui-ci soit complètement spécifié a engendré des opérations selon les niveaux : système (famille de produits, standardisation, etc.), structurel (structure produit et séquence d'assemblage) et composant (assistance au concepteur pour la conception détaillée) (FIG. 8).

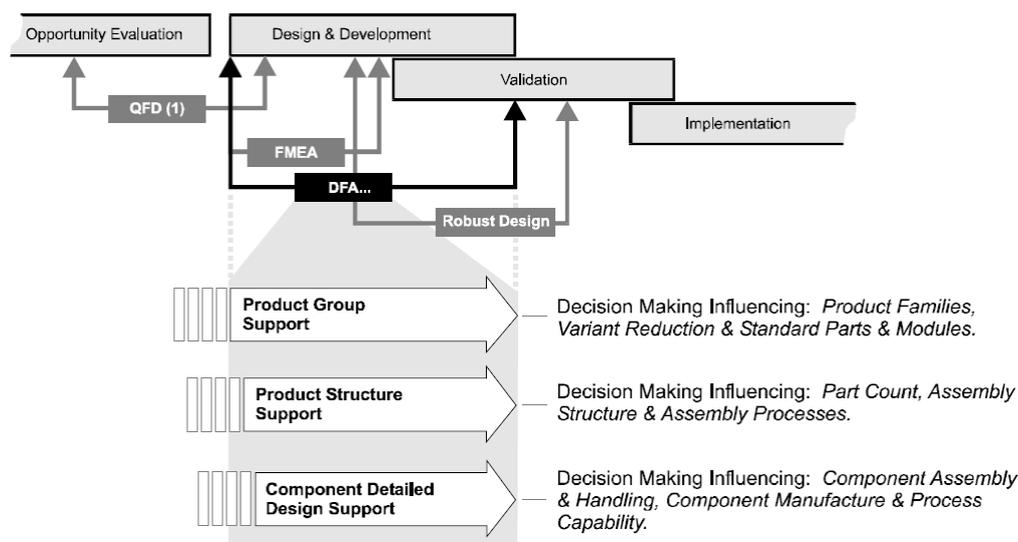


FIG. 8 — Approche de conception proactive pour l'assemblage [Barnes *et al.*, 2004]

Dans ce cadre, un système interactif d'aide à la décision, baptisé **SPADE** (**S**equencing **P**lanning **A**nd **D**esign **E**nvironment) a été développé dans un environnement orienté assemblage. Celui-ci utilise un système à base de connaissances, afin de fournir un support pour la structuration du produit, la génération des séquences et l'application des contraintes dans le processus de développement. L'objectif de cet outil est d'assister l'utilisateur pour définir la séquence d'assemblage fonctionnelle, et réalisable avec une approche basée sur les contraintes de stabilité, d'accessibilité et géométriques. De ce fait, SPADE propose une aide au choix des composants et des attributs associés aux liaisons physiques. La méthodologie proposée met en exergue les questions d'assemblage, ce qui est un avantage au regard des travaux réalisés sur les évaluations. Cependant, celle-ci pourrait être plus efficace par

l'apport d'un plus grand nombre de critères d'évaluation, et par l'utilisation d'une représentation fonctionnelle, afin d'intervenir très tôt dans le processus de développement.

### 3.4.5 L'approche d'amélioration de l'assemblabilité et de montabilité des produits

Au sein du laboratoire **LURPA** (Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée) de l'**ENS** (Ecole Normale Supérieure) Cachan, [Mathieu & Marguet, 2001] ont proposé une démarche d'amélioration de l'assemblabilité et de la montabilité des produits (FIG. 9), en particulier dans le secteur aéronautique.

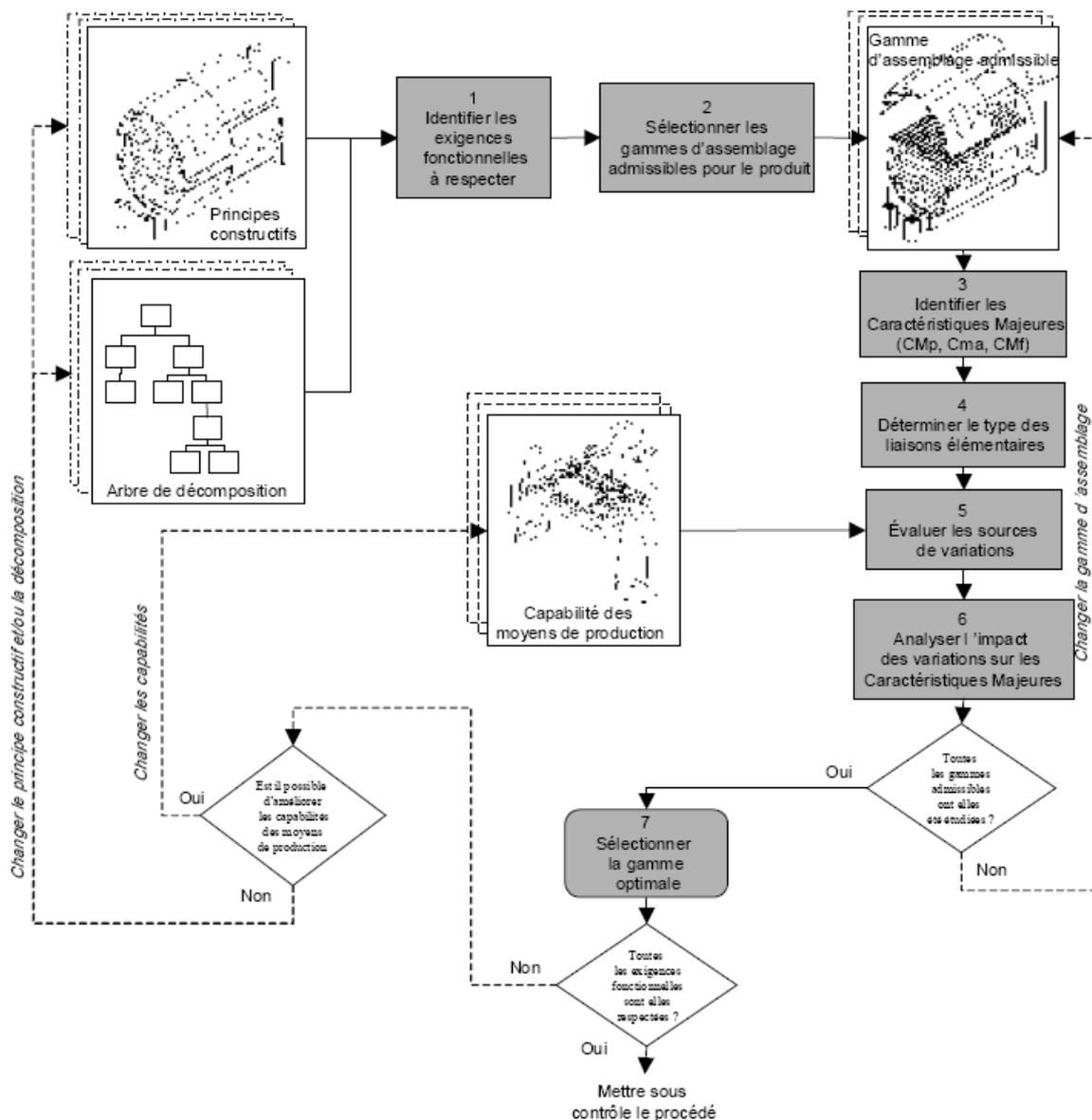


FIG. 9 — Démarche d'amélioration de l'assemblabilité et de la montabilité des produits

Cette démarche consiste à :

- identifier les exigences fonctionnelles du produit ;

- sélectionner les séquences d'assemblage admissibles du produit ;
- identifier les caractéristiques majeures (*Key Characteristics*) définies comme les caractéristiques physiques et géométriques dont les variations auront l'impact le plus important sur les exigences fonctionnelles du produit. Etroitement liées aux exigences fonctionnelles du produit, ces caractéristiques sont alors cascadées via la structure produit préalablement définie ;
- déterminer la nature des relations élémentaires existant entre les composants du produit, telles que les liaisons de positionnement et les liaisons d'attachement ;
- évaluer les sources de variations possibles sur les caractéristiques influentes du produit par la prise en compte des capacités associées aux process de fabrication et d'assemblage ;
- analyser l'impact des variations géométriques et dimensionnelles sur les caractéristiques majeures du produit.

Cette approche apporte une vision différente des approches de conception orientée assemblage, recensées dans les divers travaux de recherche. Il s'agit ici d'assurer la robustesse de l'assemblage d'un produit, et ainsi trouver la séquence d'assemblage optimale [Marguet, 2001]. Partant du principe que les variations géométriques et dimensionnelles peuvent influencer l'ordre dans lequel les composants du produit peuvent être assemblés, les auteurs proposent de vérifier la montabilité du produit en fonction de critères fonctionnels, tels que les exigences fonctionnelles et les caractéristiques majeures associées.

Malgré l'originalité de cette contribution, nous pouvons constater que l'approche intervient sur une structure définie et une géométrie détaillée du produit, et donc pourrait apporter davantage si déployée plus en amont, avant que la géométrie du produit soit spécifiée. De plus, la phase de définition de toutes les séquences admissibles n'est pas abordée, ce qui implique ici des itérations dans le cas où les séquences d'assemblages sélectionnées ne garantissent pas les exigences fonctionnelles et les caractéristiques majeures associées.

### 3.4.6 L'approche de conception d'assemblage par les relations

Issu d'une collaboration entre Shanghai Jiao-Tong University et General Motors, [Zhang *et al.*, 2002] [Wang *et al.*, 2005] [Chen *et al.*, 2006], un cadre méthodologique a été proposé pour déployer un système intelligent de conception et d'assemblage de caisse en blanc (*Body In White - BIW*), pour le secteur automobile. L'approche développée est capable de générer, de manière automatique, les types de liaisons physiques entre composants ainsi que la séquence d'assemblage associée au produit. La conception des relations, tout comme la définition de la séquence d'assemblage est traditionnellement basée sur l'expérience. Celle-ci met en évidence le besoin de raisonnement scientifique et de modèles précis en ingénierie du couple produit-process.

Afin d'implémenter l'approche proposée, un outil, baptisé **BBA (Body Build Advisor)**, a été développé, dans lequel le gammiste a la possibilité d'évaluer une séquence d'assemblage avant que la géométrie des composants du produit soit figée. L'outil BBA emploie une méthodologie de raisonnement à partir de cas (*Cas-based reasoning*), où une librairie de cas

intégrant des révisions est à disposition de l'utilisateur. La librairie de cas est une base de données contenant des conceptions réalisées et intégrant des informations relatives aux entités d'assemblage utilisées. Après avoir retrouvé un cas similaire, celui-ci devra être révisé afin de satisfaire les exigences de production. La méthodologie proposée s'appuie sur des algorithmes de génération de solutions et de chaînes de décisions, de sélection de liaisons physiques, de génération de séquences d'assemblage, d'analyse des tolérances et d'optimisation (FIG. 10). Malgré l'étendu de la méthodologie et la qualité des algorithmes proposés, nous pouvons mettre en évidence le manque de critères d'évaluation des séquences d'assemblage et le besoin d'un modèle informationnel, permettant de mettre en relation la quantité importante d'informations, afin de réaliser une véritable intégration.

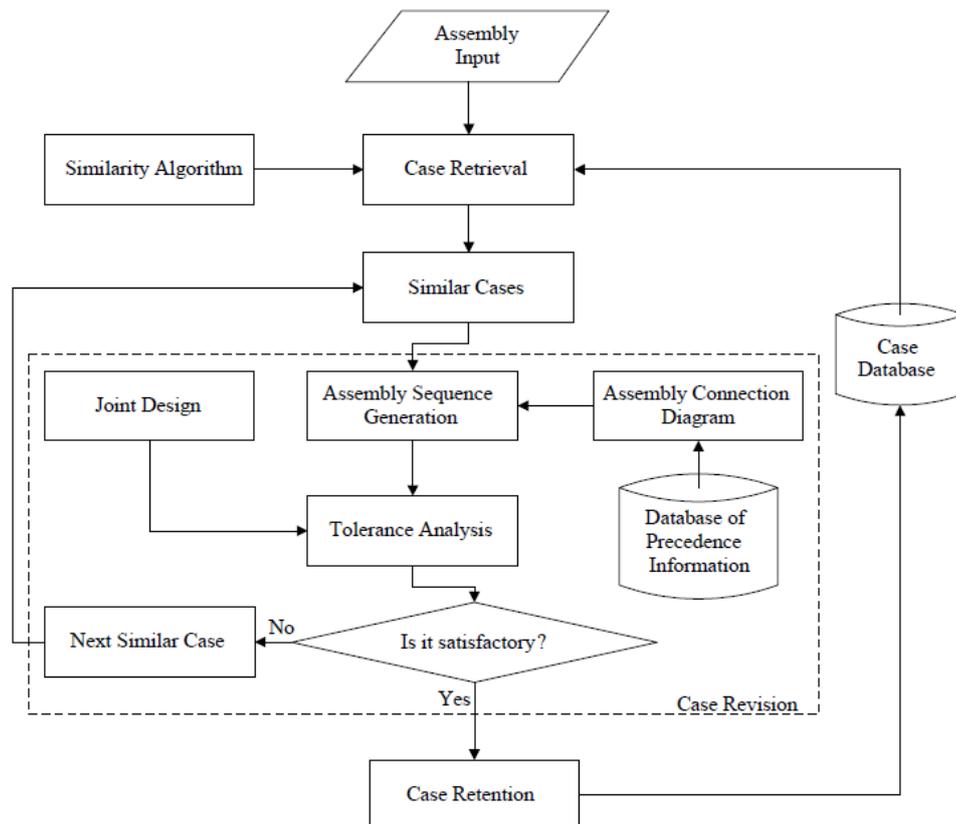


FIG. 10 — Cadre méthodologique de conception pour l'assemblage à base de cas

### 3.5 Bilan et positionnement

Dans cette section consacrée au domaine de la conception pour l'assemblage, nous avons énoncé et décrit les divers travaux de recherche existants. La majorité des approches identifiées apportent une évaluation du produit à travers ses composants [Eskilander, 2001]. Chaque composant est sujet à une analyse selon des critères liés aux opérations de préhension, manipulation, insertion et fixation au regard du type d'assemblage (manuel, automatique et robotisé). Le degré d'automatisation de ces approches peut être considéré comme semi génératif, car s'appuyant sur des règles heuristiques et des connaissances capitalisées. Dès lors, partant d'une définition détaillée du produit et de ses composants, l'implication de ces approches soulève une dimension réactive puisqu'elles engendrent généralement des modifications du produit. Des tentatives d'intégration [Wu & O'Grady,

1999] et d'automatisation au sein des environnements CAO ont fait l'objet de nombreux travaux pour exploiter et extraire les données géométriques associées aux composants du produit, afin de vérifier et valider le produit. Malgré l'obtention de gains significatifs dans le secteur industriel, nous pouvons constater que les approches existantes de DFA mettent en exergue :

- l'importance de la séquence d'assemblage comme référentiel aux évaluations. Ce point introduit la nécessité de travailler en contexte d'assemblage ;
- le besoin d'intervenir dès les phases amont du processus de développement du produit.

Au regard de ces constatations, peu de travaux de recherche (cf. *Paragraphe 3.4*) ont porté un intérêt sur la définition du produit et de sa gamme d'assemblage de manière concourante, étant donné les domaines de recherche à parcourir. De ce fait, il y a l'opportunité d'obtenir des gains en efficacité et en flexibilité, en intégrant ces préoccupations dans les phases amont du processus de développement des produits [Lin *et al.*, 2008]. C'est la raison pour laquelle, le DFA doit s'inscrire dans :

- une démarche proactive et intégrée de développement de produit ;
- le contexte plus large de la gestion des informations techniques et de la gestion de cycle de vie des produits.

En conclusion, le passage d'une approche réactive à une approche intégrée et proactive, dans le contexte du PLM, fait partie des enjeux actuels dans ce domaine, afin de concevoir de manière étroite et « juste du premier coup » (*Right first time*) le produit et sa séquence d'assemblage.

## 4. Définition/planification de la gamme d'assemblage

A partir des informations issues des phases de conception détaillée du produit, la phase d'industrialisation est une étape importante qui permet, d'une manière générale, la définition/planification des processus de fabrication et d'assemblage du produit (*process planning*). Cette phase introduit la notion de « gamme », afin de décrire le séquençage des différentes opérations à effectuer, ainsi que l'allocation de ressources (humaines et matérielles) pour l'obtention d'un produit physique.

Ces questions de définition des informations liées au process ont suscité de nombreux travaux pour répondre aux objectifs de production de masse, notamment avec la définition de gammes de fabrication automatisées et les outils de **CAPP** (Computer Aided Process Planning) associés [GAMA, 1990]. Plus récemment, le projet **RNTL** (Réseau National des Technologies Logicielles), baptisé **USIQUICK**<sup>21</sup> [Candlot *et al.*, 2008], a eu pour objectif de réduire les temps de définition de gammes de fabrication par le développement d'un outil d'ingénierie à base de connaissances (*KBE - Knowledge-based Engineering*) [Ammar-Khodja, 2007] s'intégrant à un système CAO, afin de préparer les pièces fraisées pour leur industrialisation [Derigent, 2005].

<sup>21</sup> <http://www.usiquick.com/public/deliver/index.html>

Ces travaux récents, considérant le process de fabrication, peuvent trouver leur écho dans le process d'assemblage avec les phases de définition/planification de gammes d'assemblage (*Assembly Process Planning*) pour cette phase du cycle de vie du produit. Parmi les sous-domaines relatifs à la définition de gammes, nous nous intéressons plus particulièrement aux divers travaux qui ont été conduits dans le domaine de définition de séquences d'assemblage (*Assembly Sequence Planning*).

Considéré comme un problème d'optimisation NP-difficile<sup>22</sup> [Garey & Johnson, 1979] [Wilson & Watkins, 1990] [Falkenauer, 1998], ce domaine a fait l'objet d'abondants travaux de recherche sur les vingt dernières années, avec pour objectifs, de proposer des solutions de génération automatiques et d'optimisation métaheuristiques des séquences d'assemblage. Différents états de l'art ont été réalisés par [Delchambre, 1996], [Homem de Mello & Sanderson, 1991], [Lim *et al.*, 1995], [Zha *et al.*, 1998] et récemment par [Wang *et al.*, 2009], afin d'apporter une vue d'ensemble. De ce fait, nous présentons ici les méthodes intégrant la génération, la représentation, l'évaluation et la sélection des séquences d'assemblage que nous regroupons selon les classes définies par [Wang *et al.*, 2009], telles que les approches « exactes » et les approches « métaheuristiques ». Toutes ces approches débutent à partir des informations relatives aux composants, ainsi qu'à leurs relations physiques.

## 4.1 Les approches exactes

Les approches exactes, considérées dans ce paragraphe, sont des méthodes d'énumération intelligentes, telles que les méthodes par séparation et évaluation (*cut-set method*), les méthodes arborescentes (*tree search*), voire les méthodes de recherche dans les graphes (*graph search*). Celles-ci permettent d'obtenir un résultat optimal en limitant l'espace de solutions admissibles.

### 4.1.1 L'approche Bourjault

Considéré comme le pionnier dans le domaine de définition de gammes d'assemblage, Alain Bourjault a proposé une approche de détermination des gammes d'assemblage par la génération de toutes les séquences admissibles à partir d'une définition détaillée du produit [Bourjault, 1984].

Le produit est ici modélisé sous la forme d'un graphe appelé « graphe des liaisons fonctionnelles » où chaque sommet représente un composant, et chaque arc entre les sommets décrit une liaison fonctionnelle (FIG. 11).

---

<sup>22</sup> La classe *NP* des problèmes Non-déterministes Polynomiaux réunit les problèmes de décision qui peuvent être décidés sur une machine non déterministe en temps polynomial. De façon équivalente, c'est la classe des problèmes qui admettent un algorithme polynomial capable de tester la validité d'une solution du problème, on dit aussi capable de construire un certificat. [Source : Wikipedia].

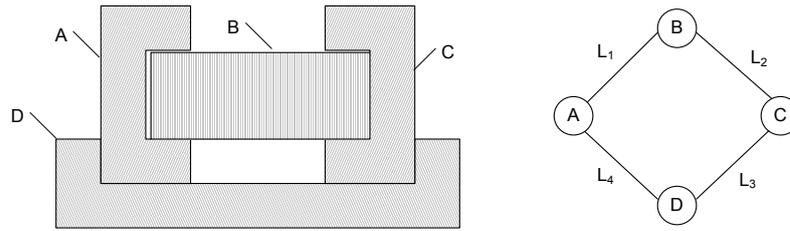


FIG. 11 — Exemple d'assemblage et du graphe de liaisons fonctionnelles associé

A partir de ce graphe, une série de questions directes est alors posée au gammiste sous la forme  $\mathbf{R}(L_i, L)$  et  $\mathbf{S}(L_i, L)$ , où  $i$  est le numéro de la liaison et  $L$  l'ensemble des liaisons fonctionnelles. De ce fait, ces questions peuvent s'exprimer de la manière suivante :

- $\mathbf{R}(L_i, L)$ : est-ce que la liaison  $L_i$  peut être réalisée si  $L$  est déjà réalisé ?
- $\mathbf{S}(L_i, L)$  : est-ce que la liaison  $L_i$  peut être réalisées si  $L$  n'est pas encore réalisé ?

Si la réponse à ces deux questions est négative, il faudra trouver quelle liaison appartenant à  $L$  en est la cause. Ce raisonnement doit être appliqué à toutes les liaisons fonctionnelles modélisées. Ces questions mettent en évidence la notion de précédence dans la réalisation d'une liaison fonctionnelle et donc pour l'assemblage de deux composants. Bourjault introduit la notion d'état d'une liaison  $L_i$  à un instant quelconque du processus d'assemblage par une fonction logique. Une variable binaire  $f_i$  est alors associée à chaque liaison et définit son état à un instant donné dans le processus d'assemblage du produit, telle que :

$$\begin{cases} f_i = 1 \Rightarrow L_i \text{ établie} \\ f_i = 0 \Rightarrow L_i \text{ non établie} \end{cases} \quad (2.6)$$

L'état d'assemblage  $E_k$ , à un instant quelconque du processus d'assemblage d'un produit contenant  $n$  liaisons, peut être caractérisé par un vecteur binaire de dimension  $n$ . Celui-ci est obtenu par une simple concaténation des variables  $f_i$  :

$$E_k = \{ f_1, f_2, \dots, f_n \} \quad (2.7)$$

La fonction logique  $\phi_k$  associée à ce vecteur vaut (2.8) :

$$\phi_k = \tilde{f}_1^k \cdot \tilde{f}_2^k \cdot \dots \cdot \tilde{f}_n^k \quad (2.8)$$

Avec  $\tilde{f}_j^k = f_j^k$  ou  $\bar{f}_j^k$  suivant que la fonction de rang  $j$  du vecteur  $E_k$  vaut 1 ou 0.

De cette manière, Bourjault définit, pour chaque liaison, la liste de tous les états permettant la réalisation de celle-ci. La fonction logique associée à l'ensemble des  $q_i$  états autorisant la réalisation de la liaison  $L_i$  est notée  $C_i$  et appelée « condition de réalisabilité » pour la liaison  $L_i$ . Celle-ci est décrite sous la forme :

$$C_i = \sum_{k=1}^{q_i} \phi_k = \sum_{k=1}^{q_i} \left( \prod_{j=1}^n f_j^k \right) \quad (2.9)$$

Ainsi, une réponse positive à la question  $\mathbf{R}$ , indiquera qu'aucune condition  $C_i$  ne contiendra une expression incluant  $\bar{f}_i f_j$  et que  $C_j$  ne contiendra aucune expression incluant  $\bar{f}_i f_j$ , à moins

que  $i$  et  $j$  puissent être réalisées simultanément. L'exploitation systématique des fonctions logiques  $C_i$  permet d'obtenir l'ensemble des séquences d'assemblage satisfaisant les conditions de réalisabilité. Celles-ci sont représentées sous forme d'arbres d'assemblage, ayant pour sommet chaque liaison fonctionnelle par laquelle l'assemblage peut commencer (FIG. 12). De ce fait, le nombre de feuilles indiquera le nombre de séquences d'assemblage réalisables.

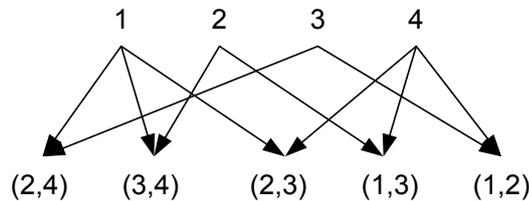


FIG. 12 — Récapitulatif des relations de précédence associées à l'exemple

L'inconvénient dans l'approche proposée par Bourjault réside dans le nombre de questions à poser pour des produits possédant un nombre important de composants. De plus, pour répondre aux questions, le gammiste s'intéresse seulement aux composants qui sont impliqués avec les liaisons considérées, sans se soucier de savoir si les composants restants pourront être assemblés par la suite.

#### 4.1.2 L'approche De Fazio & Whitney

A partir des travaux de recherche de Bourjault, De Fazio & Whitney ont proposé une méthode pouvant s'adapter à des produits plus complexes en nombre de composants [De Fazio & Whitney, 1987]. Celle-ci consiste, en premier lieu, à modéliser le produit par un graphe de liaisons. Le gammiste doit ensuite, répondre à une série de questions. L'objectif ici a été de réduire le nombre de questions à poser. Ainsi, pour un produit constitué de  $n$  liaisons, De Fazio & Whitney ont établi que le nombre de questions posées dans l'approche développée par Bourjault, variait de :

$$n \cdot 2^n \leq Q \leq 2 \cdot (n^2 + n) \quad (2.10)$$

Les auteurs arrivent au constat que l'approche développée par Bourjault devient inapplicable pour des produits dépassant 10 composants. C'est la raison pour laquelle, De Fazio & Whitney ont tenté de réduire le nombre de questions. Les questions qui étaient auparavant directes, consistent maintenant en une expression booléenne, avec un nombre de questions équivalent à :

$$Q = 2 \cdot n \quad (2.11)$$

Par conséquent, pour toute liaison  $L_i$ , deux questions seront posées :

- **Q<sub>1</sub>** : quelle(s) liaison(s) doit être réalisée(s) pour que  $i$  soit réalisée ?
- **Q<sub>2</sub>** : quelle(s) liaison(s) ne soit pas être réalisée(s) pour que  $i$  soit réalisée ?

Pour la liaison  $L_i$ , une réponse typique sera de la forme :

- $R_{1i}$ :  $(L_j \vee (L_k \wedge L_m)) \rightarrow L_i$   $\rightarrow$  signifiant « doit précéder »
- $R_{2i}$ :  $L_i \rightarrow (L_s \vee (L_t \wedge L_u))$   $\vee$  signifiant « ou »  
 $\wedge$  signifiant « et »

En utilisant les règles de l'algèbre booléenne, les réponses peuvent être insérées dans un ensemble de relations de précedence sous la forme :

$$(L_j \vee (L_k \wedge L_m)) \rightarrow L_i \quad (2.12)$$

Cette expression indique qu'il existe une seule et unique relation de précedence pour chaque liaison. Une liaison réalisée prendra la valeur VRAI (1) dans chaque relation de précedence où elle apparaît, et FAUX (0) sinon.

En s'inspirant des travaux de recherche menés par Bourjault, De Fazio & Whitney utilisent également les concepts d'état-transition (FIG. 13). Cet état est caractérisé par un vecteur binaire qui aura pour dimension le nombre de liaisons. De ce fait, une valeur égale à 0 pour une position donnée dans le vecteur, indiquera que la liaison n'a pas encore été réalisée. Une valeur égale à 1 indiquera que la liaison a été réalisée. En résumé, un vecteur avec toutes ses valeurs à 0 correspond à l'état du produit non assemblé, et un vecteur avec toutes ses valeurs à 1 correspond à l'état du produit assemblé.

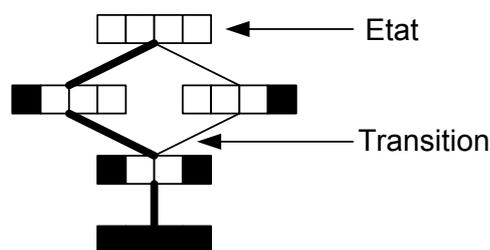


FIG. 13 — Diagramme d'état-transition de l'assemblage

L'approche proposée par De Fazio & Whitney offre une représentation plus compacte que les arbres présentés par Bourjault. Bien que le nombre de questions posées au gammiste ait été réduit, celles-ci demandent davantage de raisonnement de la part de l'utilisateur. Dans la continuité des travaux, [Baldwin *et al.*, 1992] a proposé une approche systématique de génération des contraintes de précedence. Un système d'aide a été développé, afin de permettre la génération de toutes les séquences d'assemblage réalisables pour un produit donné. A partir de différents critères (stabilité, retournement, etc.), le gammiste est aidé par le système, pour la sélection des séquences pertinentes.

### 4.1.3 L'approche Homem de Mello & Sanderson

Homem de Mello & Sanderson ont, quant à eux, développé une approche basée sur un modèle relationnel du produit pour générer toutes les séquences d'assemblage admissibles [Homem de Mello & Sanderson, 1988] [Homem de Mello & Sanderson, 1991]. Ce modèle est une version enrichie du modèle fonctionnel proposé par Bourjault. Les auteurs apportent une autre vision de la définition des gammes d'assemblage en prenant le problème dans le

sens inverse, c'est-à-dire par une approche de désassemblage. Le problème, de génération de toutes les séquences d'assemblage possibles, se réduit à chercher, à partir du produit assemblé, toutes les séquences de désassemblage permises. Cette approche tient compte des deux hypothèses suivantes :

- aucune opération d'assemblage ne nécessite une déformation physique des composants ;
- toute séquence d'assemblage est l'opération inverse de la séquence de désassemblage.

L'algorithme proposé permet de générer tous les sous-graphes possibles, afin d'avoir un vue globale sur les possibilités de décomposer le produit en sous-assemblages. Celles-ci peuvent être vérifiées à l'aide de trois critères tels que :

- la faisabilité géométrique via une analyse locale et globale ;
- la faisabilité mécanique ;
- la stabilité.

Cette approche de décomposition amène la représentation des séquences d'assemblage à un graphe ET/OU (*AND/OR Graph*) (FIG. 14). Dans ce graphe, le nœud principal représente le produit assemblé, les nœuds finaux correspondent aux composants seuls, et les nœuds intermédiaires correspondent à des sous-assemblages. Chaque nœud, mis à part les finaux, est divisé en une paire de sous-nœuds, chacun correspondant à une décomposition autorisée et relié par des hyperarcs.

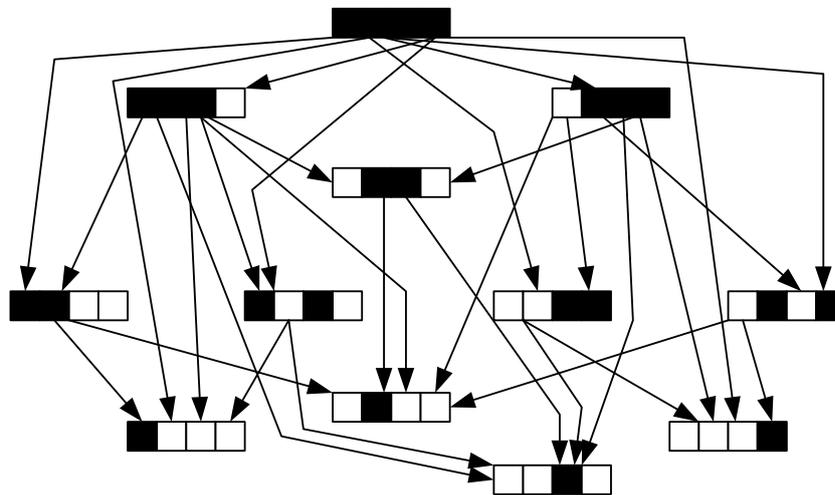


FIG. 14 — Graphe ET/OU

Nous pouvons constater, de manière claire, la différence entre les travaux présentés auparavant et ceux de Homem de Mello & Sanderson. La différence la plus significative réside dans l'objectif à atteindre. En effet, les auteurs portent, ici, leur intérêt sur l'impact économique de différentes séquences d'assemblage pour un même produit.

#### 4.1.4 L'approche Wolter

Partant d'une définition du nombre de séquences d'assemblage ( $N_{AS}$ ) pour un nombre de composants donné (2.13) soulignant l'explosion combinatoire des séquences, Wolter a développé un système baptisé **XAP/1** (**eX**perimental **A**ssembly **P**lanner, version **1**), afin de générer une unique séquence d'assemblage optimale [Wolter, 1988]. Cette démarche vise à proposer, pour chaque composant du produit, des trajectoires d'insertion. Ainsi, si un composant ne peut pas être déplacé suivant aucune des trajectoires proposées, sans entrer en collision avec d'autres composants déjà assemblés, cela implique que ce composant devra être assemblé avant tous les autres.

$$N_{AS} = \frac{(2n - 2)!}{(n - 1)!} \quad (2.13)$$

Pour ce faire, un graphe des contraintes d'assemblage baptisé **ACG** (**A**ssembly **C**onstraint **G**raph) est introduit pour représenter l'ensemble de toutes les collisions possibles entre les composants. Chaque nœud représente un composant du produit, chaque relation entre les nœuds indique une trajectoire d'assemblage. Etant donné que certains composants peuvent avoir plusieurs trajectoires, deux nœuds peuvent être reliés par plus d'une liaison.

En conséquence, une séquence d'assemblage correspond à une liste ordonnée de ces relations, contraintes par des règles de précedence liées aux interférences géométriques. L'algorithme propose de définir deux types d'information :

- une assertion de trajectoire : « le composant A utilise la trajectoire X » ;
- une assertion d'opération : « le composant A doit être assemblé avant le composant B ».

Ainsi, l'algorithme permet de générer des séquences d'assemblage à travers le réseau de règles. Une fois les séquences générées, celui-ci va appliquer une méthode de choix optimal, qui consiste à évaluer chaque séquence, suivant les critères : trajectoires de l'opération, manipulation du composant et la complexité des outils utilisés.

En résumé, l'approche développée par Wolter met en exergue les contraintes de précedence liées aux interférences géométriques, et introduit des informations sur les directions d'insertion relatives aux procédés d'assemblage. Malgré la qualité des travaux réalisés, nous constatons que l'auteur n'aborde pas l'identification des différents niveaux de sous-assemblages mais se contente juste de définir un séquençement des opérations en cohérence avec les mobilités des composants du produit.

#### 4.1.5 L'approche Dini & Santochi

Dini & Santochi ont développé un système baptisé **FLAPS** (**F**lexible **A**ssembly **P**lanning **S**ystem) [Dini & Santochi, 1992] qui permet de déterminer les séquences d'assemblage, ainsi que les sous-assemblages d'un produit. FLAPS est basé sur un modèle mathématique décrivant les contraintes entre les composants du produit sous la forme de trois matrices, telles que :

- la matrice des interférences ( $A$ ) ;
- la matrice des contacts ( $B$ ) ;
- la matrice des connexions ( $C$ ) décrivant les types d'attachement entre les composants.

Chaque matrice est évaluée suivant les trois axes des coordonnées cartésiennes, dans les sens positif et négatif ( $x+$ ,  $x-$ ,  $y+$ ,  $y-$ ,  $z+$ ,  $z-$ ), amenant par conséquent à un nombre de 9 matrices à définir. De ce fait, pour un produit de  $n$  composants, les auteurs décrivent les sous-assemblages comme étant des ensembles de  $m$  composants ( $s_1, s_2, \dots, s_m$ ), avec  $2 \leq m \leq n - 1$ . L'algorithme proposé identifie tous les sous-graphes relatifs aux sous-assemblages réalisables. Cette identification tient compte de trois conditions, telles que :

- *condition 1* : chaque composant appartenant à un sous-assemblage doit être en contact avec presque tous les autres composants appartenant au même sous-assemblage ;
- *condition 2* : l'ensemble des composants appartenant à un sous-assemblage doit constituer une structure stable (aucune mobilité externe) suivant toutes les directions dans l'espace ;
- *condition 3* : après son assemblage, un sous-assemblage ne doit pas interférer avec les composants restants.

Ainsi, pour chaque sous-assemblage identifié, une procédure vérifie si chacune des conditions est satisfaite. Des matrices contractées ( $A_k^*$ ,  $B_k^*$  et  $C_k^*$ ) sont alors générées considérant les sous-assemblages retenus comme des composants uniques au sein du produit.

Nous pouvons souligner la valeur ajoutée de cette approche concernant la manipulation des matrices pour la génération de séquences d'assemblage admissibles. Cependant, la tâche de définition des informations dans les 9 matrices peut devenir fastidieuse en fonction du nombre de composants du produit. L'introduction d'un graphe, ou d'une connexion avec un système CAO peuvent être des solutions pour la modélisation des informations d'entrée. De plus, les auteurs considèrent uniquement les informations d'interférences géométriques, il y a donc l'opportunité d'introduire des informations fonctionnelles et logiques, afin de rationaliser les conditions décrites ci-dessus.

#### 4.1.6 L'approche Laperrière & ElMaraghy

Laperrière & ElMaraghy ont proposé une approche permettant de réduire considérablement le nombre de séquences admissibles via le développement d'un outil baptisé **GAPP** (**Generative Assembly Process Planner**) [Laperrière & ElMaraghy, 1996]. L'approche se base sur un graphe orienté  $D = \{C, R\}$ , où  $C$  représente l'ensemble des composants et  $R$  l'ensemble des relations. Pour un produit de  $n$  composants, la génération des séquences est effectuée en enlevant, à chaque étape, un composant et ses relations. Dans le graphe généré, chaque chemin allant du haut vers le bas représente une séquence de désassemblage. Pour

contourner la complexité combinatoire, les auteurs ont introduit deux types de contraintes, telles que :

- les contraintes géométriques ;
- les contraintes d'accessibilité.

De plus, quatre critères d'aide à la décision, associés à des fonctions de coût, sont adoptés pour définir la séquence d'assemblage optimale, tels que :

- *le retournement* : décrit la structure, qui doit recevoir le prochain composant ou sous-assemblage, pour être orientée ;
- *le parallélisme* : décrit l'exécution simultanée de plusieurs opérations d'assemblage ;
- *la stabilité* : décrit si les sous-assemblages sont stables suivant les directions dans l'espace, en calculant les degrés de liberté de chaque composant ;
- *le regroupement* : décrit le regroupement des opérations d'assemblage similaires en une succession d'opération au cours de l'assemblage.

De ce fait, l'algorithme proposé permet l'évaluation des quatre critères au fur et à mesure de l'évolution du graphe. Ceci permet la génération directe d'une séquence d'assemblage optimale, pour un produit donné, en fonction des critères de choix déterminés auparavant.

Laperrière & ElMaraghy ont décrit un système permettant l'évaluation et la sélection de séquences d'assemblage pertinentes à l'aide d'un nombre de critères d'évaluation et des fonctions coût associées. Les exemples décrits dans leurs travaux prouvent l'efficacité de leurs dires. Cependant, l'utilisateur doit avoir une bonne connaissance du produit étudié, afin d'introduire les informations nécessaires pour les critères d'évaluation. De plus, comme les solutions dépendent de poids relatifs donnés par l'utilisateur, les séquences obtenues en sortie peuvent varier d'un utilisateur à l'autre.

#### 4.1.7 L'approche Cittolin

Basé sur les travaux de Dini & Santocchi, Cittolin, au sein du Laboratoire de Méthodes et Techniques d'Assemblage (LMTA) à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), a proposé d'introduire des « filtres universels » comme critères de sélection, pour la définition des séquences d'assemblage d'un produit donné [Cittolin, 1997a] [Cittolin, 1997b]. Ces filtres successifs ont pour objectif de réduire les permutations à réaliser pour la génération de séquences d'assemblage, et par conséquent améliorent considérablement le temps de raisonnement. Les contraintes existantes entre les différents composants du produit sont modélisées ici sous la forme de matrices booléennes. De ce fait, Cittolin aborde une approche par le désassemblage pour identifier les sous-assemblages et les pièces de base. Un outil baptisé PADGAP (Prototype d'Aide à la Détermination des Gammes d'Assemblage de Produits) a été développé pour supporter l'approche.

Cittolin débute par une description mathématique du produit avec :

- l'ensemble  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  où  $n$  est le nombre de composants du produit ;

- un référentiel global :  $O(x, y, z)$  ;
- un ensemble de direction d'insertion  $D = \{d_{x+}, d_{x-}, \dots, d_t\}$  où  $d_t = \{x+, x-, y+, y-, z+, z-\}$  ;
- un ensemble de trois matrices carrées booléennes de dimension  $(n \times n)$  permettant de décrire la stabilité  $S_{d_t}$ , les contraintes géométriques  $G_{d_t}$  et les attachements  $F$  entre les composants du produit.

De manière plus précise, l'auteur décrit :

- une contrainte de stabilité entre deux composants  $c_i$  et  $c_j$  comme une liaison de contact suivant une direction de désinsertion  $d_t \in D$ , empêchant ainsi tout mouvement de translation de  $c_i$  suivant  $d_t$  ;
- une contrainte géométrique comme la relation existante entre deux composants  $c_i$  et  $c_j$  suivant la direction  $d_t \in D$ , si le volume occupé par  $c_j$  interfère avec le volume engendré par la translation de  $c_i$  suivant la direction de désinsertion  $d_t$ . Dans le cas où il existe déjà une contrainte de stabilité entre ces deux composants, le coefficient associé à  $G_{d_t}$  est mis à zéro ;
- une liaison d'attachement comme une technique permettant de solidariser les composants d'un produit dans toutes les directions spatiales.

A partir de ces différentes informations, PADGAP permet d'identifier les sous-assemblages, les pièces de base et les séquences de désassemblage admissibles d'un point de vue interférence géométrique. Par inversement des séquences de désassemblage, l'auteur génère les séquences d'assemblage. Cela dit, cette hypothèse ne garantit pas l'obtention de la séquence d'assemblage optimale pour les produits industriels.

## 4.2 Approches métaheuristiques : les algorithmes génétiques

L'introduction des méthodes d'optimisation pour la génération, l'évaluation et la sélection des séquences d'assemblage optimales/locales a fait l'objet de nombreux travaux au cours de ces dix dernières années, comme décrit via l'étude bibliométrique représentée ci-après (FIG. 15) [Wang *et al.*, 2009].

En effet, la complexité combinatoire liée au nombre de composants des produits, faisant consommer beaucoup de temps aux méthodes exactes, a nécessité de développer des méthodes heuristiques pour converger vers des résultats plus rapidement.

Ces méthodes sont plus efficaces mais ne garantissent pas un résultat optimal. Parmi ces approches, nous distinguons les méthodes basées sur :

- le recuit simulé (*Simulated Annealing*) ;
- les algorithmes génétiques (*Genetic Algorithms*) ;
- les colonies de fourmis (*Ant colony*).

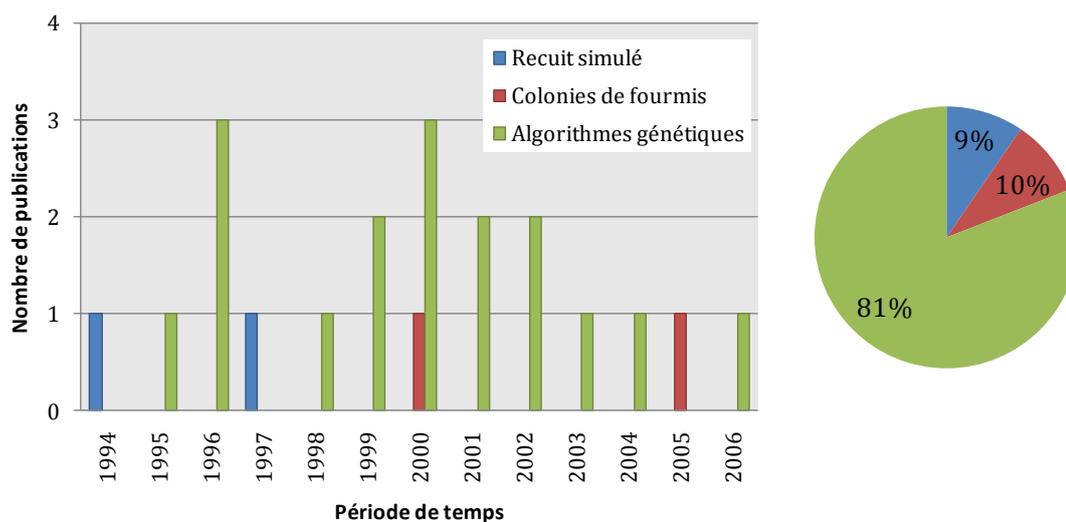


FIG. 15 — Répartition des articles intégrant de l'optimisation pour la définition de la séquence d'assemblage optimale [Wang *et al.*, 2009]

Nous allons nous focaliser, dans la section suivante, aux méthodes basées sur les algorithmes génétiques. En effet, les méthodes basées sur le recuit simulé, ainsi que sur les colonies de fourmis, sont utilisées pour résoudre des problèmes combinatoires liés à l'allocation de ressources à la séquence d'assemblage. Nous n'aborderons pas cette voie puisque la donnée d'entrée à ces méthodes est la séquence d'assemblage du produit.

Les méthodes basées sur les algorithmes génétiques ont suscité beaucoup d'attention au cours de cette dernière décennie [Wang *et al.*, 2009]. Ainsi, ces approches de définition de séquence d'assemblage peuvent se décomposer en quatre étapes :

- définition du code (*gène*) : qui définit de manière non ambiguë l'individu considéré ;
- définition de la population initiale (*chromosome*) : composée d'un certain nombre d'individu composé par leur code ;
- définir la fonction « objectif » (*critère*) : qui permet d'évaluer un individu ;
- définir les opérateurs génétiques, tels que les processus de croisement et de mutation.

La plupart des travaux de recherche dans ce domaine ont utilisé les composants du produit comme gènes. Ainsi, chaque chromosome a autant de gènes que de composants et représente ainsi une séquence d'assemblage. Afin d'évaluer une séquence d'assemblage, plusieurs critères peuvent être utilisés. Nous exposons, ci-dessous, les divers travaux de recherche dans ce domaine.

Tout d'abord [Bonneville *et al.*, 1995], au sein du Laboratoire d'Automatique de Besançon (**LAB**), ont proposé d'utiliser les algorithmes génétiques pour la définition des séquences d'assemblage, au lieu des méthodes exactes. Ainsi, deux critères sont mis en évidence pour formuler la fonction « objectif », tels que la complexité opératoire (accessibilité, stabilité, etc.) et la complexité logistique (nombre de réorientations et de transfert de sous-assemblages). Dans leur approche semi-automatique, la population initiale est un ensemble de séquences d'assemblage admissibles donné par un gammiste. De ce fait, l'évaluation fera

intervenir l'expert par une série de questions, les réponses seront sauvegardées dans une base de connaissances, afin de faciliter les traitements, pour proposer une séquence d'assemblage sous forme d'arbre. Des opérateurs génétiques de mutation et de croisement sont appliqués pour identifier les séquences d'assemblage optimales. Cependant, la vitesse de traitement s'accroît rapidement en fonction du nombre de composants du produit.

En cohérence avec ces travaux de recherche, [Fujimoto & Sebaly, 1996] ont proposé un algorithme qui permet de générer automatiquement un ensemble de séquences d'assemblage admissibles répondant à des règles heuristiques et des contraintes géométriques. De ce fait, les composants du produit sont considérés comme les gènes dans un chromosome, et trois opérateurs génétiques sont mis en place, tels que : la mutation, le croisement et le regroupement. L'opérateur de regroupement est introduit pour assurer l'identification de sous-assemblage, ceci afin de réduire l'espace de solutions. Dans cette approche, chaque règle contient une valeur définie qui comprend les critères de coût, stabilité, direction et manipulation. Ainsi, la fonction d'évaluation, pour chaque chromosome, est la somme de ces valeurs.

[De Lit *et al.*, 2001] ont proposé un algorithme génétique d'ordonnancement qui met en évidence les relations physiques entre les composants comme gènes dans le chromosome au lieu des composants du produit. Sur la base de contraintes géométriques, l'approche génère, de manière aléatoire, un ensemble de séquences d'assemblage, et une valeur de précédence est calculée pour chaque gène. La méthode identifie et gère également les sous-ensembles au sein de la séquence d'assemblage. Au final, les auteurs ont pris en compte quatre critères : le nombre de réorientations, l'assemblage des sous-ensembles, le parallélisme entre les opérations d'assemblage et l'identification des pièces de base. L'introduction de trois opérateurs génétiques, tels que le croisement et la mutation (inversion et réciprocity), offre à un cette approche des temps de traitements raisonnables, même pour des produits possédant de nombreux composants.

Afin de rencontrer, d'une manière plus rapide et plus fiable, des solutions optimales, [Smith & Smith, 2002] ont considérés cinq opérateurs génétiques, tels que : mutation, croisement, couper-coller (déplacement d'un ensemble de composants vers une position aléatoire dans le même chromosome), séparer et assembler (séparation du chromosome à une position aléatoire et jonction des deux groupes dans un ordre inversé) et reproduction (Fig. 16).

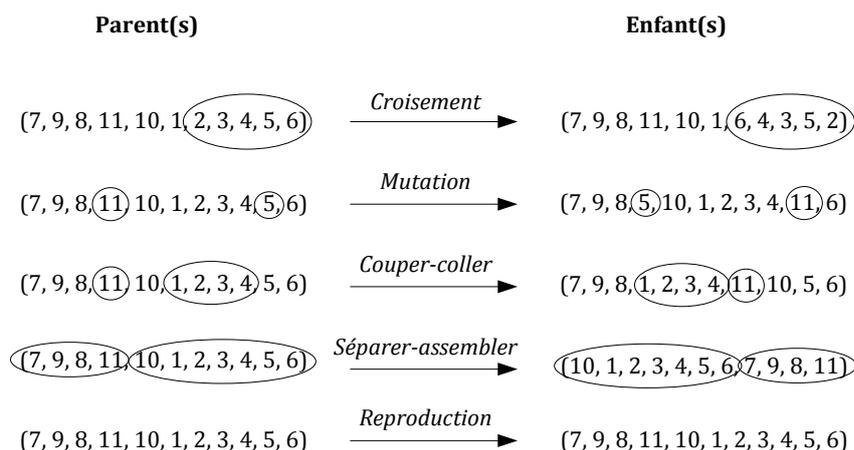


Fig. 16 — Opérateurs génétiques [Smith &amp; Smith, 2002]

A partir de contraintes géométriques, du nombre de réorientations et des chromosomes préalablement définis par l'utilisateur, l'algorithme permet de converger efficacement vers des solutions optimales. Ici, la vitesse de traitement dépend principalement de la complexité de la population initiale et de l'affectation des opérateurs génétiques.

Plus récemment, [Tseng *et al.*, 2004] [Tseng *et al.*, 2007] ont apporté une nouveauté dans l'utilisation des algorithmes génétiques en introduisant le concept de connecteur dans la définition des gènes du chromosome et des critères d'évaluation. Le connecteur ici peut être considéré comme l'élément mécanique qui solidarise un sous-ensemble (vis, écrou, soudure, etc.). De ce fait, la structure de données associée aux connecteurs va influencer la définition de la séquence. Les auteurs considèrent quatre propriétés associées au concept de connecteur : combinaison, direction d'assemblage, moyen d'assemblage et relation de précéence. Partant du constat que les relations de précéence sont déjà établies, l'algorithme utilise trois opérateurs génétiques : mutation, croisement et reproduction, pour générer les séquences d'assemblage. Bien que cet algorithme détermine la séquence d'assemblage optimale des connecteurs, celui-ci ne considère pas la séquence d'assemblage des composants reliés par ces connecteurs.

Enfin, [Marian *et al.*, 2006] ont décrit une adaptation des algorithmes génétiques proposés dans les divers travaux de recherche, en cohérence avec les caractéristiques des problèmes de définition de séquence d'assemblage. Ainsi, leur algorithme obtient une population initiale en générant de manière aléatoire les chromosomes admissibles par l'utilisation d'une recherche contrôlée. Les combinaisons comprenant les séquences d'assemblage séquentielles/non séquentielles, linéaires/non linéaires, monotones/non monotones, etc. et impliquant les combinaisons de composants rigides, élastiques/non élastiques, solides, liquides ou gazeux possédant des géométries/volumes variables ou fixes peuvent être considérées. De même, les relations de précéence sont catégorisées comme intrinsèques et spécifiques aux liaisons entre les composants, ou extrinsèques car faisant référence aux contraintes liées au processus d'assemblage (géométrie, accessibilité, etc.). Une fonction « fitness » est dédiée à chaque chromosome et considère la somme des différents critères d'optimisation.

### 4.3 Bilan et positionnement

Située entre la phase de conception détaillée et la phase d'équilibrage des lignes d'assemblage, la phase de définition/planification des séquences d'assemblage a engendré, comme nous l'avons évoqué, de nombreux travaux de recherche au cours de ces deux dernières décennies [Wang *et al.*, 2009]. Nous pouvons constater une évolution des approches exactes vers les approches métaheuristiques, étant donné le gain en termes de temps de traitement procuré par ces approches. Les algorithmes métaheuristiques, tels que les algorithmes génétiques peuvent être une solution intéressante pour résoudre les problèmes multi-objectif car ils sont capables de rechercher efficacement des solutions optimales parmi un large espace de solutions. Néanmoins, leur utilisation doit être conditionnée par certaines caractéristiques du problème. En effet, les paramètres comme la taille de la population ou le taux de mutation sont parfois difficiles à déterminer. Il faut souligner également que les algorithmes génétiques ne convergent pas forcément vers une solution optimale mais plutôt s'approchent vers une solution optimale, uniquement quand ils réussissent à échapper aux optima locaux.

De manière plus précise, toutes les approches identifiées s'orientent vers une compréhension du produit à travers ses composants et les relations impliquées comme données d'entrée, que ce soit pour les méthodes exactes que pour les méthodes métaheuristiques. Une fois les données d'entrée identifiées, les approches considèrent différents critères pour évaluer les séquences d'assemblage, tels que : coût, temps, stabilité, changement d'outil, réorientation, parallélisme, pièce de base, direction d'assemblage, etc.

De ce fait, nous pouvons mettre en évidence un besoin qui est de définir une séquence d'assemblage optimale le plus tôt possible, ce qui implique un compromis entre les méthodes exactes et métaheuristiques. Pour satisfaire cet objectif, il est impératif de réduire l'ensemble des solutions admissibles avant évaluation. En effet, le nombre considérable de solutions justifie l'utilisation des algorithmes génétiques, où leur point fort n'est pas l'identification d'une solution optimale mais plutôt dans le traitement d'un large espace de solutions s'approchant de l'optimal. Par conséquent, une réduction de l'espace de solutions permettrait aux approches exactes de prendre place, d'où l'importance de la représentation de l'assemblage.

Dans la mesure où nous cherchons une solution optimale, il est déterminant d'évaluer les solutions admissible au regard de critères liés au contexte de production mais également au regard des exigences fonctionnelles du produit, aspect quasi-inexistant dans les divers travaux de recherche.

## 5. Gestion du Cycle de vie des Produits

### 5.1 Le concept et les objectifs du PLM

Le contexte économique actuel oblige les entreprises à faire face aux contraintes sévères de réactivité pour fournir des produits répondant à des besoins toujours plus diversifiés. Pour améliorer la compétitivité des entreprise, la gestion du cycle de vie des produits, ou plus communément appelée **PLM** (*Product Lifecycle Management*), est une stratégie de gestion

intégrée de l'ensemble des informations et des processus liés au produit sur l'ensemble de son cycle de vie, en contexte d'entreprise étendue, allant de la phase de « définition du besoin » jusqu'à la phase de « fin de vie » de celui-ci [Stark *et al.*, 2004] [Sääksvuori & Immonen, 2005] [CIMdata, 2009]. De ce fait, la définition du PLM acquise par la communauté associée peut être exposée ci-dessous [Amann, 2002] :

*« A strategic business approach that applies a consistent set of business solution in support of the collaborative creation, management, dissemination, and use of product definition information across the extended enterprise from concept to end of life - integrating people, processes, business systems, and information. »*

Cette récente stratégie, issue du monde universitaire, a vu le jour au début des années 2000 afin de maintenir une cohérence entre les approches intégrées, collaboratives [Kvan, 2000], et les méthodologies associées aux outils de XAO (X Assisté par Ordinateur), tels que les outils de CAO (CAD Computer Aided Design), CAPP et CAM (Computer Aided Manufacturing), les systèmes de gestion des données techniques de type PDM, EDM (Engineering Data Management), MPM, etc., en connexion avec les systèmes SCM (Supply Chain Management) et ERP (Enterprise Ressources Planning) [Abramovici & Sieg, 2002] dans une unique chaîne numérique [Stark *et al.*, 2004], où tous les départements de l'entreprise ont un rôle à jouer [Danesi *et al.*, 2007] (FIG. 17).

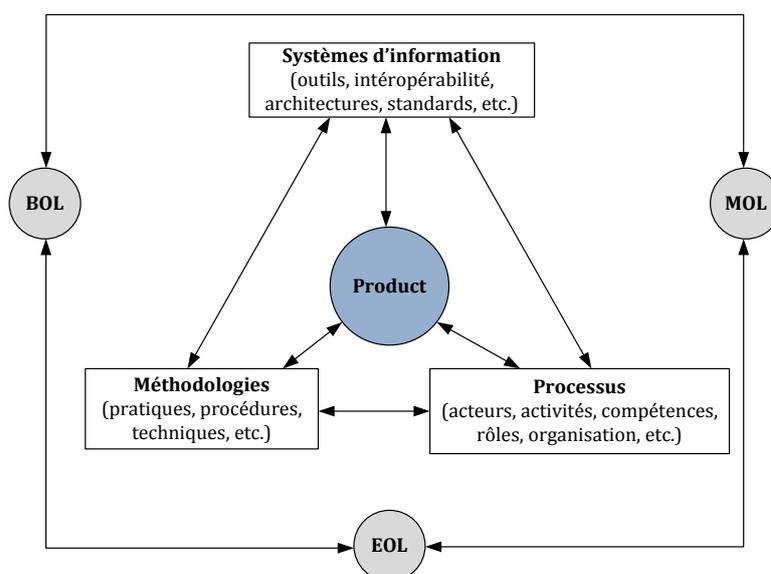


FIG. 17 — Stratégie PLM centrée sur le produit et mettant en avant des méthodologies, des processus et des systèmes d'informations à différentes phases du cycle de vie (BOL : Beginning of Lifecycle, MOL : Middle of Lifecycle, EOL : End of Lifecycle)

Cette stratégie peut se justifier par la disparité des divers systèmes d'information (*Information Technology - IT*) parcourant le cycle de vie des produits [Garetti & Terzi, 2007] (FIG. 18). Ainsi, nous pouvons constater des besoins en intégration et en cohérence parmi la quantité considérable de données et de structures de données embarquée dans ces systèmes [Karcher & Glander, 2003] [Bergsjö *et al.*, 2007]. Ces préoccupations font également l'objet de travaux portant sur les questions d'interopérabilité [Merlo, 2009] [Paviot *et al.*, 2009], d'échange de données [Gomes, 2001] [Eynard, 2005], de

déploiement/implémentation [Eynard *et al.*, 2004] [Schuh *et al.*, 2008] [Le Duigou, 2010] [Bissay, 2010], de capitalisation/réutilisation des connaissances [Ducellier, 2008] [Gomes, 2008] et gestion des processus métiers [Monticolo, 2008] à différents niveaux de l'entreprise [Sudarsan *et al.*, 2005].

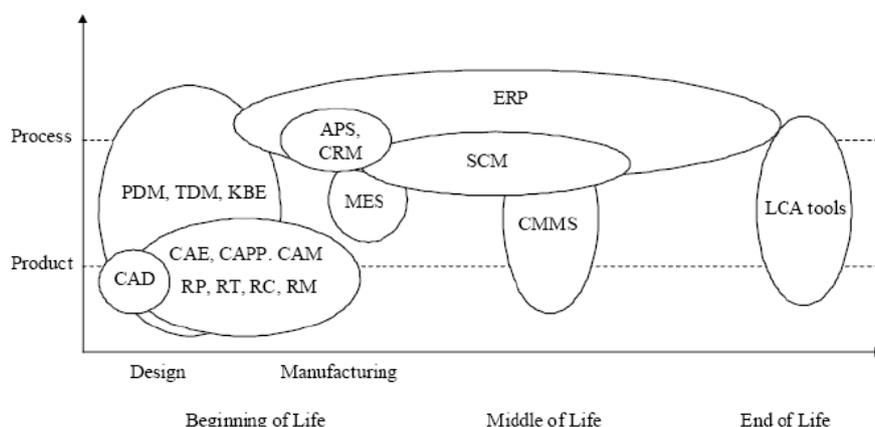


FIG. 18 — Cartographie des systèmes d'information parcourant le cycle de vie des produits [Garetti & Terzi, 2007]

De cette manière, les phases d'ingénierie couvrant le cycle de vie du produit se retrouvent étroitement liées et des contraintes mutuelles peuvent émerger. Dans le processus de développement traditionnellement séquentiel, ces contraintes ou conflits arrivent généralement assez tard et demandent des modifications sur les décisions prises en amont. Les itérations entre les phases d'ingénierie sont donc inévitables et doivent être gérées efficacement afin de maintenir la cohérence, l'intégrité et la validité du modèle informationnel du produit à travers son cycle de vie [Stark *et al.*, 2004] [Liu *et al.*, 2009].

Basée sur les bénéfices industriels issus des systèmes SGDT ou PDM et des méthodologies de gestion des données techniques associées, la stratégie PLM étend les fonctionnalités de ces systèmes, entre autres, dans le contexte de l'entreprise étendue [Fathi *et al.*, 2007] [Debaecker, 2004], par exemple via l'introduction des systèmes MPM pour la gestion des données process. Cet objectif de gestion des informations parcourant le cycle de vie des produits permet aujourd'hui, d'obtenir des gains en termes de productivité, d'efficacité, d'amélioration de la qualité des produit, de communication, de coordination et de collaboration [Ming *et al.*, 2005].

Les travaux de recherche actuels, dans le domaine du PLM, sont principalement ciblés sur la gestion des informations dans les phases de début (*Beginning of Life - BOL*) et de milieu (*Middle of Life - MOL*) de vie des produits [Kiritsis *et al.*, 2003], plus particulièrement autour des systèmes PDM, ERP et SCM [Liu *et al.*, 2009]. Durant cette décennie, le PLM a suscité beaucoup d'attention auprès des chercheurs et des industriels où plusieurs éditions de journaux internationaux [Ma & Fuh, 2007] [Wognum & Trappey, 2008] [Yan *et al.*, 2008] et états de l'art ont été proposés [Abramovici, 2002] [Hung & Fan, 2004] [Rangan *et al.*, 2005] [Abramovici, 2007] [Ming *et al.*, 2005] [Liu *et al.*, 2009], afin de décrire le concept, les fonctionnalités, le rôle, les futurs développements et technologies et l'application industrielle de la stratégie PLM [Terzi, 2005].

Devant l'étendue du domaine considéré, nous nous focalisons, dans le paragraphe suivant, sur les approches de gestion des informations du couple produit-process, ceci afin d'être en cohérence avec notre problématique de conception orientée assemblage.

## 5.2 Gestion des informations produit-process

Considérées comme une composante essentielle à la stratégie PLM, les problématiques de gestion du patrimoine informationnel du produit à travers son cycle de vie font partie des enjeux scientifiques et industriels toujours en vigueur [Yan *et al.*, 2008].

Plus particulièrement, les questions de gestion des informations du couple produit-process demandent d'avoir la main mise sur les interactions entre les acteurs métier impliqués, tels que l'architecte produit, le concepteur, le gammiste et l'expert process (FIG. 19). Nous décrivons dans la section suivante, l'état actuel des approches de gestion des données-informations associées au produit et au process.

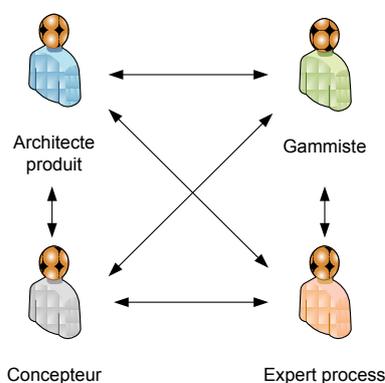


FIG. 19 — Interaction entre les parties prenantes impliquées dans la gestion des informations produit-process

### 5.2.1 Gestion des informations produit

La question de gestion du patrimoine informationnel du produit a tout d'abord été adressée aux niveaux des données et informations techniques du produit par l'introduction des Systèmes de Gestion des Données Techniques (SGDT) [Maurino, 1995] [Randoing, 1995] ou plus communément appelés systèmes Product Data Management (PDM) [Liu *et al.*, 2001]. L'objectif de ces systèmes est de fournir la bonne information, au bon format, à la bonne personne et au bon moment [Miller, 1997] [CIMdata, 2001]. D'une manière générale, ces plateformes d'ingénierie visent à gérer [Peltonen, 2000] [Helms, 2002] :

- le volume de données décrivant le produit et les process associés ;
- les versions des données ;
- les utilisateurs impliqués et leur accès aux données (gestion des rôles et comptes) ;
- les différents états des données et les changements d'état ;
- l'archivage des données ;
- l'intégrité des données ;

- la sécurité et la confidentialité des données ;
- la traçabilité des données ;
- l'approbation des données.

De ce fait, le rôle du système PDM peut être défini comme ci-dessous [CIMdata, 1997] :

*« Product Data Management (PDM) is a tool that helps people to manage both product data and the product development process. PDM systems keep track of the masses of data and information required to design, manufacture and then support and maintain products during the entire product life cycle. PDM systems also provide support for modeling of processes that can be executed on the data in the system. »*

Suite à une étude menée par Gao sur l'importance de considérer les systèmes PDM et CAPP dans une approche globale [Gao & Bowland, 2002], [Bowland *et al.*, 2003] ont proposé d'intégrer les fonctionnalités des systèmes **CAAPP** (Computer Aided Assembly Process Planning) dans un système PDM afin d'apporter un cadre méthodologique de contrôle des données et une structure de données permettant de réunir les données du couple produit-process. Cette tendance a été confortée par les travaux de [Bouikni, 2005] [Bouikni *et al.*, 2008], où un modèle baptisé, **VECP** (Validation des Evolutions des Caractéristiques du Produit), a été décrit, afin de contrôler le flux d'information nécessaire au support de l'évolution de la définition du produit, tout en assurant sa validation par les disciplines impactées.

Plus récemment, [Weber *et al.*, 2002] ont proposé un système PDM avancé supportant une approche de développement ciblée sur les propriétés du produit (*Property-Driven Development/Design - PDD*) en introduisant la manipulation de caractéristiques d'ingénierie prédéterminées (structure, forme et matériau), de propriétés (comportement du produit), et de leurs interdépendances au sein du produit. Cependant, les informations associées au produit et à l'ingénierie du processus d'assemblage ne sont pas considérées de manière efficace.

## 5.2.2 Gestion des informations process

Plus récemment les systèmes PDM ont étendu leurs fonctionnalités vers les systèmes **Manufacturing Process Management (MPM)** visant notamment à gérer les informations issues du processus d'assemblage [Shalvi, 2003] [Sly, 2004]. Tandis que les systèmes CAO et PDM adressent le « QUOI » pour la production, et que les systèmes ERP décrivent le « QUAND » et « OU », les systèmes MPM ont pour objectif de décrire le « COMMENT » et le transfert du « QUOI » au « COMMENT », tout en apportant des informations sur le « QUAND » et « OU » (FIG. 20).

De ce fait, les systèmes MPM entrent dans une logique d'ingénierie intégrée et collaborative, et permettent de faciliter le flux d'informations entre les systèmes PDM et ERP. Ainsi, les bénéfices obtenus par l'introduction des systèmes MPM sont d'améliorer l'accès et la gestion des informations associées au process. Ces systèmes peuvent prendre en considération la nomenclature produit et fournir des informations techniques au gammiste et à l'expert

process, qui ont pour objectif la gestion/conception du processus d'assemblage à différents niveaux de détails, ainsi que l'allocation des opérations d'assemblage sur les éléments constituant le produit.

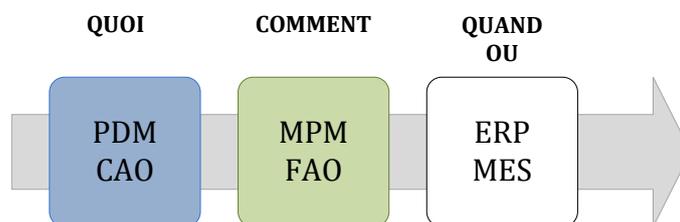


FIG. 20 — Gestion des informations produit-process

De plus, les systèmes MPM sont capables de déterminer le temps et les ressources à affecter pour chaque opération et définir ainsi l'architecture de l'usine de production par les méthodes d'équilibrage des lignes d'assemblage [Becker & Scholl, 2006] [Boysen *et al.*, 2007]. Enfin, le gammiste et l'expert process pourront effectuer des réconciliations entre la nomenclature produit et les nomenclatures process (mBOM et BOP – Bill of Process) définie dans le système MPM. Ainsi les nomenclatures process pourront être envoyées aux systèmes de définition de la production (ERP) (FIG. 21).

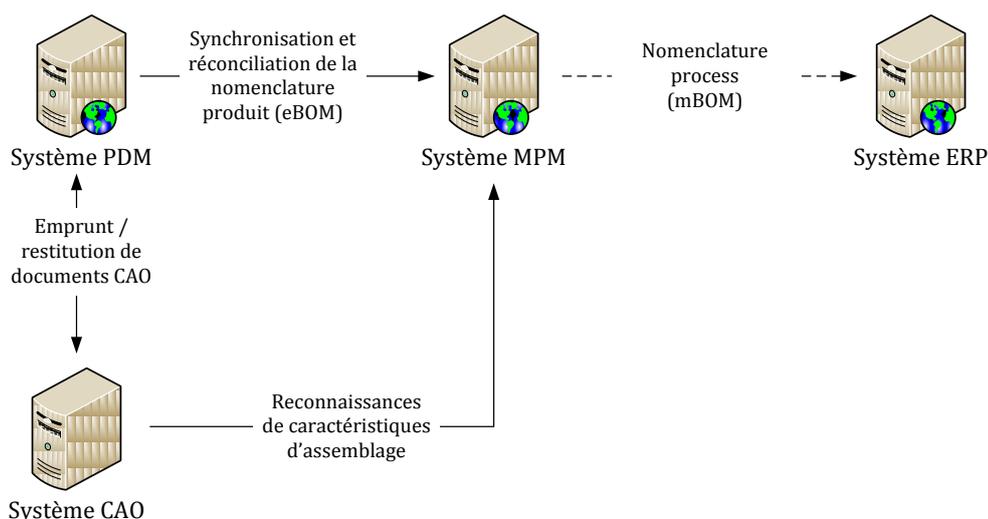


FIG. 21 — Relations existantes entre les systèmes PDM, MPM, CAO et ERP

### 5.2.3 Fonctionnalités des systèmes PDM et MPM

Cette section présente une vue globale des fonctionnalités associées aux systèmes PDM et MPM, afin d'être en adéquation avec les principes de l'ingénierie intégrée et de la stratégie PLM. Selon [Abramovici, 2005], les méthodologies et outils associés à la problématique de gestion des informations du produit en contexte PLM doivent proposer des mécanismes tels que l'identification, la structuration, la classification, la modélisation, l'accessibilité, le partage, la distribution/propagation, la visualisation et l'archivage des données et informations associées aux domaines projet, produit et process.

Plusieurs auteurs ont décrit, dans leurs travaux de recherche, les différentes fonctionnalités des systèmes PDM, telles que les fonctions utilitaires et les fonctions utilisateurs [CIMdata,

1996] [Hamer & Lepoeter, 1996] [Sackett & Bryan, 1998] [Maurino, 1995] [Randoing, 1995] [Peltonen, 2000] [Helms, 2002]. Nous décrivons ci-dessous les fonctions génériques auxquelles nous ajoutons les fonctionnalités des systèmes MPM, telles que présentées par les principaux éditeurs de ces systèmes (Dassault Systèmes<sup>23</sup>, PTC<sup>24</sup>, Siemens<sup>25</sup>, Notixia<sup>26</sup>, Krontime<sup>27</sup>, etc.) (TAB. 3).

TAB. 3 — Fonctionnalités associées aux systèmes PDM et MPM

Système PDM	Système MPM
Gestion de la structure produit	Gestion de la structure d'opérations
Check-in / Check-out	Versionnement
Versionnement	Gestion des documents
Gestion des modifications	Gestion de la nomenclature process
Gestion de la maturité	Gestion de la nomenclature d'opération
Gestion de la nomenclature produit	Gestion de la nomenclature ressources
Gestion des documents	Réconciliation des nomenclatures produit-process
Gestion de configuration	Gestion de configuration
Gestion du workflow	Définition des séquences d'assemblage
Administration	Définition du processus d'assemblage
Gestion des rôles et accès	Equilibrage des lignes d'assemblage
Visualisation du produit	Administration
Intégration CAO/ERP	Visualisateur produit et usine
Gestion du coffre-fort	Intégration CAO/PDM/ERP

TAB. 4 — Entités manipulées par les systèmes PDM et MPM

Système PDM	Système MPM
Produit	Opération d'assemblage
Sous-ensemble	Document
Composant	Librairie
Article	Configuration
Document	Nomenclature process
Nomenclature produit	Nomenclature opération
Modifications	Nomenclature ressource
Configuration	Ressource
Workflow	Contraintes de précedence
Demande de modification	Temps d'assemblage
Ordre de modification	Gamme d'assemblage

Dans ce contexte, les mécanismes permettant la gestion du patrimoine informationnel du produit couvrant son cycle de vie sont étroitement liés aux différentes entités à manipuler dans chaque domaine. De ce fait, la mise en place d'un modèle produit est nécessaire afin de

<sup>23</sup> <http://www.3ds.com/products/delmia>

<sup>24</sup> <http://www.ptc.com/products/windchill/mpmlink/>

<sup>25</sup>

[http://www.plm.automation.siemens.com/se\\_se/products/teamcenter/solutions\\_by\\_product/mfg\\_process.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/se_se/products/teamcenter/solutions_by_product/mfg_process.shtml)

<sup>26</sup> <http://www.notixia.com/Notixia/>

<sup>27</sup> <http://www.krontime.com/>

capitaliser les entités liées aux préoccupations des parties prenantes concernées par l'intégration produit-process. Tout comme pour le TAB. 3, nous dressons dans le TAB. 4, les entités manipulées par chaque système.

La gestion intégrée produit-process demande de maintenir une cohérence des données et informations. La section suivante vise à décrire, de manière synthétique, les divers travaux de recherche portant sur la modélisation du produit en vue de sa compréhension suivant les différentes préoccupations parcourant son cycle de vie.

### 5.3 Modélisation du produit

L'étude des divers travaux de recherche nous fournit de nombreux modèles de données associées au produit ainsi que des ontologies<sup>28</sup> dédiées à des domaines variés [Kim *et al.*, 2006] [Kabilan, 2007] [Matsokis & Kiritsis, 2010], tels que les domaines d'expertise et les domaines liés au cycle de vie des produits. D'une manière générale, le modèle produit vise à capitaliser, à différents niveaux d'abstraction, l'ensemble des informations associées à travers son cycle de vie [Sudarsan *et al.*, 2005]. Selon [Mony, 1992] le modèle produit permet :

*« [...] d'avoir un modèle de représentation s'inscrivant dans une approche globale de l'ingénierie des systèmes mécaniques, en vue d'une intégration par les données des informations produits établies durant la conception détaillée, et qui intègre toutes les informations nécessaires à la définition du produit. »*

Ces modèles présentent non seulement les objets techniques décrivant le produit à travers son cycle de vie mais également des vues regroupant les objets techniques selon les préoccupations des acteurs métiers impliqués dans le processus de développement des produits [Bernard, 1996]. Parmi les modèles existants en lien avec notre problématique, nous pouvons identifier les grandes familles de modèles et les travaux de recherche associés, tels que les modèles génériques, fonctionnels, par vue métier, par niveau de concrétisation, et multi-vues (TAB. 5).

Dès lors, sur la base de ces abondants travaux de recherche autour de la modélisation du produit, nous constatons une évolution des préoccupations vers de modèles génériques et extensibles, à l'interface des métiers [Roucoulès, 2007] pour supporter une approche descendante. De plus, l'élévation sémantique des modèles pour la capitalisation du contexte d'ingénierie à travers le cycle de vie des produits, fait partie des enjeux liés aux problématiques d'intégration, dès les phases préliminaires, des métiers parcourant le cycle de vie des produits.

---

<sup>28</sup> En philosophie, l'ontologie est l'étude de l'être en tant qu'être, c'est-à-dire l'étude des propriétés de ce qui existe. Par analogie, le terme est repris en informatique et en science de l'information, où une ontologie est l'ensemble structuré des termes et concepts représentant le sens d'un champ d'informations. L'ontologie constitue en soi un modèle de données représentatif d'un ensemble de concepts dans un domaine, ainsi que les relations entre ces concepts. [Source : Wikipédia]

TAB. 5 — Typologie des modèles produit

Typologie des modèles	Modèles et références
Fonctionnel	Fonctionnel [Dupinet, 1991], <b>SATT</b> (Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement) [Clément <i>et al.</i> , 1994], [Constant, 1996]
Par vue métier	[Villeneuve, 1990], [Chep, 1992], [Sabourin, 1995], Modèle peau-squelette [Belloy, 1994], [Tichkiewitch & Veron, 1998], [Nederbragt <i>et al.</i> , 1998] [Deglin & Bernard, 2000], Ontologie processus d'assemblage [Lohse <i>et al.</i> , 2005]
Générique (par niveau de concrétisation)	Modèle systémique [Le Moigne, 1977], [Umeda <i>et al.</i> , 1990], <b>FBS</b> (Function-Behavior-Structure) [Gero, 1990] [Gero & Kannengiesser, 2007], [Mony, 1992], Chromosomique [Andreasen, 1991], [Tollenaere, 1992], [Tollenaere, 1996], Niveaux [Grabowski <i>et al.</i> , 1995], Méta-modèle [Harani, 1997], <b>CPM</b> (Core Product Model) [Fenves <i>et al.</i> , 2001], <b>CPM2</b> [Fenves <i>et al.</i> , 2004] [Fenves <i>et al.</i> , 2008], <b>OAM</b> (Open Assembly Model) [Sudarsan <i>et al.</i> , 2005], Modèle d'assemblage [Zha & Du, 2002], <b>FBS-PPRE</b> (Process, Product, Resource, External Effect) [Labrousse & Bernard, 2008]
Multi-vues	Composant-Lien-Relation [Chapa, 1997] [Roucoules, 1999], <b>VIM</b> (Viewpoint Information Modelling) [Million, 1998], Multi-vues [Tichkiewitch, 1996], FBS [Rosenmann & Gero, 1996], Concurrent Engineering Reference Model [Eversheim <i>et al.</i> , 1995], <b>MD-MV</b> (Multi-Domains - Multi-Vues) [Gomes & Sagot, 2002], Features multi-views [Bronsvort & Noort, 2004], <b>PPO</b> (Produit Process Organisation) [Noel & Roucoules, 2007], <b>VECP</b> (Validation des Evolutions des Caractéristiques du Produit) [Bouikni, 2005], Multi-vues [Noel, 2006], <b>RFLP</b> (Requirement, Functional, Logical, Physical) [IBM & Dassault Systèmes, 2008], <b>PPCO</b> (Product-Process-Collaboration-Organisation) [Ouzrout <i>et al.</i> , 2009]

## 5.4 Bilan et positionnement

L'évolution des publications délivrées par CIMdata<sup>29</sup> au cours de ces dix dernières années souligne le besoin d'élargir la gestion des données-informations du produit à travers son cycle de vie. La stratégie PLM doit supporter les données, information, connaissances et compétences pour délivrer un produit [Sudarsan *et al.*, 2005]. Ceci implique des réflexions sur les problématiques d'intégration et de flexibilité dans la gestion du patrimoine informationnel lié au cycle de vie des produits. L'introduction des systèmes MPM et les méthodologies basées sur la gestion des relations [Brown, 2006] du produit en sont le parfait exemple. Dans ce contexte, quelques enjeux scientifiques peuvent être identifiés, tels que :

- la gestion intégrée et intelligente pour la manipulation des informations à travers les divers niveaux de prise de décision ;
- l'apport d'un degré de flexibilité entre les systèmes PDM et MPM ;

<sup>29</sup> <http://www.cimdata.com/>

- l'enrichissement du modèle produit, via les associations entre les objets techniques, afin de faciliter la compréhension du produit à travers son cycle de vie [Chen *et al.*, 2006b] [Tremblay *et al.*, 2006] ;
- besoin en gestion des intentions de conception et d'assemblage au lieu de la modélisation géométrique finale [Guyot *et al.*, 2006].

La complexité des relations entre les composants du produit doit être prise en compte, telle que l'associativité ou « relational design » dans le PLM, afin de propager les informations d'un composant à un autre [Brown, 2006].

## 6. Conclusion : nécessité de modèles, méthodes et outils

Nous avons fait état des divers travaux de recherche portant sur les thèmes de la conception pour l'assemblage, de la définition/planification des séquences d'assemblage et de gestion du cycle de vie des produits. Cette étude nous permet de constater, tout d'abord, que les problématiques de conception pour l'assemblage et de définition/planification des séquences d'assemblage ne sont pas des problèmes disjoints [Seidal & Swift, 1989]. Bien au contraire, ces questions sont étroitement liées et doivent être adressées via une approche globale couvrant différents niveaux d'abstraction, et orientée sur les problématiques d'assemblage (cf. Sections 3.5. et 4.3.). La FIG. 22 décrit notre positionnement (niveau d'abstraction et phase du cycle de vie du produit) par rapport aux travaux présentés dans ce chapitre.

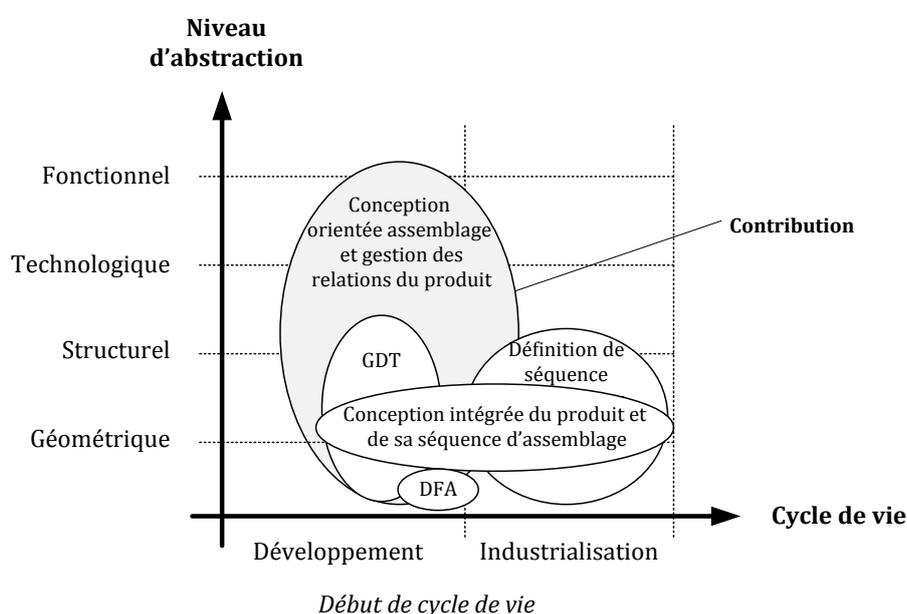


FIG. 22 — Cartographie des approches relatives aux domaines de la conception pour l'assemblage et de la définition des séquences d'assemblage en début de cycle de vie des produits

Le besoin d'interagir dans les phases préliminaires du processus de développement des produits pour la définition des séquences d'assemblage nécessite d'aborder les questions de la gestion intégrée des informations du couple produit-process. Ainsi, ce contexte étroitement lié à la stratégie PLM souligne des besoins en une nouvelle vision d'ingénierie produit-process. Actuellement les approches de modélisation/gestion sont orientées

composant, considérant la conception/gestion des composants avant la conception des assemblages et des relations associées. Cette situation se retrouve accentuée par les systèmes CAO actuels, dans lesquels la modélisation géométrique est orientée vers les composants du produit.

Les questions d'intégration [Prasad, 1999] et de proactivité dans le contexte du PLM met en exergue des besoins en une meilleure compréhension, capitalisation et gestion des informations, qui aujourd'hui sont gérés dans les systèmes d'information de type PDM et MPM, et encapsulées dans les documents et nomenclatures.

Le paradigme de conception/gestion des relations (*relational design* ou *product relationships management*) du produit [Brown, 2006] peut apporter des éléments de réponse, afin de permettre une meilleure interaction produit-process via l'introduction d'un outil approprié [Kim *et al.*, 2004] [Kim *et al.*, 2006] [Rachuri *et al.*, 2006].

De plus, ce paradigme qu'est la conception relationnelle demande une gestion d'informations préliminaires selon différents niveaux d'abstraction et différentes vues [Bouikni *et al.*, 2008], afin de garantir l'intégration produit-process dans les phases amont du processus de développement des produits [Helms, 2002], ainsi que la propagation des changements en ingénierie [Rouibah & Caskey, 2003] [Hwang *et al.*, 2009].

A partir de ces enjeux, nous soulignons la valeur ajoutée d'une approche de gestion des relations du produit pour :

- fournir une meilleure interaction entre les nombreuses approches de gestion co-existantes en ingénierie, ainsi qu'entre les outils associés ;
- mettre en exergue et gérer les informations relatives aux relations d'assemblage dans les phases préliminaires du processus de développement du produit ;
- développer une application **PRM** (**P**roduct **R**elationship **M**anagement) comme nouvel outil à l'interface des systèmes PDM, MPM et CAO, afin de réguler/orchestrer les flux d'informations produit-process, au sein du processus de développement des produits (FIG. 23).

Dans ce contexte, la FIG. 23 présente une cartographie des systèmes PLM utilisés en début de cycle de vie du produit, et permet de situer le système que nous proposons d'introduire dans les chapitres suivants.

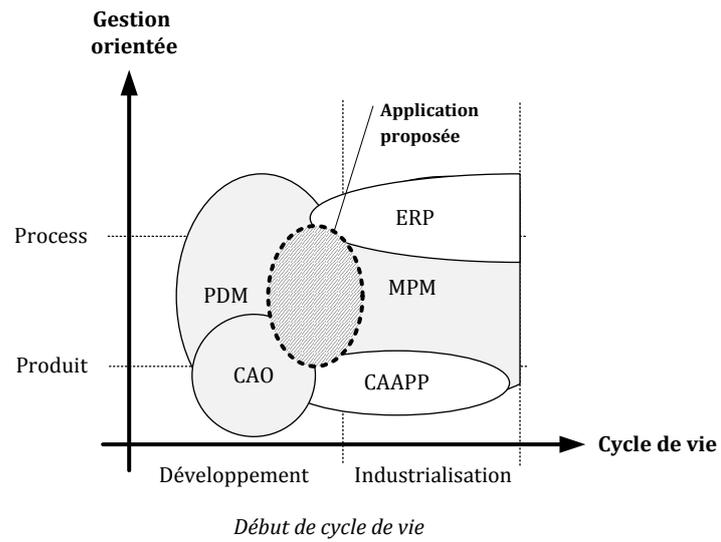


FIG. 23 — Cartographie des systèmes PLM en début de cycle de vie et positionnement d'un système à l'interface



# Chapitre 3 .

## Modèle et approches pour une conception proactive orientée assemblage

*« Trouver n'est rien. Le difficile est de s'ajouter à ce qu'on trouve. »*

*Paul Valéry.*

### Contenu du chapitre

---

<b>1. Introduction.....</b>	<b>67</b>
<b>2. Modèle Multi-Vues Orienté Assemblage (MUVOA).....</b>	<b>69</b>
2.1 Définition des parties prenantes impliquées et de leur rôle.....	70
2.2 Définition des points de vue et vues.....	70
2.3 Définition du modèle MUVOA.....	72
2.4 Correspondances et flux d'informations entre les vues.....	72
2.5 Conclusion.....	75
<b>3. Méthode pour une conception proactive orientée assemblage : le cadre méthodologique PASODE.....</b>	<b>78</b>
3.1 Objectifs du cadre méthodologique PASODE.....	78
3.2 Description du cadre méthodologique PASODE.....	78
<b>4. Définition mathématique de l'algorithme de génération de séquences d'assemblage ASDA.....</b>	<b>82</b>
4.1 Définition des relations du produit via le graphe orienté et la matrice d'adjacence (étapes 1 et 2).....	84
4.2 Règles de réduction du nombre de composants (étape 3).....	87
4.3 Définition des conditions de stabilité d'un futur sous-assemblage (étape 4).....	88

4.4 Règles d'identification de sous-assemblages (étapes 5 à 8).....	90
4.5 Règles de vérification de sous-assemblages (étapes 9 à 11).....	92
4.6 Support de décision pour le choix des sous-assemblages admissibles (étape 12) .....	93
4.7 Règles de concaténation de sous-assemblages retenus (étapes 13 et 14) .....	96
4.8 Définition/génération de la séquence d'assemblage (étape 15) .....	97
4.9 Conclusion .....	100
<b>5. Evolution de l'algorithme ASDA pour garantir l'assemblabilité du produit .....</b>	<b>100</b>
5.1 Intégration des exigences fonctionnelles .....	101
5.2 Introduction de nouvelles informations sur les relations du produit (étapes 1 et 2) ...	104
5.3 Génération de toutes les séquences d'assemblage admissibles (étapes 3 et 4).....	105
5.4 Vérification de la cohérence des informations (étape 5).....	105
5.5 Emergences des exigences géométriques (étape 6) .....	106
5.6 Evaluation de l'assemblabilité du produit à partir des séquences d'assemblage admissibles (étapes 7 à 9) .....	107
5.7 Optimisation multi-objectif des séquences d'assemblage admissibles (étape 10).....	107
5.8 Conclusion .....	111
<b>6. Bilan .....</b>	<b>111</b>

## 1. Introduction

A partir de la problématique et du périmètre scientifique définis et décrits dans les chapitres précédents, nous proposons d'introduire, dans ce chapitre, la première partie de notre contribution scientifique dans le domaine de l'ingénierie du couple produit-process, afin d'obtenir un produit se prêtant aux problématiques d'assemblage. La considération et l'intégration, au sein du processus de développement des produits, des informations issues des métiers situés en aval, telle que l'ingénierie du processus d'assemblage, reste une question d'actualité s'inscrivant dans les problématiques de gestion de cycle de vie des produits. Nous rappelons, ici, nos objectifs visant à :

- définir un modèle multi-vues permettant la définition, la propagation et la traçabilité des informations produit-process entre les acteurs métiers impliqués ;
- définir un cadre méthodologique permettant de prendre en compte les problématiques d'assemblage dès les phases préliminaires du processus de développement des produits ;
- prendre en compte la définition des séquences d'assemblage dans les phases préliminaires du processus de développement des produits ;

En conséquence, ce chapitre est organisé en quatre parties distinctes dont l'articulation est représentée à la FIG. 24. La première partie (cf. *Partie 2*) concerne la définition d'un modèle baptisé **MUVOA** (modèle **M**ulti-**V**ues **O**rienté **A**ssemblage), en tant que vision plus détaillée du modèle **Multi-Domains** et **Multi-Vues (MD-MV)** proposé par [Gomes *et al.*, 2001], qui permet d'établir les relations existantes entre les domaines et les vues du « produit » et du « processus d'assemblage », par l'identification des points de vue liés aux différents acteurs métiers impliqués [Demoly *et al.*, 2009a] [Demoly *et al.*, 2010b].

La deuxième partie (cf. *Partie 3*) introduit le cadre méthodologique, baptisée **PASODE** (méthode **P**roactive **A**ssembly-**O**riented **D**esign) [Demoly *et al.*, 2010a] [Demoly *et al.*, 2010d], qui déroule les principales phases de l'ingénierie, telles que la définition, le traitement, la vérification, la validation, l'émergence, l'évaluation, et la propagation des informations du couple produit-process, dès les phases amont du processus de développement des produits. Une partie de ce cadre méthodologique est décrite de manière détaillée dans les parties 4, 5.

La troisième partie (cf. *Partie 4*), quant à elle, présente un algorithme mathématique du cadre méthodologique PASODE. Cette algorithme, baptisé **ASDA** (**A**ssembly **S**equences **D**efinition **A**lgorithm), décrit une procédure mathématique de définition/génération de séquences d'assemblage admissibles, à partir d'informations relationnelles situées à un haut niveau d'abstraction du produit [Demoly *et al.*, 2010c]. Cet algorithme mathématique offre un degré d'automatisation de traitement des informations sur les premières étapes du cadre méthodologique PASODE.

La quatrième partie (cf. *Partie 5*) apporte une évolution de l'algorithme ASDA en considérant l'assemblabilité<sup>30</sup> du produit et donc les variations géométriques dimensionnelles des composants du produit. Ainsi ASDA prend en compte non seulement les critères liés aux règles du processus d'assemblage mais également les exigences fonctionnelles et géométriques du produit. Une approche d'optimisation multi-objectif, visant à trouver la séquence d'assemblage optimale est décrite dans cette partie.

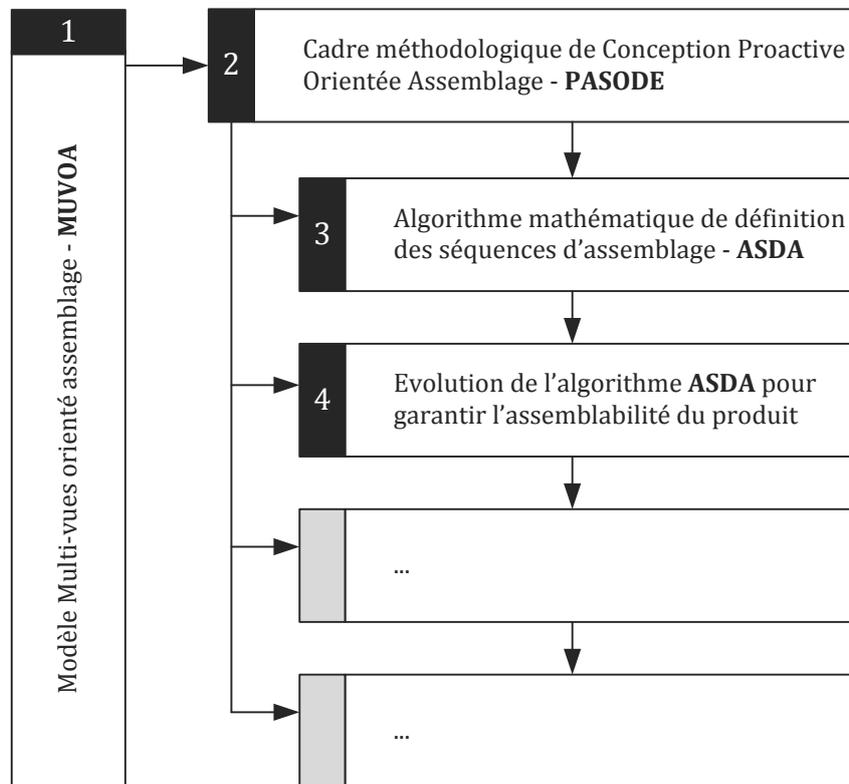


FIG. 24 — Représentation synoptique de l'organisation de ce chapitre

Enfin, nous concluons ce chapitre sur la nécessité de considérer les informations issues de la séquences d'assemblage et des relations du produit, afin d'apporter un contexte d'assemblage au sein du processus de développement des produits. De plus, nous soulignons le besoin de développer et d'implémenter le modèle MUVOA, et les mécanismes du cadre méthodologique PASODE proposé, dans un outil informatique s'intégrant aux systèmes PLM existants, afin de permettre la gestion des informations du couple produit-process.

<sup>30</sup> L'assemblabilité est considérée comme l'aptitude d'un produit à autoriser la connexion physique de ses composants. Autrement dit, c'est une condition fonctionnelle qui consiste à vérifier si le jeu spécifié entre les composants intégrant des défauts autorise l'assemblage précontraint du mécanisme.

## 2. Modèle Multi-Vues Orienté Assemblage (MUVOA)

Le modèle, baptisé **MUVOA** (**MU**lti-**V**ues **O**rientée **A**ssemblage), que nous proposons dans ce chapitre, découle des besoins identifiés dans l'état de l'art. Ces besoins portent principalement sur la nécessité de décomposer le produit selon les points de vue associés aux acteurs métiers impliqués dans le cycle de vie de celui-ci, et ainsi séparer les diverses préoccupations [Bernard, 1996]. De plus, la perpétuelle demande et les multiples évolutions du produit que l'ingénierie peut rencontrer, soulèvent des besoins en un modèle cohérent et flexible qui favorise la propagation des informations du couple produit-processus, dès les phases amont du processus de développement des produits [Kazan, 2003]. Pour construire notre modèle MUVOA, nous allons nous appuyer tout d'abord sur, l'identification des parties prenantes concernées par les problématiques de conception orientée assemblage, puis sur la modélisation des vues, au regard des points de vue associés, en cohérence avec le standard IEEE 1471<sup>31</sup> [Koning & van Vliet, 2006].

Nous présentons, ci-dessous, un méta-modèle (FIG. 25), adapté du standard IEEE 1471, qui permet d'établir la logique de construction et d'identification des vues du produit ou système. Ce méta-modèle est décrit en utilisant le « Package Diagramme » du langage standard de modélisation **SysML** (**S**ystem **M**odeling **L**anguage). Développé par l'**OMG** (**O**bject **M**angement **G**roup) [SysML Partners, 2004], le langage SysML tend à unifier les nombreux langages de modélisation utilisés par les ingénieurs système et étend les fonctionnalités du langage UML 2.0. Ce langage couvre les composantes majeures du cycle de vie du système via neuf diagrammes. Dès lors, nous associons à notre modèle deux domaines, à savoir le domaine du « produit » et du « processus d'assemblage ». Ces domaines intègrent des vues spécifiques et conformes aux points de vue, qui sont définis en fonction des rôles, préoccupations et entités métiers manipulées pour chacun des acteurs métiers impliqués.

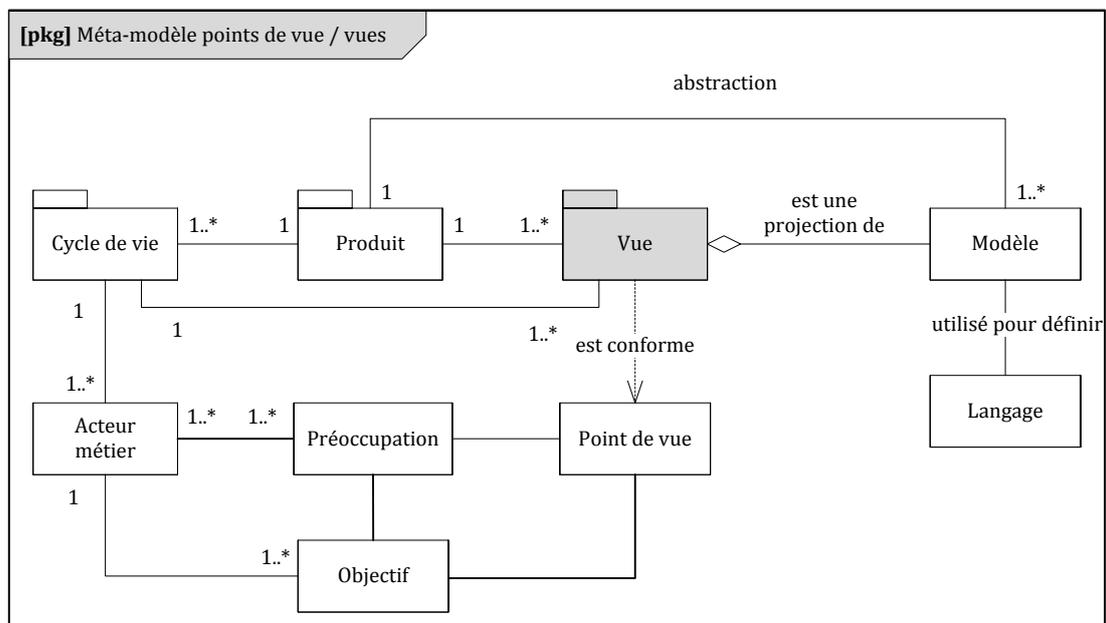


FIG. 25 — SysML Package Diagramme décrivant le méta-modèle de construction des points de vue/vues

<sup>31</sup> [http://standards.ieee.org/reading/ieee/std\\_public/description/se/1471-2000\\_desc.html](http://standards.ieee.org/reading/ieee/std_public/description/se/1471-2000_desc.html)

## 2.1 Définition des parties prenantes impliquées et de leur rôle

Afin d'orienter les phases préliminaires du processus de développement des produits vers les questions d'assemblage, nous avons identifié quatre rôles métier associés à quatre parties prenantes, tels que :

- *l'architecte produit* (également appelé *architecte Etudes*) : il a pour objectif de choisir les solutions technologiques en cohérence avec les fonctions techniques et les exigences fonctionnelles issues du cahier des charges, de gérer la structure produit et ses différentes configurations, et de spécifier le contexte de conception/modélisation pour le(s) concepteur(s) ;
- le *concepteur* : il a pour objectif de spécifier et définir la géométrie du produit selon les exigences géométriques issues des exigences fonctionnelles, ainsi que de prendre en compte les contraintes issues des métiers situés en aval du processus de développement ;
- le *gammiste* (également appelé *architecte Industrialisation*) : il a pour objectif de définir et planifier la gamme d'assemblage par la définition de la séquence d'assemblage, et l'allocation des opérations d'assemblage et des ressources (humaines et matérielles) ;
- *l'expert process* (également appelé *ingénieur process*) : il a pour objectif de définir et garantir les informations relatives aux technologies d'assemblage standards, amenant des spécifications et des contraintes sur les géométries d'interface du produit.

## 2.2 Définition des points de vue et vues

Afin de permettre de cartographier les informations à gérer dans les domaines du « produit » et du « processus d'assemblage », nous avons listé les règles heuristiques majeures provenant des approches DFA issues de différents travaux de recherche (cf. *Chapitre 2 Paragraphe 2.1*). Le TAB. 6 énonce vingt règles DFA impliquant les quatre parties prenantes identifiées (cf. *Chapitre 3 Paragraphe 2.1*).

De ce fait, le TAB. 6 permet de cartographier les préoccupations des quatre acteurs métiers identifiés. Cette première identification nous amène à définir pour chaque partie prenante :

- les points de vue ;
- les rôles et objectifs ;
- les préoccupations ;
- les entités manipulées ;
- les vues.

De par cette construction, nous pouvons y associer les différentes entités à manipuler dans les vues respectives à chaque acteur métier. Nous proposons, ici, d'adapter et d'enrichir le modèle MD-MV [Gomes & Sagot, 2002] à notre problématique de conception orientée assemblage. Dès lors, nous procédons à une décomposition en domaines, points de vue et vues. Ici, chaque

domaine correspond à une phase du cycle de vie des produits, chaque vue correspond à une représentation du produit à travers la perspective d'un point de vue. Un point de vue (profil métier) décrit, quant à lui, les conventions et les règles pour construire et utiliser la vue, afin de répondre aux préoccupations des parties prenantes.

TAB. 6 — Identification des préoccupations des acteurs métiers via les règles DFA

No	Règles DFA	Architecte produit	Concepteur	Expert process	Gammiste
1	Réduire le nombre de composants par des composants multifonctionnels		X		
2	Éliminer les éléments de fixation		X	X	
3	Standardiser les composants (réduire le type de composant)		X		
4	Minimiser l'utilisation de composants flexibles, petits, pointus, coupants, etc.		X		
5	Architecture intégrale vs. modulaire	X			X
6	Permettre aux sous-ensembles fonctionnels d'être contrôlés indépendamment	X			X
7	Minimiser le poids des composants	X	X		X
8	Privilégier les sous-ensembles stables	X	X		X
9	S'assurer que le produit a un composant de base sur lequel les composants peuvent s'y ajouter	X	X		X
10	Faciliter la manipulation		X		
11	Faciliter l'insertion (auto-positionnement)		X		
12	Minimiser les directions d'insertion	X	X		X
13	Utiliser des composants symétriques (sinon forcer l'asymétrie : POKA-YOKE)		X		
14	Fournir des caractéristiques géométriques d'orientation		X		
15	Utiliser la gravité pour insérer les composants (axe z)		X		
16	Assurer l'accessibilité et la vision pour l'opérateur		X		
17	Vérifier la compatibilité des matériaux		X	X	
18	Éliminer les ajustements		X	X	
19	Utiliser les principes cinématiques	X	X		
20	Choisir la technologie d'assemblage optimale		X	X	

Nous avons défini les points de vue des parties prenantes identifiées précédemment via le TAB. 9. Ces points de vue décrivent les rôles, les objectifs, les entités manipulées et les processus métiers en cohérence avec le standard 1471. De ce fait, chacun de ces domaines, que sont le domaine du « produit » et du « processus d'assemblage », peut être considéré comme un système à part entière, possédant des connections étroites et observées selon six types de vues, dont trois vues (structurelle, fonctionnelle et comportementale) sont issues des travaux de *Le Moigne* dans *la théorie du système général* [Le Moigne, 1977], puis reprises par d'autres modèles plus récents (cf. *Chapitre 2 Paragraphe 5.3*), telles que :

- la vue *fonctionnelle* (*functional view*) considère le système dans sa fonction ;
- la vue *comportementale* (*behavioral view*) considère le système dans son comportement lié à son cycle de vie ;

- la vue *structurelle* (*structural view*) considère le système dans sa structure. Cette vue décrit les structures associées au produit et au processus d'assemblage ;
- la vue *géométrique* (*geometric view*) considère le système dans ses formes, son encombrement, son positionnement et ses contraintes spatiales ;
- la vue *technologique* (*technological view*) considère le système dans sa concrétisation et réalisation, et met en évidence le savoir-faire pour y parvenir. Cette vue décrit les solutions/composants technologiques et les technologies d'assemblage associées ;
- la vue *contextuelle* (*contextual view*) considère le système dans un contexte orienté cycle de vie. Cette vue vise à définir les informations servant de support au développement du produit et de son processus d'assemblage.

### 2.3 Définition du modèle MUVOA

Nous décrivons dans ce paragraphe le contenu du modèle de données MUVOA (FIG. 27). Celui-ci met en exergue les entités manipulées et leurs relations dans les domaines du « produit » et du « processus d'assemblage ». L'objectif de ce modèle est de cartographier les concepts et les structures associées, afin de pouvoir les exploiter dans une approche intégrée et proactive. L'intégration du métier de l'assemblage en phase préliminaire du processus de développement nécessite de pouvoir prendre des décisions avec des données et informations préliminaires. De ce fait, le modèle proposé donne une description des concepts à différents niveaux d'abstraction. Ces niveaux d'abstraction, situés en phase de début de cycle de vie, sont mis en évidence via les six vues identifiées dans le paragraphe précédent. L'ensemble de ces informations peut donc apporter une description fonctionnelle, structurelle, contextuelle, comportementale, technologique et géométrique en début de cycle de vie du produit.

Nous remarquerons à travers la FIG. 27 que la classe « Relation » joue un rôle important dans ce modèle car étant porteur des intentions de conception et d'assemblage à capitaliser. Ceci ayant pour objectif, aussi bien d'apporter un support ou contexte pour le processus de développement du produit, que pour la définition de sa séquence d'assemblage. Ainsi, ces phases pourront se dérouler de manière concurrente et proactive, afin d'obtenir des gains en temps de développement, et éviter les rétroactions tardive dues aux problèmes d'assemblage identifiés en phase de production du produit.

### 2.4 Correspondances et flux d'informations entre les vues

Ce paragraphe vise à présenter le comportement du modèle à travers les flux d'informations et les correspondances entre les vues. Les questions de conception orientée assemblage en phase préliminaire impliquent l'intégration d'informations entre ces deux domaines. Cette intégration nécessite, soit des échanges d'informations entre les vues soit, des correspondances, afin de travailler de manière concurrente. Tout d'abord, nous avons représenté dans le TAB. 7 les correspondances entre les domaines, les vues et les parties prenantes impliquées.

De ce fait, nous pouvons remarquer que, pour chaque domaine, nous avons un acteur métier dédié à un haut niveau d'abstraction et un second pour travailler à un niveau d'abstraction en deçà. Seules les vues technologiques et contextuelles concernent des catégories différentes d'acteurs métier : elles permettent donc d'établir les relations entre les domaines et vues métier.

TAB. 7 — Correspondance entre les vues et acteurs métiers

Domaine	Vue	Architecte produit	Gammiste	Concepteur	Expert process
Produit	Fonctionnelle	X			
	Structurelle	X			
	Géométrique			X	
	Technologique	X		X	X
	Contextuelle	X	X		
Processus d'assemblage	Structurelle		X		
	Comportementale		X		
	Technologique		X		X
	Contextuelle		X		

Ainsi, le modèle MUVOA peut s'exprimer de la manière suivante :

Soit  $V_X$  la vue correspondant à un point de vue et appartenant au domaine  $X$ .

$$MUVOA = \bigcup_{X=Produit}^{X=Process} V_X + \bigcap_{X=Produit}^{X=Process} V_X \quad (3.1)$$

Cette expression signifie que le modèle MUVOA est un ensemble de vues décrivant des objets techniques conformes au point de vue de chaque partie prenante, et liées inter-domaine et extra-domaine (FIG. 26).

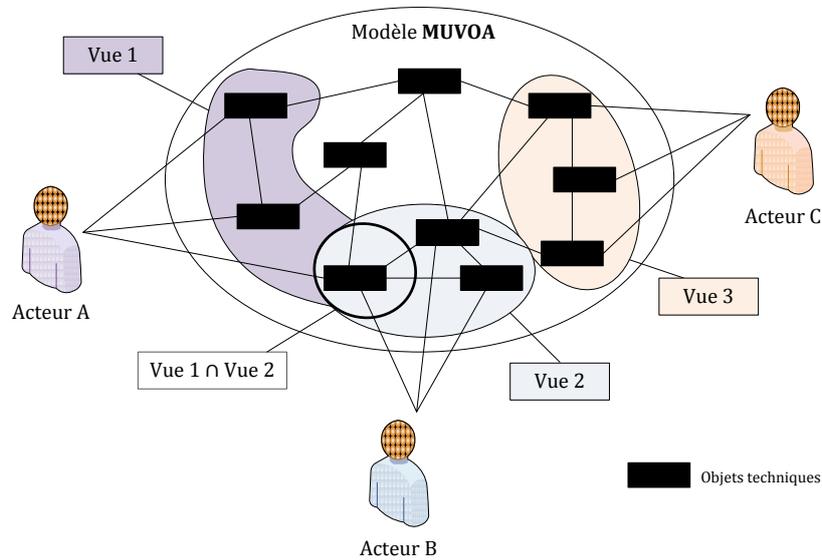


FIG. 26 — Vues et intersections des vues dans le modèle MUVOA

La nécessité d'introduire ici des dépendances et des correspondances est justifiée pour définir l'aspect dynamique et cohérent du modèle MUVOA, par rapport aux problématiques de conception orientée assemblage (TAB. 8).

TAB. 8 — Dépendance entre les vues des domaines produit et processus d'assemblage

Process Produit	Structurelle	Comportementale	Technologique	Contextuelle
Fonctionnelle				
Structurelle	X	X		
Géométrique		X	X	
Technologique		X	X	
Contextuelle	X	X	X	X

La correspondance entre deux vues, ou plus exactement la correspondance entre les objets techniques manipulés dans ces vues, doit être supportée dans le modèle MUVOA. Dans ce contexte, les méthodes de « projection » [Maurino, 1995], de « conversion » [de Kraker *et al.*, 1995], d'« allocation » [SysML Partners, 2004], de « dérivation » [Suh, 1998] ou de « mapping matriciel » [Danilovic & Browning, 2007] peuvent être des solutions intéressantes pour maintenir la traçabilité des flux d'informations dans le processus de développement des produits.

Dans notre contexte, nous pouvons citer quelques exemples concrets de correspondance entre les vues définies dans le modèle MUVOA, tels que :

- une liaison pivot glissant entre deux composants, définie dans la vue « contextuelle produit », correspondra à une contrainte d'alignement entre les deux axes de rotation, avec la définition d'un squelette géométrique de type ligne dans la vue « géométrique produit » et une contrainte technologique d'ajustement tournant-glissant (H8e8) dans la vue « technologique produit », impliquant une spécification géométrique et un guidage long dans la vue « géométrique produit » ;
- une relation d'ordonnancement entre deux éléments (sous-ensemble ou composant), en contact physique dans la vue « contextuelle produit », se traduira par une relation de précédence entre deux futures opérations d'assemblage dans la vue « comportementale process » ;
- une séquence d'assemblage associée à plusieurs composants, dans la vue « comportementale process », se traduira par une structure produit intégrant les niveaux de sous-ensembles, en cohérence avec les sous-assemblages intermédiaires dans la vue « structurelle produit », ainsi que la définition d'un squelette géométrique dans la vue « géométrique produit » ;
- une relation technologique entre un arbre et un alésage de type H7p6 (montage serré) dans la vue « technologique produit », se traduira par une opération d'insertion-fixation de type « emmanchement forcé à froid », « dilatation de l'alésage » ou « contraction de l'arbre » dans la vue « technologique process », et une opération de contrôle dans la vue « structurelle process ».

## **2.5 Conclusion**

Nous soulignons l'importance d'introduire des flux d'informations [Tollenaere, 1995] en cohérence avec notre problématique de conception orientée assemblage, afin de définir et orienter les correspondances entre les différents aspects liés aux domaines du « produit » et du « processus d'assemblage ». La construction, l'évolution de chaque vue, et le contrôle de la cohérence dans le modèle produit, font partie des enjeux toujours en vigueur [Bernard & Perry, 2003]. En conséquence, les parties suivantes mettent en exergue les flux d'informations proposés, les mécanismes de définition des informations, de correspondance entre les différentes vues des domaines « produit » et « processus d'assemblage », et de contrôle des flux d'informations par les relations du produit.

TAB. 9 — Points de vue des parties prenantes identifiées

Parties Prenantes	Architecte produit	Gammiste	Concepteur	Expert process
Rôle/Objectif	Définir l'architecture du produit	Définir la gamme d'assemblage du produit	Concevoir et définir la géométrie du produit	Définir les technologies d'assemblage standards
Préoccupations	Comment préparer et délivrer une structure produit aux concepteurs ? Comment gérer les différentes interfaces entre sous-ensembles ?	Comment définir une séquence optimale ? Comment allouer les stations d'assemblage ?	Comment avoir un produit se prêtant aux besoins des différents métiers et disciplines ?	Comment garantir des conditions pour une technologie d'assemblage ?
Entités manipulées/ Concepts	Fonction, Exigence fonctionnelle, Sous-ensemble, Composant, Liaisons Squelette géométrique, etc.	Temps de cycle, Volume de production, Contraintes de précedence, Séquence d'assemblage, Opérations d'assemblage, Technologie d'assemblage, etc.	Sous-ensemble, Composant, Liaisons physiques, Squelette géométrique Caractéristiques géométriques, etc.	Technologie d'assemblage, Station Outillage Capabilité Coût, etc.
Processus/Méthode	Prendre en compte les exigences fonctionnelles et géométriques, et les informations issues de la séquence d'assemblage, Définir une structure produit support à la conception / modélisation / gestion des informations associées au produit, Définir un squelette produit basé sur la séquence d'assemblage Définir les interfaces entre les sous-ensembles	Calculer du temps de cycle Définir les contraintes de précedence entre les opérations d'assemblage Définir une séquence d'assemblage Allouer les stations à la séquence d'assemblage	Modéliser la géométrie du produit en s'appuyant sur les exigences géométriques et les caractéristiques majeures d'assemblage	Prendre en compte les capabilités machines Définir les accessibilités pour les opérations Définir la géométrie d'interface

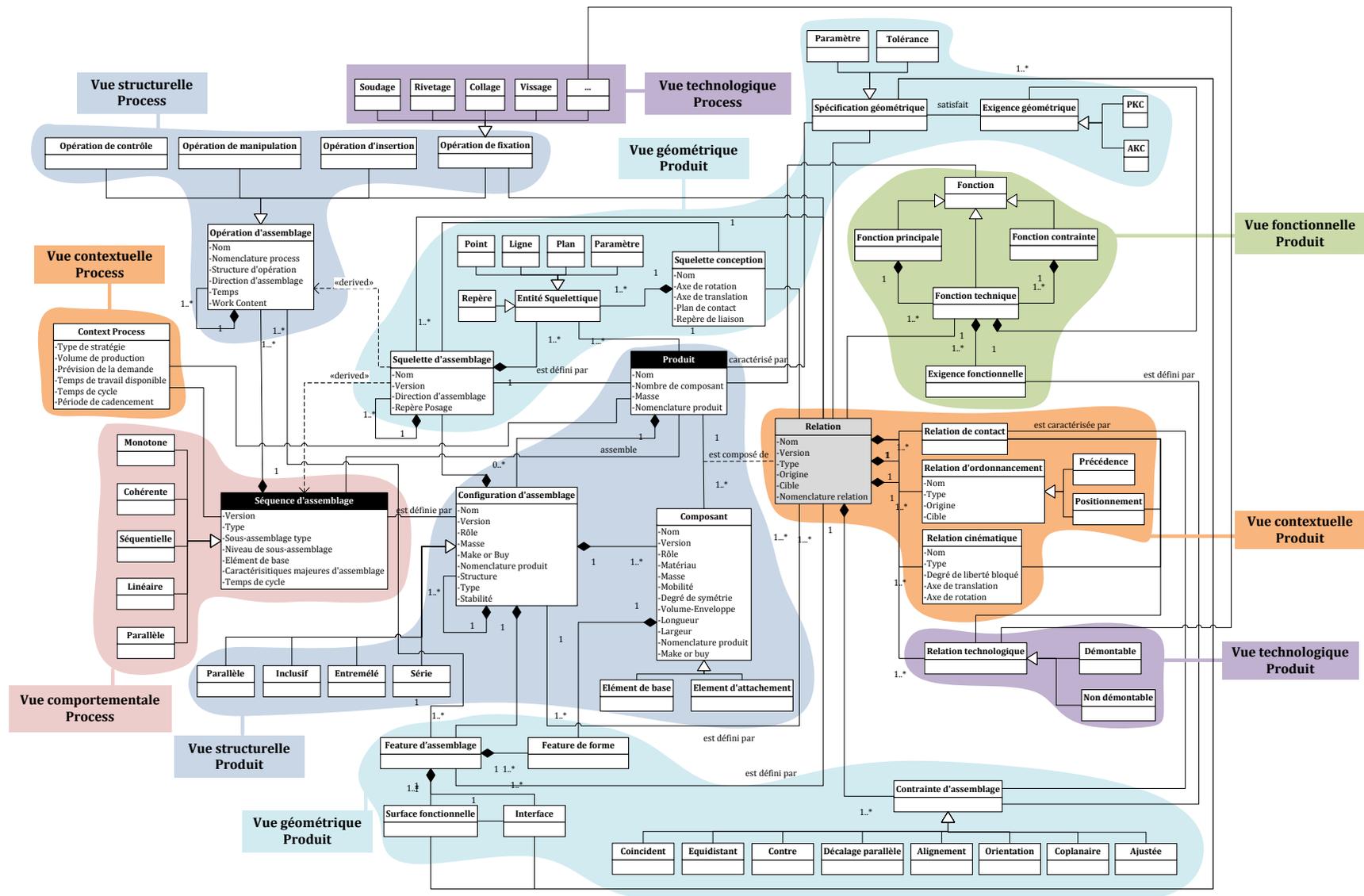


FIG. 27 — Diagramme UML de classes décrivant notre modèle Multi-Vues Orienté Assemblage (MUVOA)

### 3. Méthode pour une conception proactive orientée assemblage : le cadre méthodologique PASODE

Au regard de la problématique décrite et de l'étude des différents travaux de recherche dans les domaines de la conception pour l'assemblage et de la définition/planification des séquences d'assemblage en contexte PLM, nous proposons, dans cette partie, de décrire les objectifs et le cadre méthodologique proposé et baptisé **PASODE** (**P**roactive **A**Ssembly-Oriented **D**esign).

#### 3.1 Objectifs du cadre méthodologique PASODE

La cadre méthodologique PASODE proposé, vise à promouvoir une approche proactive et intégrée de conception orientée assemblage, plus particulièrement dans les phases préliminaires du processus de développement des produits mécaniques. De ce fait, les objectifs de l'approche PASODE sont :

- d'impliquer différents acteurs métiers concernés par les problématiques d'assemblage dans les phases préliminaires du processus de développement des produits, tels que l'architecte produit, le concepteur, le gammiste et l'expert process ;
- de générer une séquence d'assemblage avec des informations préliminaires, avant que la géométrie du produit soit spécifiée (cf. *Partie 4.*) ;
- de garantir l'assemblabilité du produit au regard de critères liés au processus d'assemblage, mais également à l'aspect fonctionnel du produit (cf. *Partie 5*) ;
- d'apporter un contexte, défini par la séquence d'assemblage et les informations relationnelles, comme support du processus de développement du produit (cf. *Chapitre 4 Partie 2*) ;
- de s'interfacer entre les plateformes PLM, telles que les systèmes PDM, MPM, et CAO, par l'apport d'une gestion des relations du produit (cf. *Chapitre 4 Partie 3*).

#### 3.2 Description du cadre méthodologique PASODE

Basé sur le modèle MUVOA et sur les objectifs cités précédemment, le cadre méthodologique PASODE propose de définir, d'une manière plus détaillée, une séquence d'assemblage au plus tôt dans les phases préliminaires du processus de développement. Il s'agit ici d'apporter un réel contexte d'assemblage au sein du processus de développement de produits mécaniques, en adoptant une logique descendante (*top-down*). Par conséquent, en partant d'un haut niveau d'abstraction en informations dans les phases amont du processus de développement, le cadre méthodologique PASODE est composé :

- d'un algorithme mathématique de définition/planification de séquences d'assemblage, baptisé **ASDA** (**A**sssembly **S**equences **D**efinition **A**lgorithm), intégrant des règles heuristiques et logiques, et décrivant les mécanismes suivants :
  - la définition des relations du produit ;

- la réduction du nombre de composants à considérer ;
  - la définition des conditions de stabilité d'un futur assemblage ;
  - la définition et l'identification de sous-assemblages ;
  - la vérification et validation des sous-assemblages admissibles ;
  - l'aide à la décision pour le choix des sous-assemblages admissibles ;
  - la gestion et concaténation des sous-assemblages ;
  - la génération/définition de la séquence d'assemblage.
- d'une évolution de l'algorithme ASDA pour garantir l'assemblabilité du produit, et comprenant :
    - la considération des exigences fonctionnelles et géométriques liées aux fonctions techniques du produit ;
    - la vérification de la cohérence des informations pour chaque séquence d'assemblage admissible ;
    - l'émergence de caractéristiques majeures d'assemblage (*Assembly Key Characteristics - AKC*) ;
    - l'analyse de tolérances pour calculer l'impact des propagations des variations géométriques ;
    - la comparaison des séquences d'assemblage admissibles.
    - l'optimisation multi-objectif des séquences d'assemblage admissibles pour trouver la séquence d'assemblage optimale ;
  - d'une approche basée sur les squelettes, pour la définition du contexte d'assemblage support du processus de développement, et en cohérence avec les intentions de conception et d'assemblage du produit. Cette approche baptisée **SKL-ACD** (**SKeLeton-based Assembly Context Definition**) comprend :
    - la définition et la structuration des informations de produit, issues de la séquence d'assemblage ;
    - la définition des correspondances entre les vues du modèle MUVOA ;
    - la définition des squelettes d'assemblage intégrant les entités squelettiques ;
    - la structuration et l'allocation des squelettes d'assemblage dans la structure produit.
  - d'une approche de gestion des relations du produit, baptisée **PRM** (**Product Relationship Management**), pour apporter une gestion des informations relationnelles entre les domaines du « produit » et du « processus d'assemblage » :

- l'extraction et la définition des relations ;
- l'exploitation des relations ;
- la propagation des relations à travers les systèmes PDM, MPM et CAO.

Le cadre méthodologique PASODE couvre donc les domaines du « produit » et du « processus d'assemblage », ainsi que les différentes vues associées (fonctionnelle, structurelle, contextuelle, technologique, comportementale, et géométrique). Ce cadre méthodologique est composé d'un ensemble de mécanismes de définition, traitement, génération, vérification, validation, vérification, émergence, propagation et gestion des informations du couple produit-process (FIG. 28). Ces mécanismes feront l'objet d'une description plus détaillée dans les parties suivantes de ce chapitre, ainsi que dans le chapitre suivant.

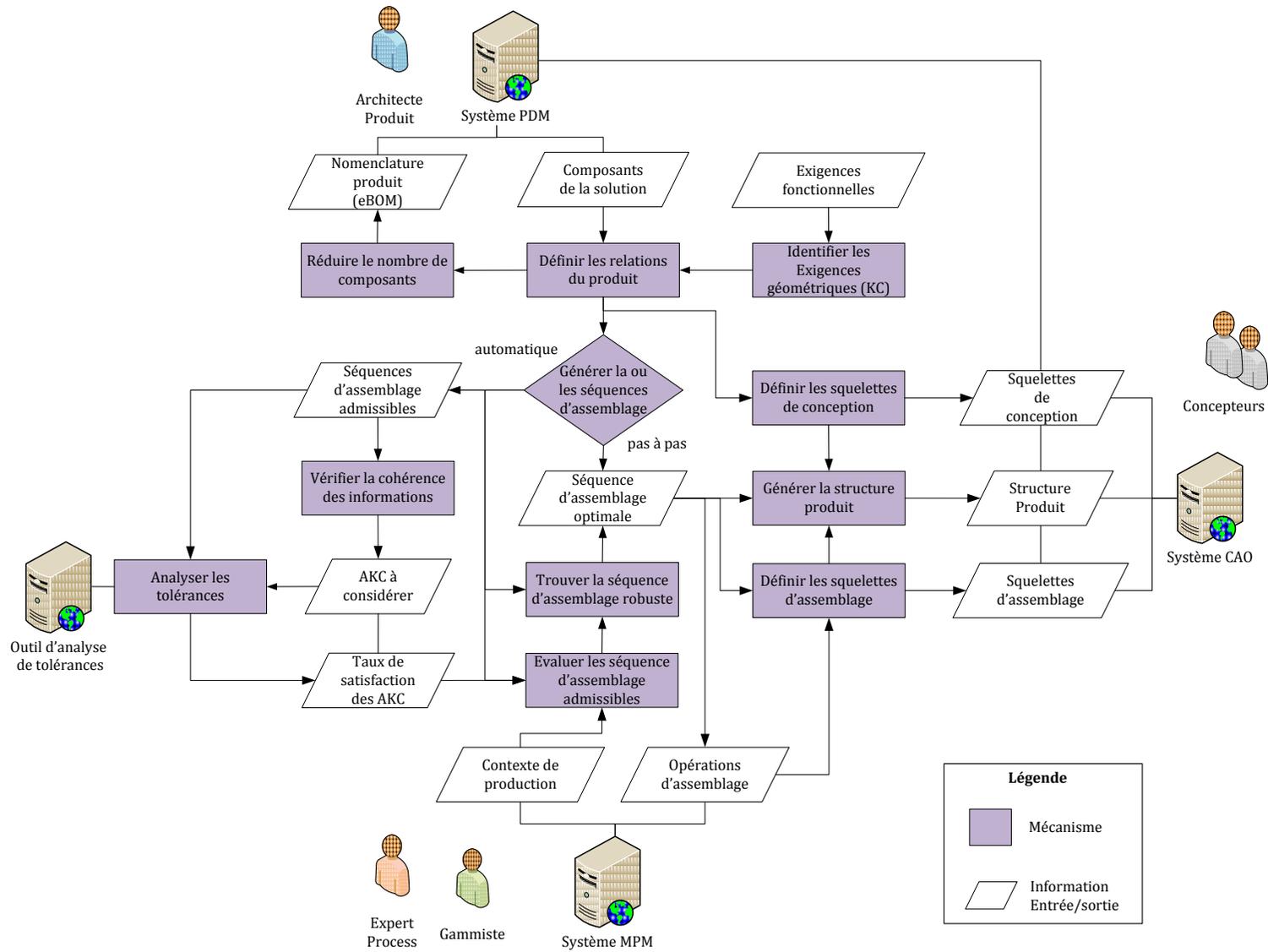


FIG. 28 — Description générale du cadre méthodologique PASODE

## 4. Définition mathématique de l’algorithme de génération de séquences d’assemblage ASDA

Sur la base des vues « comportementale process » et « contextuelle produit », issues du modèle MUVOA ainsi que du cadre méthodologique PASODE, nous proposons de décrire la procédure algorithmique de définition/planification de séquences d’assemblage baptisée **ASDA** (**A**ssembly **S**equences **D**efinition **A**lgorithm), qui est représentée par les mécanismes grisés dans le cadre méthodologique PASODE (FIG. 29). Cet algorithme de définition de séquences d’assemblage peut être considéré comme le cœur de l’approche PASODE, car intégrant la définition des règles heuristiques DFA, sous la forme d’équations mathématiques, pour générer les séquences d’assemblage admissibles qui serviront de contexte d’assemblage pour le processus de développement des produits. De cette manière, les acteurs métiers associés au domaine du « produit » et du « processus d’assemblage » peuvent travailler en simultanée dans une logique de conception descendante. (cf. *Chapitre 4 Partie 2*).

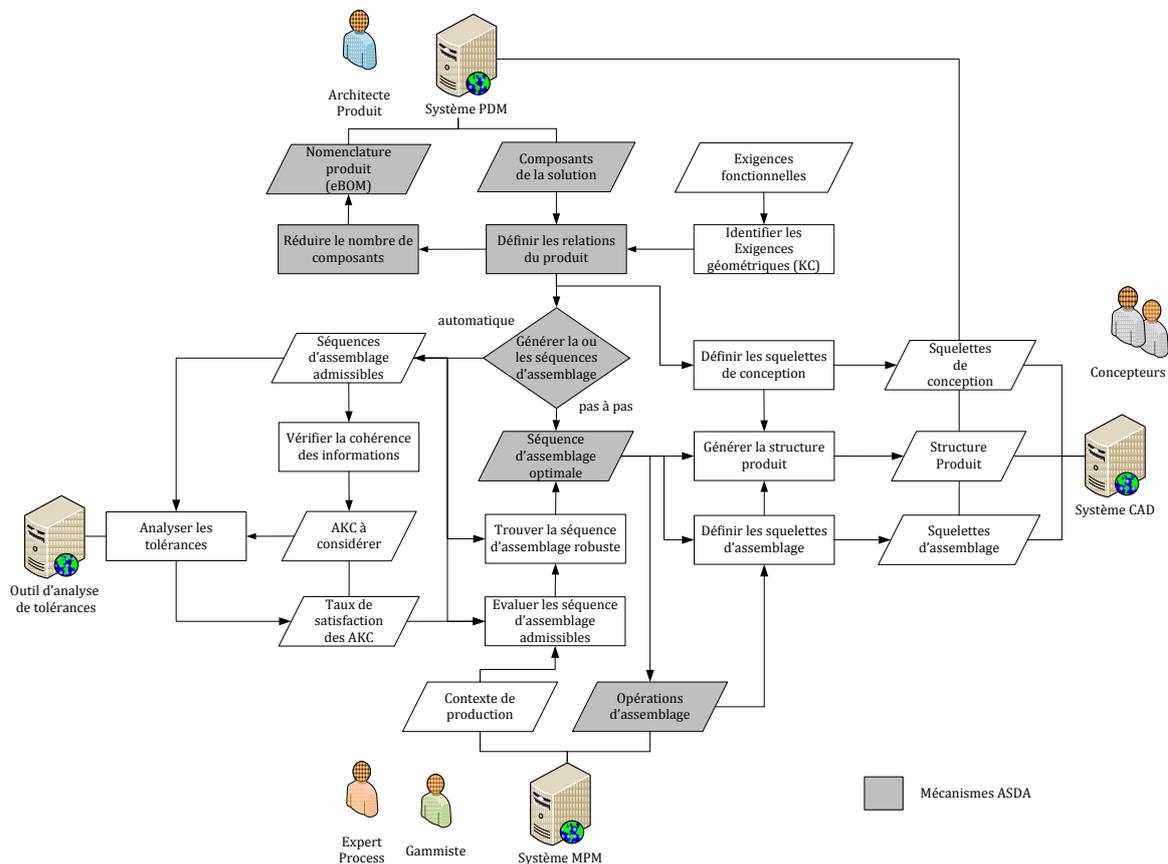


FIG. 29 — Algorithme ASDA dans le cadre méthodologique PASODE

Afin de répondre aux deux premiers objectifs de PASODE, un logigramme est introduit pour représenter l’algorithme ASDA, dans lequel chaque étape, permettant la définition/génération des séquences d’assemblage admissibles, sera décrite dans les paragraphes ci-après (FIG. 30). La notation utilisée est retranscrite dans la *Table des symboles* (p. xviii).

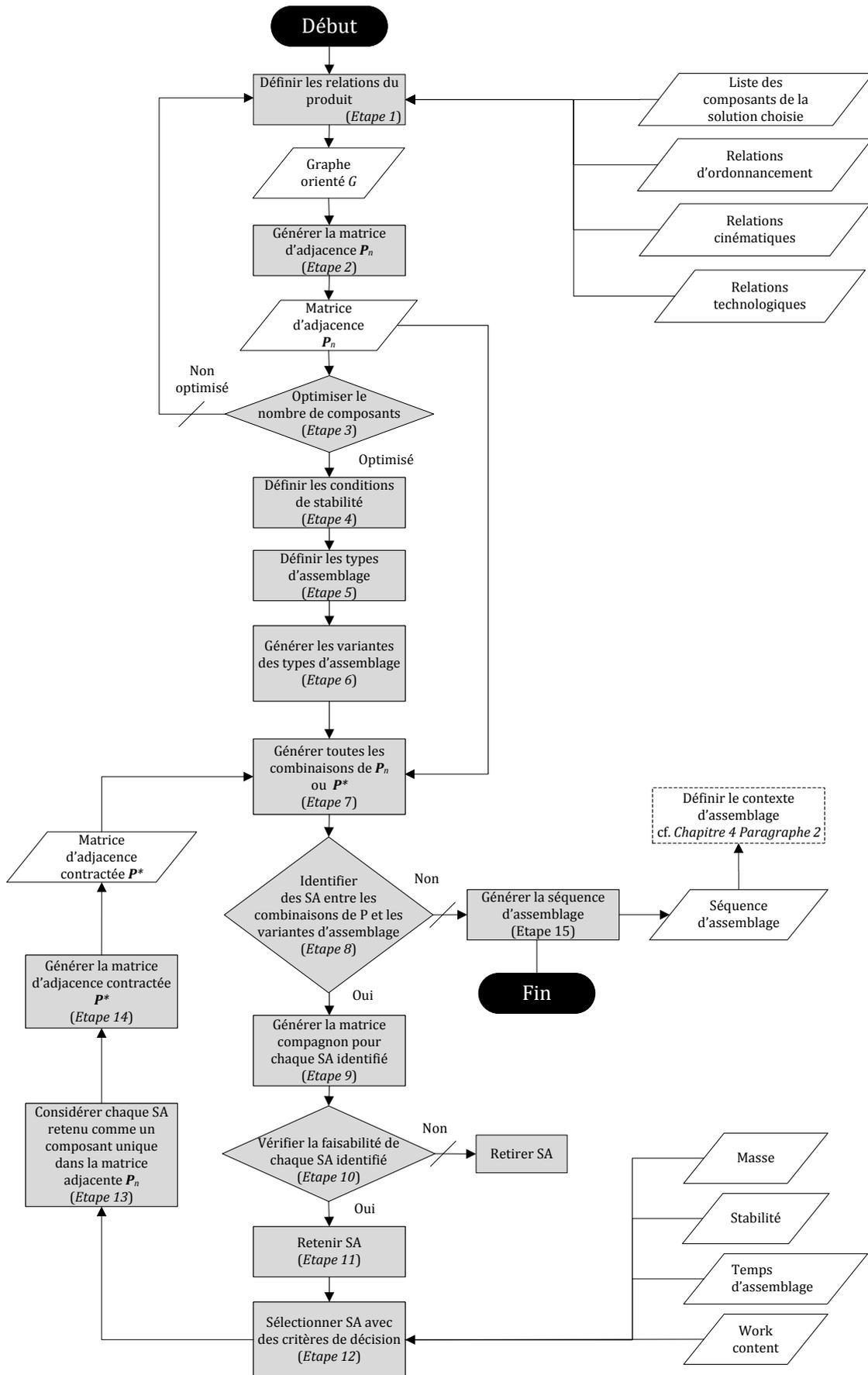


FIG. 30 — Logigramme décrivant les différentes étapes de l'algorithme ASDA

## 4.1 Définition des relations du produit via le graphe orienté et la matrice d'adjacence (étapes 1 et 2)

Ce paragraphe décrit les relations du produit comme données d'entrée, du cadre méthodologique PASODE et plus particulièrement de l'algorithme ASDA, à prendre en compte pour la génération pas à pas de la séquence d'assemblage, dans un premier temps. Nous nous focalisons donc sur les différents niveaux d'abstraction de ces relations pour développer une approche descendante. Nous proposons de nous appuyer sur une solution choisie du produit, qui intègre les composants à concevoir. Ces composants ont des attributs définis, tels que leur masse prédéterminée et leur matériau. Conformément à la vue « contextuelle produit » du modèle MUVOA (cf. *Paragraphe 2.3*), nous décomposons les relations du produit de la manière suivante :

- *contact direct* : décrivant une connexion physique entre deux composants du produit. Nous verrons dans ce chapitre qu'une liaison de contact direct peut être soit une liaison de positionnement<sup>32</sup> soit une liaison d'attachement<sup>33</sup> ;
- *ordonnement (ou précedence)* : apportant un ordre logique d'assemblage ou un ordre de positionnement entre deux composants, ayant une relation de contact direct, ainsi que sur deux composants n'ayant aucun contact direct. L'introduction d'une relation de précedence pour des composants n'ayant aucun contact physique entre eux, est justifiée dans le cadre d'une inclusion amenant une interférence dans le futur assemblage, ou pour le maintien d'une condition de stabilité d'un sous-assemblage (cf. *Paragraphe 4.3*). Ce type de relation nous permet de restreindre l'espace des solutions admissibles, et ainsi de diminuer les temps de traitement de l'algorithme ASDA ;
- *cinématique* : décrivant une relation entre deux composants en contact direct par la restriction des mobilités, et donc de l'espace des degrés de liberté. Une matrice de dimension (3x2) des degrés de liberté, décrivant trois translations et trois rotations possibles dans un repère orthonormé direct, est associée à chaque type de liaison cinématique. Pour chaque relation cinématique, nous attribuons la valeur liée aux degrés de liberté bloqués par la relation, notée *CDOF (Constrained Degree of Freedom)*. Cette relation permet d'apporter une information supplémentaire sur une relation de contact direct ;
- *technologique* : décrivant la technologie employée (soudage, collage, montée serré, avec une main, etc.), pour le positionnement et le maintien de la relation de contact direct en termes de position et d'orientation. Une relation technologique apporte une information sur la démontabilité ou la non-démontabilité de l'assemblage, et par conséquent correspond à la relation entre un composant d'attachement et une pièce ou à une caractérisation d'un contact direct entre deux composants par un ajustement. De plus, cette relation intègre les moyens mis en œuvre pour assembler,

---

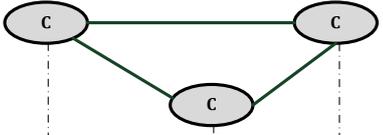
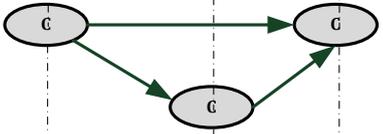
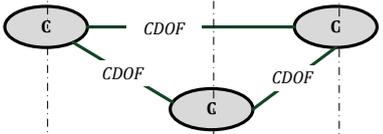
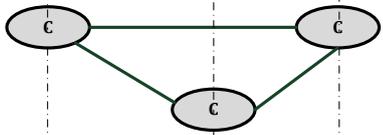
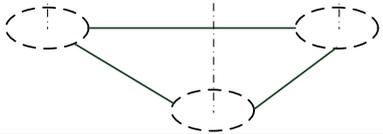
<sup>32</sup> Liaison établissant une ou plusieurs contraintes sur la position et/ou l'orientation entre deux composants du produit.

<sup>33</sup> Liaison établissant une ou plusieurs contraintes surabondantes sur la position et/ou l'orientation entre deux composants déjà positionnés.

tels que la manipulation et l'insertion du composant/sous-ensemble. Cette relation permet d'apporter une information supplémentaire sur un contact direct.

De ce fait, cette typologie des relations, restreinte à la problématique de cette partie, nous permet d'introduire, au fil des étapes de l'algorithme ASDA, le juste nécessaire en information, d'où la décomposition de ces relations en niveaux, sous la forme de graphes (TAB. 10).

TAB. 10 — Niveaux d'abstraction des relations du produit

Niveau d'abstraction	Type de graphe	Illustration	Type de relations
1 <sup>er</sup> niveau	Graphe simple		Contact
2 <sup>ème</sup> niveau	Graphe orienté		Ordonnancement
3 <sup>ème</sup> niveau	Graphe valué		Cinématique
4 <sup>ème</sup> niveau	Graphe simple		Technologique
n <sup>ième</sup> niveau	Graphe....		...

En cohérence avec la Théorie des graphes et les domaines d'application associés [Bollobás, 2002] [Gross & Yellen, 2005] [Fournier, 2007], le TAB. 10 décrit ces types de relation selon leur niveau d'abstraction, sous la forme de trois types de graphe :

- *le graphe simple* (également appelé *graphe non orienté*) : décrivant un ensemble de nœuds et un ensemble d'arrêtes ;
- *le graphe orienté* : décrivant un ensemble de nœuds et un ensemble d'arcs ;
- *le graphe valué* : décrivant un graphe simple où les réels (les valuations) sont associés aux arrêtes.

Les graphes qui permettent de modéliser ces relations, seront donc exploités par l'algorithme ASDA. Afin de faciliter la compréhension du lecteur de ce chapitre, nous présentons un graphe, appelé graphe orienté valué, qui récapitule les informations relationnelles à différents niveaux d'abstraction, en cohérence avec les préoccupations et le contexte des acteurs métiers impliqués. Le terme « orienté » est justifié par l'intégration des

relations d'ordonnement (précédence) et l'héritage des relations de contact direct. Le terme « valué » est justifié par les relations cinématiques qui intègrent des valuations, telles que les degrés de liberté contraints.

Dans un premier temps, nous allons nous focaliser sur l'aspect « orienté » du graphe orienté valué. Représenté par un ensemble de nœuds et d'arcs orientés, celui-ci est introduit pour représenter la structure et les connexions d'un ensemble complexe, en exprimant les relations entre ses éléments à un haut niveau d'abstraction, dans divers domaines d'ingénierie. Il constitue donc une méthode de pensée qui permet de modéliser notre problématique en facilitant la compréhension au niveau visuel et algorithmique. Une fois construit, ce modèle de graphe est traduit sous un format matriciel, tel que le format proposé pour la « matrice d'adjacence<sup>34</sup> » décrite ci-après, afin d'être utilisée pour le traitement algorithmique ASDA. La matrice d'adjacence d'un graphe orienté est toujours antisymétrique. Au sein de cette matrice, les entrées de la diagonale principale sont égales à 0. L'ordre d'une telle matrice est égal au nombre de nœuds, et donc au nombre de composants du produit.

Soit  $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$  l'ensemble de tous les composants du produit, de cardinalité  $n \in \mathbb{N}^*$ .

Soit  $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_m\}$  l'ensemble de toutes les relations entre les composants du produit, de cardinalité  $m \in \mathbb{N}^*$ .

Supposons un graphe orienté  $\mathcal{G} = (C, R)$ , où chaque « nœud » représente un composant, et chaque couple orienté de deux composants appelé « arc » représente les informations relationnelles. Dans notre cas, une flèche pleine représente un ordre d'assemblage entre deux composants en contact direct, une flèche en pointillés représente une contrainte de précédence entre deux composants n'ayant pas de contact direct.

Soit  $P_n = (p_{i,j})$  la matrice d'adjacence définie, à partir du graphe orienté  $\mathcal{G}$ , comme une matrice antisymétrique de dimension  $n$ , telle que les entrées  $p_{i,j} \in \{0, 1, -1, \lambda, -\lambda\}$  (FIG. 31).

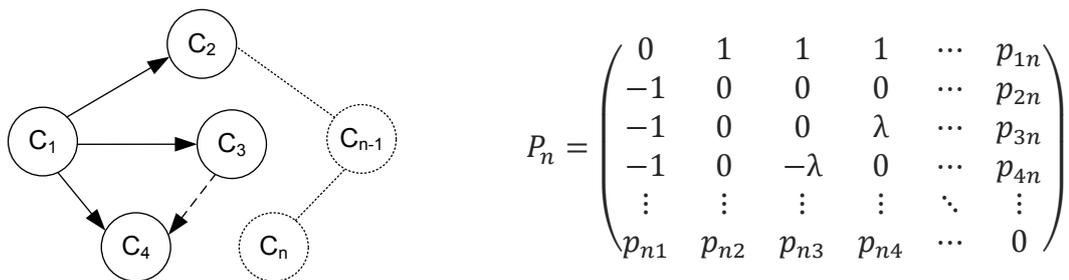


FIG. 31 — Graphe orienté  $\mathcal{G}$  et la matrice d'adjacence  $P_n$  associée

De cette manière, nous pouvons définir les relations de contact direct et d'ordonnement, introduites dans le graphe orienté  $\mathcal{G}$ , dans la matrice d'adjacence décrite précédemment, et telle que :

$$P_{i,j} = (p_{i,j})_{i,j \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*} = \begin{cases} p_{i,j} = 1 \\ p_{i,j} = \lambda \\ p_{i,j} = 0 \end{cases} \quad \text{où les entrées en ligne } i \text{ et colonne } j \text{ sont :} \quad (3.2)$$

<sup>34</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Matrice\\_d'adjacence](http://fr.wikipedia.org/wiki/Matrice_d'adjacence)

$$\left. \begin{array}{l}
 p_{i,j} = 1 \text{ si } \left\{ \begin{array}{l} \text{il existe une relation de contact direct entre le composant } i \text{ et le composant } j ; \\ \text{le composant } i \text{ doit être assemblé avant que le composant } j \text{ soit assemblé} \end{array} \right. ; \\
 \\
 p_{i,j} = \lambda \text{ si } \left\{ \begin{array}{l} \text{il existe une relation de précédence entre le composant } i \text{ et le composant } j \\ \text{le composant } i \text{ et le composant } j \text{ ne sont pas en contact direct} ; \\ \text{le composant } i \text{ doit être assemblé avant que le composant } j \text{ soit assemblé} \end{array} \right. ; \\
 \\
 p_{i,j} = 0 \text{ si } \left\{ \begin{array}{l} \text{identité} \\ \text{aucune relation} \end{array} \right. ; \\
 \\
 \forall (i,j) \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*, \quad p_{i,j} = -p_{j,i} \text{ avec } p_{i,j} \in \mathbb{Z}
 \end{array} \right.$$

## 4.2 Règles de réduction du nombre de composants (étape 3)

Avant de pouvoir traiter les informations portées par les relations entre les composants, il est important de minimiser le nombre de composants de la solution choisie, ceci afin d'optimiser le produit et sa séquence d'assemblage, et par conséquent réduire les temps de traitement de l'algorithme ASDA. Pour ce faire, nous nous appuyons sur les règles établies par [Boothroyd & Dewhurst, 1983]. Ces règles à mettre en place peuvent s'écrire de la manière suivante :

- *règle 1* : est-ce que le composant a un mouvement/mobilité relatif par rapport aux autres composants déjà assemblés et en contact avec lui ?
- *règle 2* : est-ce que le composant doit être composé d'un matériau différent de celui des autres composants en contact avec lui (isolation, amortissement des vibrations, frottement, etc.) ?
- *règle 3* : est-ce que le composant doit être séparé de ses composants connexes pour des raisons de désassemblage lors d'une maintenance future ?

Si au moins une réponse positive est obtenue pour ces trois questions, le composant candidat sera considéré par l'algorithme ASDA pour la définition des séquences d'assemblage. Dans le cas contraire, le composant sera candidat soit à une élimination, soit à une fusion avec son/ses composant(s) connexe(s) pour l'obtention d'un composant multifonctionnel.

Ces règles associées à des questions directes (OUI ou NON) peuvent paraître assez lourdes si nous devons les appliquer à chaque composant. De manière à optimiser les temps de traitement de l'algorithme ASDA, nous proposons de les exprimer sous une condition mathématique, telle que :

$$\forall c_i, c_j \in C \ / \ |p_{i,j}| = 1 \quad \left. \begin{array}{l}
 \text{si } CDOF(r_{i,j}) < 6 \ \vee \ ma_{c_i} \neq ma_{c_j} \ \vee \ c_i = c_{usure} \\
 \left| \begin{array}{l}
 \text{alors } c_i \in C \\
 \text{sinon } c_i \notin C \ \vee \ c_j \subset c_i
 \end{array} \right.
 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

**Remarque :** il est important de préciser que cette règle a tout de même des flexibilités dans son application. En effet, la fusion ou l'inclusion d'un composant dans un autre, pour obtenir un composant multifonctionnel, demande une étude préalable au niveau de la faisabilité de sa fabrication et des coûts associés,

afin de ne pas engendrer de conflit dans le processus de développement [Ouertani, 2008].

### 4.3 Définition des conditions de stabilité d'un futur sous-assemblage (étape 4)

L'assemblage est défini par des relations physiques/géométriques entre ces composants, et de ce fait, par les mobilités autorisées entre eux. Une pièce sans aucune liaison peut se déplacer librement dans l'espace. Nous pouvons décomposer son mouvement en six degrés de mobilité constitués de trois translations ( $T_x, T_y, T_z$ ) et de trois rotations ( $R_x, R_y, R_z$ ) par rapport au repère orthonormé considéré  $\mathcal{R}(x, y, z)$ .

Cette question de stabilité des sous-assemblages a été traitée de manière succincte dans divers travaux de recherche, principalement axée sur l'estimation des temps de repositionnement dus aux instabilités des composants [Kanai *et al.*, 1996], le calcul des degrés de liberté de chaque composant [Baldwin *et al.*, 1992] [Homem de Mello & Sanderson, 1991], et de manière plus précise, le calcul des douze demi-degrés de libertés associés aux directions ( $x+, x-, y+, y-, z+, z-$ ) [Lavoie & Laperrière, 1996] [Laperrière & ElMaraghy, 1996] [Masclé *et al.*, 1997] [Masclé, 2002].

Dans notre cas, nous avons besoin de connaître le degré de stabilité (stable ou instable) des sous-assemblages admissibles, en fonction de degré de mobilité selon les directions d'assemblage, afin de savoir si le sous-assemblage pourra ou non subir un retournement futur. Pour ce faire, nous nous appuyons sur les définitions suivantes de la **stabilité** des sous-assemblages :

*« Un sous-ensemble est considéré comme stable s'il est possible de le maintenir suivant au moins une orientation, de telle façon que toutes ses liaisons géométriques restent établies en présence de mouvement, ou sous l'action de forces potentielles agissant sur lui. » [Stadzisz, 1997]*

*« A subassembly is stable if it does not spontaneously disassemble under the effects of gravity or the accelerations imposed by material handling or assemblies activities. » [Whitney, 2004]*

Ces définitions mettent en évidence l'importance de l'orientation du sous-assemblage, si celui-ci possède des composants ayant des mobilités sur des directions. Cette notion de stabilité, en relation avec les mobilités, doit être associée à la notion de retournement ou réorientation du sous-assemblage [Lee & Yi, 1993], ceci afin de savoir si celui-ci devra être suivi, ou non, d'une opération d'assemblage supprimant cette instabilité. Par exemple, un sous-assemblage stable dans une seule direction ne pourra tolérer aucun retournement jusqu'à l'arrivée d'un composant ou sous-assemblage le stabilisant. Fréquemment les liaisons de contact direct (ou géométriques) sont complétées par une énergie de cohésion apportée par la mise en œuvre d'un procédé de solidarisation. Ce procédé requiert soit l'apport d'un élément d'attachement (vis, soudure, etc.), soit la déformation des composants concernés (insertion à force, rivetage, etc.).

Par conséquent, nous proposons une manière différente d'aborder la question de stabilité. Nous introduisons une règle pour anticiper les problèmes de stabilité dans l'identification future des sous-assemblages. Nous posons comme hypothèse que le composant de base est toujours stable car étant positionné par un posage. Parmi les structures physiques composant les systèmes d'assemblage, le posage ou gabarit (*jig* dans la langue anglo-saxonne) peut être défini comme un organe de maintien de l'élément de base lui assurant une position, une orientation et un déplacement stable dans l'espace, pour accepter les opérations d'assemblage des composants/sous-ensembles. De ce fait, un retournement de l'élément de base demandera un nouveau posage ou une reconfiguration de celui-ci.

Cette règle, que nous proposons de mettre en place, consiste à identifier les composants d'attachement ou de stabilité (vis, vis de pression, vis en bout + rondelle, écrou, goupille, anneau élastique, etc.), notés  $c_s$ , en recherchant, parmi chacune des liaisons d'attachement, le composant/sous-assemblage positionné. Les liaisons d'attachement peuvent être obtenues soit directement par les relations cinématiques du produit (liaison encastrement ou complète), soit par l'ajout d'une relation technologique (par exemple : ajustement serré H7p6 sur une liaison pivot glissant), sur une relation cinématique. Cette identification peut se traduire par la condition suivante :

$$\forall c_i \in C, \exists c_s \in C \mid \begin{cases} CDOF(r_{s,i}) = 6 \\ p_{s,i} = -1 \end{cases} \quad (3.4)$$

Une fois que les composants de stabilité, supprimant les mouvements de translation des composants/sous-assemblage instables, ont été identifiés, nous proposons d'affecter des relations de précedence flexibles (lignes en pointillés), c'est-à-dire sans orientation définie, entre les composants de stabilité des sous-assemblages instables, qui devront être assemblés selon des directions d'assemblage différentes (FIG. 32).

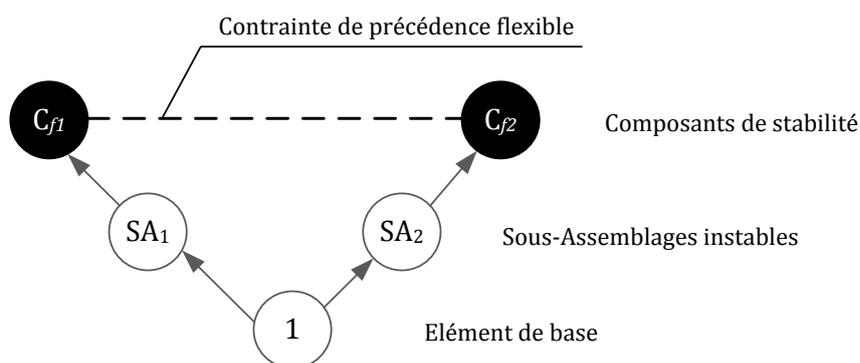


FIG. 32 — Affectation d'une contrainte de précedence flexible entre les composants de stabilité

**Remarque :** dans le contexte de production, il est possible d'avoir recours, de manière temporaire, à un « composant de maintien » pour maintenir un sous-assemblage instable dans une orientation quelconque. Ce composant ne fait pas partie de la composition du produit final, et son rôle sera limité à la phase d'assemblage du produit. Bien qu'il apporte une certaine flexibilité dans la définition de la séquence d'assemblage, une opération de désassemblage devra être considérée dans la séquence d'assemblage du produit.

Cet apport de priorité d'assemblage entre les composants de stabilité permet de garantir des réorientations avec des sous-assemblages stables. L'orientation des contraintes de précédence entre ces composants de stabilité sera affectée lors du choix des sous-assemblages par le gammiste, et justifiée par un objectif de minimiser les retournements des sous-assemblages.

Soit  $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_p\}$  l'ensemble de toutes les directions d'assemblage du produit, de cardinalité  $p \in \mathbb{N}^*$ .

$$\begin{aligned} & \forall c_{s_1}(d_1), c_{s_2}(d_2) \in C, \\ & d_1, d_2 \in D \text{ avec } d_1 \neq d_2, \\ & \exists r(c_{s_1}, c_{s_2}) \in R \quad | \quad p_{c_{s_1}, c_{s_2}} = |\lambda| \end{aligned} \tag{3.5}$$

#### 4.4 Règles d'identification de sous-assemblages (étapes 5 à 8)

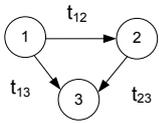
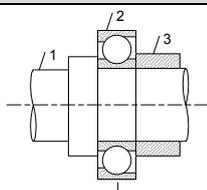
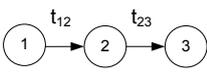
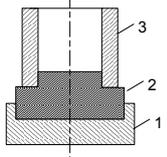
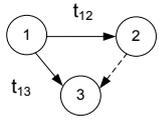
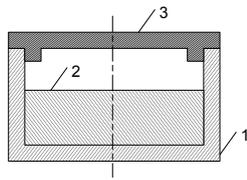
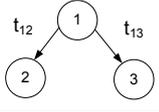
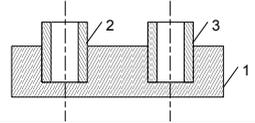
A partir des composants retenus pour la solution, et de la matrice d'adjacence associée, nous proposons de définir une règle pour l'identification de sous-assemblages, en introduisant une typologie de sous-assemblages, considérée ici comme un ensemble des motifs/cas de sous-graphes et sous-matrices. Nous distinguons quatre sous-assemblages, tels que définis ci-dessous :

- *série* : sous-assemblage défini par une chaîne de relations unidirectionnelles de contact direct, et conduisant à un séquençement en série des opérations d'assemblage ;
- *parallèle* : sous-assemblage défini par une chaîne de relations de contact direct orientées sur un composant, et conduisant à un séquençement en parallèle des opérations d'assemblage ;
- *entremêlé* : sous-assemblage défini par une boucle fermée de relations de contact direct, et conduisant à un séquençement en série des opérations d'assemblage ;
- *inclusif* ou *obligatoire* : sous-assemblage défini par une boucle fermée de relations, incluant des relations de contact direct et des contraintes de précédence, et conduisant à un séquençement en série des opérations d'assemblage.

De ce fait, pour chaque sous-assemblage (motif/cas), nous représentons le graphe orienté, la matrice d'adjacence, le pseudo-vecteur traduisant la séquence d'assemblage, et le temps d'assemblage (TAB. 11).

Afin de faciliter la procédure algorithmique, nous décrivons, sous forme mathématique, les différents sous-assemblages (TAB. 12). Afin de représenter les séquençements en série et en parallèle, nous utilisons la notation « , » pour décrire une opération d'assemblage en série, et la notation « - » pour décrire une opération d'assemblage en parallèle. Les temps d'assemblage pourront être calculés de manière automatique.

TAB. 11 — Type de sous-assemblages et les informations associées

Type	Graphe orienté	Matrice d'adjacence	Pseudo-vecteur	Temps d'assemblage	Illustration
Entremêlé		$P_3 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	$(1, 2, 3)$	$t_{12} + t_{23}$	
Série		$P_3 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	$(1, 2, 3)$	$t_{12} + t_{23}$	
Inclusif / obligatoire		$P_3 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & \lambda \\ -1 & -\lambda & 0 \end{pmatrix}$	$(1, 2, 3)$	$t_{12} + t_{13}$	
Parallèle		$P_3 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$(1, 2-3)$	$\text{Max}(t_{12}, t_{13})$	

TAB. 12 — Description mathématique de chaque matrice d'adjacence associée à chaque type de sous-assemblage

Type de sous-assemblage	Description mathématique
Entremêlé	$B_{ij} = (b_{i,j})_{i,j \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*} / \begin{cases} b_{ij} = 1 & \forall j > i \\ b_{ij} = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$
Série	$C_{ij} = (c_{i,j})_{i,j \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*} / \begin{cases} c_{ij} = 1 & \forall j = i + 1 \\ c_{ij} = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$
Inclusif	$D_{ij} = (d_{i,j})_{i,j \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*} / \begin{cases} d_{ij} = 1 & \forall k \in \mathbb{N}^*, \\ d_{ij} = \lambda & \end{cases} \quad \begin{matrix} \exists ! i \in \mathbb{N}^* / d_{i,k} = 1 \\ \forall j = i + 1 \end{matrix} \quad (3.8)$
Parallèle	$E_{ij} = (e_{i,j})_{i,j \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^*} / \begin{cases} e_{ij} = 1 & \forall k \in \mathbb{N}^*, \\ e_{ij} = 0 & \end{cases} \quad \begin{matrix} \exists ! i \in \mathbb{N}^* / e_{i,k} = 1 \\ \text{sinon} \end{matrix} \quad (3.9)$

Pour chaque cas de sous-assemblage, la procédure génère toutes les permutations des composants, afin de faciliter le processus de reconnaissance des sous-assemblages dans la matrice d'adjacence  $P_n$ . De cette manière, nous évitons les processus coûteux en termes de temps de traitement, traditionnellement basés sur les arrangements et permutations de la matrice initiale  $P_n$ .

Soit  $X_k \in \{B_k, C_k, D_k, F_k\}$  l'ensemble de toutes les permutations de chaque matrice associée aux types de sous-assemblage :

$$X_k = \bigcup_{3 \leq k \leq n-1} A_k^k X_{ij} \quad \forall i, j, k \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^* \quad (3.10)$$

Soit  $VA_k$  l'ensemble de toutes les permutations des variantes parmi les types de sous-assemblage :

$$VA_k = \bigcup_{3 \leq k \leq n-1} A_k^k X_k \quad \forall k \in \mathbb{N}^* \quad (3.11)$$

Une fois que la définition/génération de toutes les variantes des types de sous-assemblage est réalisée, nous décrivons l'ensemble des combinaisons de matrices à vérifier, tel que présenté ci-dessous :

Soit  $H_k$  l'ensemble de toutes les combinaisons de  $k$  éléments pris parmi  $C$ , afin de représenter les combinaisons des matrices de dimensions  $k$  dans la matrice d'adjacence  $P_n$ .

$$H_k = \sum_{k=3}^{k=n-1} \frac{n!}{k!(n-k)!} = \sum_{k=3}^{k=n-1} \binom{n}{k} \quad \forall k, n \in \mathbb{N}^* \times \mathbb{N}^* \quad (3.12)$$

Soit  $\mathcal{M}_0(\mathbb{N}^*)$  l'ensemble des matrices de dimensions  $k$  dans  $\mathbb{N}^*$  associées aux sous-assemblages candidats de  $k$  composants :

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_0(\mathbb{N}^*) &= VA_k \cap H_k \\ \forall (h_{i,j}) \in H_k, (h_{i,j}) \in \mathcal{M}_0(\mathbb{N}^*) &\Leftrightarrow \exists (v_{i,j}) \in VA_k / (h_{i,j}) = (v_{i,j}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Dès que le processus de reconnaissance est exécuté, les sous-matrices identifiées, représentant des sous-assemblages candidats, sont vérifiées, afin de ne pas avoir de contradiction vis-à-vis de la faisabilité technique, tels que les problèmes d'interférence et d'inclusion entre les sous-assemblages candidats et les composants restants à assembler.

## 4.5 Règles de vérification de sous-assemblages (étapes 9 à 11)

Afin de vérifier chaque sous-assemblage identifié dans la matrice d'adjacence  $P_n$ , nous introduisons une « matrice compagnon », notée  $CM = (cm_{k,n-k})$  (également appelée « matrice partenaire »). Celle-ci vise à mettre en relation les composants du sous-assemblage identifié (vecteurs ligne de  $CM$ ) avec les composants restants à assembler (vecteurs colonne de  $CM$ ), afin de déterminer si le sous-assemblage candidat est réalisable selon le point de vue interférence (FIG. 33).

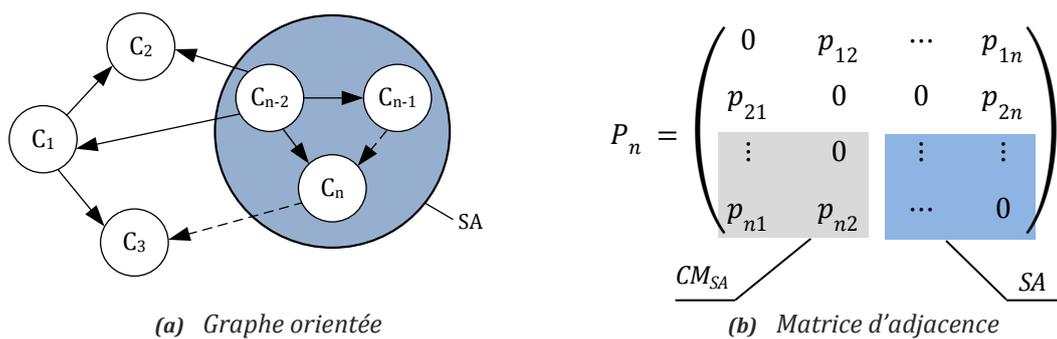


FIG. 33 — Identification du sous-assemblage SA (a) et définition de la matrice compagnon  $CM_{SA}$  (b)

Par conséquent, une règle de vérification peut être appliquée sur la matrice compagnon  $CM$  et présentée ci-dessous :

Soit  $\mathcal{M}_k(\mathbb{N}^*)$  l'ensemble des matrices antisymétriques de dimension  $k$  dans  $\mathbb{N}^*$  associées aux sous-assemblages candidats de dimension  $k$  dans  $\mathbb{N}^*$ .

Soit  $\mathcal{M}_{k,n-k}(\mathbb{N}^*)$  l'ensemble des matrices compagnon  $CM$  de dimension  $(k \times n-k)$  associées aux sous-assemblages  $SA$  candidats de dimension  $k$  dans  $\mathbb{N}^*$ .

$$(h_k) \in \mathcal{M}_k(\mathbb{N}^*) \Leftrightarrow \left| \begin{array}{l} \exists! (cm_{k,n-k}) \in \mathcal{M}_{k,n-k}(\mathbb{N}^*) \mid \\ \forall (cv_{(cm_{k,n-k})}), cm_{k,n-k} \geq 0 \vee cm_{k,n-k} \leq 0 \end{array} \right. \quad (3.14)$$

De ce fait, si les signes des éléments non nuls appartenant à la  $k^{\text{ème}}$  colonne, notée  $cv$ , de la matrice compagnon  $CM$ , ne sont ni tous positifs ni tous négatifs, il y aura une ou plusieurs interférences entre les composants du sous-assemblage candidat et les composants restants à assembler. Ce sous-assemblage ne pourra donc pas être considéré comme un sous-assemblage admissible vis-à-vis de sa faisabilité technique. A partir du moment où tous les sous-assemblages candidats ont été vérifiés et retenus, nous allons définir des critères d'aide à la décision, tels que les critères de taux de charge, de masse, de temps, etc., afin de fournir une assistance au gammiste, pour qu'il puisse choisir les sous-assemblages et les différents niveaux associés, de manière pas à pas dans un premier temps.

## 4.6 Support de décision pour le choix des sous-assemblages admissibles (étape 12)

La mise en place de critères pour apporter une aide à la définition de la séquence d'assemblage par le choix des sous-assemblages à réaliser, doit pouvoir se faire en fonction d'un contexte initial de production préalablement défini par le gammiste. De ce fait, nous nous positionnons dans le contexte de « Lean Manufacturing », qui vise à adapter le volume production des produits en fonction de la demande du client.

### 4.6.1 Définition du contexte de production

Le contexte de « Lean Manufacturing » sous-entend différentes méthodes pour faciliter et optimiser les systèmes de production. Nous nous appuyons sur la méthode, appelée Total

Productive Maintenance (TPM), qui a pour objectif d'augmenter le temps de fonctionnement des moyens de production (également appelé temps d'ouverture) [Nakajima, 1987]. Dans notre contexte de lignes d'assemblage cadencées, nous définissons le « Design Takt Time<sup>35</sup> » désiré ( $T_T$ ), qui est considéré comme la période de cadencement exprimée en seconde par unité (sec./unit.). Celui-ci peut s'exprimer de la manière suivante :

$$T_T = \frac{\text{temps d'ouverture}}{\text{prévision de la demande}} = \frac{A}{D_{prev}} \quad (3.15)$$

Afin d'être en cohérence avec la méthode TPM, nous introduisons le **Taux de Rendement Synthétique (TRS)**, issu de la Norme NF E 60-182, qui est une méthode permettant aux opérateurs d'identifier et de traiter les causes de pertes de production. Mesuré généralement heure par heure, cette indicateur permet également, à la maîtrise et à l'encadrement, d'orienter au quotidien les décisions de management (FIG. 34).

Le calcul du TRS fait intervenir quatre temps, tels que le :

- *temps d'ouverture (A)* : temps correspondant à l'amplitude des horaires de travail et incluant les temps d'arrêt de désengagement, tels que nettoyage, pause, maintenance préventive, etc. ;
- *temps effectif de disponibilité (B)* : partie du temps d'ouverture (A) pendant lequel l'utilisateur engage son moyen de production avec la volonté de produire comprenant les temps d'arrêt subis et programmés ;
- *temps net de fonctionnement (C)* : temps pendant lequel le moyen de production produit des pièces ;
- *temps utile (D)* : partie du temps net (C) correspondant au temps non mesurable obtenu en multipliant le nombre de pièces bonnes par le temps de cycle de référence.

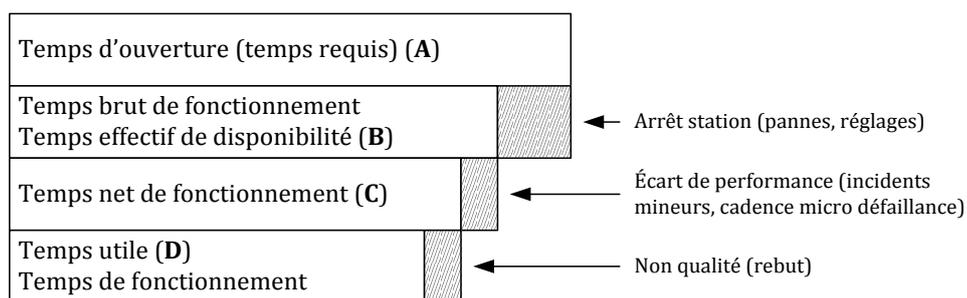


FIG. 34 — Temps définissant le Taux de Rendement Synthétique

De ce fait, le TRS est le rapport entre le temps utile (D) et le temps d'ouverture (A). L'objectif que nous nous fixons pour une action TPM est un TRS  $\geq 85\%$ .

<sup>35</sup> Le Takt est un mot allemand qui signifie « rythme ». Il représente la cadence à laquelle le client demande le produit. Le Takt est ainsi utilisé pour représenter la cadence de production des pièces.

$$TRS = \frac{D}{A} = \frac{\text{temps utile}}{\text{temps ouverture}} \geq 85\% \quad (3.16)$$

Afin d'être plus proche de réalité, nous exprimons le « Design Takt Time » en fonction du temps utile (D), tel que :

$$T_T = \frac{A \cdot TRS}{D_{prev}} = \frac{D}{D_{prev}} \quad (3.17)$$

#### 4.6.2 Critères de décision

L'approche de définition pas à pas de la séquence d'assemblage nécessite de choisir les différents sous-assemblages à réaliser. Dans ce contexte, l'algorithme ASDA propose plusieurs cycles d'identification (cf. boucle d'identification dans la FIG. 30) de sous-assemblages en fonction des sous-assemblages imposés<sup>36</sup> par le gammiste. Par conséquent, devant le nombre de sous-assemblages admissibles qui est réduit au fur et à mesure des cycles, il est important de guider le gammiste dans ses choix, par la mise en place d'une aide à la décision en phase préliminaire.

Comme critères de décision, la procédure algorithmique exploite les informations qui ont été modélisées dans le graphe orienté et repris dans la matrice d'adjacence. Tout d'abord, les masses prédéterminées, les paramètres dimensionnels (longueur, largeur ou épaisseur) de chaque composant du produit et les temps d'assemblage associés (calculés via les tables MTM) aux sous-assemblages identifiés sont considérés pour l'aide à la décision. Par conséquent, les règles permettant d'établir les critères pour l'aide à la décision peuvent être énoncées et exprimées de la manière suivante :

*Soit  $m_c$ , la masse prédéterminée pour composant du produit.*

*Soit  $T_o$ , le taux acceptable du port de charges manuel pour une personne*

*Soit  $t_{SA}$  le temps d'assemblage associé au sous-assemblage SA.*

Ainsi, l'algorithme proposé va pouvoir calculer automatiquement, pour chaque sous-assemblage, la masse et le taux acceptable du port de charges manuel pour une personne. De plus, les paramètres dimensionnels, tels que la longueur et la largeur de chaque composant, associés aux informations technologiques, nous permettent de calculer les temps opératoires. Ces temps peuvent être calculés via les tables MTM, issues de l'approche DFA proposée par [Boothroyd & Dewhurst, 1983].

Ces paramètres sont limités par des constantes prédéterminées, telles que la limite acceptable du port de charges manuel  $T_{o_{limit}}$  et le Design Takt Time  $T_T$  préalablement défini, en cohérence avec les normes ergonomiques NF X35-109 [X35-109, 1989] et NF EN 1005-5 [NF EN 1005-5, 2007].

<sup>36</sup> L'existence de sous-ensemble imposé dès le départ réduit le nombre de séquences d'assemblage admissibles. La définition d'un sous-ensemble imposé peut être justifiée par une exigence dans le cahier des charges, qui est lié à une problématique de maintenance, de gestion de production, ou de coïncidence avec un sous-ensemble fonctionnel.

$$m_{SA} = \sum_{c=1}^k m_c \quad (3.16)$$

$$T_{O_{SA}} = \frac{m_{SA}}{T_T} \leq T_{O_{limit}} \quad (3.17)$$

Partant des opérations d'assemblage, nous avons défini, pour chaque sous-assemblage, un temps de cycle prédéterminé  $CT_0$  lié au temps opératoire (temps de fixation)  $T_a$ , au Work Content (chargement, manipulation, mise en position, etc.)  $W_c$ , et au temps non affecté  $T_i$ . Ce temps de cycle associé à chaque sous-assemblage devra vérifier la condition suivante :

$$CT_0 = T_a + W_c + T_i \leq T_T \quad (3.18)$$

L'assemblage manuel peut être décrit selon des opérations d'assemblage, qui elles mêmes peuvent être décomposées par des activités techniques élémentaires. Cette décomposition permet d'évaluer les temps d'assemblage et la charge de l'opérateur, afin d'équilibrer la charge de travail, tout en satisfaisant les exigences des normes ergonomiques.

**Remarque :** ces critères de décision peuvent être mis en place dans un contexte automobile où l'on a un assemblage final cadencé avec des petits composants. Pour ce qui est des composants ayant des volumes d'encombrement plus important (contexte aéronautique), il faudra prendre en compte d'autres critères (cf. *Partie 5*).

#### 4.7 Règles de concaténation de sous-assemblages retenus (étapes 13 et 14)

A partir du moment où le gammiste a choisi le(s) sous-assemblage(s) réalisable(s) selon le point de vue de l'ingénierie, l'algorithme va considérer chaque sous-assemblage comme un unique composant à réintroduire dans la matrice d'adjacence  $P_n$  (cf. boucle FIG. 30). De ce fait, une nouvelle matrice, appelée matrice d'adjacence contractée  $P^*$ , va être générée automatiquement et sera, par conséquent, la nouvelle donnée d'entrée pour les étapes 7 à 12 de l'algorithme ASDA (FIG. 35).

Par la suite, d'autres sous-assemblages pourront être identifiés et sélectionnés à un autre niveau d'assemblage. La matrice d'adjacence contractée  $P^*$  dépend donc des dimensions des sous-assemblages retenus. Par exemple, pour un sous-assemblage sélectionné de dimension  $k$  parmi  $n$  composants, la dimension de la matrice d'adjacence contractée  $P^*$  sera  $n-k+1$ .

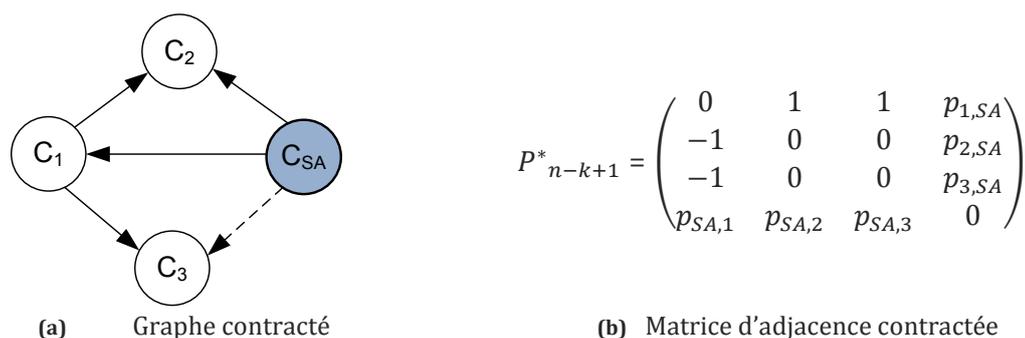


FIG. 35 — Graphe contracté (a) et matrice d'adjacence contractée  $P^*_{n-k+1}$  (b) considérant le sous-assemblage de dimension  $k$  comme un unique composant

Afin de construire la matrice d'adjacence contractée  $P^*$  intégrant le sous-assemblage retenu de dimension  $k$ , plusieurs règles de concaténation doivent être exécutées afin d'assigner des nouvelles entrées dans cette nouvelle matrice, tels que décrits ci-dessous :

$$\begin{array}{l}
 \text{Si (tous les éléments appartenant à la } j^{\text{ème}} \text{ colonne de la matrice} \\
 \text{compagnon } CM = 0) \\
 \text{Alors } p_{SA,j} = 0 \\
 \text{Si (tous les éléments non nuls appartenant à la } j^{\text{ème}} \text{ colonne de la} \\
 \text{matrice compagnon } CM > 0 \text{ et } CM = \lambda) \\
 \text{Alors } p_{SA,j} = \lambda \\
 \text{Sinon } p_{SA,j} = 1 \\
 \text{Si (tous les éléments non nuls appartenant à la } j^{\text{ème}} \text{ colonne de la} \\
 \text{matrice compagnon } CM < 0 \text{ et } CM = -\lambda) \\
 \text{Alors } p_{SA,j} = -\lambda \\
 \text{Sinon } p_{SA,j} = -1
 \end{array} \tag{3.21}$$

En effet, ces règles heuristiques vont être appliquées sur la matrice de dimension  $k$  associée au sous-assemblage à intégrer, ainsi que sur la matrice compagnon de ce sous-assemblage. De cette manière, ces règles de concaténation décrivent comment le sous-assemblage retenu va hériter des informations relationnelles entre les composants le constituant et les composants restants à assembler.

## 4.8 Définition/génération de la séquence d'assemblage (étape 15)

A la fin de la procédure de concaténation des derniers sous-assemblages retenus par le gammiste, l'algorithme ASDA compile l'historique de l'ensemble des choix de sous-assemblages effectués par le gammiste. De ce fait, la séquence d'assemblage générée par l'algorithme ASDA met en évidence les informations suivantes :

- *l'ordre d'assemblage des composants du produit* : cette information décrit l'ordre chronologique dans lequel les composants du produit sont positionnés et assemblés, impliquant par conséquent l'ordonnancement des opérations d'assemblage ;
- *le type de sous-assemblage* (série, parallèle, entremêlé, inclusif) : cette information permet de décrire la nature du sous-assemblage liés au réseau de relations entre les composants, afin d'affecter des opérations d'assemblage ;
- *la dimension du sous-assemblage* : cette information décrit le nombre de composants contenus dans chaque sous-assemblage ;
- *le niveau de sous-assemblage* : cette information présente les différents états du produit (configuration d'assemblage) dans le processus d'assemblage. De ce fait, nous aurons la vision de l'imbrication des sous-ensembles du produit, et ainsi un aperçu de la complexité du produit ;
- *l'élément de base*<sup>37</sup> : cette information décrit, pour chaque sous-assemblage et chaque niveau de sous-assemblage, un composant ou un sous-assemblage, stabilisé par un posage, sur lequel les autres composants/sous-ensembles devront se positionner et s'assembler progressivement. Cet élément est alors considéré comme primaire dans une ou plusieurs opérations d'assemblage consécutives. Il joue un rôle de support pour les autres composants/sous-ensembles et garde une orientation constante ;
- *les directions d'assemblage* : cette information décrit les directions d'insertion en fonction de la stabilité des sous-assemblages. Par cette information, il est possible de déterminer pour une séquence d'assemblage générée le nombre de réorientations à effectuer.

La séquence d'assemblage résultante peut être représentée selon différentes façons. En effet, l'étude des travaux de recherche dans ce domaine ont mis en évidence des représentations de séquences d'assemblage, telles que les arbres d'assemblage [Henrioud, 1989], les arbres ordonnés [Stadzisz, 1997], etc. (FIG. 36).

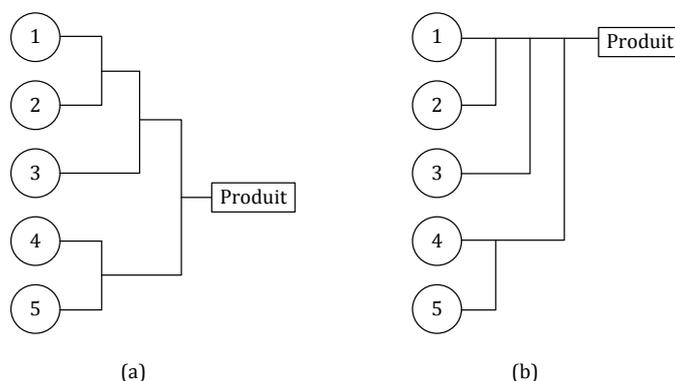


FIG. 36— Séquence d'assemblage représentée par un arbre d'assemblage (a) et un arbre ordonné (b)

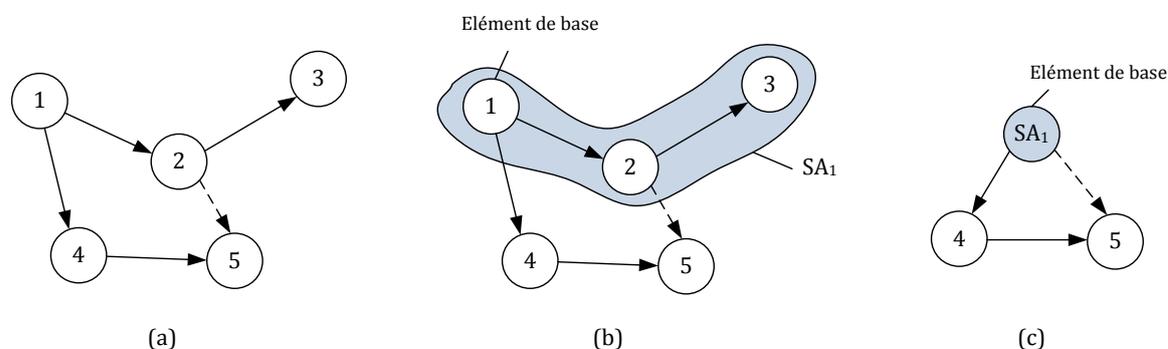
<sup>37</sup> La définition d'un ou plusieurs éléments de base dans un produit fait partie des recommandations généralement admises pour la conception des produits à assembler [Henrioud, 1989] [Boothroyd et al., 1994]

Compte tenu du fait que nous souhaitons interpréter la séquence d'assemblage résultante pour apporter un contexte au processus de développement, nous proposons de représenter la séquence d'assemblage sous une liste ordonnée, associée à un graphe orienté, afin de représenter les états (ou configurations) d'assemblage. Nous présentons ci-dessous un exemple de séquence d'assemblage et de représentation associée (FIG. 37).

Partant d'un graphe orienté et de la matrice d'adjacence associée, dans lesquels les relations d'ordonnancement entre les cinq composants de la solution sont décrits, nous avons déterminé la séquence d'assemblage exprimée sous la forme d'une liste ordonnée :

Séquence d'assemblage :  $\{(1, 2, 3), 4, 5\} = \{(SA_1, 4, 5)\}$

Celle-ci est composée d'un sous-assemblage en série  $SA_1 = (1, 2, 3)$  (identifié par le motif représenté en bleu), et deux éléments de base, tels que le composant 1 pour l'état  $SA_1$ , et l'élément  $SA_1$  pour l'état produit (assemblage final).



$$P_5 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & \lambda \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\lambda & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} \quad P_5 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & \lambda \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\lambda & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} \quad P^*_3 = \begin{pmatrix} SA_1 & 4 & 5 \\ 0 & 1 & \lambda \\ -1 & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} SA_1 \\ 4 \\ 5 \end{matrix}$$

FIG. 37 — Proposition de représentation des états d'assemblage du produit via le graphe orienté et les matrices d'adjacence

Une fois la séquence d'assemblage définie, il est possible de définir l'ensemble des opérations d'assemblage du produit, telles que les opérations de préhension/manipulation, insertion et fixation dans un premier temps [Henrioud, 1989]. Les opérations de contrôle pourront être définies une fois les exigences fonctionnelles et géométriques exprimées (cf. Partie 5).

Une opération d'assemblage permet la réalisation d'une ou plusieurs relations de contact direct entre deux éléments (composant ou sous-ensemble). De ce fait, la structuration des opérations d'assemblage dépendra des différents états d'assemblage du produit. Cet aspect sera abordé dans la Partie 3 du Chapitre 4 en contexte PLM.

## 4.9 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie, les différents mécanismes, intégrant des règles heuristiques et logiques, pour la définition pas à pas d'une séquence d'assemblage. L'algorithme ASDA vise à définir et planifier les séquences d'assemblage admissibles en phases préliminaires du processus de développement des produits. Bien que cette approche ait développé son originalité sur la définition d'informations du processus d'assemblage avant que la géométrie du produit ne soit définie, il est important de souligner que le gammiste a une vue locale sur le choix des sous-assemblages. En effet, le choix des sous-assemblages s'effectue par niveau d'assemblage, et donc le gammiste ne possède pas de vision sur l'impact de ses choix dans l'obtention de la séquence d'assemblage finale. De plus, d'un point de vue fonctionnel, la séquence d'assemblage générée ne permet pas de vérifier l'assemblabilité du produit. Sur ce point, les variations géométriques des composants ont un rôle à jouer sur l'ordre dans lequel les composants/sous-ensembles doivent s'assembler. Pour ce faire, nous proposons dans la partie suivante, d'apporter :

- une vue globale au gammiste, en générant l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles ;
- une vérification de l'assemblabilité par une simulation de tolérancement ;
- une optimisation multi-objectif des séquences d'assemblages admissibles, afin d'identifier la séquence d'assemblage optimale en phase préliminaire du processus de développement du produit.

## 5. Evolution de l'algorithme ASDA pour garantir l'assemblabilité du produit

Sur la base du cadre méthodologique PASODE et de l'algorithme ASDA, définis dans la partie précédente, nous proposons une évolution de l'algorithme ASDA, afin de prendre en compte les critères d'assemblabilité du produit dans le choix de la séquence d'assemblage [Lu *et al.*, 2006a]. Pour ce faire, nous nous appuyons sur la définition proposée par [Marguet, 2001], qui est exprimée ci-dessous :

*« L'assemblabilité est l'aptitude d'un produit à autoriser la connexion physique de ses composants. C'est une condition fonctionnelle qui consiste à vérifier si le jeu spécifié entre les pièces intégrant des défauts autorise l'assemblage précontraint du mécanisme. »*

De ce fait, cette partie présente les mécanismes permettant le déploiement des exigences fonctionnelles, via la vue « fonctionnelle produit » du modèle MUVOA, pour apporter une vérification fonctionnelle de la séquence d'assemblage, et ainsi garantir l'assemblabilité du produit. Cette évolution de l'algorithme ASDA est représentée par les mécanismes grisés dans le cadre méthodologique PASODE (FIG. 38).

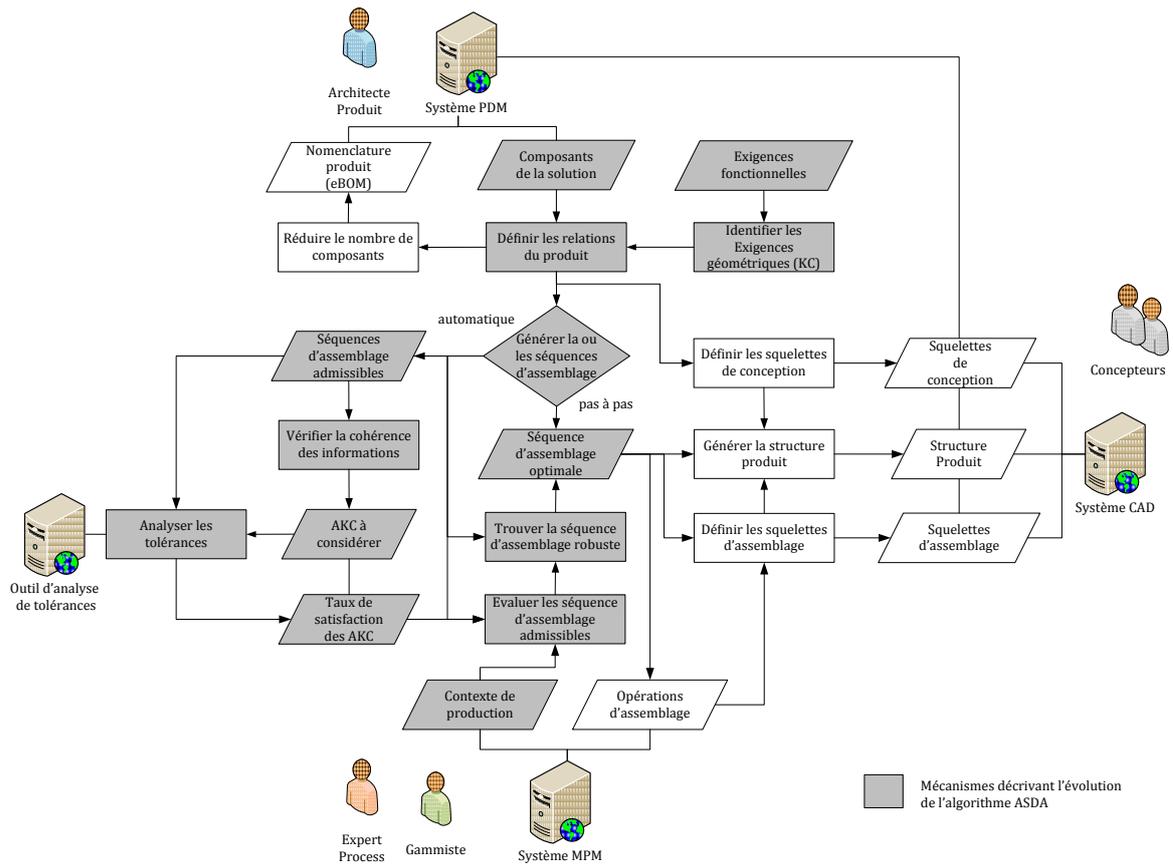


FIG. 38 — Evolution de l'algorithme ASDA dans le cadre méthodologique PASODE

## 5.1 Intégration des exigences fonctionnelles

La partie précédente nous a permis de décrire un algorithme mathématique, basé sur des informations définies par un graphe orienté, pour la définition pas à pas de la séquence d'assemblage dans les phases préliminaires du processus de développement [Demoly *et al.*, 2010a] [Demoly *et al.*, 2010c]. Un aspect important qui n'a pas été pris en compte est celui de la satisfaction des exigences fonctionnelles. En effet, d'un point de vue assemblage, il est important de cascader les exigences fonctionnelles dans les phases du processus de développement et de définition de séquences d'assemblage, ceci afin de permettre la faisabilité de l'assemblage du produit. Cet aspect peut avoir un impact majeur sur l'ordre dans lequel les opérations d'assemblage doivent être effectuées, et par conséquent sur la définition de la séquence d'assemblage [Whitney, 1996] [Marguet, 2001].

Cette hypothèse est mise en exergue par les pratiques industrielles actuelles au sein du processus de développement des produits. En effet, le département ou le service de l'entreprise chargé de l'industrialisation des produits, souligne, de plus en plus, le besoin de travailler avec des volumes réels et des variations géométriques à la place des dimensions nominales, qui introduisent systématiquement des variations géométriques sur les composants et les assemblages [Mantripragada & Whitney, 1999] [Zhao *et al.*, 2009], plus particulièrement au niveau des interfaces entre les composants.

De ce fait, les exigences et les contraintes techniques, liées à la phase d'assemblage du produit, doivent être intégrées, dès que possible, dans le processus de développement pour

réduire les temps d'ingénierie du couple produit-process. La FIG. 39 illustre la prise en compte des variations géométriques sur les composants (A, B, C), afin de vérifier si les séquences d'assemblage, qui au départ était admissibles d'après notre algorithme ASDA (Séquences 1 et 2), permettent l'assemblabilité du produit.

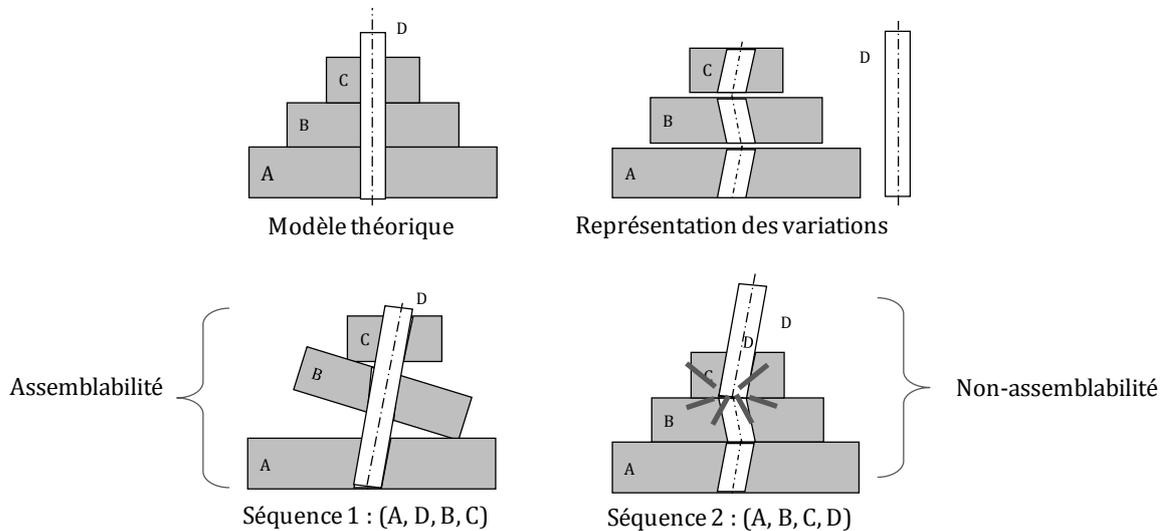


FIG. 39 — Importance des variations géométriques dans la définition de la séquence d'assemblage [Marguet, 2001]

Il est donc question ici de déployer, au sein de notre démarche, les exigences géométriques, afin de les considérer comme des critères d'évaluation à intégrer dans notre algorithme ASDA, pour la vérification de la faisabilité de l'assemblage du produit. Nous allons décrire dans cette partie, l'évolution de l'algorithme ASDA par l'apport de mécanismes de définition, de vérification et d'émergence d'informations, au plus tôt dans le processus de développement, pour garantir cet aspect. Sur la base de ce troisième objectif du cadre méthodologique PASODE, un logigramme est introduit pour représenter l'évolution de notre algorithme ASDA dans le contexte de l'assemblabilité du produit (FIG. 40). La notation utilisée est retranscrite dans la *Table des symboles* (p. xviii).

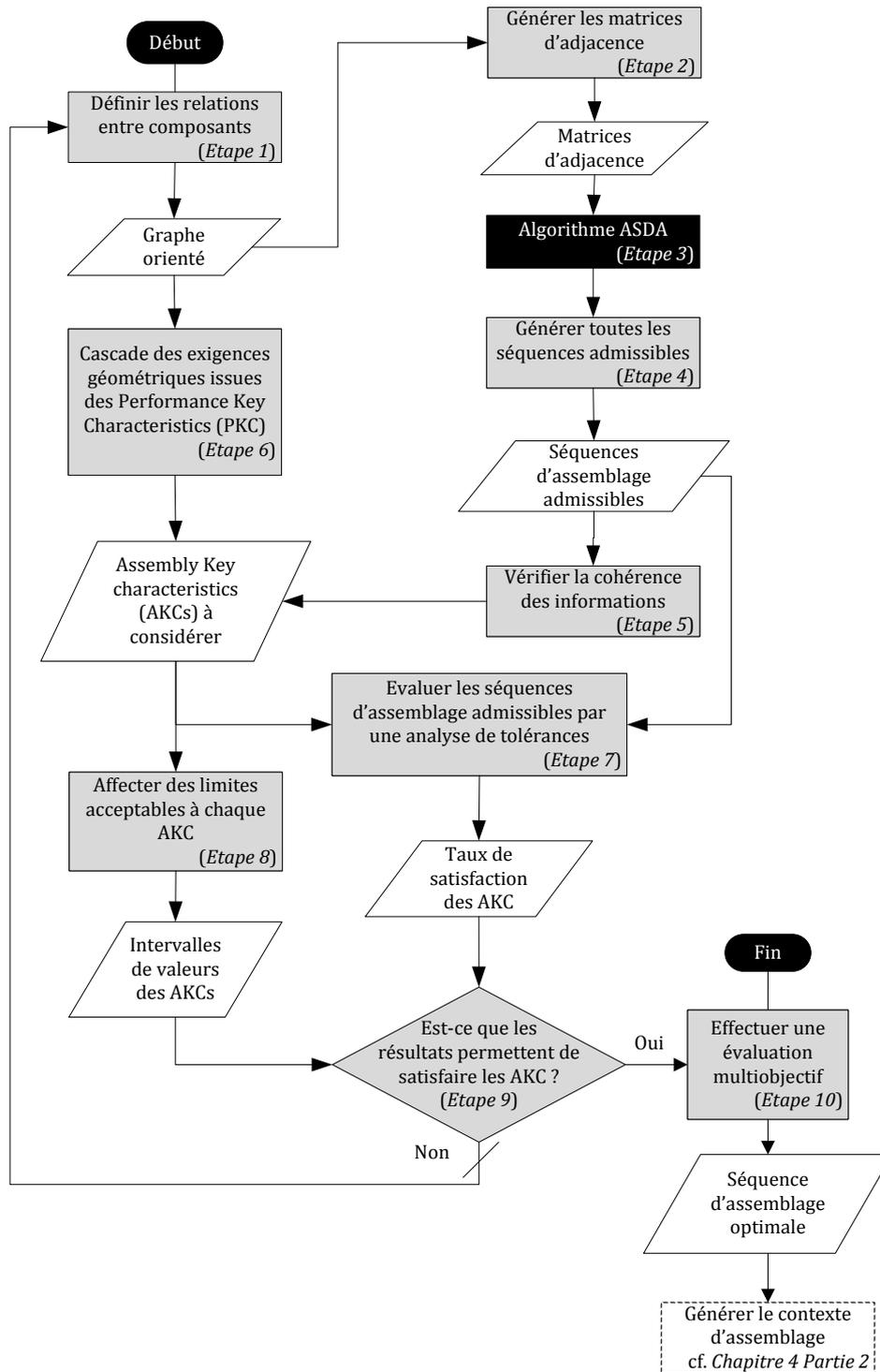


FIG. 40 — Evolution de l'algorithme ASDA pour satisfaire les exigences fonctionnelles

## 5.2 Introduction de nouvelles informations sur les relations du produit (étapes 1 et 2)

Sur la base des relations décrites et exploitées dans l'algorithme ASDA, nous proposons de les enrichir par l'apport d'informations sur les relations de contact direct, telles que :

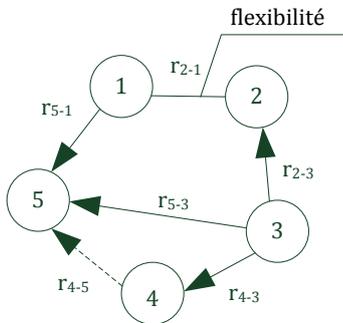
- *le degré de flexibilité* sur la relation de contact direct (ligne pleine sans orientation). L'allocation d'un degré de flexibilité sur une relation de contact direct entre deux composants permet à l'architecte produit de ne pas définir de relations d'ordonnancement. Ainsi l'algorithme pourra explorer plus de solutions puisqu'il devra développer l'ensemble des solutions pour les deux cas de figure ;
- *l'exigence géométrique* pour allouer une exigence fonctionnelle sur une relation entre deux composants, telle que la caractéristique majeure d'assemblage (Assembly Key Characteristics - AKC) identifiée et définie en fonction de la séquence d'assemblage.

**Remarque :** il est important de noter que l'introduction de niveaux de flexibilité dans les relations d'ordonnancement doit être effectuée avec précaution. En effet, cela va impliquer la génération de  $2^n$  matrices d'adjacence (avec  $n$  le nombre de degrés de flexibilité), comme données d'entrée, ce qui augmentera les temps de traitement de l'algorithme ASDA.

Soit  $P_n = (p_{i,j})$  la matrice d'adjacence définie, à partir du graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ , comme une matrice antisymétrique de dimension  $n$ , telle que les entrées  $p_{i,j} \in \{0,1,-1,\lambda,-\lambda,\delta,-\delta\}$  (FIG. 41) (FIG. 42).

De ce fait, l'introduction d'un degré de flexibilité sur une relation de contact direct dans le graphe  $\mathcal{G}$ , peut se modéliser de la manière suivante :

$$p_{i,j} = \delta \quad \text{si} \quad \begin{cases} \text{Relation de contact direct entre } c_i \text{ et } c_j \\ c_j \text{ peut être assemblé soit avant soit après } c_i \\ (\delta = 1 \text{ or } \delta = -1) \end{cases} \quad (3.22)$$



$$P_5 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & \delta & 0 & 0 & 1 \\ -\delta & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \lambda \\ -1 & 0 & -1 & -\lambda & 0 \end{pmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} \end{matrix}$$

FIG. 41 — Graphe orienté valué  $\mathcal{G}$  et la matrice d'adjacence  $P_5$  associée intégrant un degré de flexibilité

$$P_5(\delta = 1) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \lambda \\ -1 & 0 & -1 & -\lambda & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (a)$$

$$P_5(\delta = -1) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \lambda \\ -1 & 0 & -1 & -\lambda & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (b)$$

FIG. 42 — Matrices d'adjacence  $P_5$  pour  $\delta = 1$  (a) et  $\delta = -1$  en cohérence avec le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$  avec  $n=1$

### 5.3 Génération de toutes les séquences d'assemblage admissibles (étapes 3 et 4)

Nous proposons ici de générer l'ensemble des scénarios d'assemblage, c'est-à-dire que nous simulons tous les choix possibles réalisés par le gammiste, dans l'approche pas à pas de définition de séquence d'assemblage (cf. *Paragraphe 4.6.2*).

Nous appelons  $S = \{s_1, s_1, \dots, s_q\}$  l'ensemble fini des séquences d'assemblage admissibles, de cardinalité  $q \in \mathbb{N}^*$ .

Ainsi, toutes les séquences d'assemblages admissibles sont générées de manière automatique et peuvent être soumises à plusieurs évaluations, afin de respecter les exigences géométriques et les règles associées au contexte de production. Cette génération de l'ensemble des solutions  $S$  permet, au gammiste, d'avoir une vision globale sur les séquences d'assemblage admissibles.

### 5.4 Vérification de la cohérence des informations (étape 5)

Afin de procéder à la vérification de la cohérence des informations issues de chaque séquence d'assemblage, nous posons comme hypothèse que le produit est un corps rigide, et que l'assemblage de celui-ci requiert que les composants soient positionnés sans contraintes surabondantes. Il s'agit donc de vérifier les liaisons mécaniques, afin de savoir si les sous-assemblages sont isostatiques ou hyperstatiques. Pour vérifier la cohérence des informations définies dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ , nous appliquons une règle sur les relations (liaisons) cinématiques et les degrés de liberté bloqués associés, telle qu'exprimée ci-dessous :

**Règle de vérification :** pour assurer l'isostatisme sur chaque composant positionné, la somme des degrés de liberté bloqués (degrés d'entrée dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ ) vers chaque composant, doit être inférieure ou égale à la valeur six.

$$\forall c_i \in C, \quad \begin{cases} \sum r_{i,j}(cDOF) \leq 6 \\ p_{i,j} = -1 \end{cases} \quad (3.23)$$

Dans le cas où la somme des degrés de liberté bloqués est supérieure à six, l'architecte produit devra libérer des degrés de liberté bloqués. Ceci pourra s'effectuer, soit par la

modification des relations cinématiques apportant des contraintes surabondantes, soit par l'allocation des exigences géométriques, soit les deux. Ces exigences géométriques, à mettre en place pour garantir cette règle de vérification de l'isostatisme de l'assemblage, peuvent être des jeux fonctionnels ou des mesures à vérifier (FIG. 43).

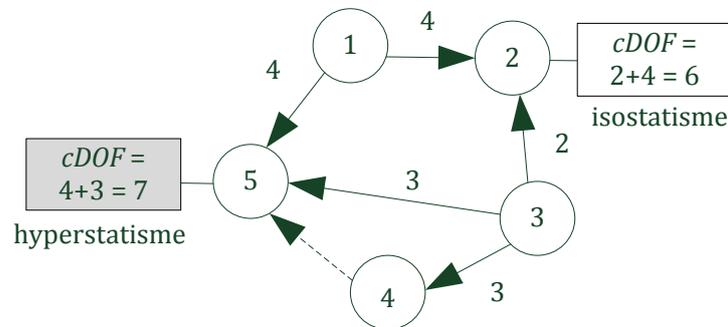


FIG. 43 — Graphe orienté valué  $G$  soulignant un assemblage hyperstatique

## 5.5 Emergences des exigences géométriques (étape 6)

L'analyse fonctionnelle du produit, permet d'identifier les fonctions principales et les fonctions techniques du produit à considérer, dans lesquelles des exigences fonctionnelles sont définies. Ces exigences fonctionnelles sont alors cascadiées, via une approche descendante, dans la structure produit, et représentent ce qu'il faut respecter pour atteindre les performances souhaitées du produit.

Par conséquent, sur chaque composant de l'assemblage, un ensemble d'exigences géométriques (également appelés Caractéristiques Majeures), noté **KC (Key Characteristics)** est défini à partir des exigences fonctionnelles du produit. Les **KC** peuvent être considérés comme des caractéristiques géométriques du produit sur lesquels une petite variation géométrique aura un impact important sur les fonctions du produit [Lee & Thornton, 1996] [Srinivasan, 1998] [Thornton, 1999].

De plus, les informations associées aux relations cinématiques et à la séquence d'assemblage mettent en évidence des **KC**, plus particulièrement des **AKC**, pour respecter l'assemblabilité d'assemblage du produit, tels que les jeux fonctionnels ou les mesures à vérifier. Ainsi, l'émergence des **KC**, à partir des **AKC**, est étroitement liée aux degrés de liberté bloqués ( $cDOF$ ), l'ordre d'assemblage et les directions d'insertion de chaque composant. La caractéristique majeure d'assemblage peut être considérée ici comme une caractéristique couvrant les différents niveaux d'assemblage et permettant au produit de satisfaire un **KC**.

Soit  $KC = \{kc_1, kc_2, \dots, kc_r\}$  l'ensemble fini de toutes les exigences géométriques, de cardinalité  $r \in \mathbb{N}^*$ .

La condition d'émergence des exigences géométriques peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\forall c_i \in C, \forall r_{i,j} \in R, \exists kc_{i,k} \in KC \Leftrightarrow \begin{cases} \sum r_{i,j}(cDOF) > 6 \\ \exists AKC(r_{i,j}) \in KC \end{cases} \quad (3.24)$$

## 5.6 Evaluation de l'assemblabilité du produit à partir des séquences d'assemblage admissibles (étapes 7 à 9)

Pour chaque séquence d'assemblage admissible, une analyse de tolérance 3D est effectuée afin de garantir l'assemblabilité du produit et le respect des exigences fonctionnelles et géométriques [Mathieu & Marguet, 2001]. Pour ce faire, nous exploitons les relations cinématiques, les exigences géométriques et les tolérances des composants (Capabilité de fabrication, notée  $MC$ ) préalablement décrites dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ . Pour chaque exigence géométrique  $KC$ , l'analyse des tolérances tend à calculer le cas le plus défavorable et les impacts des propagations des variations géométriques, afin d'identifier les relations contributrices et leur facteur de sensibilité, noté  $\alpha_{i,j}$ . De ce fait, nous pouvons quantifier la faisabilité d'un assemblage via la génération de toutes les chaînes de cotes, et tel que :

$$KC_i = \sum \alpha_{ij} \cdot MC_j \quad (3.25)$$

Cette évaluation est exécutée pour chaque séquence d'assemblage admissible générée précédemment par l'algorithme ASDA, où un taux de satisfaction pour chaque exigence géométrique est calculé, et indiquant un pourcentage de satisfaction des KC. Par conséquent, une table de comparaison est établie, afin d'identifier, parmi l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles, la séquence d'assemblage qui permet de satisfaire, de manière optimale, l'ensemble des exigences géométriques (KC).

**Remarque :** nous pouvons noter qu'il faudra définir, de manière manuelle, la nature des liaisons de positionnement (cinématique de positionnement) entre les composants du produit. Dans le cas de l'assemblage d'un composant A, en contact direct avec deux composants B et C déjà assemblés, il faudra spécifier la nature du contact primaire et du contact secondaire. Cette étude fera l'objet de travaux futurs, afin d'intégrer cet aspect à notre algorithme ASDA.

## 5.7 Optimisation multi-objectif des séquences d'assemblage admissibles (étape 10)

Nous avons introduit dans le paragraphe précédent le taux de satisfaction des exigences géométriques afin de vérifier l'assemblabilité du produit. Il s'agit ici de trouver le bon compromis entre les critères fonctionnels et les critères liés au contexte de production. Pour ce faire, nous proposons d'introduire une approche d'optimisation multi-objectif. Celle-ci aura pour but d'évaluer toutes les séquences d'assemblage admissibles via différents critères associés, que nous allons chercher à améliorer simultanément.

### 5.7.1 Définition du problème d'optimisation

De manière à identifier la séquence d'assemblage optimale en phase préliminaire du processus de développement, nous formulons le problème d'optimisation multi-objectif, tel que présenté ci-dessous ;

$$\begin{cases} \max f(s) \\ g(s) \leq 0 \\ 1 \leq s \leq n \end{cases} \quad (3.26)$$

Avec :  $f(s)$  la fonction objectif à maximiser

$g(s)$  la fonction contrainte à considérer

$s$  les séquences d'assemblage admissibles

### 5.7.2 Définition des fonctions à optimiser

L'approche d'optimisation multi-objectif nécessite de définir plusieurs fonctions mettant en évidence la pertinence des solutions admissibles, à partir de critères à optimiser, que nous appelons « fonction(s) objectif ». Ainsi, la définition de ce(s) fonction(s) dépend des hypothèses à prendre en compte, et que nous énumérons ci-dessous :

- la prévision de la demande  $D_{prev}$  est fixée à son objectif de vente maximum ;
- le Taux de Rendement Synthétique ( $TRS$ ) est connu, variable et bornée :

$$70\% \leq TRS \leq 90\% \quad (3.27)$$

- le temps d'ouverture est connu et fixe ;
- le nombre de stations d'assemblage est inconnu ;
- toutes les directions d'assemblage devront se réaliser selon l'axe z (gravité).

Dès lors, nous pouvons décrire les fonctions à optimiser via le TAB. 13 ci-dessous :

TAB. 13 — Critères à optimiser pour l'identification de la séquence d'assemblage optimale

Critères associés à chaque séquence d'assemblage admissible	Notation	Fonctions
Taux de satisfaction des KC (en %)	$CS_{KC}$	$f_1 = \max(CS_{PKC})$
Nombre de sous-assemblages	$N_{SA}$	$f_2 = \max(N_{SA})$
Nombre de sous-assemblages parallèles	$N_{SAp}$	$f_3 = \max(N_{SAp})$
Nombre de niveaux de sous-assemblages	$N_{nSA}$	$f_4 = \max(N_{nSA})$
Nombre de sous-assemblages stables	$N_{SAs}$	$f_5 = \max(N_{SAs})$
Nombre de retournements	$N_r$	$f_6 = \min(N_r)$
Temps d'assemblage (en s.)	$T_{seq}$	$f_7 = \min(CT)$
Nombre de caractéristiques majeures d'assemblages générées	$N_{AKC}$	$f_8 = \min(N_{AKC})$

Nous avons défini 8 critères à optimiser via le TAB. 13. Ces objectifs visent à identifier la séquence d'assemblage qui permet de garantir à la fois l'assemblabilité du produit et sa montabilité. Nous avons choisi de maximiser les sous-assemblages en parallèle (car étant par défaut des sous-assemblages en série), ceux-ci peuvent apporter de la flexibilité pour les questions d'équilibrage de lignes d'assemblage lorsque la demande (commande) est fluctuante.

Afin de procéder à cette évaluation d'une manière globale, c'est-à-dire de prendre en compte simultanément l'ensemble des fonctions à optimiser, nous proposons deux types de fonctions objectif, telles que :

$$f_1(s) = \max_S \left( \sum_{n=1}^{n=5} f_n - \sum_{n=6}^{n=8} f_n \right) \quad (3.28)$$

$$f_2(s) = \max_S \left( \prod_{n=1}^{n=5} f_n - \prod_{n=6}^{n=8} f_n \right) \quad (3.29)$$

Une fois que les fonctions « objectif » ont été définies, nous proposons de prendre en compte une fonction contrainte pour notre problème d'optimisation. Celle-ci est directement associée au taux de charge, et est définie ci-dessous :

$$g(s) = \frac{T_{O_{SA}} - T_{O_{limit}}}{T_{O_{limit}}}$$

De plus, nous considérons que le système de production est dimensionné aux objectifs maximum de vente, donc que la prévision de la demande est fixée à sa valeur maximale. Nous proposons de parcourir le facteur TRS, défini dans la *Partie 4*, entre les valeurs 70% et 90%, de manière à identifier la séquence d'assemblage robuste. Ces variations induisent par conséquent une variation du « design Takt Time », considéré comme une variable subie dans ce contexte, telle que définie ci-dessous :

$$70\% \leq TRS \leq 90\% \quad (3.30)$$

$$T_T = \frac{A \cdot TRS}{D_{prev}} = \frac{D}{D_{prev}} \quad (3.31)$$

$$\frac{A \cdot 70}{D_{prev}} \leq T_T \leq \frac{A \cdot 90}{D_{prev}} \quad (3.32)$$

Afin d'obtenir des résultats pertinents, les deux types de fonctions « objectif » nécessitent de travailler sur des données homogènes, ce qui oblige de normaliser les données hétérogènes dans un intervalle adapté. Le paragraphe suivant vise à normaliser les critères associés aux séquences d'assemblage admissibles.

### 5.7.3 Normalisation des données (fonctions)

Pour améliorer la vitesse de convergence et éviter les difficultés de traitement, il est souhaitable d'homogénéiser les données à utiliser par l'algorithme d'optimisation en les normalisant. La normalisation des données (critères dans notre cas) joue un rôle important, tant sur la convergence de l'algorithme d'optimisation que sur la qualité de la solution optimale. De ce fait, nous allons procéder à la transformation linéaire des critères en un nouveau jeu de critères appelées « critères normalisées », telles que les « variables centrées réduites ».

Rappelons que les données, utilisées pour l'optimisation des séquences d'assemblage admissibles, doivent être numériques et leurs modalités comprises dans l'intervalle  $[0,1]$ , ce qui implique, quand ce n'est pas le cas, une normalisation des données. Par l'introduction de variables centrées réduites comprises entre 0 et 1, nous pouvons obtenir des données indépendantes de l'unité, ou de l'échelle choisie mais également des variables ayant une même moyenne et dispersion, facilitant ainsi l'évaluation.

Soit  $x_i^r$  la variable courante mesurée en unité de mesure courante.

Soit  $x_i^{\min}$  et  $x_i^{\max}$  sont les limites inférieure et supérieure de la variable courante.

Soit  $\bar{x}_i$  la moyenne arithmétique, exprimée ci-dessous :

$$\bar{x}_i = \frac{x_i^{\max} + x_i^{\min}}{2} \quad (3.33)$$

Soit  $P_i^x$  le pas médian, exprimé ci-dessous :

$$P_i^x = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2} \quad (3.34)$$

Soit  $x_i^c$  la variable centrée réduite associée à la variable courante, telle que  $x_i^c \in [0,1]$ .

$$x_{i\alpha}^c = \frac{\frac{x_i^r - \bar{x}_i}{P_i^x} + 1}{2} \quad (3.35)$$

$$x_{i\beta}^c = \frac{x_i^r}{x_i^{\max}} \quad (3.36)$$

Nous proposons d'introduire deux types de variable centrée réduite en raison de nos deux fonctions « objectif » (par addition et par multiplication). Ainsi  $x_{i\alpha}^c$  est associée à la fonction objectif notée  $f_1(s)$  et  $x_{i\beta}^c$  associée à  $f_2(s)$ .

## 5.8 Conclusion

Dans cette partie, nous avons pris en compte les exigences fonctionnelles et géométriques du produit, afin de vérifier l'assemblabilité du produit. Cette vérification a été intégrée dans notre algorithme ASDA par la définition de nouveaux mécanismes, tels que l'émergence de caractéristiques majeures d'assemblage (AKC) et la génération de toutes les séquences d'assemblage admissibles. Ainsi, l'espace des solutions admissibles a pu être réduit par la prise en compte de ces critères fonctionnels.

De plus, nous avons décrit une approche d'optimisation multi-objectif de l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles pour trouver la séquence d'assemblage optimale et robuste, en phase préliminaire du processus de développement de produits. Cette approche a pu être réalisée par l'introduction et la normalisation de critères de complexité fonctionnels et structurels, associés à chaque séquence d'assemblage admissible. L'introduction de cette approche d'optimisation est justifiée par le contexte réel de production, où la séquence d'assemblage résulte d'un ensemble de compromis entre les contraintes fonctionnelles, structurelles, géométriques et logistiques du futur produit à assembler.

## 6. Bilan

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la première partie de notre contribution scientifique dans le domaine de la conception proactive orientée assemblage et de la définition/planification des séquences d'assemblage.

Dès lors, nous avons décrit le modèle baptisé **MUVOA** (**M**ulti-**V**ues **O**rienté **A**ssemblage), et le cadre méthodologique **PASODE** (**P**roactive **A**Ssembly-**O**rienté **D**Esign), dans lequel une approche a fait l'objet d'une description détaillée et d'une évolution.

Ainsi, l'approche **ASDA** (**A**ssembly **S**equences **D**efinition **A**lgorithm) et son évolution pour garantir l'assemblabilité du produit ont été proposées, afin de définir la séquence d'assemblage optimale en phase préliminaire du processus de développement du produit [Demoly *et al.*, 2010a] [Demoly *et al.*, 2010c] [Demoly *et al.*, 2010d] ;

Nous pouvons conclure ce chapitre sur la nécessité de considérer les informations issues de la séquence d'assemblage et des relations du produit, afin d'apporter un contexte d'assemblage au sein du processus de développement des produits. Cette définition du contexte d'assemblage en contexte PLM, demandera de faire évoluer les approches actuelles de gestion des informations du couple produit-process, par l'introduction d'une approche de gestion des relations.

De plus, nous soulignons le besoin de développer et d'implémenter le modèle MUVOA, et le cadre méthodologique PASODE proposé, dans un outil informatique. De ce fait, nous pourrons appliquer le modèle et l'approche ASDA et son évolution décrites dans le cadre méthodologique PASODE à des cas industriels provenant de différents secteurs industriels, tels que le secteur automobile et le secteur aéronautique.

Nous proposons donc d'introduire, dans le chapitre suivant, la description de deux nouvelles approches intégrées au cadre méthodologique PASODE.

# Chapitre 4 .

## Approches pour la gestion des informations du couple produit-process en contexte PLM

*« Concevez toujours une chose en la considérant dans un contexte plus large [..]. »*

*Eliel Saarinen.*

### Contenu du chapitre

---

<b>1. Introduction.....</b>	<b>115</b>
<b>2. Définition du contexte d'assemblage dans le processus de développement .....</b>	<b>116</b>
2.1 Définition et structuration des informations produit (étape 1) .....	118
2.2 Définition et structuration des squelettes d'assemblage.....	120
2.3 Conclusion .....	128
<b>3. Gestion des relations du produit dans le contexte du PLM .....</b>	<b>130</b>
3.1 Nécessité d'apporter une meilleure interaction dans la gestion des informations du couple produit-process .....	131
3.2 Extraction des relations du produit.....	132
3.3 Propagation des informations via les vues du modèle MUVOA.....	133
3.4 Introduction d'une application PRM pour la gestion des relations du produit à l'interface des systèmes PDM, MPM, CAO .....	134
3.5 Conclusion .....	138
<b>4. Conclusion .....</b>	<b>139</b>



## 1. Introduction

Dans la continuité du chapitre précédent, nous proposons d'introduire, dans ce chapitre, la seconde partie de notre contribution scientifique dans le domaine de la gestion des informations du couple produit-process en contexte PLM.

Le chapitre précédent nous a permis de présenter et de décrire les mécanismes de l'algorithme ASDA, visant à générer toutes les séquences d'assemblage admissibles, et à les évaluer/optimiser, via des critères d'assemblabilité et de montabilité. Ceci a permis de trouver la séquence d'assemblage optimale en phase préliminaire du processus de développement. Les trois premiers objectifs du cadre méthodologique PASODE étant atteints, il s'agit maintenant d'aborder les deux derniers objectifs, qui visent à interpréter, exploiter et gérer les informations issues de la séquence d'assemblage générée et les informations relationnelles, afin d'apporter un contexte d'assemblage support au processus de développement des produits.

En conséquence, ce chapitre est organisé en deux parties distinctes dont l'articulation, au regard du cadre méthodologique PASODE, est représentée à la FIG. 44.

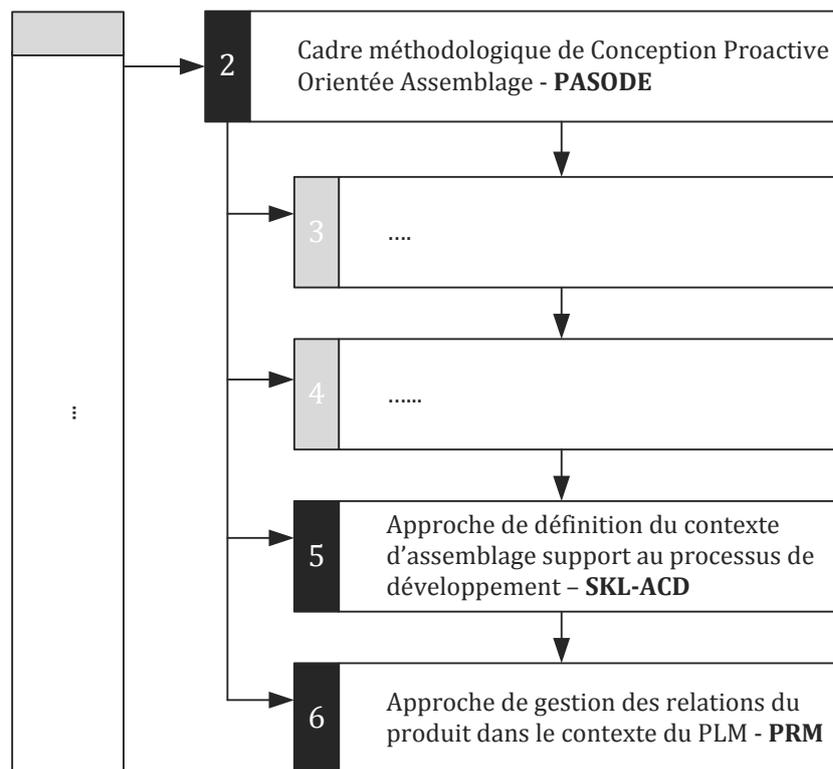


FIG. 44 — Représentation synoptique de l'organisation de ce chapitre

La première partie (cf. *Partie 2*) propose une approche, baptisée **SKL-ACD** (**SKeLeton-based Assembly Context Definition**), basée sur les squelettes géométriques pour la définition du contexte d'assemblage dans le processus de développement des produits. Ce contexte sera basé sur les intentions de conception et les informations issues de la séquence d'assemblage préalablement définie via l'algorithme ASDA. Les informations définissant le contexte portent sur divers aspects du produit, tels que sa vue structurelle, sa vue géométrique, etc.

La seconde partie (cf. *Partie 3*) présente une approche de définition des relations du produit, baptisée **PRM** (**P**roduct **R**elationships **M**anagement), dans le contexte de l'ingénierie intégrée et de la gestion du cycle de vie des produits [Demoly *et al.*, 2010e]. Cette approche vise à maintenir la cohérence entre les informations du produit et du processus d'assemblage, au sein du processus de développement, par une gestion des informations relationnelles.

Enfin, nous concluons ce chapitre sur la nécessité de développer et d'implémenter les approches proposées, développées dans le cadre méthodologique PASODE, dans un outil informatique s'intégrant aux systèmes PLM existants, afin d'apporter une meilleure interaction dans la gestion des informations du couple produit-process.

## 2. Définition du contexte d'assemblage dans le processus de développement

En cohérence avec le modèle MUVOA (cf. *Chapitre 3 Partie 2*) et le cadre méthodologique PASODE (cf. *Chapitre 3 Partie 3*), nous proposons une approche, baptisée **SKL-ACD** (**S**Ke**L**eton-based **A**ssembly **C**ontext **D**efinition), afin d'interpréter, d'exploiter les informations relationnelles et les informations issues de la séquence d'assemblage. Ces informations vont nous permettre de définir un contexte d'assemblage, support à la définition du produit, via les différentes vues identifiées. De ce fait, nous proposons de définir un contexte d'assemblage, basé sur des squelettes, dans une vision descendante et proactive du processus de développement des produits.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur la définition du contexte de conception établie par [Rehman & Yan, 2007] :

*« [...] The Design Context Knowledge can be defined as the related surrounding knowledge of a design problem at a given moment in time for consideration »*

Cette définition illustre bien le contexte, comme la prise en compte, à un instant donné, des connaissances liées à un métier pour résoudre un problème de conception. Les travaux de recherche dans le domaine de la conception pour le multi-X et de la modélisation du cycle de vie du produit ont souligné l'importance du contexte de conception [Borg & MacCallum, 1997] [Borg *et al.*, 1999] [Yan *et al.*, 2002]. Ceux-ci illustrent l'impact de la prise en compte des contraintes du cycle de vie des produits dans les différentes phases du processus de développement, tout en précisant les avantages et les inconvénients liés à la sélection d'une solution de conception. Dès lors, nous montrerons que la séquence d'assemblage a un impact sur la structuration et la modélisation géométrique du produit [Su, 2009].

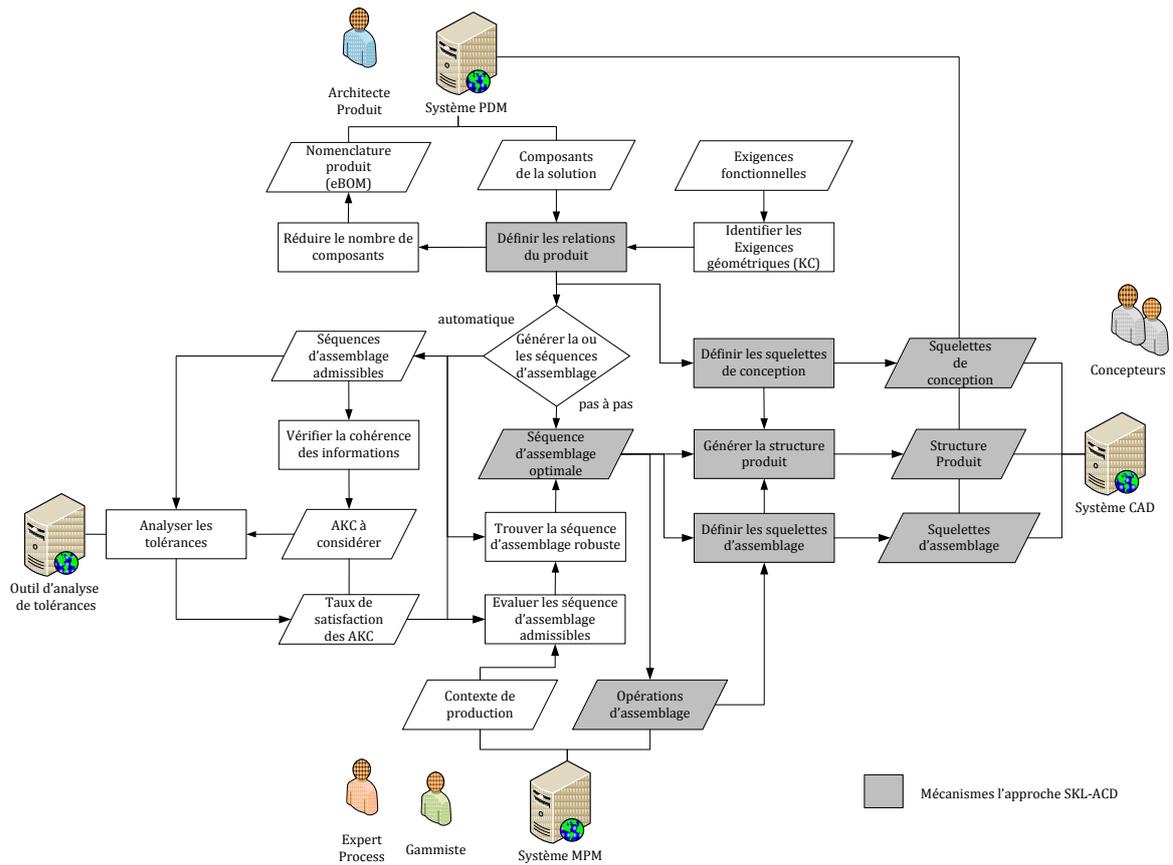


FIG. 45 — Approche SKL-ACD dans le cadre méthodologique PASODE

Cette partie s’inscrit dans le cadre méthodologique PASODE, de manière complémentaire aux approches présentées dans le chapitre précédent. La FIG. 45 présente les mécanismes grisés permettant la définition des informations support du processus de développement, et cohérentes avec la séquence d’assemblage préalablement définie via l’algorithme ASDA (cf. *Chapitre 3 Parties 4 et 5*).

Sur la base de ce troisième objectif du cadre méthodologique PASODE, un logigramme est introduit pour représenter l’approche SKL-ACD, dans laquelle chaque mécanisme, permettant la définition du contexte d’assemblage en phase préliminaire du processus de développement, sera décrit dans les paragraphes ci-après (FIG. 46).

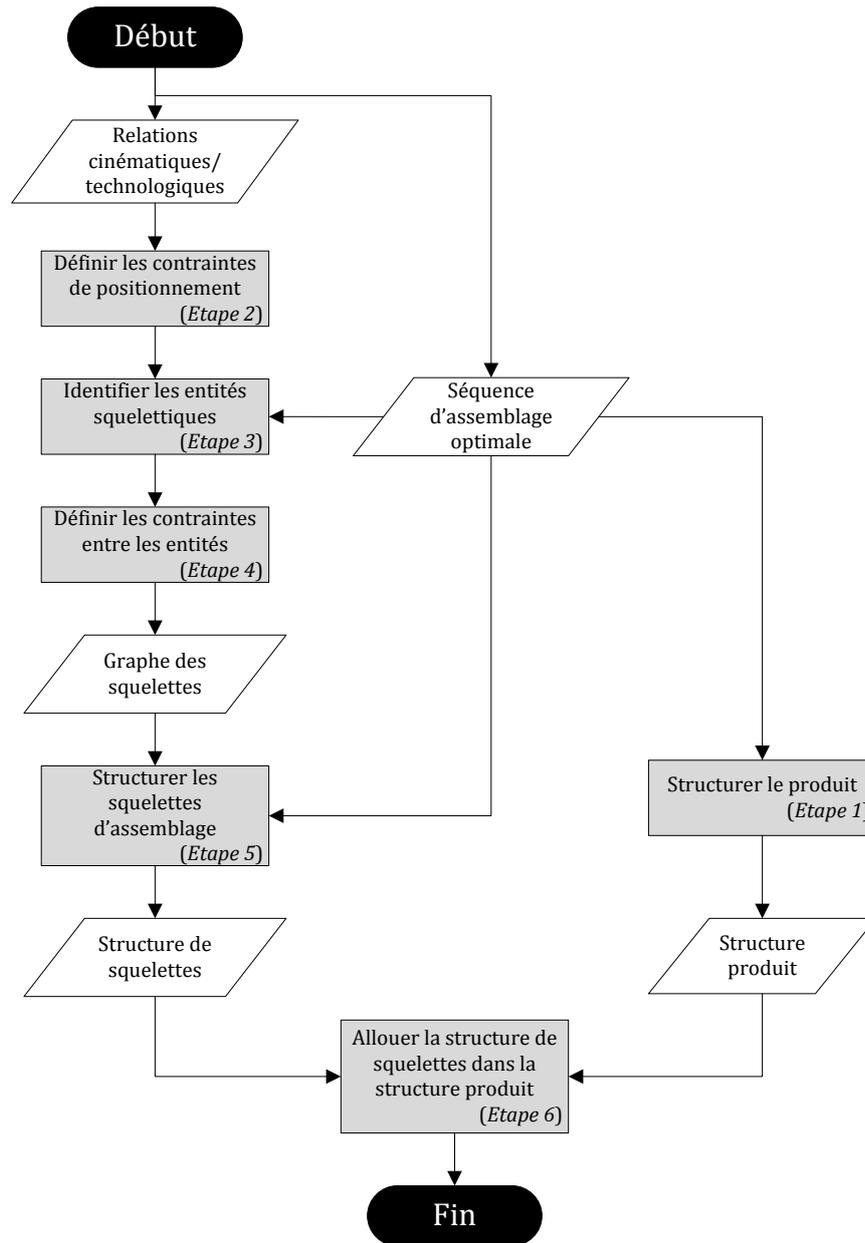


FIG. 46 —Logigramme décrivant les différentes étapes de l'approche SKL-ACD

## 2.1 Définition et structuration des informations produit (étape 1)

A la fin de la procédure ASDA, la séquence d'assemblage optimale est générée. Celle-ci est utilisée pour définir, dans un premier temps, la structure produit dans la vue « structurelle produit », considérée comme la colonne vertébrale du processus de développement [Tichem & Storm, 1997] [Schuh *et al.*, 2006] (FIG. 47). Les composants, qui initialement étaient sur le même niveau hiérarchique dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ , vont pouvoir être regroupés selon les sous-assemblages et les niveaux d'assemblage retenus par le gammiste.

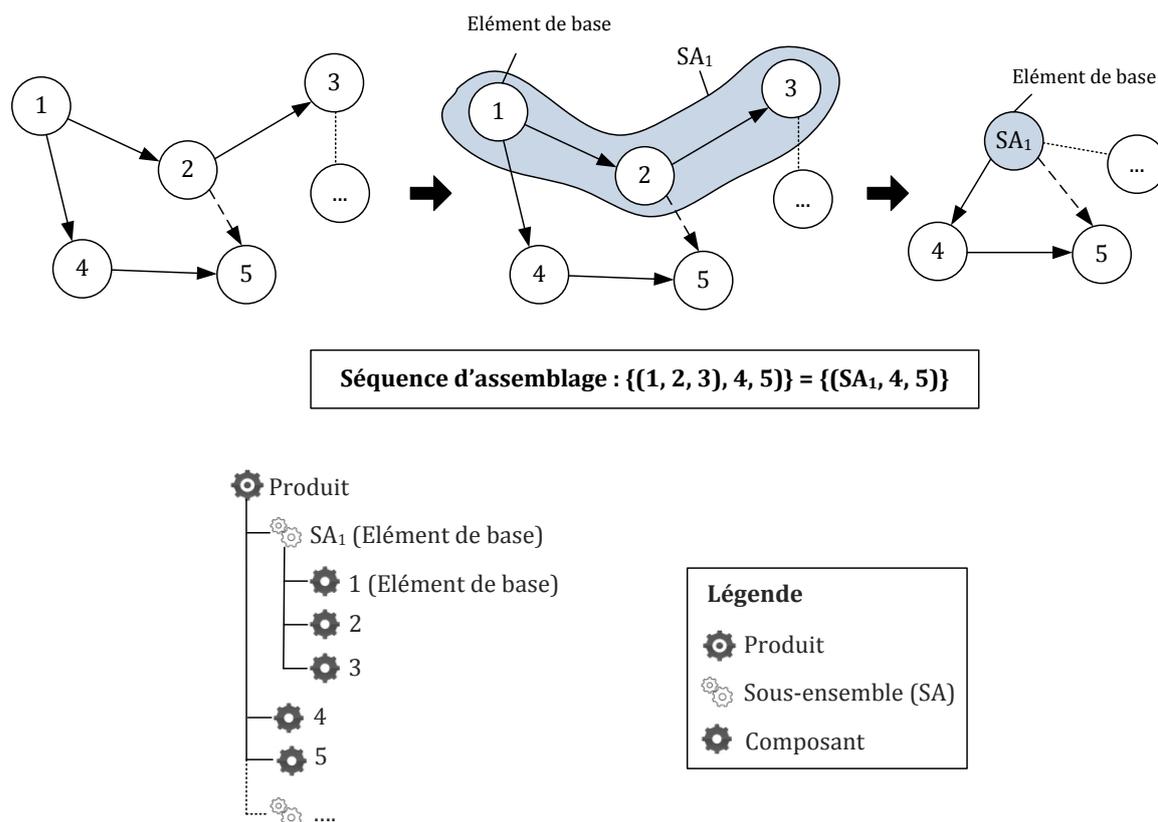


FIG. 47 — Structure produit définie à partir de la séquence d'assemblage et des états d'assemblage identifiés dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$

Nous proposons d'ici de décrire les différentes entités constituant la structure produit résultante :

- *le produit* : il représente le système à concevoir. Celui-ci est représenté à la racine de la structure et est considéré comme l'état final du processus d'assemblage (produit assemblé). Il contient par conséquent l'ensemble des configurations traduisant ses états d'assemblage (niveaux de sous-assemblages) ;
- *le sous-assemblage* (également appelé *produit intermédiaire*) : il représente l'assemblage de plusieurs composants, et est en cohérence avec les sous-assemblages retenus dans la séquence d'assemblage. Le sous-ensemble peut intégrer plusieurs niveaux de sous-ensembles. Celui-ci contient des informations sur le type d'assemblage et par conséquent le réseau de relations associé. La séquence d'assemblage nous permet de définir si le sous-assemblage est un élément de base ou un élément d'attachement ;
- *le composant* (également appelé *pièce élémentaire*) : il représente la pièce à assembler, et est donc affecté sur un niveau d'assemblage (configuration). La séquence d'assemblage nous permet de définir si le composant est un élément de base [Yeh & Urzi, 1996] ou un élément d'attachement.

**Remarque :** nous faisons l'hypothèse que la structure produit n'est pas figée. Dans certaines stratégies d'entreprise, la structure produit, telle qu'elle est

représentée dans les systèmes PDM, fait partie des standards et ne peut refléter la séquence d'assemblage. Il faudra dans ce cas définir un moyen de traçabilité, tel que l'approche **DSM** (**D**esign **S**tructure **M**atrix), afin de maintenir la relation entre les informations issues de la séquence d'assemblage et la structure produit déjà établie.

Cette structure produit définie en fonction de la séquence d'assemblage, et plus particulièrement en fonction de l'ordre d'assemblage, des états d'assemblage et des sous-assemblages retenus, peut être considérée comme la base du contexte d'assemblage que nous souhaitons définir. Nous proposons d'ajouter, sur cette structure, des éléments traduisant les informations portées par les relations définies dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ . C'est pourquoi, nous présentons ci-après la définition d'informations complémentaires, afin d'enrichir ce contexte d'assemblage.

## 2.2 Définition et structuration des squelettes d'assemblage

### 2.2.1 Interprétation/exploitation des relations du produit

Au cours de ce chapitre précédent, nous avons su exploiter les relations du produit et les informations associées, afin de définir la séquence d'assemblage optimale. Ces relations permettent de capturer les intentions de conception de l'architecte produit et les intentions d'assemblage, via la séquence d'assemblage en phase préliminaire du processus de développement. A partir de ces informations relationnelles, nous proposons de définir des éléments géométriques support à la modélisation du produit, que nous appelons « squelette ».

La définition de squelettes de conception a fait l'objet de divers travaux de recherche, notamment pour relier les intentions de conception et les procédés de fabrication, tel que l'usinage [Belloy, 1994] [Roucoules, 2007] [Skander *et al.*, 2008], ou pour filtrer les informations du produit dans le contexte de l'ingénierie collaborative [Mun *et al.*, 2009]. Les modèles squelette, considérés dans ces travaux de recherche, sont orientés composant et permettent de contrôler la géométrie en fonction du flux de matière. Mise à part les travaux portés sur les « features » d'assemblage [Bordegoni, 1995] [Shah & Rogers, 1993] [Deneux, 1999] [van Holland, 1997] [van Holland & Bonsvoort, 2000], très peu de travaux ont été portés sur les squelettes traduisant les informations d'assemblage du produit [Mantylas, 1990] [Csabai *et al.*, 2002] [Bley & Bossmann, 2006] [Chen *et al.*, 2009] [Wang, 2009]. Ceci est lié au manque d'intégration des informations liées au processus d'assemblage, dans le processus de développement des produits.

Dans notre contexte, nous proposons d'exprimer et de définir les squelettes de conception avec une orientation assemblage, c'est-à-dire que nous allons traduire les intentions de conception et d'assemblage sous forme d'éléments géométriques [Guiguère *et al.*, 2002], centralisant les informations relationnelles pour les différents états d'assemblage.

### 2.2.2 Description des squelettes d'assemblage

Afin de proposer un contexte de modélisation descendante liée aux informations relationnelles et à la séquence d'assemblage, nous proposons de décrire les entités

composant les squelettes d'assemblage. Ces entités sont les premiers éléments géométriques sur lesquels le concepteur peut s'appuyer pour la définition géométrique du produit à assembler. Ces éléments paramétrés peuvent contrôler le modèle géométrique en étant à l'interface des éléments solides et des relations du produit. Par ce biais, nous pouvons donc importer dans la vue « géométrique produit », les informations issues des vues « comportementale process » et « contextuelle produit ».

Nous décrivons ci-dessous les six entités squelettiques manipulées dans les squelettes d'assemblage, telles que :

- entité « *Point* » : cette entité décrit une position fixe pour situer les entités « plan », « repère », etc. ;
- entité « *Droite* » : cette entité décrit une contrainte d'alignement entre deux composants, et apporte un degré de liberté en rotation, en translation voire les deux. Cette entité permet de définir également l'axe d'assemblage des composants sur lequel nous pouvons ajouter une direction ;
- entité « *Plan* » : cette entité décrit une délimitation du volume du composant, ainsi qu'un arrêt en translation de celui-ci. Elle permet donc de définir une contrainte de contact entre deux composants ;
- entité « *Repère* » : cette entité décrit l'orientation dans laquelle l'assemblage doit se réaliser, et par conséquent l'orientation dans laquelle les différentes entités doivent être décrites ;
- entité « *Contrainte* » : cette entité décrit les contraintes entre les entités de type point, ligne, plan et repère, ainsi qu'entre les squelettes parent/enfant.
- entité « *Paramètre* » : cette entité décrit les paramètres influents l'assemblage des composants, ainsi que les paramètres dimensionnels liés aux contraintes entre les entités.

**Remarque :** la constitution du squelette d'assemblage peut être enrichie par l'apport d'entité de type « courbe », « interface » et « surface ». L'introduction des entités « interface » et « surface », décrivant les surfaces fonctionnelles, peut se justifier ici par la prise en compte des exigences géométriques et des spécifications associées dans la définition des relations du produit.

### 2.2.3 Allocation et structuration des squelettes d'assemblage

Défini dans la vue « géométrique produit », le squelette d'assemblage est associé à chaque niveau d'assemblage, et décrit le contexte d'assemblage pour le niveau d'assemblage sur lequel il se situe (FIG. 48) [Vielhaber *et al.*, 2004]. Ainsi, la structuration des squelettes est effectuée en cohérence avec la structure produit préalablement définie. Sur chaque niveau d'assemblage, le squelette d'assemblage centralise les relations de la configuration pour ce niveau, et contrôle le(s) squelette(s) directement associé(s) au(x) niveau(x) inférieur(s) (relation pilotant/piloté). Cela permet donc de définir une hiérarchie dans les relations du produit et favorise la propagation des informations relationnelles dans une approche

descendante. La FIG. 48 illustre l'allocation des squelettes d'assemblage dans la structure produit issue de l'exemple représenté dans la FIG. 47. Deux squelettes sont représentés en cohérence avec les deux niveaux d'assemblage identifiés. Ainsi, les deux squelettes d'assemblage sont associés à chaque niveau d'assemblage.

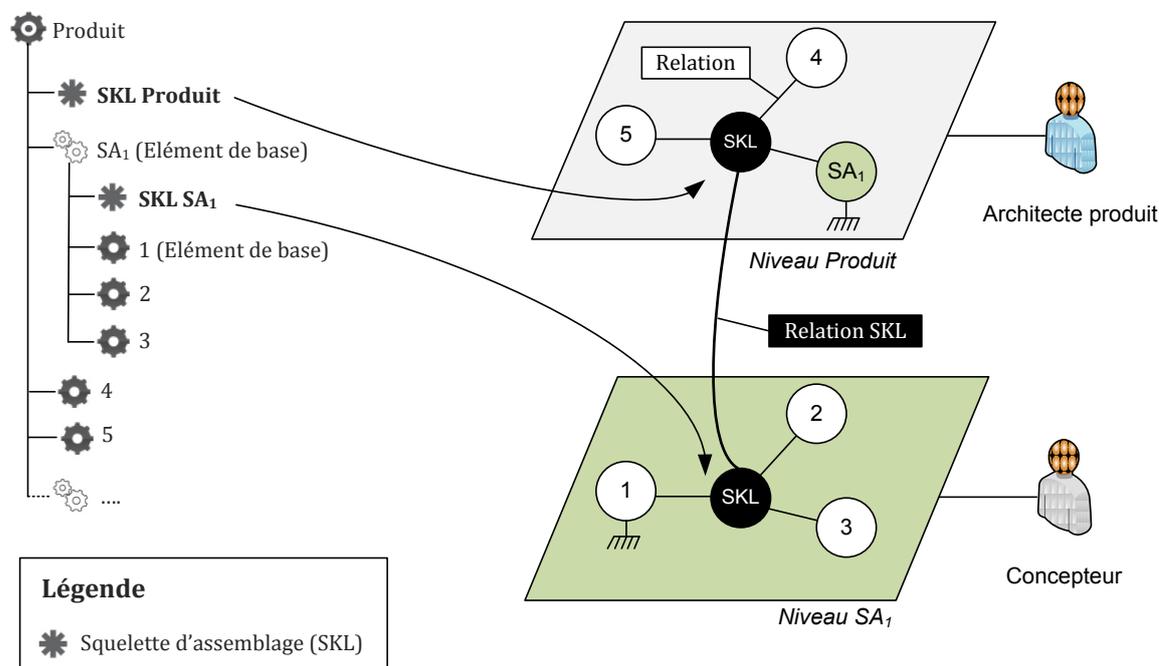


FIG. 48 — Allocation et structuration des squelettes d'assemblage en cohérence avec la structure produit

Sur la base de ces premiers éléments, nous définissons, ci-après, le contenu des squelettes d'assemblage ainsi que leurs relations. Les relations entre squelettes, représentées via la FIG. 48 par « Relation SKL », nécessitent l'introduction d'un nouveau graphe, afin de compléter et d'enrichir les relations parent-enfant couramment utilisées dans la structure produit.

### 2.2.4 Définition des repères d'assemblage

Sur chaque état d'assemblage dans la séquence d'assemblage, nous avons une configuration de composants assemblés (sous-ensembles) et non assemblés. Ces états d'assemblage sont représentés par différents niveaux dans la structure produit. De ce fait, nous proposons d'intégrer et de définir, dans chaque squelette d'assemblage alloué, un repère d'assemblage sur lequel les entités squelettiques et les repères des composants à assembler devront se positionner.

Le repère d'assemblage aura la même position que le repère de l'élément de base identifié sur son même niveau hiérarchique. Par contre, son orientation dépendra de l'orientation dans laquelle les composants/sous-ensembles du même niveau d'assemblage devront s'assembler. En effet, si pour des raisons d'instabilité, l'élément de base nécessite d'être réorienté afin d'accueillir les composants à assembler, il faudra alors procéder à un changement de repère par une ou plusieurs rotations de celui-ci.

Parmi les nombreuses représentations de rotations, telles que les représentations par matrices homogènes, par angles d'Euler et par Quaternions [Hamilton, 1866], nous proposons d'utiliser les angles d'Euler pour notre problématique de composition de rotations de repère.

**Remarque :** la représentation par Quaternions a fait l'objet de travaux de recherche dans notre domaine, en particulier pour représenter les trajectoires d'assemblage de composants via des compositions de translations et rotations de repères de composants [Rejneri, 2000]. Ce type de représentation pourra être envisagé si nous souhaitons combiner les rotations et les translations de repères.

De ce fait, nous proposons les conditions ci-dessous pour définir et transformer les repères d'assemblage appartenant à chaque squelette d'assemblage :

**Condition 1 :** | Si le sous-assemblage  $SA$  est stable,  
| **Alors** repère Sous-Assemblage = repère élément de base (FIG. 49) ;

**Condition 2 :** | Si le sous-assemblage  $SA$  est instable sur un axe quelconque,  
| **Alors** réorientation de l'élément de base **ET** changement de son repère par rotation avec point d'origine conservé (FIG. 50).

La première condition nous permet de définir un repère d'assemblage qui sera le repère de conception. Nous pouvons définir le repère de conception et le repère d'assemblage de la manière suivante :

Soit  $\mathcal{R}_{co} = (O, x_1, y_1, z_1)$  le repère de conception, associé à l'élément de base du sous-assemblage  $SA$  réalisé, dans sa pose naturelle liée à sa phase d'utilisation.

Soit  $\mathcal{R}_{as} = (O, u, v, w)$  le repère d'assemblage, associé à l'élément de base du sous-assemblage  $SA$  à réaliser, liée à la phase d'assemblage.

Dans le cas où le sous-assemblage  $SA$  répond à la Condition 1, alors  $\mathcal{R}_{as} = \mathcal{R}_{co}$ . Si celui-ci est instable (condition 2), une ou plusieurs rotations du repère de conception  $\mathcal{R}_{co}$  devront être effectuées, d'où l'expression intégrant une composition de rotations  $R_{co \rightarrow as}$  :

$$\mathcal{R}_{as} = R_{co \rightarrow as} \cdot \mathcal{R}_{co} \quad (3.29)$$

**Remarque :** dans le cas où le sous-assemblage instable nécessite plusieurs réorientations, plusieurs rotations du repère de conception  $\mathcal{R}_{co}$  seront nécessaires, et donc impliquera une composition de rotations, sur laquelle les différentes rotations du repère de conception devront s'effectuer dans un ordre précis.

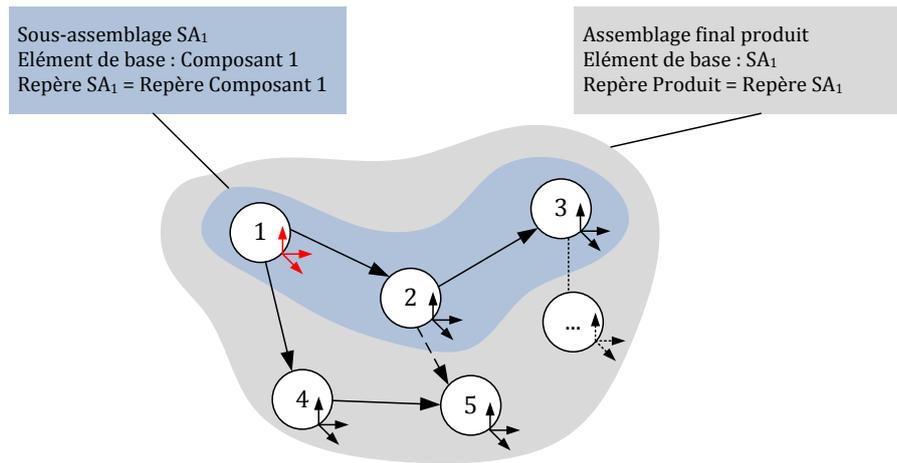


FIG. 49 — Définition du repère d'assemblage pour des assemblages stables

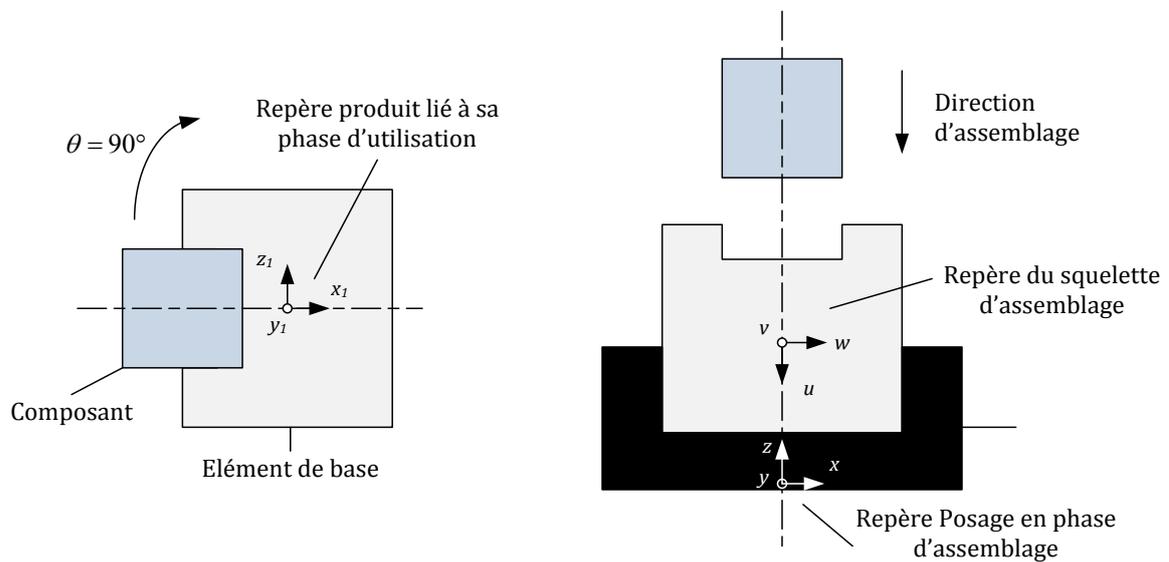


FIG. 50 — Changement de repère via la réorientation de l'élément de base pour un assemblage instable sur  $\vec{x}$

### 2.2.5 Entités squelettiques issues des relations du produit

Nous avons présenté précédemment la description et la structuration des squelettes d'assemblage en fonction des états d'assemblage du produit. Il s'agit dès à présent de prendre en considération les informations relationnelles du produit, afin de tisser le réseau de ces éléments support à la définition géométrique du produit. Nous proposons d'exploiter les relations cinématiques et technologiques pour faire émerger des compositions d'entités squelettiques. Les relations du produit, les compositions d'entités squelettiques, et les axes d'assemblage associés sont décrits dans TAB. 14 et TAB. 15. Ces compositions d'entités squelettiques, associées à chaque relation, doivent pouvoir être intégrées et générées pour l'ensemble des relations définies dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ .

## 2.2.6 Définition des contraintes entre les entités squelettiques

D'un point de vue local, les squelettes d'assemblage, relatifs à chaque relation du produit, peuvent faire émerger des contraintes entre leurs entités, telle que la contrainte de perpendicularité entre un axe et un plan du squelette d'assemblage pour une relation cinématique de type « pivot » (TAB. 14). Cette notion de « contrainte » doit pouvoir être introduite au sein du réseau de relations définie via le graphe  $\mathcal{G}$ .

Pour ce faire, nous proposons d'introduire un nouveau graphe appelé « *graphe des squelettes* », noté  $\mathcal{G}_{SKL}$ , afin de modéliser les relations et les contraintes entre les entités squelettiques associés à chaque relation entre les composants du produit. Ce graphe apporte une représentation complémentaire à la structure squelettique, allouée à la structure produit.

Pour définir ce nouveau graphe, nous avons besoin de définir et d'exploiter les relations cinématiques ou technologiques définies dans le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ . De par ces relations, celui-ci met en exergue des contraintes de positionnement entre les composants du produit. Conformément aux TAB. 14 et TAB. 15, nous allons exprimer ces contraintes sous la forme d'entités squelettiques situées à l'interface des composants à assembler.

Nous pouvons remarquer que l'enchaînement de ces étapes conduit à la définition d'un modèle squelette minimal, où chaque entité squelettique peut être le support de plusieurs relations. Cette contraction, du graphe des squelettes  $\mathcal{G}_{SKL}$ , découle des relations cinématiques/technologiques et des contraintes entre les entités squelettiques associées. A ce modèle squelette minimal, viennent s'ajouter les repères d'assemblage préalablement définis, en fonction des éléments de base issus de la séquence d'assemblage. L'introduction d'un ou plusieurs repères d'assemblage va engendrer des contraintes de positionnement spatial, entre les entités squelettiques, exprimées sous la forme de paramètres dimensionnels et angulaires.

L'exemple représenté via la FIG. 51 peut être identifié comme un motif d'assemblage défini dans le TAB. 11 désignant un « assemblage entremêlé ». Ce type d'assemblage a un pseudo-vecteur égal à (1, 2, 3), et équivalent à sa séquence d'assemblage. Cette information nous permet d'identifier le composant 1, comme étant l'élément de base, sur lequel les composants 2 puis 3 devront se positionner. Ainsi, la position repère d'assemblage de cet assemblage est associée à la position du repère du composant 1. Celui-ci fera l'objet d'une ou plusieurs rotations, ou non, en fonction des directions de stabilité de cet assemblage.

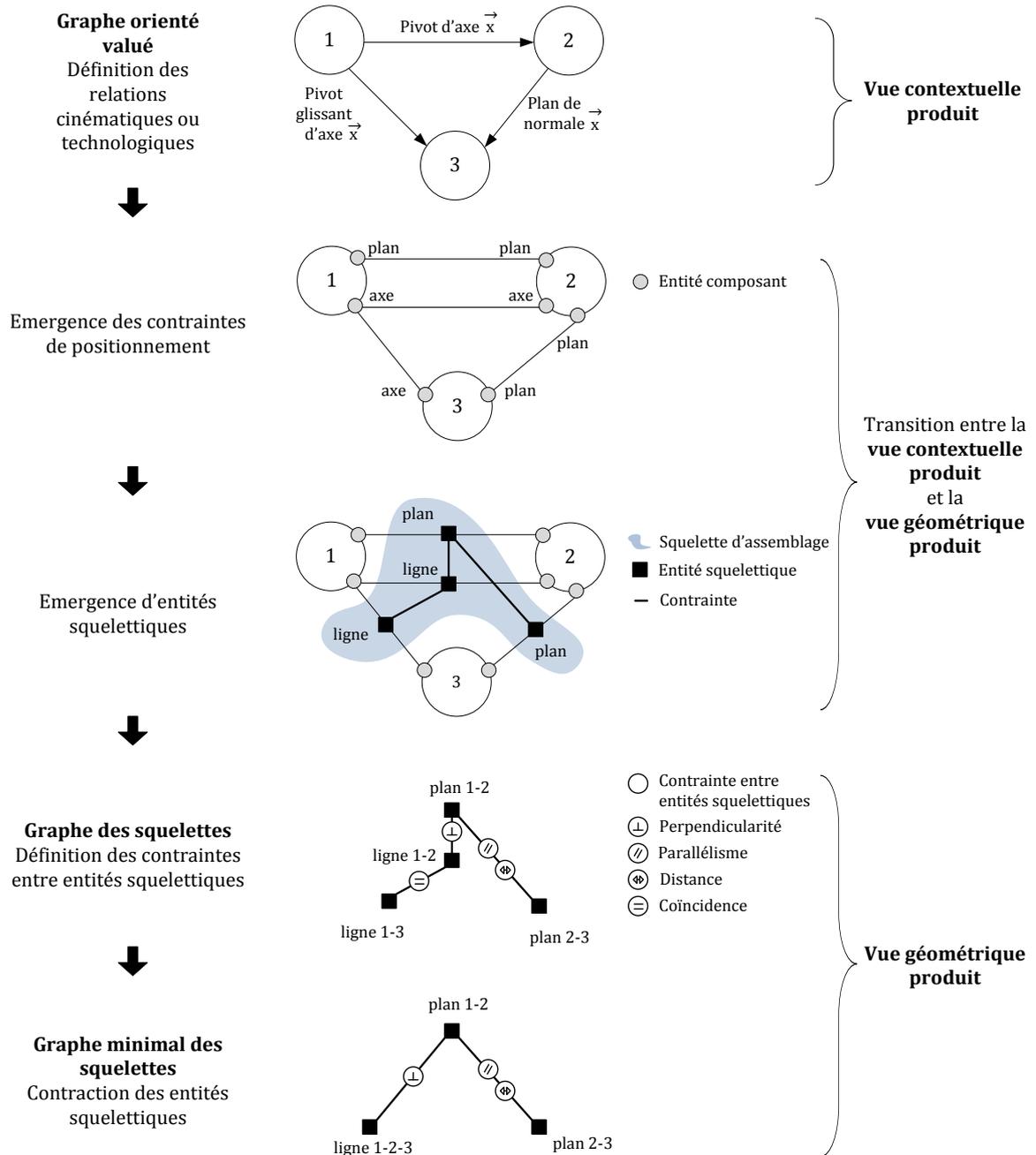


FIG. 51 — Définition d'un modèle squelette minimal

Les relations cinématiques de cet assemblage nous permettent de déduire que celui-ci est instable sur l'axe  $\vec{x}$ , ce qui par conséquent nécessitera une réorientation de l'élément de base (composant 1) pour que l'assemblage puisse s'effectuer sur l'axe  $\vec{z}$  (repère absolu). Cette réorientation engendre par conséquent un changement de repère (cf. *Paragraphe 2.2.4*). Une fois ce repère défini, nous proposons de le considérer comme étant une entité squelettique du modèle squelette minimal (FIG. 51), qui va permettre, soit de centraliser les contraintes entre les entités, soit de chaîner celles-ci, tel qu'illustré par la FIG. 52.

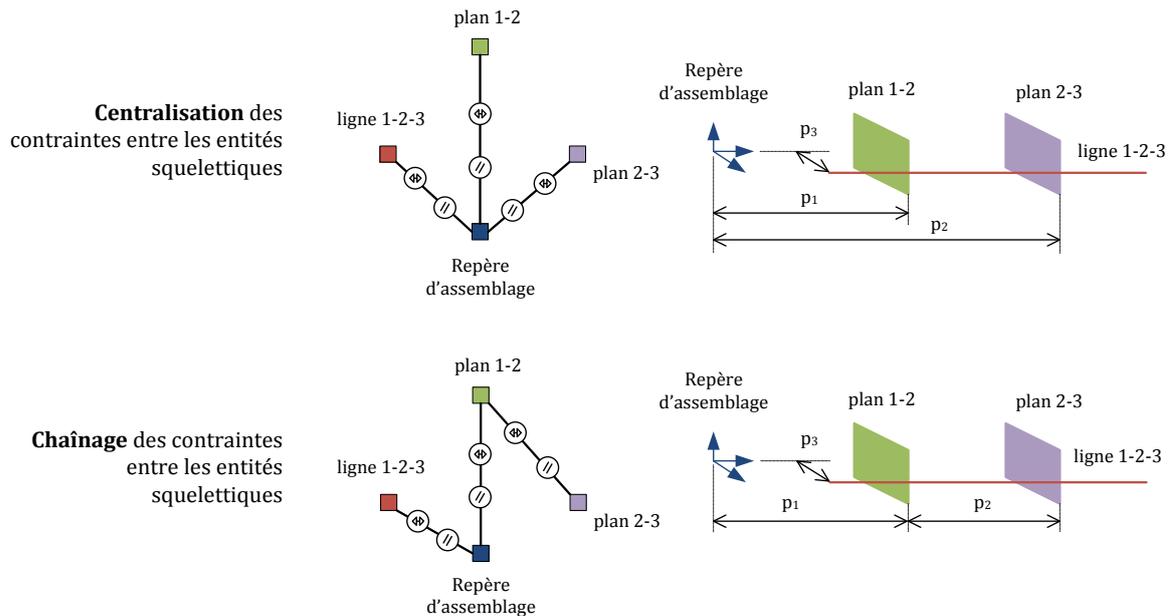


FIG. 52 — Impact de l'introduction du repère d'assemblage dans le modèle minimal de squelettes

**Remarque :** nous pouvons retrouver l'approche par centralisation des contraintes dans le secteur automobile, où le constructeur met généralement en place un repère véhicule, auquel tous les sous-ensembles viennent s'y référer. De cette manière, les relations peuvent être gérées via une matrice de position.

### 2.2.7 Définition des relations entre les squelettes d'assemblage

Nous avons défini précédemment le graphe de squelettes mettant en exergue les entités squelettiques, ainsi que les contraintes permettant de les relier en fonctions des relations cinématiques/technologiques. Nous considérons ici la structure de squelettes cohérente avec la structure produit (cf. *Paragraphe 2.2.3*). Celle-ci engendre des regroupements d'entités squelettiques et de contraintes. Le modèle squelette minimal, représenté par le graphe des squelettes  $\mathcal{G}_{SKL}$ , permet de définir des entités squelettiques communes à plusieurs composants.

De ce fait, lors de la structuration, ces entités squelettiques peuvent se retrouver à l'interface de deux squelettes d'assemblage (FIG. 53). Nous proposons d'introduire une information supplémentaire, afin de ne pas dupliquer ces entités dans chaque squelette. Pour être en cohérence avec la vision descendante, chaque squelette d'assemblage, situé à un niveau supérieur, doit piloter le squelette d'assemblage situé au niveau inférieur. Ceci a pour conséquence que chaque entité commune à deux squelettes de niveau différent sera définie comme :

- *entité directrice et publiée* : appartenant au squelette d'assemblage de niveau supérieur, cette entité pourra être modifiée à ce niveau ;
- *entité référencée* : appartenant au squelette d'assemblage inférieur, cette entité ne pourra pas être modifiée à ce niveau, et sera considéré comme une référence externe pour ce squelette.

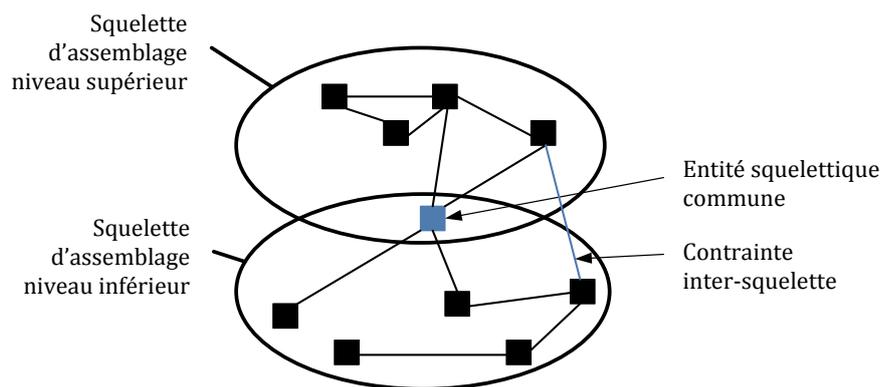


FIG. 53 — Entités squelettique à l'interface de deux squelettes d'assemblage

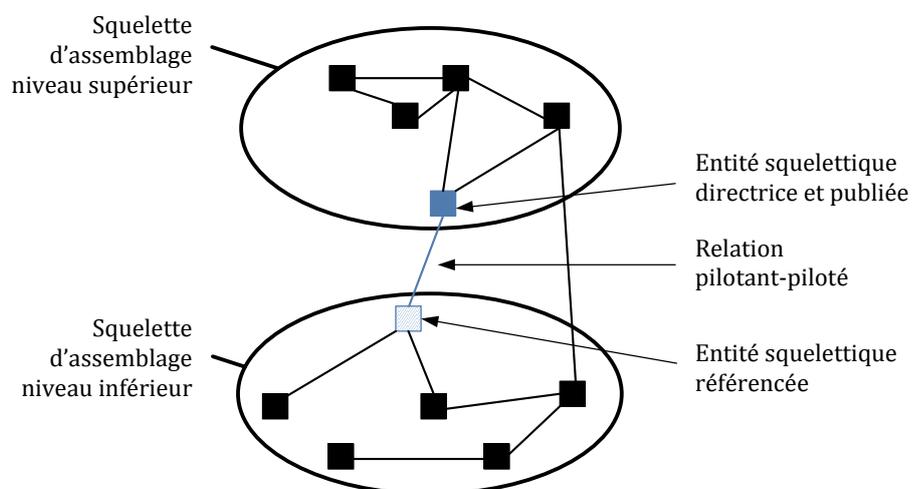


FIG. 54 — Introduction de deux entités pour séparer les deux squelettes d'assemblage de niveaux différents

## 2.3 Conclusion

Cette partie nous a permis de présenter l'approche SKL-ACD en cohérence avec le modèle MUVOA et le cadre méthodologique PASODE. Basée sur la définition de la séquence d'assemblage, cette approche permet d'apporter et de définir, dans une vision descendante, un contexte d'assemblage au sein du processus de développement des produits mécaniques. Ce contexte d'assemblage représente un ensemble d'informations définies dans différentes vues, telles que la « vue structurelle » et la « vue géométrique » du « domaine produit ».

Qui plus est, nous avons introduit la notion de « squelette d'assemblage », afin de garantir une cohérence entre les informations issues de la séquence d'assemblage traduisant les intentions d'assemblage, et les informations relationnelles traduisant les intentions de conception. Un graphe de squelette d'assemblage, baptisé « Graphe des squelettes » a été proposé pour représenter le modèle squelette minimal.

Par conséquent, ce contexte d'assemblage, basé sur les squelettes d'assemblage, peut être considéré comme une base, afin d'accueillir les interfaces entre les composants, qui elles-mêmes pourront piloter les surfaces fonctionnelles. De cette manière, les informations à différents niveaux d'abstraction peuvent être allouées à cette modélisation squelettique.

TAB. 14 — Squelettes d'assemblage définis par les relations cinématiques

Relation cinématique	Contrainte	Squelette d'assemblage			Degré de liberté (DOF)	
		Entité	Contrainte entre entités	Axe d'assemblage	Translation	Rotation
Encastrement	Repère-Repère	Repère	/	Quelconque	0	0
Pivot	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité	Axe de rotation	0	1
Glissière	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité	Axe de translation	1	0
Hélicoïdale	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité	Axe de rotation	0	1
Pivot glissant	Axe-Axe	Ligne	/	Axe de translation/rotation	1	1
Rotule	Point-Point	Point	/	Quelconque	0	3
Plan	Plan-Plan	Plan	/	Normale au plan	2	1
Ponctuelle	Point-Plan	Point + Plan	Coïncidence	Normale au plan	2	3
Linéaire rectiligne	Ligne-Plan	Ligne + Plan	Coïncidence	Plan perpendiculaire	2	2
Linéaire annulaire	Courbe-Courbe	Courbe	/	Axe de translation	1	3

TAB. 15 — Squelettes d'assemblage définis par les relations technologiques

Relation technologique	Contrainte	Squelette d'assemblage			Degré de liberté (DOF)	
		Entité	Contrainte entre entités	Axe d'assemblage	Translation	Rotation
Collage	Repère-Repère	Repère	/	Quelconque	0	0
Soudage	Repère-Repère	Repère	/	Quelconque	0	0
Vissage	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité	Axe de rotation	0	1
Rivetage	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité	Axe de rotation	0	1
Clavetage	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité	Axe de translation ou Normale au plan	1	0
Goupillage	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendiculaire	Axe de rotation	0	1
Pignon-Crémaillère	Courbe-Courbe	Lignes + Courbe	Distance	Axe de rotation	1	1
Engrenage	Axe-Axe et Courbe-Courbe	Lignes + Courbe	Distance	Axe de rotation	0	1

### 3. Gestion des relations du produit dans le contexte du PLM

Cette dernière partie vise à décrire la brique finale du cadre méthodologique PASODE (cf. *Chapitre 3 Partie 3*). Précédemment, nous avons mis en évidence l'importance des relations entre les composants du produit, que ce soit pour la définition des séquences d'assemblage admissibles via l'algorithme ASDA (cf. *Chapitre 3 Parties 4 et 5*), que pour la définition du contexte d'assemblage basée sur les squelettes via l'approche SKL-ACD (cf. *Chapitre 4 Partie 2*). Il s'agit ici de répondre au dernier objectif du cadre méthodologique PASODE, qui est de gérer les flux d'informations produit-process entre les différentes vues identifiées dans le modèle MUVOA (cf. *Chapitre 3 Partie 2*).

De manière plus précise et dans la continuité des approches développées dans le cadre méthodologique PASODE, nous proposons d'introduire une approche de gestion centrée sur les relations du produit, et baptisée **PRM (Product Relationships Management)**, afin de gérer les informations relationnelles, situées à l'interface du domaine du « produit » et du « processus d'assemblage ». De ce fait, en cohérence avec le paradigme de conception/gestion des relations du produit [Brown, 2006], l'approche PRM proposée se positionne dans le contexte de l'ingénierie intégrée, de la gestion des données techniques (GDT) et de la gestion du cycle de vie des produits (PLM) [Demoly et al., 2010e]. La Fig. 55 illustre ci-dessous le périmètre de l'approche PRM dans le cadre méthodologique PASODE.

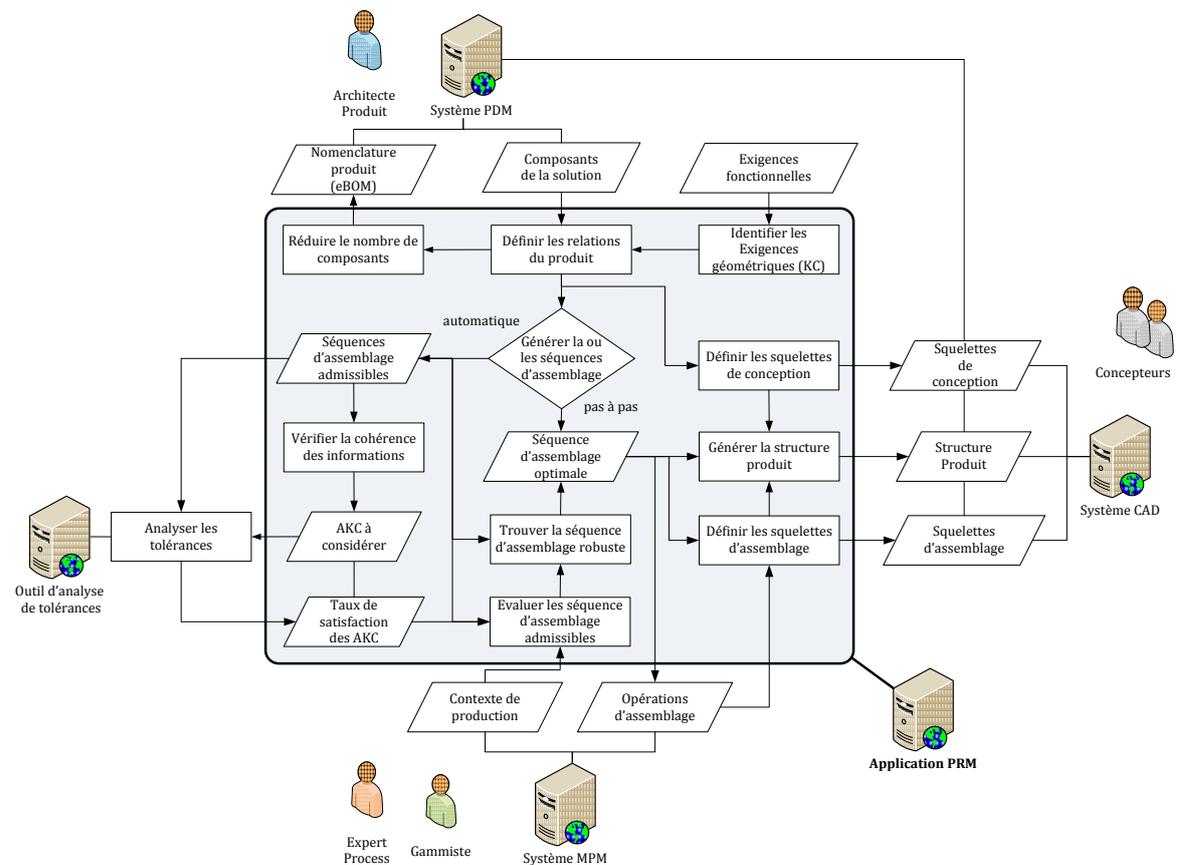


FIG. 55 — Périmètre de l'approche PRM dans le cadre méthodologique PASODE

### 3.1 Nécessité d'apporter une meilleure interaction dans la gestion des informations du couple produit-process

L'étude des divers travaux de recherche et des pratiques industrielles dans le domaine du PLM met en exergue des besoins en une gestion intelligente et efficace des informations à différents niveaux d'abstraction, afin de pouvoir intégrer les contraintes métiers dès les phases préliminaires du processus de développement des produits [Eppinger *et al.*, 1997] [Helms, 2002] [Roucoules, 2007].

Avec pour objectif principal de donner la bonne information au bon moment et à la bonne personne, les systèmes PDM ont mis en œuvre des fonctionnalités de gestion portées principalement sur les entités du produit, telles que la structure produit et la nomenclature, ainsi que sur les documents du produit, tels que le changement d'état, le versionnement, le workflow, etc. (cf. *Chapitre 2 Paragraphe 5.2.3.*). Ces mécanismes ont été repris dans les systèmes émergents de type MPM, dédiés à la gestion des informations du process, tel que le processus d'assemblage.

Cependant, il n'existe aujourd'hui quasiment aucune connexion entre les entités manipulées dans ces systèmes. La FIG. 56 souligne des mécanismes d'échange existants (importation et exportation) sur les structures de données, telles que les nomenclatures et les documents, entre les systèmes PDM, MPM et CAO, et des mécanismes de reconnaissances/réconciliation associés au système MPM.

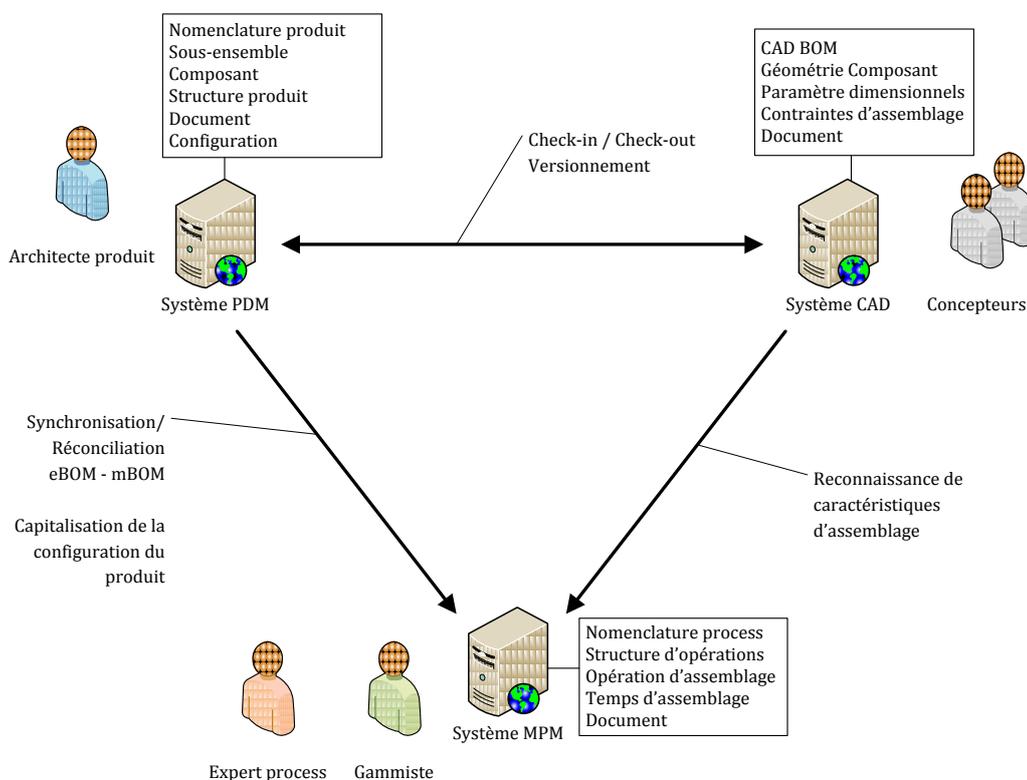


FIG. 56 — Connexions existantes entre les systèmes PDM, MPM et CAO

L'inconvénient de ces connexions réside en une non exploitation des informations relationnelles entre les objets techniques du couple produit-process. En effet, les

nomenclatures (produit et process) ne permettent pas de capitaliser les relations entre les objets techniques [Weber *et al.*, 2002]. Il en résulte que les réseaux de composants et d'opérations d'assemblage sont gérés de manière indépendante via les systèmes PDM et MPM (FIG. 57). Ce constat est en cohérence avec le besoin d'enrichissement du modèle produit, via les associations entre les objets techniques, afin de faciliter la compréhension du produit à travers son cycle de vie [Weber *et al.*, 2002] [Chen *et al.*, 2006b] [Tremblay *et al.*, 2006].

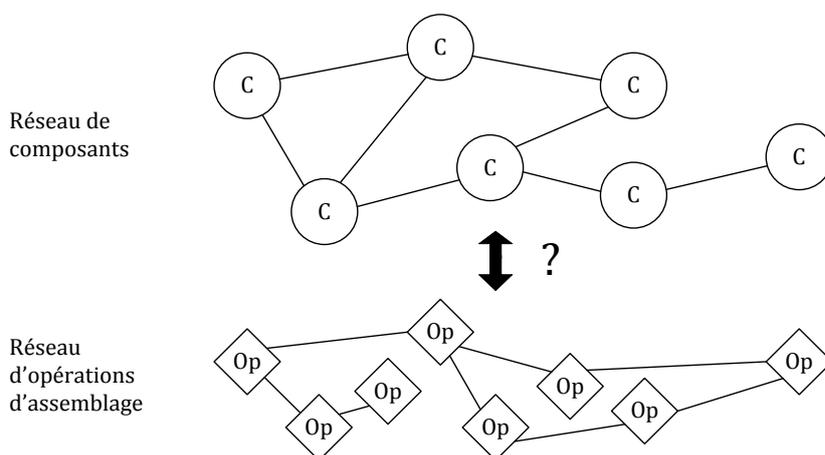


FIG. 57 — Réseaux de composants et d'opérations d'assemblage

De ce fait, l'apport d'une meilleure intégration, dans le domaine de la gestion des informations du couple produit-process, nécessite de considérer de nouveaux objets techniques ou d'extraire les informations existantes dans les documents d'ingénierie capitalisés dans ces systèmes, et de les gérer à différents niveaux d'abstraction [Bradley & Maropoulos, 1998]. Nous proposons de faire l'analogie de ces approches associées à ces systèmes, à notre contexte de conception orientée assemblage, en nous focalisant dans un premier temps sur l'extraction de l'objet technique « relation ».

### 3.2 Extraction des relations du produit

Le chapitre précédent nous a permis de mettre en évidence l'introduction d'informations relationnelles entre les composants du produit pour la phase de définition des séquences d'assemblage admissibles, en phase préliminaire du processus de développement. Cette intégration, en amont du processus de développement, nécessite de travailler avec des données et informations préliminaires, et donc d'avoir un suivi sur l'évolution des différentes vues dans les domaines considérés. Par conséquent, nous soulignons l'importance de gérer les relations, afin de faciliter et contrôler la propagation des informations entre le domaine du « produit » et le domaine du « processus d'assemblage ».

La FIG. 58 décrit l'externalisation des informations relationnelles, provenant des réseaux de composants et d'opérations d'assemblage (FIG. 57). De cette manière, les informations relationnelles traduisant les intentions de conception et d'assemblage du produit, sont centralisées et permettent de relier deux composants avec une ou plusieurs opérations d'assemblage. Nous avons également représenté, dans la FIG. 58, le flux fonctionnel passant par ses relations, afin de savoir quelle relation réalise les fonctions de service du produit. Ce

flux fonctionnel est une extraction du flux fonctionnel défini dans le **Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF)**.

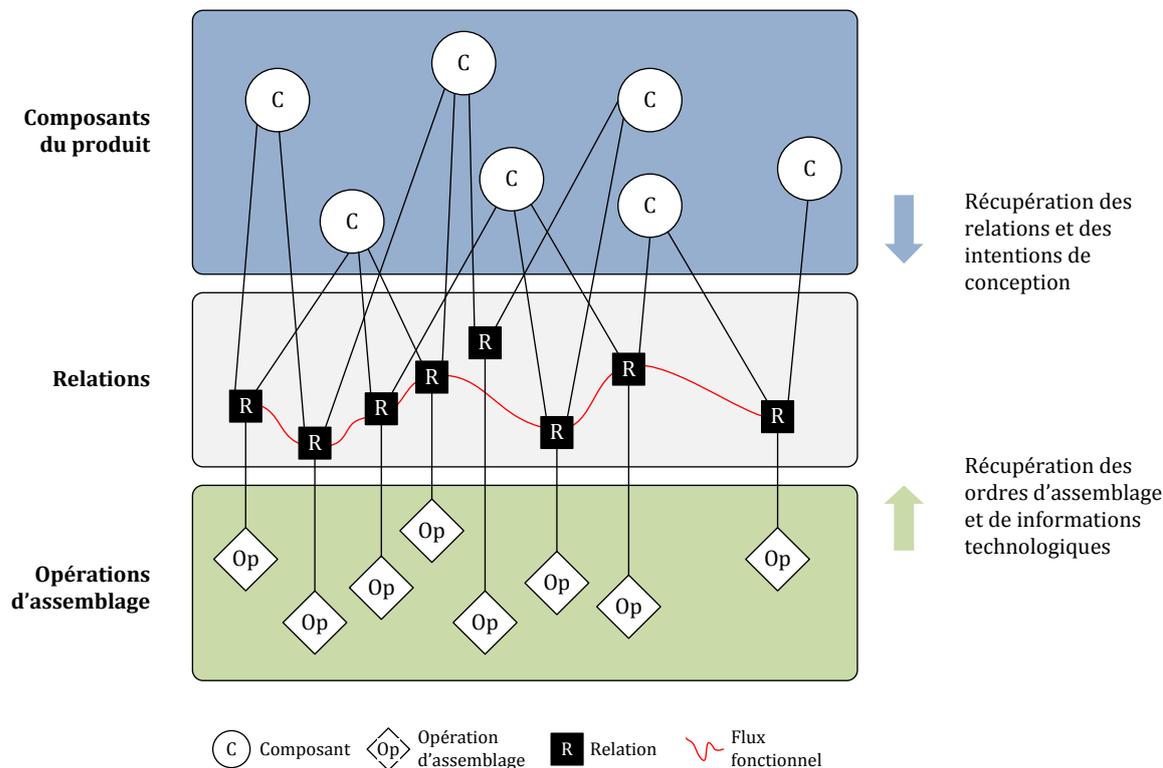


FIG. 58 — Extraction des relations traduisant les intentions de conception et d'assemblage

Dès lors, dans ce contexte, une modification d'une relation impactera les composants et les opérations d'assemblage associés. De même, une modification d'une opération d'assemblage, impactera la relation et les composants associés. D'une manière plus globale, et en cohérence avec le cadre méthodologique PASODE, cette modification impactera non seulement les entités connexes mais également les vues définies dans le modèle MUVOA. Nous allons donc aborder, dans le paragraphe suivant, les dépendances entre les vues du modèle MUVOA, afin d'identifier les flux d'informations.

### 3.3 Propagation des informations via les vues du modèle MUVOA

Conformément au modèle MUVOA (cf. *Chapitre 3 Partie 2*), le cadre méthodologique PASODE nous a permis de définir les différentes vues décrites dans les domaines du « produit » et du « processus d'assemblage ». De manière à représenter les flux d'informations du couple produit-process, nous avons représenté, via la FIG. 59, les dépendances entre les vues du modèle MUVOA.

Nous pouvons constater que les vues « contextuelle produit » et « comportementale process » jouent un rôle majeur dans le flux d'informations, car situées au carrefour des vues structurelle, fonctionnelle, technologique et géométrique. Ceci peut se justifier par la capitalisation des intentions de conception et d'assemblage dans ces deux vues.

Par conséquent, le graphe (FIG. 59) décrivant les dépendances et les flux d'informations nous permet d'identifier les vues qui seront impactées en fonction de l'évolution de l'une

d'entre elles, qui correspondra à : soit l'évolution du produit, soit l'évolution du processus d'assemblage à différents niveaux d'abstraction. L'aspect proactif est souligné ici par le caractère bidirectionnel entre le domaine du « produit » et du « processus d'assemblage ». Par exemple, la séquence d'assemblage définie dans la vue « comportementale process » impactera la structure produit définie dans la vue « structurelle produit », et de même pour la définition géométrique du produit via la vue « géométrique produit ».

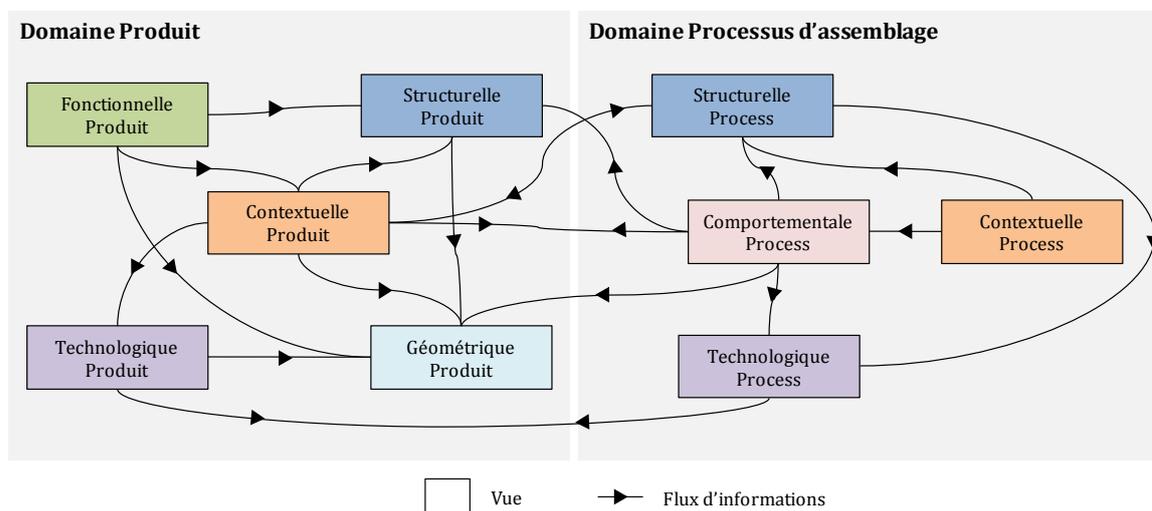


FIG. 59 — Graphe décrivant les dépendances et les flux d'informations entre les vues du modèle MUVOA

De plus, chaque mécanisme décrit dans l'algorithme ASDA et dans l'approche SKL-ACD demande d'exploiter les relations à différents niveaux d'abstraction. Il arrive que, pour des raisons de cohérence, une ou plusieurs relations demandent à être modifiées.

Nous avons présenté le besoin de gérer les vues en fonctions des flux d'informations, il s'agit maintenant de décrire ces impacts via les associations existantes dans les systèmes PLM. Le paragraphe suivant décrit donc l'introduction d'une application à l'interface des systèmes PLM permettant de gérer les relations, et de propager les informations relationnelles dans les vues, via les associations.

### 3.4 Introduction d'une application PRM pour la gestion des relations du produit à l'interface des systèmes PDM, MPM, CAO

#### 3.4.1 Objectif de l'application PRM

L'application PRM que nous proposons s'intègre dans la stratégie PLM, en favorisant les échanges d'informations préliminaires à l'interface des systèmes PDM, MPM, et CAO. Cette application a pour objectif d'améliorer les capacités en termes de flexibilité et d'interaction des systèmes PDM et MPM pour la gestion intégrée du couple produit-process, par la mise en œuvre d'une gestion des relations du produit. Aujourd'hui, les fonctionnalités des systèmes PDM et CAO ne permettent pas de fournir une vue interne des relations dans la définition du produit. C'est la raison pour laquelle, nous illustrons par la FIG. 60, l'introduction d'une application PRM visant à contrôler et orchestrer les flux d'informations

entre les systèmes PLM connexes, et à gérer des objets techniques complémentaires aux entités gérées dans ces systèmes, que sont les relations. Cette nouvelle vision se voit cohérente avec les objectifs développés dans le cadre méthodologique PASODE, qui est de pouvoir propager le plus tôt possible les informations entre le domaine du « produit » et du « processus d'assemblage ».

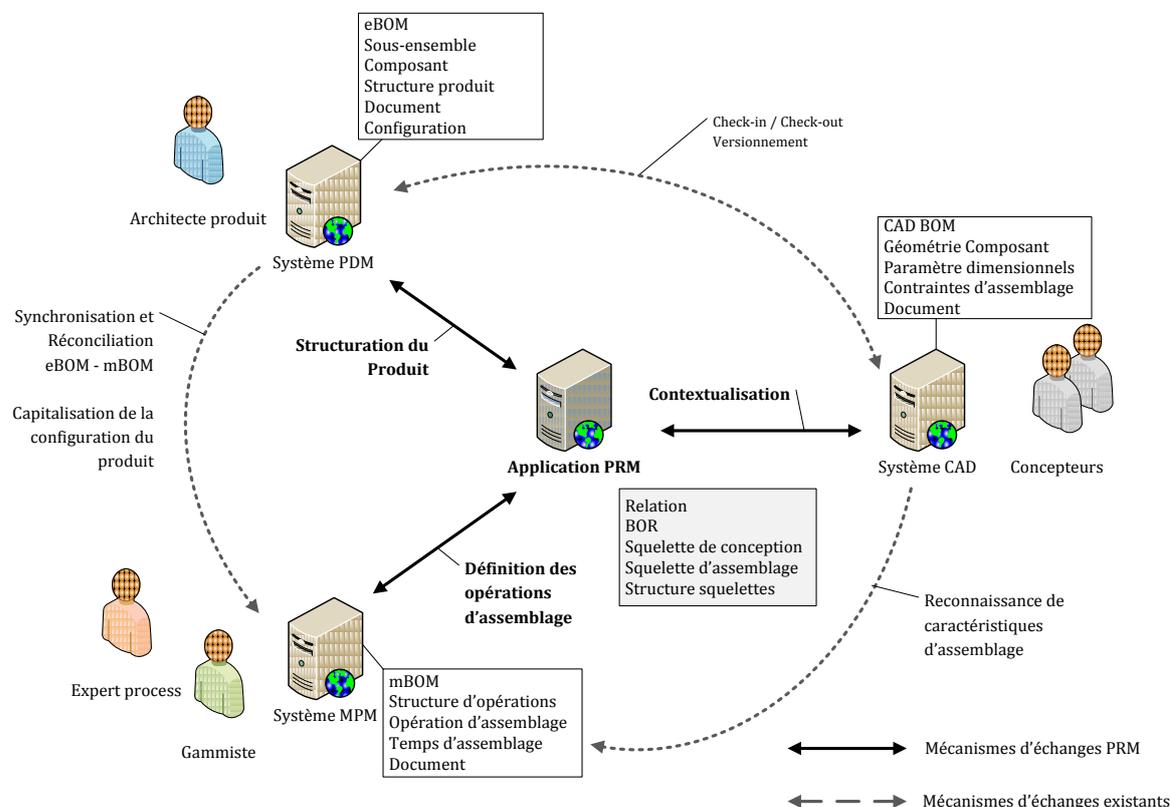


FIG. 60 — Application PRM à l'interface des systèmes PDM, MPM et CAO

### 3.4.2 Description des fonctionnalités du système PLM

Nous avons décrit dans le chapitre 2 (cf. *Paragraphe 5.2.3*), les entités manipulées (TAB. 4) et les fonctionnalités (TAB. 3) pour les systèmes PDM et MPM. L'extraction de l'objet technique « relation » nécessite donc d'adapter les fonctionnalités de gestion pour contrôler les flux d'informations entre les domaines du « produit » et du « processus d'assemblage ».

Les systèmes de gestion des informations dans le contexte du PLM font appel à des fonctions de définition, de modification et de validation des informations du produit [Toussaint *et al.*, 2010]. Ces fonctions peuvent être retrouvées dans le cadre méthodologique PASODE, où divers mécanismes de définition, vérification, émergence et validation des informations relationnelles à différents niveaux d'abstraction, tels que définis dans le modèle MUVOA, ont été présentés dans les *Parties 4 et 5* du *Chapitre 3*. Nous introduirons un cycle de vie de la relation, ceci afin d'être en cohérence avec les mécanismes de l'algorithme ASDA.

La gestion de ces relations est étroitement liée aux informations entrantes et sortantes de l'application PRM. Nous avons présenté, dans le *Paragraphe 3.3*, le fait que la vue « contextuelle produit » est au carrefour de plusieurs vues du domaine du « produit » et du « processus d'assemblage ». Dès lors, les paragraphes suivants vont nous permettre de

décrire comment les relations vont impactées ces vues, via les associations entre les objets techniques et la définition des entités pour ces systèmes (PDM, MPM, et CAO).

### 3.4.3 Gestion des associations dans les systèmes PLM

Sur la base des vues identifiées dans le modèle MUVOA (cf. *Chapitre 3 Partie 2*), nous proposons de définir une typologie des associations entre objets techniques dans les systèmes PLM, basée sur la typologie préétablie par [Maurino, 1995]. Dans ce cadre, nous exprimons les différentes associations que nous allons exploiter dans l'application PRM, et telles que définies ci-dessous :

- *lien de composition* : décrit un lien entre un produit et ses composants dans le domaine du « produit », ou entre la gamme et ses opérations d'assemblage dans le domaine du « processus d'assemblage » ;
- *lien d'interface* : décrit un lien entre deux composants dans un même assemblage (lien d'interface interne) ou dans des sous-assemblages différents (lien d'interface externe) ;
- *lien de représentation* : décrit un lien entre un objet technique et ses documents ;
- *lien de projection* : décrit un lien entre un objet technique et une vue métier ;
- *lien de précéden*ce : décrit une antécédence entre deux opérations d'assemblage ;
- *lien temporel* : décrit un lien entre deux opérations d'assemblage.

Afin de pouvoir gérer ces associations, il est important de connaître le positionnement des vues du modèle MUVOA dans l'application PRM et les systèmes PDM, MPM et CAO. De ce fait, le TAB. 16 décrit l'allocation des différentes vues identifiées dans le modèle MUVOA (cf. *Chapitre 3 Paragraphe 2.2.2*) à l'application PRM et aux systèmes PLM.

TAB. 16 — Allocation des vues du modèle MUVOA aux systèmes PLM

Domaine	Vue	Système PLM associé			
		PRM	PDM	MPM	CAO
Produit	Fonctionnelle	X			
	Contextuelle	X			
	Technologique	X			
	Structurelle		X		
	Géométrique	X			X
Processus d'assemblage	Structurelle			X	
	Contextuelle	X		X	
	Comportementale			X	
	Technologique			X	X

Nous soulignons ainsi l'intérêt d'introduire l'application PRM pour gérer les informations dans des vues complémentaires, aux vues existantes dans les systèmes PLM connexes.

Sur la base de ces informations, nous allons pouvoir décrire les actions réalisées dans l'application PRM, utilisant les mécanismes définis dans le cadre méthodologique PASODE, qui vont impacter les systèmes PLM via les associations (TAB. 17). Par exemple, la définition des relations de contact direct entre deux composants va créer, au sein du système PDM, un lien d'interface entre ces deux entités (correspondant à la première ligne du tableau ci-dessous). De la même manière, le mécanisme de définition des relations d'ordonnancement entre deux composants va créer un lien de précedence dans le système MPM entre deux opérations (voir deuxième ligne du même tableau).

TAB. 17 — Gestion des associations dans l'application PRM

Mécanismes PASODE	Association	Système PLM	Action PRM
Définition des relations de contact direct	Lien d'interface	PDM	Création
Définition des relations d'ordonnancement	Lien de précedence	MPM	Création
Définition des relations cinématiques/technologiques	Lien d'interface	CAO	Création
Définition des séquences d'assemblage admissibles	Lien temporel	MPM	Création
Vérification de la cohérence des informations	Lien de projection	PDM	Modification relations cinématiques/technologiques
Définition des squelettes de conception	Lien de composition/ Lien d'interface	CAO	Projection des relations cinématiques/technologiques
Définition de la structure produit	Lien de composition Lien d'interface interne/externe	PDM – CAO	Projection de la séquence d'assemblage
Définition des squelettes d'assemblage	Lien de composition Lien de représentation	PDM - CAO	Projection de la séquence d'assemblage
Définition des opérations d'assemblage	Lien de composition	MPM	Projection des relations technologiques

### 3.4.4 Définition de la liste des relations

Afin de favoriser les échanges d'informations entre le domaine du « produit » et du « processus d'assemblage », nous proposons d'introduire le concept de « liste des relations » (*Bill of Relation – BOR*). La nomenclature, telle qu'utilisée dans les systèmes PDM (nomenclature produit – eBOM), CAO (nomenclature CAO – CADBOM) et MPM (nomenclature process – mBOM), permet de capitaliser l'état du produit et du processus d'assemblage à un instant  $t$  du processus de développement. Dès lors, le concept BOR

apporte une vision complémentaire sur l'état du produit en lien avec l'état de son processus d'assemblage.

Pour maintenir une communication étroite avec les systèmes PDM, MPM et CAO, le concept de BOR pourra être orienté vers chacun de ces systèmes, tel que :

- *BOR orientée PDM* : liste des relations décrivant les liens de composition, d'interface (interne/externe) et de représentation des composants du produit. Ce type de liste est généré et piloté par les vues « contextuelle produit » et « comportementale process », permettant ainsi de définir la structure produit ;
- *BOR orientée MPM* : liste des relations décrivant les liens de composition, de précédence et temporel des opérations d'assemblage. Ce type de liste est généré et piloté par les vues « contextuelle produit », « technologique produit », « contextuelle process » et « comportementale process », permettant ainsi de définir la structure d'opérations d'assemblage ;
- *BOR orientée CAO* : liste des relations décrivant les liens de composition, d'interface (externe/interne) des entités squelettiques. Ce type de liste est généré et piloté par les vues « contextuelle produit », « structurelle produit » et « comportementale process », permettant ainsi de définir la structure de squelettes.

Ces différentes listes de relations permettent à l'application PRM d'échanger les informations avec les systèmes PDM, MPM et CAO, conformément aux associations définies dans le TAB. 17.

### 3.5 Conclusion

Dans cette dernière partie, nous avons proposé une approche de gestion des relations du produit. Celle-ci vise apporter une cohérence dans la gestion des informations du couple produit-process, par l'introduction de l'objet technique « relation » situé à l'interface de ces deux domaines. Cette dernière brique du cadre méthodologique PASODE souligne l'importance d'extraire les relations du produit pour améliorer les capacités des systèmes PLM. L'exploitation et la gestion des relations, à l'extérieur des systèmes PDM, MPM et CAO, permet de mettre en évidence l'aspect flexible, dynamique et proactif du cadre méthodologique PASODE.

L'implémentation de l'approche PRM, dans une application PRM à l'interface de ces systèmes souligne le besoin d'introduire des fonctionnalités complémentaires à celle existantes dans les systèmes PDM et MPM. Dans ce contexte, nous avons proposé des mécanismes de gestion d'associations en lien avec les mécanismes développés dans le cadre méthodologique PASODE. Ceci a eu pour objectif d'impacter ou de définir les vues appartenant aux systèmes connexes de l'application PRM au regard des flux d'informations préalablement définis (FIG. 59). De manière plus précise, nous avons introduit le concept de « liste de relations » (BOR), afin de capitaliser l'état du produit en lien avec l'état du processus d'assemblage.

Cette partie nous a permis d'introduire un nouveau concept dans le contexte du PLM, afin d'apporter une meilleure interaction dans la gestion des informations du couple produit-

process. Ces premiers éléments pourront donc servir de base pour les travaux futurs, autant sur l'aspect gestion du contenu, sur le maintien de la traçabilité entre les objets techniques appartenant à ces systèmes, et sur l'aspect d'interopérabilité.

## **4. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté notre contribution scientifique dans le domaine de la conception orientée assemblage et du PLM. Dès lors, nous avons proposé et décrit le modèle **MUVOA** (**M**ulti-**V**ues **O**rienté **A**ssemblage) et le cadre méthodologique **PASODE** (**P**roactive **A**ssembly-**O**riented **D**esign), dans lequel trois approches ont été décrites de manière détaillée :

- l'approche **ASDA** (**A**ssembly **S**equences **D**efinition **A**lgorithm), afin de définir la séquence d'assemblage optimale en phase préliminaire du processus de développement des produits [Demoly *et al.*, 2010a] [Demoly *et al.*, 2010c] [Demoly *et al.*, 2010d] ;
- l'approche **SKL-ACD** (**S**KeLeton-based **A**ssembly **C**ontext **D**efinition), qui exploite les informations relationnelles et les informations provenant de la séquence d'assemblage, pour apporter un contexte d'assemblage au sein du processus de développement ;
- l'approche **PRM** (**P**roduct **R**elationships **M**anagement) qui permet de gérer les relations du produit, afin de promouvoir une gestion intégrée des informations relatives au domaine du « produit » et du « processus d'assemblage » [Demoly *et al.*, 2010e].

Nous concluons ce chapitre sur la nécessité de développer et d'implémenter le modèle MUVOA, et le cadre méthodologique PASODE proposé, dans un outil informatique de type PRM et s'intégrant aux systèmes PLM existants, afin de permettre une gestion efficace des informations du couple produit-process. De ce fait, nous pourrions appliquer le modèle et les approches décrites dans PASODE à des cas industriels provenant de différents secteurs industriels, tels que l'automobile, l'aéronautique et l'outillage portatif.



# Chapitre 5 .

## Développement de l'application PEGASUS et expérimentations industrielles du cadre méthodologique PASODE

*« L'esprit n'use de sa faculté créatrice que  
quand l'expérience lui en impose la  
nécessité. »*

*Henri Poincaré.*

### Contenu du chapitre

---

<b>1. Introduction.....</b>	<b>143</b>
<b>2. Application de l'approche ASDA en phase préliminaire du processus de développement.....</b>	<b>145</b>
2.1 Objectifs à atteindre .....	145
2.2 Développements d'une application MATLAB et d'une macro VB CATIA v5 .....	145
2.3 Description du cas d'étude : combiné Catalyseur - Filtre à Particules .....	147
2.4 Approche expérimentée .....	148
2.5 Conclusion .....	153
<b>3. Application de l'approche ASDA en considérant l'assemblabilité du produit.....</b>	<b>154</b>
3.1 Objectifs à atteindre .....	154
3.2 Développement de l'application PEGASUS.....	154
3.3 Description du cas d'étude : tronçon d'avion de type A320 .....	161
3.4 Approche expérimentée .....	162
3.5 Conclusion.....	168
<b>4. Application des approches SKL-ACD et PRM .....</b>	<b>169</b>
4.1 Objectifs à atteindre .....	169

4.2 Développement de l'application PEGASUS Assistant CAO dans l'environnement CATIA v5.....	170
4.3 Description du cas d'étude : vanne appartenant à un marteau burineur pneumatique .....	174
4.4 Approche SKL-ACD et PRM expérimentées.....	176
4.5 Conclusion.....	188

## 1. Introduction

Sur la base du modèle MUVOA et du cadre méthodologique PASODE décrits précédemment, ce chapitre a pour objectif de présenter les développements logiciels et les expérimentations industrielles qui ont permis d'appliquer nos travaux sur des cas d'applications concrets. La logique de structuration du chapitre est étroitement liée à l'évolution des approches développées dans le cadre méthodologique PASODE (cf. *Chapitre 3*), et à l'historique des développements.

De ce fait, ce chapitre est organisé en trois parties, liées à trois expérimentations industrielles situées dans des secteurs d'activité différents, et telles que :

- la conception d'un combiné Catalyseur-Filtre à Particules, pour l'entreprise FAURECIA Technologies de Contrôle des Emissions (ECT) (cf. *Partie 2*) ;
- la conception de la partie structurelle d'un avion de type A320, pour l'entreprise EADS (European Aeronautic Defense and Space Company) Innovation Works (cf. *Partie 3*) ;
- la conception d'un sous-ensemble « vanne » appartenant à un marteau burineur pneumatique, pour l'entreprise MABI (cf. *Partie 4*).

Nous avons volontairement introduit trois cas industriels, assez différents les uns des autres, afin d'illustrer, du mieux possible, les approches proposées dans le cadre méthodologique PASODE. Ainsi, pour chacune de ces parties, nous décrivons via le TAB. 18 ci-après :

- les objectifs à atteindre ;
- le développement logiciel et l'utilisation d'outils existants ;
- le cas d'étude ;
- l'approche expérimentée.

Ce quatrième chapitre fait également état du développement d'une nouvelle application logicielle, baptisée PEGASUS (Product design Engineering based on Generative Assembly SeqUenceS planning), et considérée comme une application de type PRM (cf. *Chapitre 4 Partie 3*), support au modèle MUVOA, et au cadre méthodologique PASODE proposé. Cette application PEGASUS est en interconnexion étroite avec les systèmes de type PDM, MPM et CAO.

TAB. 18 — Description des expérimentations industrielles réalisées dans le cadre de ce travail de recherche

N°	Approche expérimentée	Objectifs à atteindre	Développement logiciel spécifique effectué	Outil existant utilisé	Cas d'étude industriel expérimenté
1	PASODE - ASDA	Définir la séquence d'assemblage, de manière semi-automatique, en phase préliminaire du processus de développement, afin d'apporter un contexte d'assemblage.	Application MATLAB Macro VB CATIA v5	MATLAB CATIA v5	Combiné Catalyseur - Filtre à particules (Entreprise FAURECIA ECT)
2	PASODE - ASDA - Assemblabilité	Prendre en compte les critères d'assemblabilité du produit dans le choix de la séquence d'assemblage. Trouver la séquence d'assemblage optimale en phase préliminaire du processus de développement du produit.	PEGASUS	GAIA ANATOLE CATIA v5	Tronçon d'avion de type A320 (Entreprise EADS IW)
3	PASODE - SKL-ACD	Définir un contexte d'assemblage basé sur des entités squelettiques, en fonction des informations relationnelles et des informations issues de la séquence d'assemblage.	PEGASUS PEGASUS Assistant CAO	CATIA v5	Sous-ensemble « vanne » d'un marteau burineur pneumatique (Entreprise MABI)
	PASODE - PRM	Gérer les relations du produit à l'interface des systèmes PDM, MPM et CAO, afin de maintenir les flux d'informations du couple produit-process.		ACSP NOTIXIA CATIA v5	

## 2. Application de l'approche ASDA en phase préliminaire du processus de développement

### 2.1 Objectifs à atteindre

Cette première expérimentation vise à définir une séquence d'assemblage de manière pas à pas en phase préliminaire du processus de développement, afin d'apporter un contexte d'assemblage. De ce fait, nous proposons d'appliquer, dans cette partie, l'algorithme ASDA, tel que défini dans la *Partie 4* du *Chapitre 3*, à un cas industriel concret : un combiné catalyseur-Filtre à Particules. Cette expérimentation a pour objectif de tester la validité des solutions proposées par l'algorithme, en les confrontant à la séquence d'assemblage actuellement définie et utilisée pour un produit similaire dans l'entreprise.

### 2.2 Développements d'une application MATLAB et d'une macro VB CATIA v5

Afin d'implémenter notre algorithme ASDA, nous avons développé une application prototype au sein de l'environnement logiciel MATLAB, dédié au calcul scientifique. Cette application intègre les différents mécanismes décrits dans l'algorithme ASDA, et permet donc de supporter les vues « contextuelle process » et « comportementale process », issues du modèle MUVOA (cf. *Chapitre 3 Partie 2*). La FIG. 61 ci-dessous présente l'interface principale de l'application prototype développée sous MATLAB, permettant de renseigner le contexte de production (prévision de la demande, temps d'ouverture, design Takt time, limite port de charges manuel, etc.), de filtrer les sous-assemblages à identifier, et de prendre en compte les informations relationnelles pour la définition pas à pas de la séquence d'assemblage.

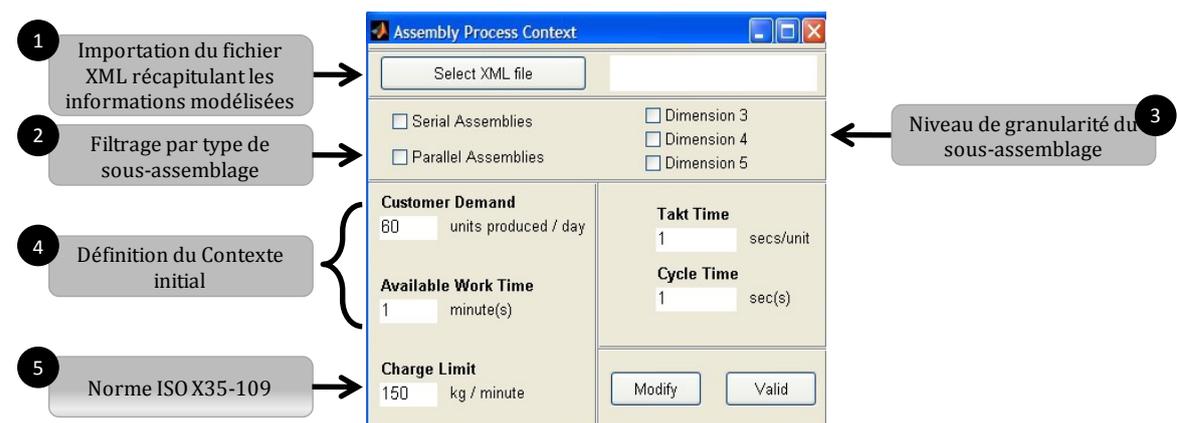


FIG. 61 — Interface de l'application prototype développée dans MATLAB, conforme à la vue « contextuelle process » du modèle MUVOA

A partir de ces informations d'entrée et des informations relationnelles, l'application prototype va pouvoir identifier et vérifier les sous-assemblages admissibles, pour différents niveaux de granularité (nombre de composants par sous-assemblage), via différents niveaux selon les choix du gammiste. De plus, le gammiste pourra être guidé par des critères de taux

de charges, de temps et de stabilité calculés, en fonction des attributs des composants, et des informations relationnelles (cf. *Chapitre 3 Partie 4 Paragraphe 4.6.2.*).

Une fois la séquence d'assemblage définie, l'application propose au gammiste de générer différents fichiers, afin de propager les informations résultantes vers les systèmes CAO (dans notre cas CATIA v5), PDM/PLM (dans notre cas TDC System) et MPM (dans notre cas NOTIXIA Assembly) comme le montre la FIG. 62 ci-dessous.

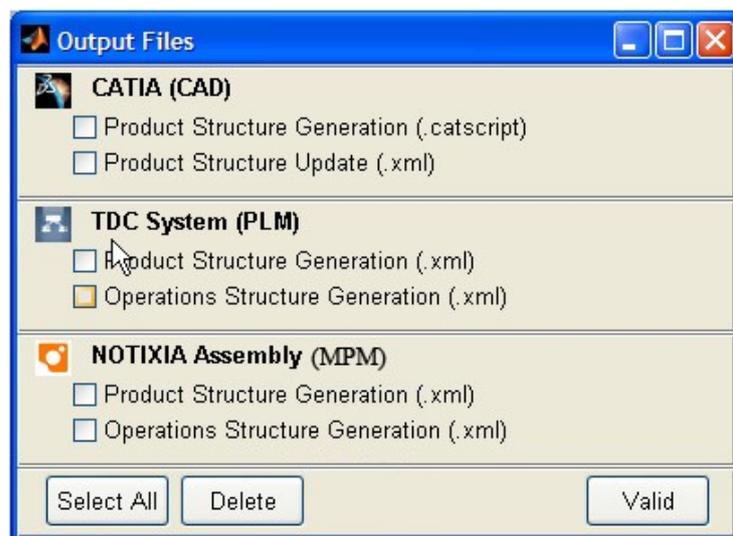


FIG. 62 — Types de fichiers générés par l'application MATLAB

Pour ce cas d'étude, nous nous limitons à la génération de fichiers CAO avec CATIA v5, afin d'apporter un contexte d'assemblage au sein du processus de développement. Pour ce type de système, l'application prototype MATLAB propose de générer deux types de fichier :

- un fichier **.catscript** qui permet de générer, de manière automatique, la structure produit avec les documents associés. Ce type de fichier est utilisé dans le cas où aucun document CAO n'a été créé au préalable ;
- un fichier **.xml** qui permet de restructurer le produit, dans le cas où une géométrie préliminaire du produit existe.

Ce dernier type de fichier (.xml) a demandé de développer une macro en **Visual Basic (VB)** dans l'environnement CATIA v5, afin que le système CAO puisse exploiter le fichier conformément à la séquence d'assemblage.

Cette macro Visual Basic permet donc de concaténer la structure produit initiale en une structure produit cohérente, vis-à-vis de la séquence d'assemblage définie par le gammiste. La FIG. 63 présente un extrait du code développé dans la macro VB.

```

Next node
Else
MsgBox ("probleme")
End If
End Sub

Private Sub Recursiv(ByVal node As IXMLDOMNode, ByVal product As product)

Dim str_ref As String
Dim str_number As String
Dim str_name As String
Dim testPos(11) As Variant

If node.nodeName = "subproduct" Then
str_name = node.Attributes.getNamedItem("name").Text
Dim product1 As product
Set product1 = product.AddNewComponent("Product", str_name)
For Each noeud In node.childNodes
Recursiv noeud, product1.products, productsInit
Next noeud
Else
str_number = node.Attributes.getNamedItem("number").Text
str_ref = node.Attributes.getNamedItem("ref").Text
Dim Product2 As product

Set Product2 = productsInit.Item(str_number)
Dim pos ' As Position
Set pos = Product2.Position
pos.GetComponents (testPos)
prodName2 = Product2.Name
prodPartNumber2 = Product2.PartNumber
Dim newProduct As product

```

FIG. 63 — Extrait de la macro VB développée dans l'environnement CATIA v5 pour concaténer la structure produit existante

Nous avons présenté, dans ce paragraphe, les développements réalisés au sein des environnements logiciels MATLAB et CATIA v5, afin de pouvoir appliquer notre algorithme ASDA sur un cas industriel concret. Le paragraphe suivant vise à décrire le cas d'étude en question.

### 2.3 Description du cas d'étude : combiné Catalyseur - Filtre à Particules

Le cas d'étude sur lequel nous allons appliquer notre approche ASDA est un combiné Catalyseur – Filtre à Particules développé, fabriqué et assemblé par le l'équipementier automobile FAURECIA Technologies de Contrôle des Emissions (ECT) (FIG. 64).

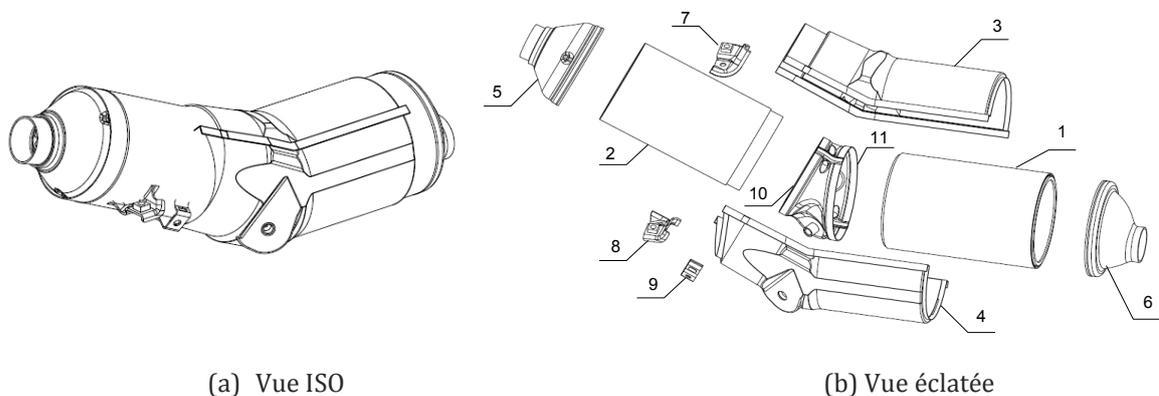


FIG. 64 — Exemple de combiné Catalyseur - Filtre à Particules

Ce sous-ensemble appartient à la partie chaude d'une ligne d'échappement, et est composé de 8 sous-ensembles et 3 composants, listés dans le TAB. 19, afin de satisfaire deux fonctions principales, telles que :

- minimiser les émissions de gaz par oxydoréduction ;
- éliminer les particules par filtration et combustion.

TAB. 19 — Nomenclature du cas d'étude

No.	Nom	Type	No	Nom	Type
1	DFP	Sous-assemblage	7	Bracket right	Sous-assemblage
2	Cat-converter	Sous-assemblage	8	Bracket left	Sous-assemblage
3	Insulating right	Sous-assemblage	9	Pressure bracket	Composant
4	Insulating left	Sous-assemblage	10	Left Half-shell link	Composant
5	Inlet	Sous-assemblage	11	Right Half-shell link	Composant
6	Outlet	Sous-assemblage			

Les départements d'ingénierie, au sein de l'entreprise FAURECIA ECT, soulignent des problèmes d'intégration et d'échange d'informations, plus particulièrement entre les domaines du « produit » et du « processus d'assemblage ». En effet, les questions d'assemblage du produit arrivent, pour la plupart du temps, à la fin de la phase de conception détaillée, lors de la phase de prototypage. C'est la raison pour laquelle, il est important de pouvoir prendre en compte cet aspect dans les phases amont du processus de développement du produit. De ce fait, nous constatons que :

- la phase de définition de séquence d'assemblage est exécutée de manière séquentielle lors du processus de développement du couple produit-process, ce qui introduit nécessairement des rétroactions, et donc modifications sur le produit ;
- de nombreuses nomenclatures (BOM), telles que : eBOM (engineering Bill Of Material), mBOM (manufacturing Bill Of Material), et CADBOM (CAD Bill Of Material), sont définies de manière séquentielle et indépendante les unes des autres.

Il s'agit donc, dans le cadre de notre travail de recherche, de pouvoir apporter un degré d'intégration et de cohésion entre les informations du couple produit-process, dès les phases préliminaires du processus de développement du produit.

## 2.4 Approche expérimentée

### 2.4.1 Définition du contexte de production

De manière à appliquer l'algorithme ASDA au cas d'étude de l'entreprise, il est important de prendre en compte les conditions de production de celle-ci, afin de définir une séquence d'assemblage cohérente avec le contexte de l'entreprise. Conformément à la vue « contextuelle process » du modèle MUVOA, nous allons décrire les informations qui vont apporter une aide à la décision au gammiste pour le choix des sous-assemblages.

Tout d'abord, l'entreprise met en œuvre une stratégie « one piece flow », afin d'accomplir sa production Juste-à-temps (**Just In Time - JIT**). Ainsi, le « design Takt time » peut être calculé en fonction d'une prévision de la demande de 500 unités, et d'un temps d'ouverture de 450 minutes. Ce « design Takt time » limitera donc chaque temps de cycle prédéterminé.

$$D_{prev} = 500 \text{ units} \quad (4.1)$$

$$A = 8,5 \text{ h} - 0,5 \text{ h (lunch)} - 0,5 \text{ h (breaks)} = 450 \text{ mins.}$$

$$T_T = \frac{\text{temps d'ouverture}}{\text{prévision de la demande}} = \frac{A}{D_{prev}} = \frac{450}{500} = 54 \text{ sec/unit}$$

$$CT_0 \leq T_T$$

Une fois ces informations calculées, il est possible d'introduire la masse limite et le port de charges limite pour une personne, en cohérence avec les conditions de référence pour l'assemblage manuel, définies par les normes [X35-109, 1989] et [NF EN 1005-5, 2007].

$$m_{limit} = 25 \text{ kg}$$

$$T_{o_{limit}} = 50 \text{ kg/min} \quad (4.2)$$

De ce fait, ces informations sont considérées pour apporter une aide à la décision dans le choix des sous-assemblages admissibles, identifiés grâce aux outils développés. L'étape suivante consiste à définir les informations relationnelles, permettant, à l'algorithme ASDA, l'identification et la vérification des sous-assemblages.

#### 2.4.2 Modélisation des informations relationnelles

A partir de la nomenclature produit initiale présentée dans le TAB. 19, nous avons défini les relations de contact direct et d'ordonnancement du produit (vue « contextuelle produit »), en cohérence avec la typologie des relations, établie dans le *Chapitre 3 Partie 4 Paragraphe 4.1*.

De ce fait, la FIG. 65 présente le graphe orienté  $G_{11}$  et la matrice d'adjacence  $P_{11}$  réalisés pour ce cas industriel, à savoir le combiné Catalyseur – Filtre à Particules, développé, fabriqué et assemblé par l'entreprise FAURECIA ECT. Les informations relationnelles, liées à ce produit sont ensuite exploitées dans l'application MATLAB, où l'étape suivante consiste à identifier les sous-assemblages admissibles.

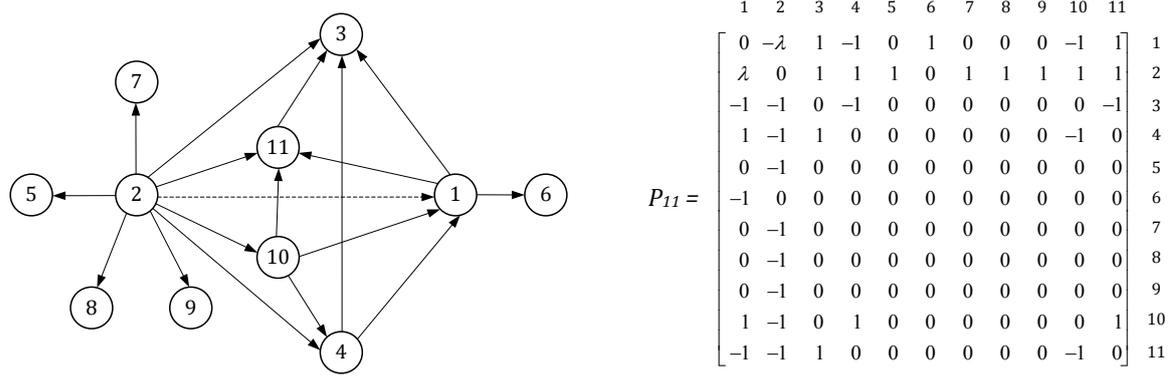


FIG. 65 — Graphe orienté  $G_{11}$  et matrice d’adjacence  $P_{11}$  définis pour le cas industriel

### 2.4.3 Identification et choix des sous-assemblages

Une fois le contexte de production et les informations relationnelles définis, l’application MATLAB lance le processus d’identification des sous-assemblages admissibles, en fonction du type de sous-assemblage choisi, et du niveau de granularité demandé par le gammiste.

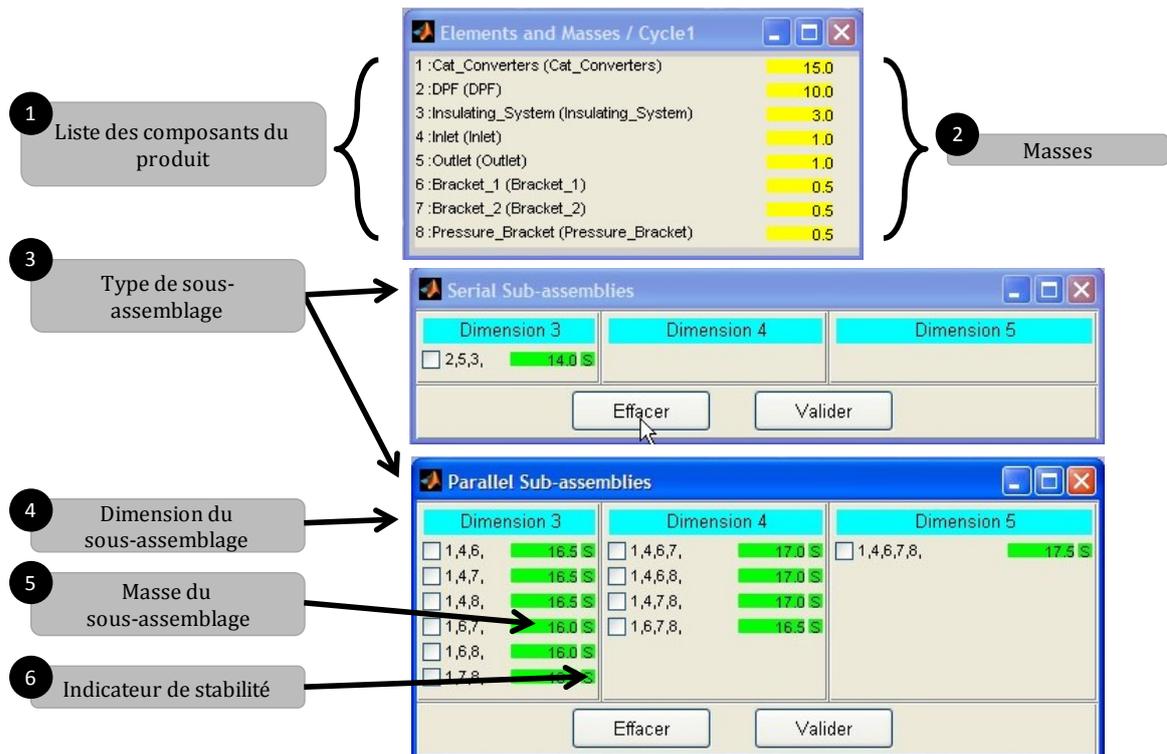


FIG. 66 — Sous-assemblages identifiés lors du premier cycle de l’algorithme ASDA

Pour le cas d’étude, l’application MATLAB présente les résultats du premier cycle d’identification via 3 fenêtres (FIG. 66) :

- la première fenêtre présente la nomenclature initiale du produit, qui intègre les masses prédéterminées à chaque élément (composant ou sous-ensemble) ;

- la *deuxième fenêtre* présente les sous-assemblages admissibles de type « série », de différentes dimensions (3, 4 et 5), avec les indicateurs de masse et de stabilité calculés ;
- la *dernière fenêtre* présente les sous-assemblages admissibles de type « parallèle », de différentes dimensions (3, 4 et 5), avec les indicateurs de masse et de stabilité calculés.

Ainsi, le gammiste a la possibilité de choisir, étape par étape, un ou plusieurs sous-assemblages admissibles de différentes natures (série ou parallèle), en fonction des indicateurs et de ses contraintes de production. Une fois les choix effectués, le gammiste n'a plus qu'à les valider interactivement pour que l'application MATLAB lance le cycle d'identification suivant.

#### 2.4.4 Concaténation des sous-assemblages retenus et identification de nouveaux sous-assemblages

Afin de lancer le cycle d'identification suivant, l'application prototype MATLAB doit considérer chaque sous-assemblage sélectionné par le gammiste comme un unique composant à assembler. C'est la raison pour laquelle, la FIG. 67 présente le résultat de la concaténation de la nomenclature initiale en une nomenclature comprenant désormais 4 éléments, tels que : les deux sous-assemblages en série (SA\_Ser\_1, SA\_Ser\_2) retenus par le gammiste, et les composants 2 et 4 à assembler. Pour ce cycle, et comme l'illustre la FIG. 67, ci-après, l'application prototype propose au gammiste un unique sous-assemblage.



FIG. 67 — Sous-assemblages identifiés lors du deuxième et dernier cycle

#### 2.4.5 Génération des informations résultantes

Une fois que le gammiste a effectué ses choix, et que tous les composants du combiné Catalyseur – Filtre à Particules sont assemblés, l'application prototype MATLAB génère la séquence d'assemblage, et propose au gammiste de choisir les fichiers, permettant de propager les informations issues de la séquence d'assemblage dans les systèmes PDM, CAO, et MPM (FIG. 62). La FIG. 68 présente la séquence d'assemblage générée par l'application sous la forme d'un arbre d'assemblage.

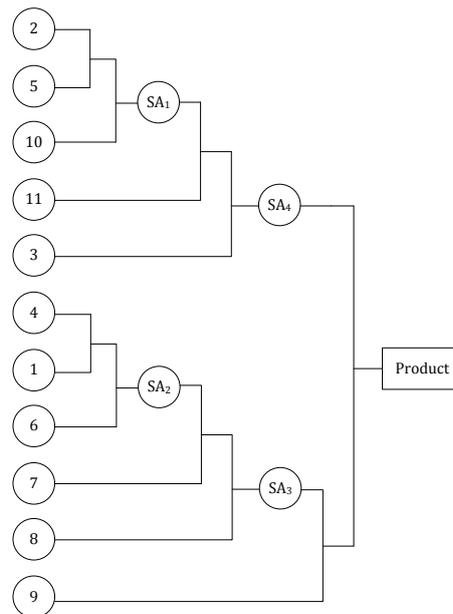


FIG. 68 — Séquence d'assemblage du combiné Catalyseur - Filtre à Particules, issue de l'application prototype MATLAB, et représentée sous la forme d'un arbre d'assemblage

Au final, l'application MATLAB a généré 3 cycles d'identification, ce qui correspond à 3 niveaux d'assemblage, afin d'assembler tous les composants du produit. La séquence générée équivaut à  $\{(((2, 5, 10), 11, 3), ((4, 1, 6), 7, 8), 9)\}$ , et est constituée de :

5 sous-assemblages en série :

SA <sub>1</sub> = (2, 5, 10)
SA <sub>2</sub> = (4, 1, 6)
SA <sub>3</sub> = (SA <sub>2</sub> , 7, 8) = ((4, 1, 6), 7, 8)
SA <sub>4</sub> = (SA <sub>1</sub> , 11, 3) = ((2, 5, 10), 11, 3)
SA <sub>5</sub> = (SA <sub>4</sub> , SA <sub>3</sub> , 9) = (((2, 5, 10), 11, 3), ((4, 1, 6), 7, 8), 9)

Ici, les éléments 2, 4, SA2, SA1, et SA4 sont considérés comme les éléments de base pour les différents sous-assemblages dans lesquels ils se situent.

Pour ce cas d'étude, nous avons choisi de propager cette séquence d'assemblage dans un système CAO existant dans le commerce, à savoir l'outil CATIA v5 de Dassault Systèmes, en générant un fichier **.catscript**. Une fois exécuté dans l'environnement CATIA v5, ce fichier **.catscript** va permettre, à l'architecte produit, de structurer le produit, et de créer les documents CAO associés aux composants, aux sous-ensembles et aux squelettes d'assemblage, de manière automatique (Fig. 69).

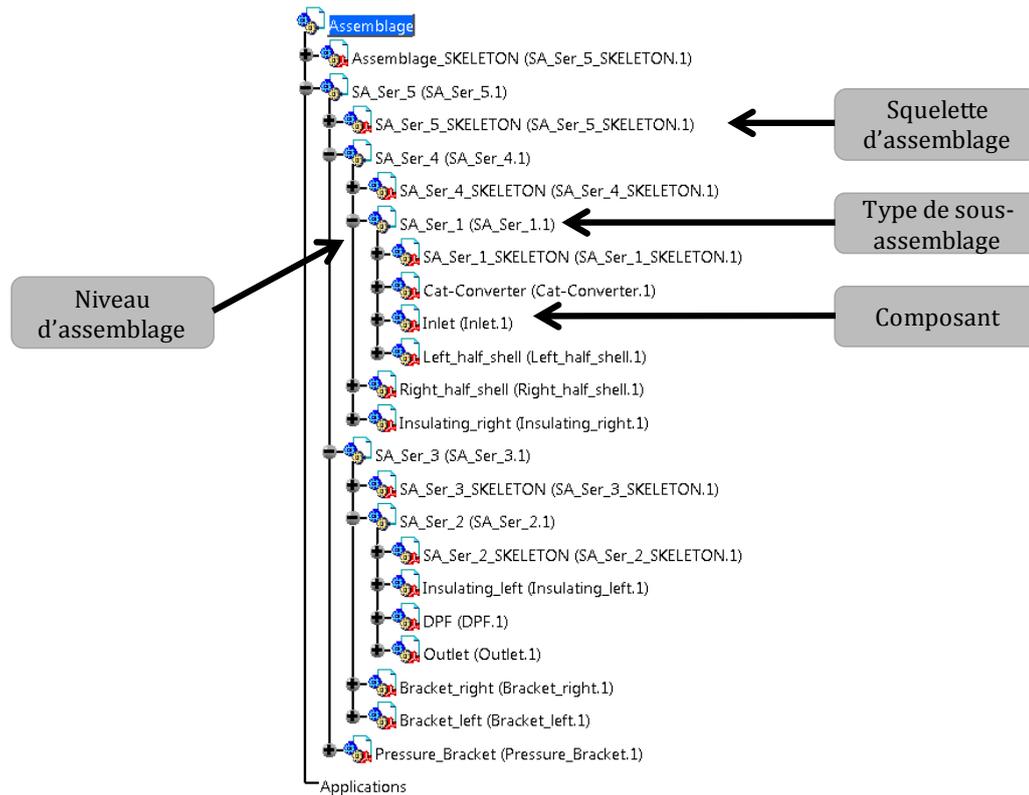


Fig. 69 — Structure produit générée par un fichier .catscript dans CATIA v5

## 2.5 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie, l'application de l'algorithme ASDA à un cas industriel concret : la conception d'un combiné Catalyseur – Filtre à Particules pour l'entreprise FAURECIA ECT. Cette expérimentation illustre l'intérêt d'intégrer la phase de définition de séquence d'assemblage dans les phases amont du processus de développement, avant que la géométrie du produit soit spécifiée. Nous soulignons les développements de l'application MATLAB et de la macro VB sous CATIA v5, qui permettent au gammiste de définir, de manière pas à pas, la séquence d'assemblage, en orientant l'algorithme ASDA dans la concaténation/identification des sous-assemblages admissibles.

Pour ce cas d'étude, la séquence d'assemblage générée par l'application MATLAB a été comparée aux séquences d'assemblage existantes pour les produits similaires développés dans l'entreprise. Il en résulte que la solution générée est conforme et cohérente par rapport aux contraintes de production actuelles du combiné Catalyseur – Filtre à Particules.

Bien qu'ayant obtenu des résultats satisfaisants, nous mettons en évidence le besoin d'enrichir le support de décision dans le choix des sous-assemblages admissibles. En effet, sur chaque cycle d'identification, le gammiste n'a pas la possibilité de visualiser l'impact de son choix sur le prochain cycle, voire même sur la séquence d'assemblage finale.

Par conséquent, et dans la mesure où il est important de pouvoir apporter au gammiste une vision d'ensemble sur les différentes solutions possibles, nous nous proposons maintenant de générer l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles, et de les évaluer. Pour ce

faire, l'expérimentation suivante permet d'appliquer l'évolution de l'algorithme ASDA (cf. *Chapitre 3 Partie 5*), à un deuxième cas industriel concret, à savoir la partie structurelle d'un avion de type A320 en partenariat avec l'entreprise EADS IW.

## 3. Application de l'approche ASDA en considérant l'assemblabilité du produit

### 3.1 Objectifs à atteindre

Cette deuxième expérimentation vise à générer toutes les séquences d'assemblage admissibles et à identifier la séquence d'assemblage optimale selon des critères d'assemblabilité. De ce fait, nous proposons d'appliquer, dans cette partie, l'évolution de l'algorithme ASDA, telle que définie dans la *Partie 5 du Chapitre 3*, à un autre cas industriel réalisé en partenariat avec l'entreprise EADS IW : la partie structurelle d'un avion de type A320. Cette expérimentation nous permettra d'identifier, parmi l'ensemble des solutions proposées par notre algorithme ASDA, la séquence d'assemblage qui satisfait, de manière optimale, les exigences fonctionnelles et géométriques. Pour ce faire, le paragraphe suivant introduit une nouvelle application développée spécifiquement pour appliquer l'évolution de l'algorithme ASDA à ce cas d'application.

### 3.2 Développement de l'application PEGASUS

Ce paragraphe introduit une nouvelle application logicielle, baptisée **PEGASUS** (**P**roduct design **E**ngineering based on **G**enerative **A**ssembly **S**eqUence**S** planning), et qui sert de démonstrateur de la performance de la démarche que nous proposons. En effet, l'application PEGASUS permet la validation du modèle MUVOA, et des différentes approches proposées dans le cadre méthodologique PASODE. Notre application PEGASUS s'inscrit donc dans la continuité des développements réalisés précédemment sous les environnements MATLAB et CATIA v5.

#### 3.2.1 Méthode Modèle Vue Vue-Modèle (MVVM)

Afin de pouvoir implémenter et centraliser, dans l'application PEGASUS, les approches proposées dans le cadre méthodologique PASODE, nous avons choisi d'utiliser une méthode de conception en génie logicielle, actuellement en forte émergence au niveau de la communauté informatique, appelée **MVVM** (**M**odel, **V**iew, **V**iew**M**odel), et basée sur l'architecture **Modèle-Vue-Contrôleur** (**MVC**) [Sierra *et al.*, 2008]. Ainsi, ce paradigme, issu de l'ingénierie logicielle, permet de séparer l'**Interface Homme Machine** (**IHM**) en :

- un *Modèle* : réalisé en code C#, il constitue la couche de données métier et n'est lié à aucune représentation graphique ;
- une *Vue* : constituée d'éléments graphiques (fenêtre, boutons, sélecteur, etc.) ;
- un bloc *Vue-Modèle* : considéré comme un adaptateur entre la Vue et le Modèle, il introduit un niveau d'abstraction entre la partie graphique et le code.

De ce fait, le code est séparé de sa représentation graphique, ce qui permet un développement et une maintenance plus aisés de l'application. Nous allons aborder dans le paragraphe suivant, les spécifications fonctionnelles de l'application PEGASUS.

### **3.2.2 Spécifications fonctionnelles**

Ce paragraphe présente les fonctionnalités principales de l'application PEGASUS, liées aux deux acteurs métier, que sont l'architecte produit et le gammiste. Nous décrivons au total dix fonctions, telles que :

- Définir les relations du produit ;
- Utiliser les exigences fonctionnelles ;
- Définir les exigences géométriques ;
- Définir la structure produit ;
- Définir les squelettes d'assemblage ;
- Définir le contexte de production ;
- Générer toutes les séquences d'assemblage admissibles ;
- Choisir les sous-assemblages ;
- Evaluer les sous-assemblages ;
- Evaluer les séquences d'assemblage admissibles ;
- Définir la séquence d'assemblage ;
- Propager les informations vers les systèmes PLM de type PDM, MPM, et CAO.

Ces dix fonctions sont représentées par le diagramme UML de cas d'utilisation de la FIG. 70, et mettent en évidence les activités des acteurs métier impliqués. Ces activités sont étroitement liées aux mécanismes développés dans le cadre méthodologique PASODE, et sont donc complémentaires aux activités existantes dans les systèmes PDM, MPM, et CAO.

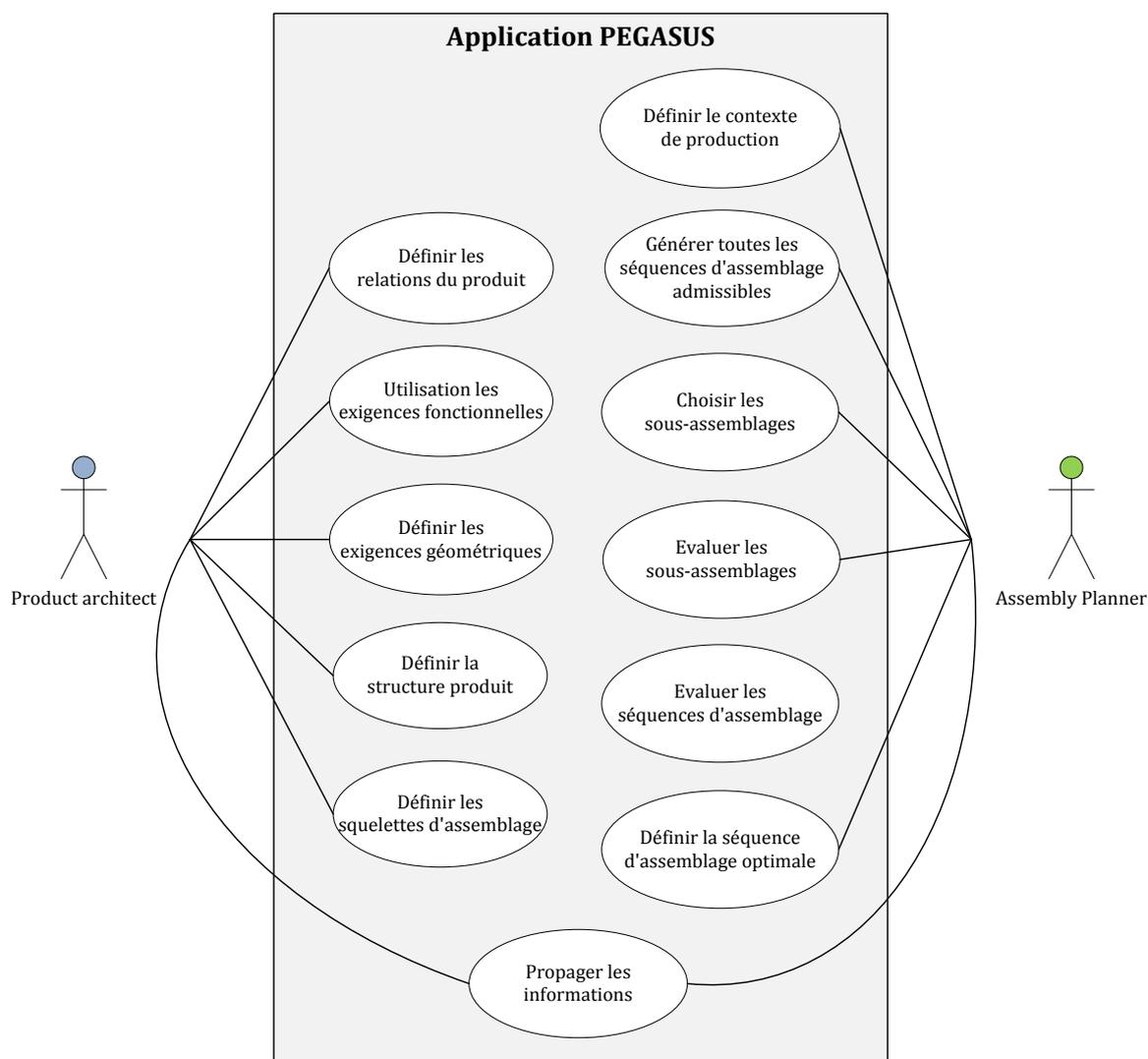


FIG. 70 — Diagramme de cas d'utilisation de l'application PEGASUS

A partir de ce cas d'utilisation principal de l'application PEGASUS, nous allons pouvoir aborder, dans les paragraphes suivants, la description des diagrammes UML de classes et de séquence de l'application proposée.

### 3.2.3 Diagramme de classes

Nous présentons, dans la FIG. 71, un extrait du modèle de données implémenté dans l'application PEGASUS. Mise à part le nom des classes dans cette structure statique, nous pouvons retrouver dans ce diagramme les différentes classes du modèle MUVOA (cf. *Chapitre 3 Partie 2*).

### 3.2.4 Diagramme de séquence

Nous décrivons, dans la Fig. 72, le diagramme UML de séquence de l'application PEGASUS. Ce type de diagramme permet de définir la chronologie des actions, et donc les flux d'informations entre les acteurs métier impliqués.

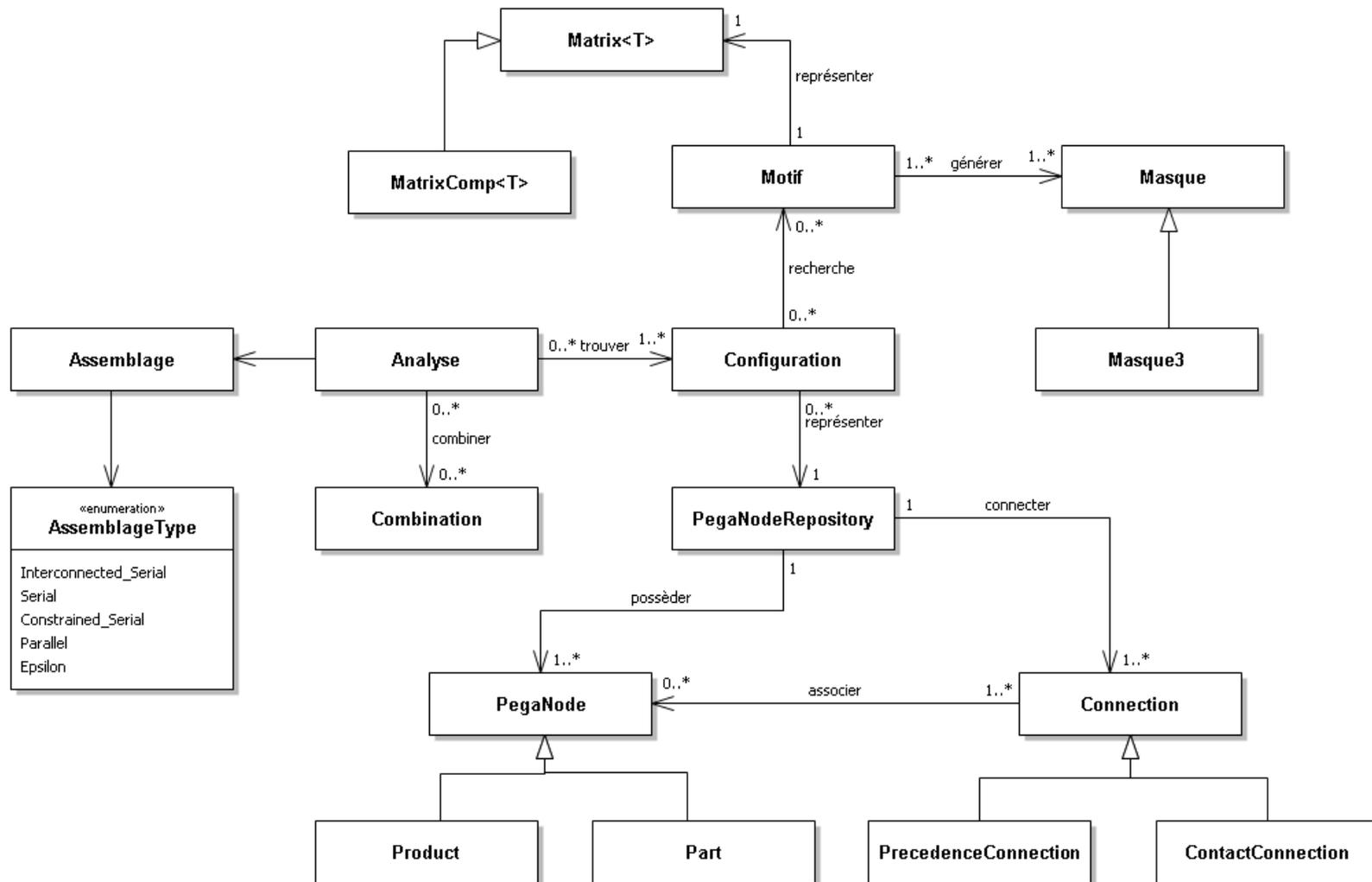


FIG. 71 — Diagramme UML de Classes décrivant le modèle de données implémenté dans l'application PEGASUS

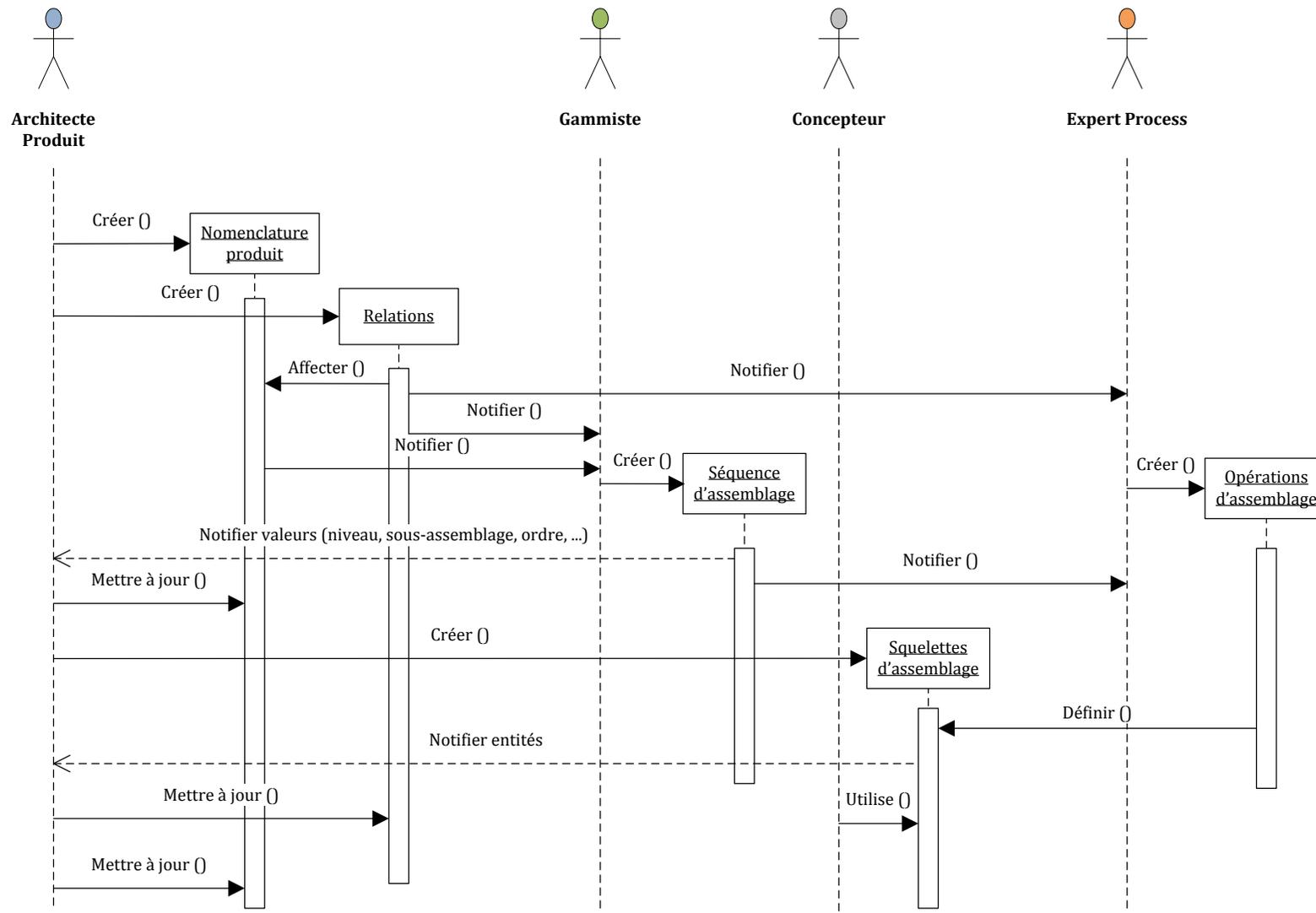


Fig. 72 — Diagramme UML de Séquence décrivant le déroulement des actions dans l'application PEGASUS

### 3.2.5 Description des interfaces de l'application PEGASUS

A partir des spécifications fonctionnelles décrites dans les paragraphes précédents, nous présentons, dans ce paragraphe, quelques interfaces de l'application PEGASUS. Cette application fait intervenir deux acteurs métier : l'architecte produit et le gammiste. Ainsi, ces acteurs vont pouvoir travailler dans leur vue respective, conformément au modèle MUVOA.

Une première interface a été définie pour l'identification de l'acteur. Cette interface demande par conséquent le nom d'utilisateur (*Login*) et le mot de passe associé (*Password*), tels que présentés dans la FIG. 73.



FIG. 73 — Interface d'identification de l'application PEGASUS

Une fois l'acteur métier connecté à l'application PEGASUS, celui-ci va pouvoir travailler dans son domaine (« Product » ou « Assembly process »), intégrant les vues définies dans le modèle MUVOA, à savoir « Contextual View », « Structural View », « Behavioral View » dans un premier temps.

La FIG. 74 présente l'interface support à la phase de définition des relations du produit (vue « contextuelle produit »). Dans cette interface, l'architecte produit pourra définir différents niveaux de relations, tels qu'établis dans le *Chapitre 3 Partie 4.1*.

Une fois les informations relationnelles établies par l'architecte produit, le gammiste devra définir le contexte de production (vue « contextuelle process »). Pour ce faire, l'interface représentée par la FIG. 75, permet au gammiste de définir le niveau de granularité des sous-assemblages à identifier, ainsi que les paramètres directement liés au contexte de production, à savoir le temps d'ouverture, la prévision du volume de production, etc.

A partir de ces informations relationnelles et du contexte de production, le gammiste a la possibilité de choisir entre une génération semi-automatique et automatique de(s) la/les séquences d'assemblage admissibles. La FIG. 76 présente l'interface des séquences d'assemblage admissibles et des états d'assemblage générés (configurations indiquées en orange).

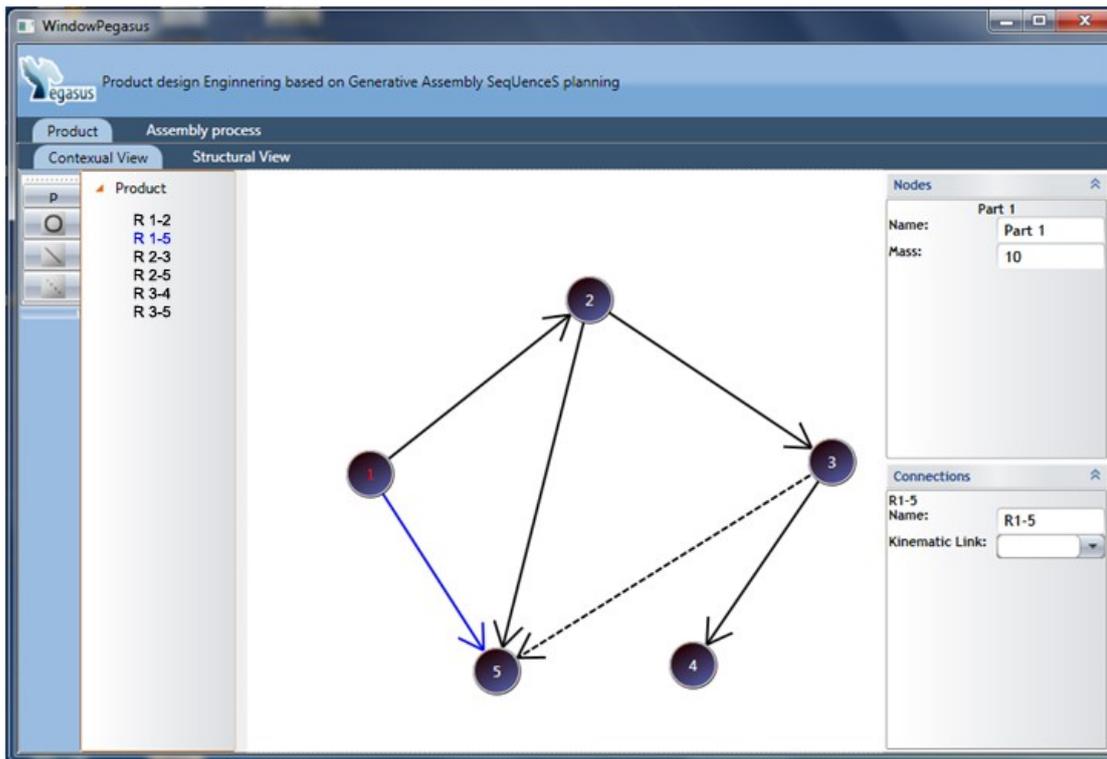


FIG. 74 — Interface de définition des relations du produit de l'application PEGASUS

The screenshot shows the 'WindowPegasus' application window. The title bar reads 'Product design Engineering based on Generative Assembly SeqUenceS planning'. The interface is divided into 'Product' and 'Assembly process' tabs. Under 'Assembly process', there are 'Contextual View' and 'Behavioral View' options. The 'Behavioral View' is active. The main workspace contains several input fields and checkboxes. On the left, under 'Type of assembly', there are checkboxes for 'Interconnected Serial', 'Serial', 'Constrained', and 'Parallel'. Below these are checkboxes for 'Dimension 3', 'Dimension 4', and 'Dimension 5'. A 'Valid' button is at the bottom left. On the right, under 'Customer Demand', there is an input field for 'units produced / day'. Under 'Available Work Time', there is an input field for 'minute(s)'. Under 'Design Takt Time', there is an input field for 'sec / unit'. Under 'TRS', there is an input field for '%'. A 'Valid' button is at the bottom left of the main workspace.

FIG. 75 — Interface de définition du contexte de production de l'application PEGASUS

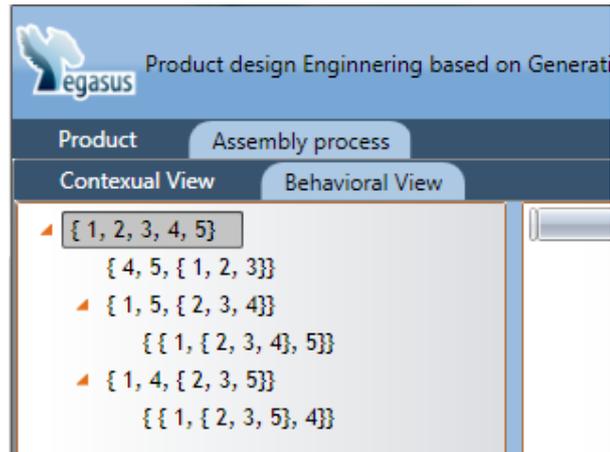


FIG. 76 — Interface de génération de toutes les séquences d'assemblage admissibles de l'application PEGASUS

Nous avons présenté dans ce paragraphe quelques interfaces de l'application PEGASUS, qui vont être opérationnalisées pour le cas d'étude de cette partie. Ainsi, nous décrivons ci-après le cas d'étude industriel.

### 3.3 Description du cas d'étude : tronçon d'avion de type A320

Le cas d'étude, sur lequel nous allons appliquer l'évolution de notre algorithme ASDA, porte sur la partie structurale d'un avion de type A320, en collaboration avec EADS Innovation Works (FIG. 77). Ce tronçon est composé de 3 sections du fuselage, et contient 12 composants, tels que listés dans le TAB. 20.

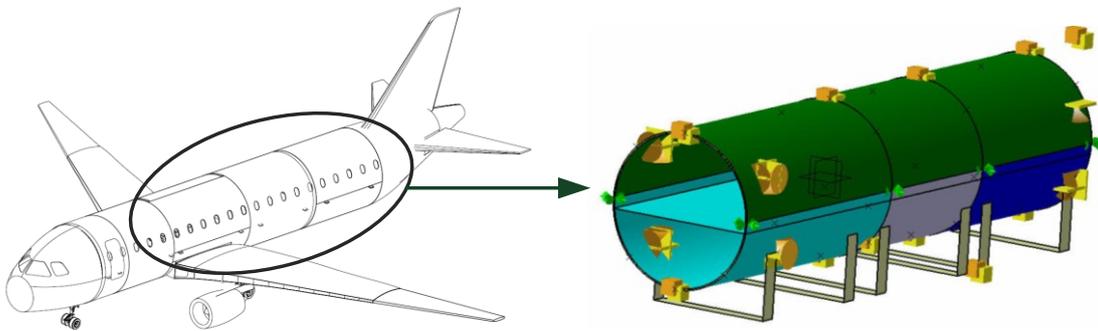


FIG. 77 — Partie structurale d'un avion de type A320

Pour ce cas d'étude, nous nous sommes basés sur les travaux de [Marguet, 2001]. Lors de l'application de ses travaux sur un tronçon similaire, l'auteur se base sur deux gammes d'assemblage à évaluer, afin de trouver la séquence d'assemblage qui satisfait, de manière optimale, toutes les exigences géométriques (également appelées **KC**, **Key Characteristics**) du produit. De manière complémentaire à ces travaux, nous proposons d'apporter une vision plus large sur les séquences d'assemblage admissibles à considérer pour l'évaluation, qui auront des impacts différents sur la propagation des variations géométriques et dimensionnelles des composants.

Ainsi, en partenariat avec l'entreprise EADS IW, notre objectif a été de déterminer l'ensemble de toutes les séquences d'assemblage admissibles pour ce cas d'étude et à les évaluer, afin de trouver la séquence d'assemblage qui permet de satisfaire, de manière optimale, toutes les KC du produit.

Pour ce faire, nous mettons en évidences les hypothèses suivantes :

- l'analyse fonctionnelle a déjà été réalisée au préalable ;
- les fonctions principales du produit sont donc connues ;
- les KC à respecter sont connues, telles que le « maximum gap » et le « minimum overlap » entre les composants Upper Shells et Lower Shells du tronçon d'avion, représentés par la FIG. 78.

TAB. 20 — Nomenclature du cas d'étude

No.	Nom	No.	Nom
1	Upper Shell	7	Lower Shell 15
2	Upper Shell Frame 1	8	Lower Shell 17
3	Upper Shell Frame 2	9	Lower Shell Frame 1
4	Upper Shell Frame 3	10	Lower Shell Frame 2
5	Upper Shell Frame 4	11	Lower Shell Frame 3
6	Lower Shell 14	12	Lower Shell Frame 4



FIG. 78 — Maximum gap (a) et minimum overlap (b) entre les Upper et Lower Shells considérées comme exigences géométriques à satisfaire pour notre expérimentation

### 3.4 Approche expérimentée

Nous allons appliquer, dès les phases amont du processus de développement, l'évolution de notre algorithme ASDA à ce cas d'étude. La FIG. 79 présente l'implémentation de l'approche via les divers outils. Pour ce cas d'étude, nous avons introduit deux outils développés par EADS IW, que sont GAIA pour la définition fonctionnelle du produit, ANATOLE pour la simulation de tolérancement intégré à CATIA v5, et notre application PEGASUS. De ce fait, l'expérimentation peut de se décomposer de la manière suivante :

1. définir les KC à considérer, et les informations relationnelles de contact direct dans l'outil GAIA. Ces informations sont ensuite exportées vers l'application PEGASUS via un fichier **.xml** ;

2. définir les différents niveaux de relations entre les composants du produit (relations d'ordonnancement, relations cinématiques, etc.) dans l'application PEGASUS ;
3. émerger des AKC en fonction des relations cinématiques et des séquences d'admissibles générées dans PEGASUS. Ces AKC sont exportés vers l'outil GAIA, afin qu'il puisse capitaliser l'ensemble des KC à satisfaire ;
4. effectuer une simulation de tolérancement, dans l'outil ANATOLE intégré dans CATIA v5, pour chaque séquence d'assemblage admissible générée par l'application PEGASUS. Cette simulation permet, en fonction des KC introduits par l'outil GAIA, de calculer les taux de satisfaction de chaque KC ;
5. à partir de ces résultats, l'outil GAIA spécifie les bornes de chaque KC, afin d'identifier, parmi les séquences d'assemblages admissibles générées par PEGASUS, la séquence d'assemblage optimale, c'est-à-dire la séquence qui offre le meilleur taux de satisfaction des KC ;
6. une fois identifiée, la séquence d'assemblage optimale est visualisée dans l'outil GAIA et la structure produit peut être générée dans l'application PEGASUS et dans CATIA v5.

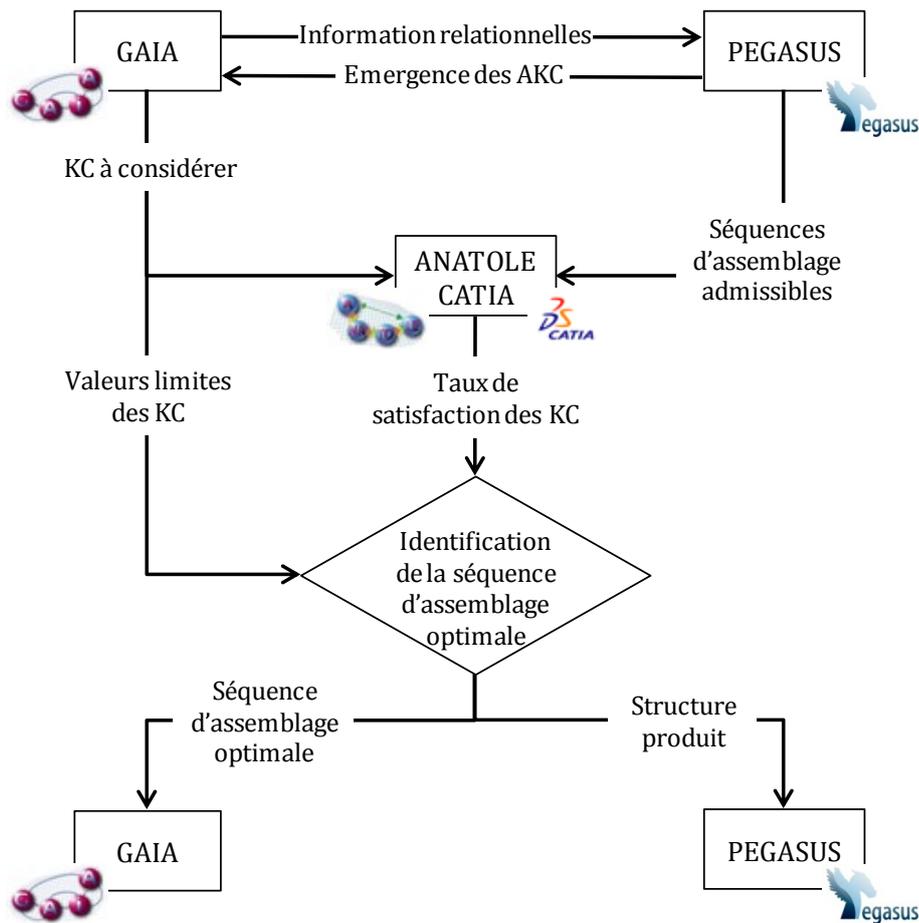


FIG. 79 — Implémentation de l'approche ASDA via les outils GAIA, ANATOLE, et PEGASUS

Les paragraphes ci-après vont décrire les principales étapes de l'algorithme ASDA (FIG. 40), et le rôle des outils logiciels impliqués.

### 3.4.1 Définition des informations relationnelles du produit

Dans ce contexte, nous commençons par établir le graphe orienté valué  $\mathcal{G}$  et les matrices d'adjacences, en tenant compte cette fois-ci, des flexibilités dans les relations d'ordonnancement, ainsi que les relations cinématiques entre les composants du produit.

Dans un premier temps, les informations relationnelles sont définies dans l'outil GAIA. Développé par EADS IW [Falgarone & Chevassus, 2004], cet outil offre un environnement pour la conception fonctionnelle du produit, via une représentation en graphes, similaire à l'application PEGASUS.

Nous retrouvons donc un graphe orienté avec, comme informations relationnelles, des flèches pleines pour désigner les relations d'ordonnancement, des lignes pleines pour décrire des contacts directs non orientés, et des flèches en pointillés pour représenter les contraintes de précédence (2 possibilités d'assemblage) (FIG. 80).

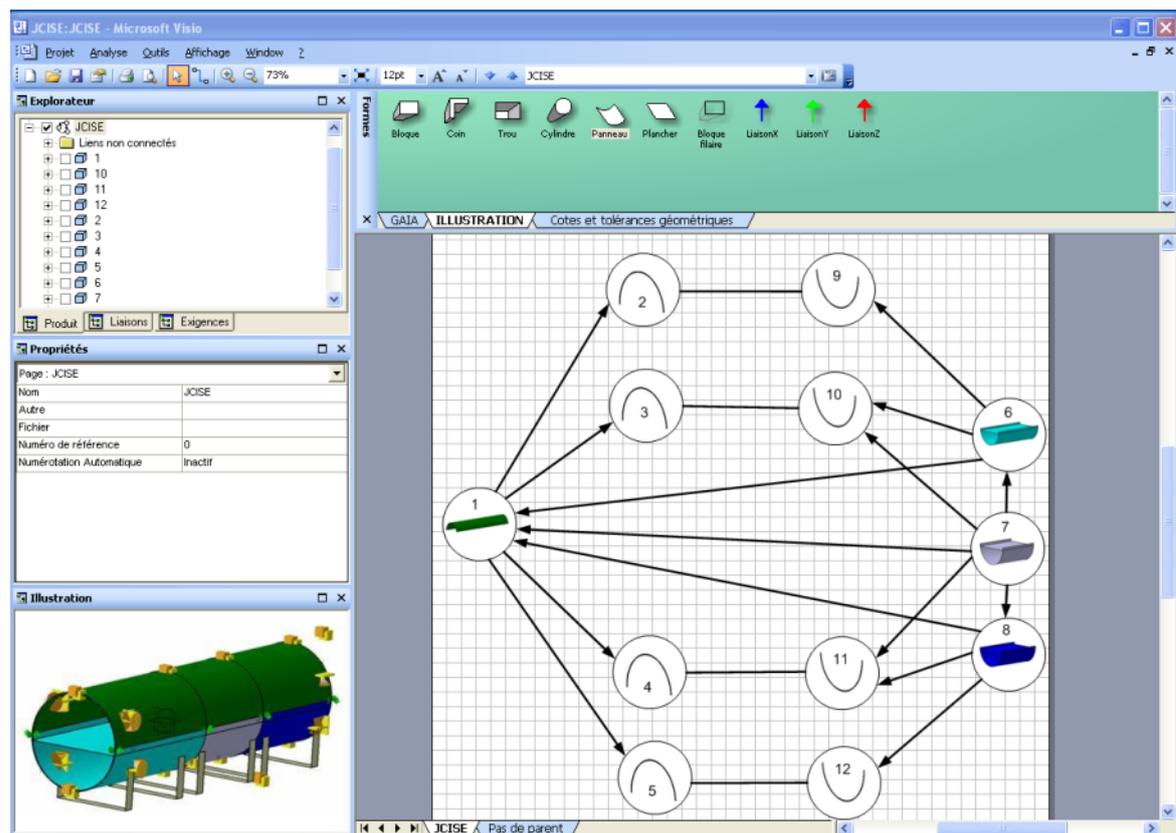


FIG. 80 — Définition du graphe orienté associé au tronçon de l'avion dans l'outil GAIA

Une fois le graphe orienté établi, celui-ci est exporté par l'intermédiaire d'un fichier **.xml** dans l'application PEGASUS, afin d'être enrichi et exploité pour la génération de l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles.

En effet, pour chaque relation de contact direct définie dans GAIA, l'application PEGASUS permet, à l'architecte produit, d'affecter des relations cinématiques, et donc des valeurs

associées aux degrés de liberté contraints (*CDOF*), générant par conséquent un graphe orienté valué (FIG. 81).

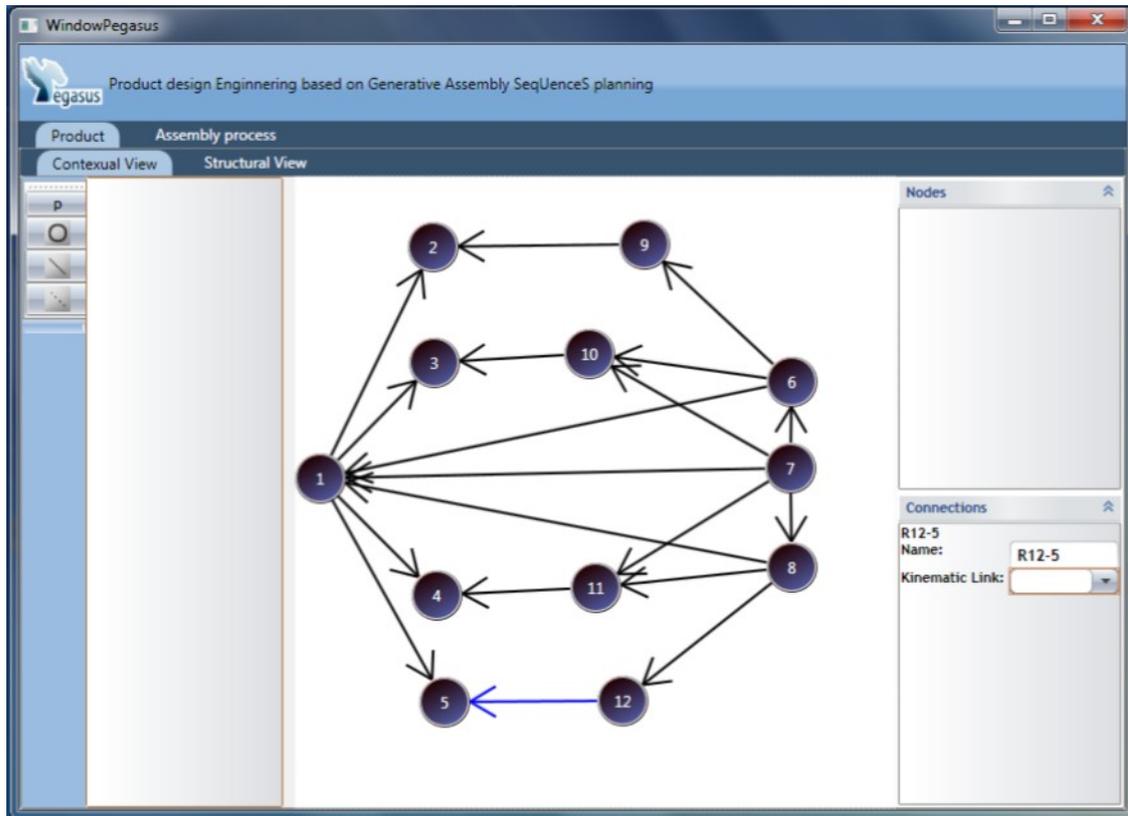


FIG. 81 — Définition des relations cinématiques dans l'application PEGASUS

De plus, l'introduction de contacts directs non orientés, tels que les contacts entre les composants 2-9, 3-10, 4-11, et 5-12 engendre  $2^4 = 16$  matrices d'adjacences, sur lesquelles l'application PEGASUS va pouvoir générer de nouvelles séquences d'assemblage admissibles.

### 3.4.2 Génération de l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles

Parmi les 16 matrices, nous illustrons, via la FIG. 81, une matrice d'adjacence générée par l'application PEGASUS (FIG. 82). Une fois les informations relationnelles renseignées par l'architecte produit, l'application peut lancer le processus de génération de l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles. Ainsi, une fois le processus lancé, l'application affiche l'ensemble des solutions dans la vue « Behavioral View » du domaine « Assembly Process » (vue « comportementale process » du modèle MUVOA). La FIG. 83 met en évidence 6072 séquences d'assemblage admissibles générées, en fonctions des informations relationnelles imposées par l'architecte produit.

$$P_{11} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 1 \\ \begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 2 \\ \begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{matrix} & 3 \\ \begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{matrix} & 4 \\ \begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{matrix} & 5 \\ \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} & 6 \\ \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{matrix} & 7 \\ \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{matrix} & 8 \\ \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 9 \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 10 \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 11 \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & 12 \end{matrix}$$

FIG. 82 — Matrice d'adjacence générée par l'application PEGASUS pour le cas d'étude

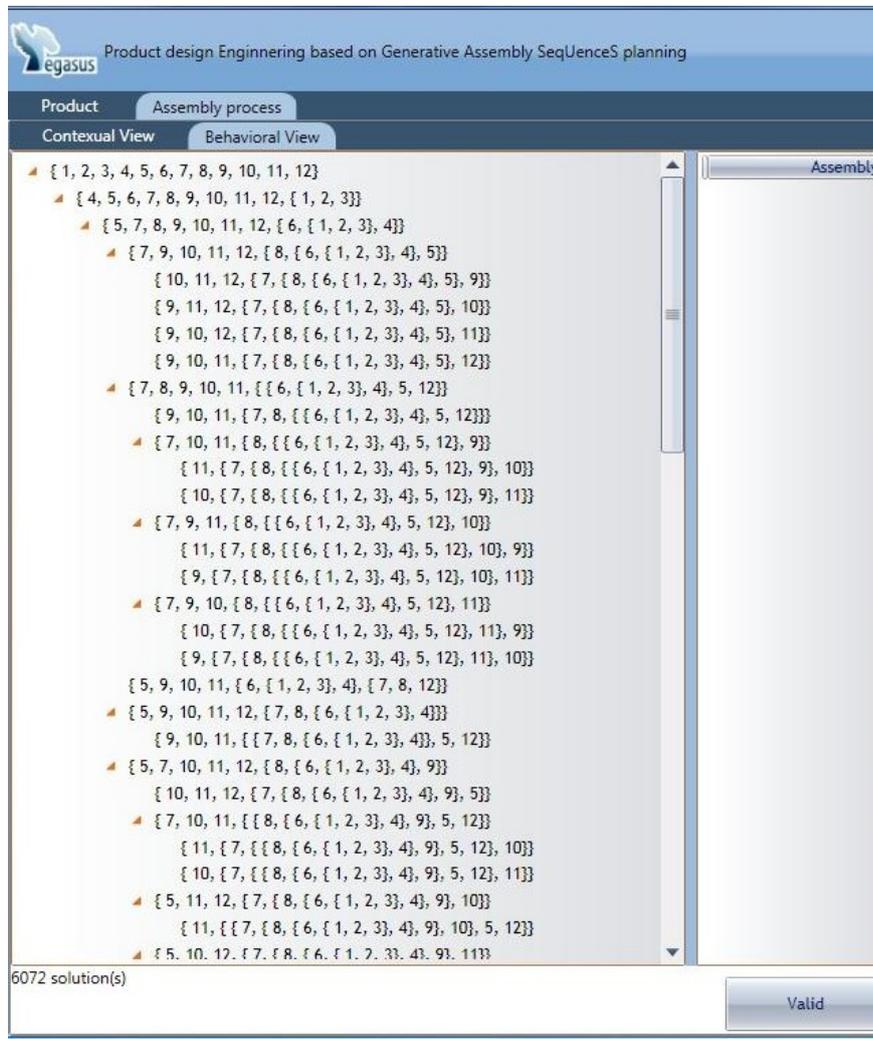


FIG. 83 — Ensemble de toutes les séquences d'assemblage admissibles générées par l'application PEGASUS

### 3.4.3 Simulation de tolérancement des séquences d'assemblage admissibles

Pour chaque séquence d'assemblage admissible générée par l'application PEGASUS, une règle de vérification sur l'isostatisme a été appliquée. Celle-ci révèle les montages hyperstatiques de composants, et introduit des **Assembly Key Characteristics (AKC)**, telles que les jeux fonctionnels ou les mesures à vérifier pour la simulation de tolérancement réalisée par l'outil ANATOLE, développé par l'entreprise EADS IW dans l'environnement CATIA v5 [Marguet *et al.*, 2003]. Cette simulation de tolérancement, représentée par la FIG. 84, considère les capacités de production des composants du produit, les KC définies en fonction des exigences fonctionnelles, et de l'ordre d'assemblage des composants (selon la séquence d'assemblage).

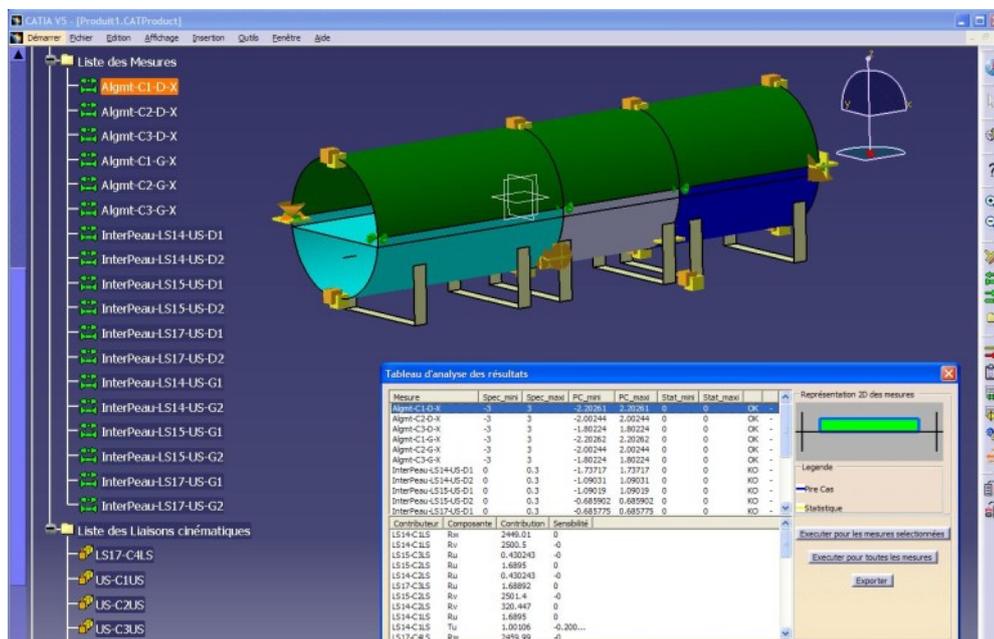


FIG. 84 — Simulation de tolérancement dans l'outil ANATOLE intégré dans CATIA v5

De ce fait, pour les 6072 séquences d'assemblage admissibles générées par l'application PEGASUS, l'outil ANATOLE permet de calculer numériquement et au pire des cas l'impact de variations géométriques sur les exigences géométriques du produit. Dans ce contexte, un KC sera satisfait si le résultat du calcul des propagations des variations géométriques amène des variations incluses dans les bornes spécifiées pour chaque KC initialement. Une fois les impacts définis, nous pouvons identifier la séquence d'assemblage optimale en comparant les taux de satisfaction sur l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles.

Pour le cas d'étude, une séquence d'assemblage, exprimée ci-après (4.3), a été identifiée comme optimale, car permettant de satisfaire les deux KC définis via la FIG. 78, tels que le « minimum overlap » à 100%, et le « maximum gap » à 84%.

$$S = \{((7, 8), (6, 9, 10, 11, 12), (1, 2, 3, 4, 5))\} \quad (4.3)$$

Ce taux de satisfaction a pu être atteint par l'introduction de 17 AKC, tels que : 6 AKC pour la relation entre les composants 3 et 10, 6 AKC pour la relation entre les composants 4 et 11, 5 AKC pour la relation entre les composants 2 et 9.

### 3.4.4 Génération des informations résultantes

Une fois la séquence d'assemblage optimale identifiée, nous proposons de la visualiser par l'intermédiaire d'un « process graph » dans l'outil GAIA, et d'une structure produit dans l'application PEGASUS, afin d'apporter un contexte d'assemblage dans le processus de développement. La FIG. 85 présente l'interface de l'outil GAIA, qui permet de visualiser la séquence d'assemblage optimale. Ce « process graph » décrit les différentes opérations d'assemblage, leur enchaînement, et l'allocation des composants du produit.

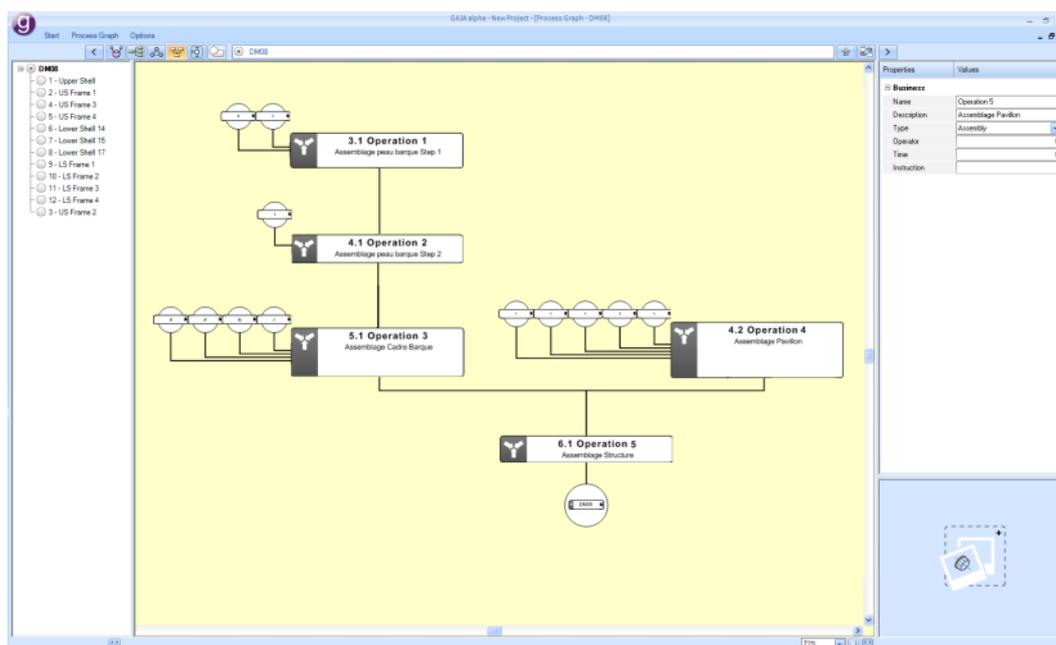


FIG. 85 — Visualisation de la séquence d'assemblage optimale dans l'outil GAIA

## 3.5 Conclusion

Nous avons présenté, dans cette partie, l'application de l'évolution de notre algorithme ASDA à un cas industriel concret : la conception de la partie structurelle d'un avion de type A320 en partenariat avec l'entreprise EADS IW. Cette expérimentation illustre l'intérêt de considérer les exigences fonctionnelles et géométriques pour le choix de la séquence d'assemblage, permettant ainsi, de garantir l'assemblabilité du produit dans les phases amont du processus de développement, avant que la géométrie ne soit complètement spécifiée (dans notre cas, nous avons utilisé une géométrie de pré-développement).

Nous avons présenté le développement de notre application logicielle PEGASUS, basée sur l'architecture MVVM, que nous avons développée. Celle-ci permet à l'architecte produit, et au gammiste, de travailler de manière étroite, à différents niveaux d'abstraction, et dans leur vues respectives, telles que définies dans le modèle MUVOA.

Pour ce cas d'étude, deux autres outils, GAIA et ANATOLE, développés par l'entreprise EADS IW, ont été utilisés. Ces outils ont apporté les fonctionnalités, encore non développées dans l'application PEGASUS, pour appliquer l'évolution de l'algorithme ASDA à la conception de la partie structurelle de l'avion de type A320.

L'expérimentation effectuée précédemment nous avait permis de définir la séquence d'assemblage étape par étape. Nous avons maintenant, dans cette partie, fait le choix de générer l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles, et de les évaluer avec des critères d'assemblabilité. Ceci a permis au gammiste d'avoir une vision sur l'ensemble des solutions admissibles, contrairement à l'expérimentation développée par [Marguet, 2001] portée sur deux gammes d'assemblage.

Bien qu'ayant obtenu des résultats satisfaisants, nous mettons en évidence un nouveau besoin : celui d'apporter un degré d'automatisation dans la simulation de tolérancement. En effet, l'introduction des séquences d'assemblages admissibles générées par l'application PEGASUS demande à l'outil ANATOLE de faire un choix dans la nature des liaisons de positionnement (cinématique de positionnement) entre les composants. Etant donné que ces informations ne sont pas traitées dans l'application PEGASUS, il sera nécessaire de définir et développer de nouveaux mécanismes à intégrer dans l'algorithme ASDA et dans l'application PEGASUS, afin de définir, d'une manière plus détaillée, les informations relationnelles entre les composants du produit.

De manière générale et conformément aux objectifs du cadre méthodologique PASODE (cf. *Chapitre 3 Partie 3*), l'intérêt de définir une séquence d'assemblage optimale dans les phases préliminaires du processus de développement réside en l'apport d'un contexte d'assemblage au sein du processus de développement. Ainsi, nous proposons dans l'expérimentation suivante de définir, à partir des informations de la séquence d'assemblage optimale et des informations relationnelles, un support à base de squelettes (cf. *Chapitre 4 Partie 2*). L'introduction d'entités squelettiques liées aux relations et à la séquence d'assemblage demandera de considérer l'expérimentation dans le contexte plus large du PLM (cf. *Chapitre 4 Partie 3*). Pour ce faire, nous introduisons un troisième cas industriel concret, à savoir le sous-ensemble « vanne » appartenant à un marteau burineur pneumatique pour l'entreprise MABI.

## **4. Application des approches SKL-ACD et PRM**

### **4.1 Objectifs à atteindre**

Cette troisième et dernière expérimentation vise à définir un contexte d'assemblage, en fonction de la séquence d'assemblage et des informations relationnelles, préalablement définies dans l'application PEGASUS. De ce fait, nous proposons d'appliquer, dans cette partie, les approches SKL-ACD (cf. *Chapitre 4 Partie 2*) et PRM (cf. *Chapitre 4 Partie 3*) à un cas industriel pour l'entreprise MABI : le sous-ensemble « vanne », appartenant à un marteau burineur pneumatique. Cette expérimentation nous permettra, de définir des squelettes d'assemblage, et de gérer les relations du produit à l'interface des systèmes PLM de type PDM, MPM et CAO.

## 4.2 Développement de l'application PEGASUS Assistant CAO dans l'environnement CATIA v5

Afin d'implémenter nos approches SKL-ACD et PRM proposées, nous avons développé une nouvelle application prototype, baptisée **PEGASUS Assistant CAO**, au sein de l'environnement CATIA v5. Développée en Visual Basic (VB), cette application prototype vise à assister l'application PEGASUS (cf. *Partie 3*), pour la définition des squelettes d'assemblage.

Pour ce faire, celle-ci se base sur la liste des relations (BOR) établie par les informations relationnelles, définies préalablement dans l'application PEGASUS, et permet, à l'architecte produit, de définir le contexte d'assemblage dans l'environnement CAO (dans notre cas CATIA v5). Cet environnement sera donc constitué d'entités squelettiques, situées aux différents niveaux d'assemblage de la structure produit, qui a été préalablement générée par l'application PEGASUS, via le fichier .catscript (FIG. 86).

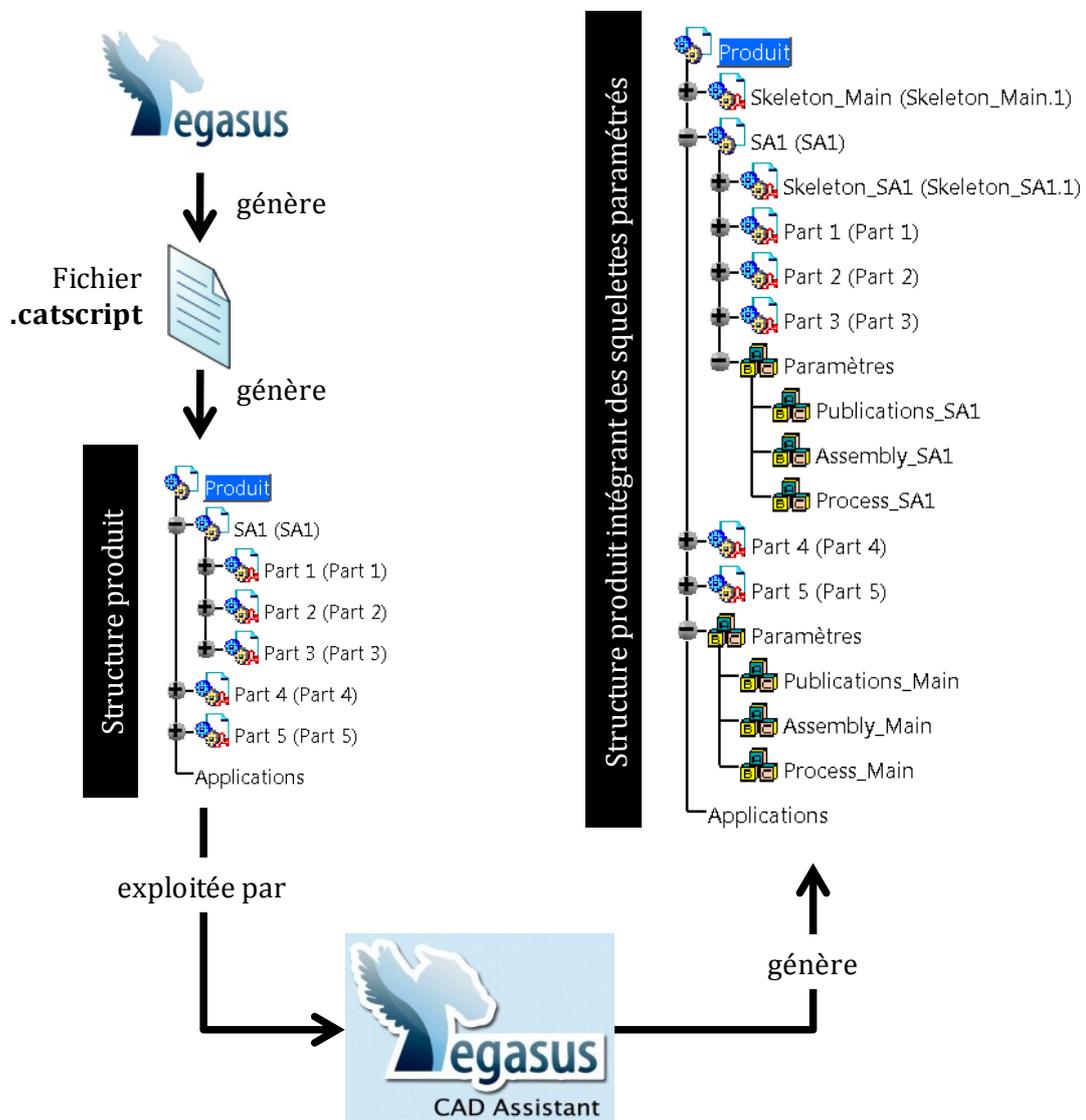


FIG. 86 — Définition des squelettes d'assemblage par la Macro VB PEGASUS Assistant CAO, développée dans l'environnement CATIA v5

Au lancement de la macro VB, l'application PEGASUS Assistant CAO génère, pour chaque niveau d'assemblage de la structure produit, un squelette d'assemblage paramétré, qui sera considéré comme un document CAO de type CATPart. De ce fait, nous obtenons une structure de squelettes qui est cohérente avec la structure produit préalablement générée par l'application PEGASUS. Dans ce contexte, la FIG. 86 présente l'enchaînement des étapes, pour la définition de la structure produit intégrant les squelettes d'assemblage paramétrés.

Une fois que les squelettes d'assemblage ont été générés pour chaque niveau d'assemblage, l'application PEGASUS Assistant CAO permet, à l'architecte produit, de définir les entités squelettiques pour chaque squelette d'assemblage. La FIG. 87 illustre les différentes étapes pour la définition des entités squelettiques dans l'environnement CATIA v5, et met en évidence le besoin de s'appuyer sur une liste de relations (BOR), définie dans notre contexte, par les graphes (orienté, contraintes, squelettes) issus de l'application PEGASUS.

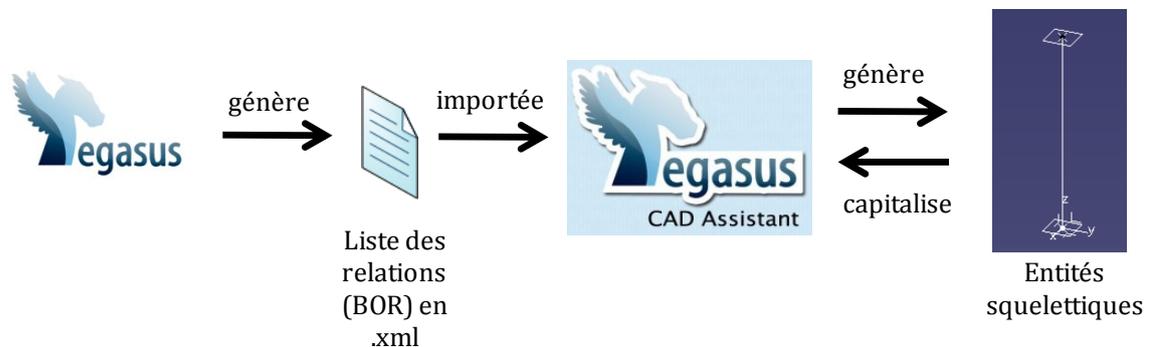


FIG. 87 — Définition des entités squelettiques via la macro PEGASUS Assistant CAO

Pour ce faire, nous proposons d'importer la BOR, issue de l'application PEGASUS et intégrant les différents graphes (graphe orienté, graphe des contraintes et graphe des squelettes), dans la macro PEGASUS Assistant CAO, afin que l'architecte produit puisse l'utiliser comme support à la définition des entités squelettiques dans l'environnement CATIA v5 (FIG. 88). Dans ce contexte, la FIG. 89 présente, dans la partie de gauche, la fonctionnalité d'importation de la BOR, et la fenêtre de visualisation des graphes définis dans l'application PEGASUS.

A partir de ces informations, l'application PEGASUS Assistant CAO permet de définir des relations cinématiques entre les éléments de la nomenclature produit (fenêtre en haut à droite), et construit automatiquement les entités squelettiques dans l'environnement CATIA v5. En fonction du niveau d'assemblage dans lequel la relation a été définie, l'entité squelettique sera publiée, c'est-à-dire qu'elle sera considérée comme une entité de référence pour les sous-assemblages situés à un niveau inférieur. L'architecte pourra visualiser la liste des publications créées dans l'environnement CATIA v5, via la fenêtre intitulée « CAD oriented BOR » de l'application PEGASUS Assistant CAO (FIG. 89).

Cette macro Visual Basic permet donc d'allouer des squelettes d'assemblage sur la structure produit, générée par le fichier .catscript, et de définir les entités squelettiques en fonction de la liste des relations (BOR), définies par l'application PEGASUS. La FIG. 89 présente un extrait du code VB développé pour l'application PEGASUS Assistant CAO.

```

For cnt = 1 To NumPart
    'MsgBox oParte(cnt).Name
    If oParte(cnt).Name = "Skeleton_Main" Then
        SK_exists = True
    End If
Next
If SK_exists = False Then
    Dim oP_Skl As Product
    Set oP_Skl = oproducts.AddNewComponent("Part", "Skeleton_Main")
    oP_Skl.PartNumber = "Skeleton_Main"

    Dim oPartdoc_skl As PartDocument
    Set oPartdoc_skl = oDocs.Item("Skeleton_Main.CATPart")

    Dim oPart_skl As Part
    Set oPart_skl = oPartdoc_skl.Part
    'Dim oHSF As HybridShapeFactory
    'Set oHSF = oPart_skl.HybridShapeFactory

    Dim oHBs_skl As HybridBodies
    Set oHBs_skl = oPart_skl.HybridBodies

    Dim oHyb_skl As HybridBody
    Set oHyb_skl = oHBs_skl.Add
    oHyb_skl.Name = ("Skeleton_Elements")
    oPart_skl.Update

    For sp = 1 To CountSP
        'MsgBox SubProd(sp).Name
        nomsbyp = SubProd(sp).Name
        Set oproducts = SubProd(sp).Products
        Set oP_Skl = oproducts.AddNewComponent("Part", "Skeleton_" & nomsbyp)
        oP_Skl.PartNumber = "Skeleton_" & nomsbyp

        'Dim oPartdoc_skl As PartDocument
        Set oPartdoc_skl = oDocs.Item("Skeleton " & nomsbyp & ".CATPart")
    
```

FIG. 88 — Extrait de la macro PEGASUS Assistant CAO développée en VB dans l'environnement CATIA v5, pour la définition des entités squelettiques

Nous avons présenté dans ce paragraphe les développements réalisés au sein de l'environnement CATIA v5, afin de pouvoir expérimenter nos approches SKL-ACD et PRM proposées, sur un cas industriel concret. Le paragraphe suivant vise à décrire le cas d'étude en question.

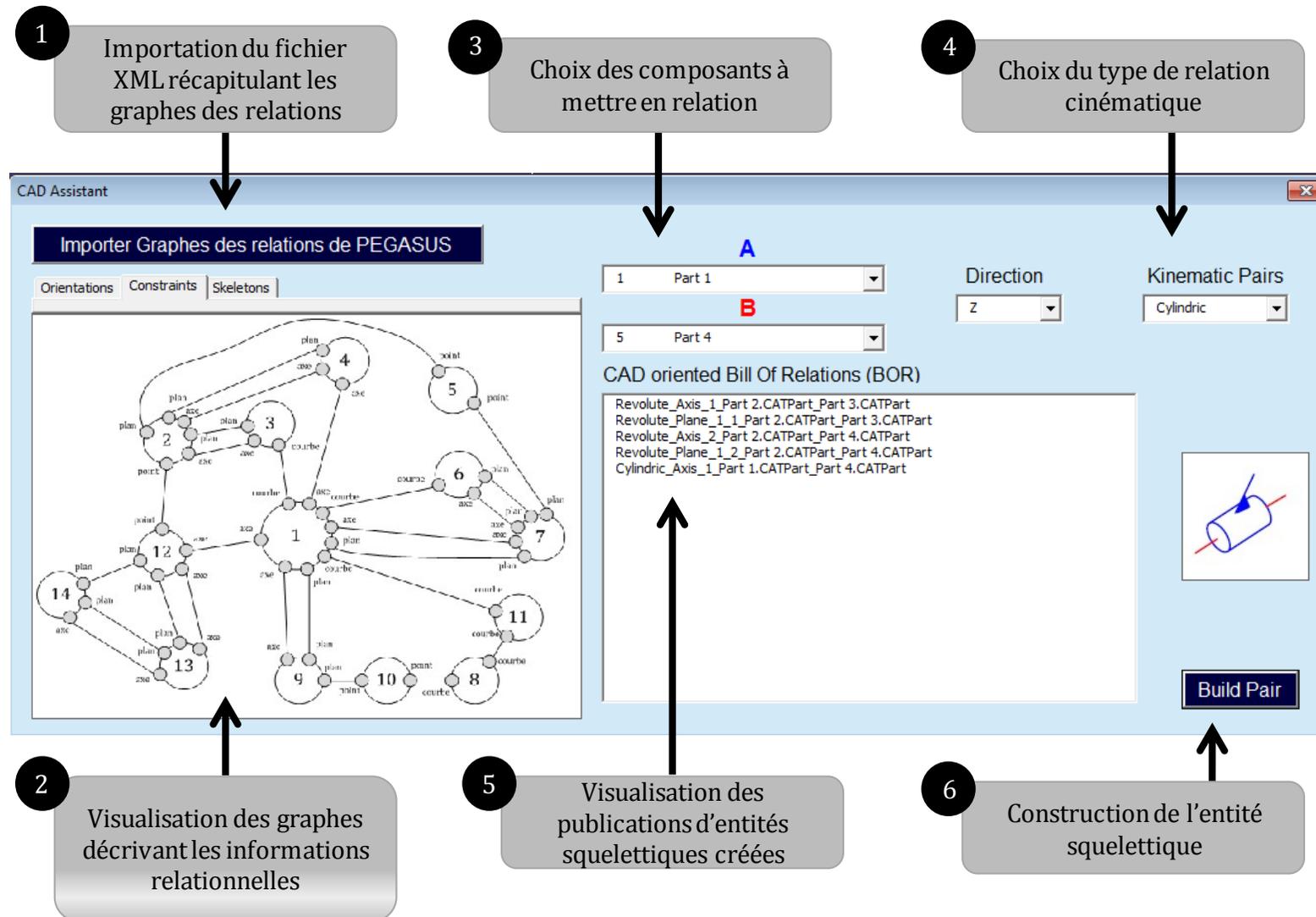


FIG. 89 — Fenêtre de définition des entités squelettiques dans l'application PEGASUS Assistant CAO

## 4.3 Description du cas d'étude : vanne appartenant à un marteau burineur pneumatique

### 4.3.1 Présentation générale

Le cas concret industriel que nous allons utiliser pour appliquer les approches SKL-ACD et PRM proposées, est un sous-ensemble, appelé « vanne », appartenant à un marteau burineur pneumatique, baptisé « Scrap'air », développé et assemblé par l'entreprise MABI (FIG. 90). Cette entreprise développe et assemble la gamme de produits Scrap'air, principalement dédiée pour le secteur du bâtiment.

D'un point de vue ingénierie, l'entreprise MABI est confrontée à des problèmes de cohérence des informations entre l'ingénierie du produit et du processus d'assemblage. Faisant sous-traiter tous les composants constituant le produit Scrap'air, le moment crucial se situe à la phase d'assemblage de celui-ci, dans l'atelier de l'entreprise. Afin d'éviter les erreurs d'assemblage tardives, et d'optimiser les temps d'assemblage, nous allons considérer le développement d'un nouvelle Vanne s'intégrant au produit Scrap'air.

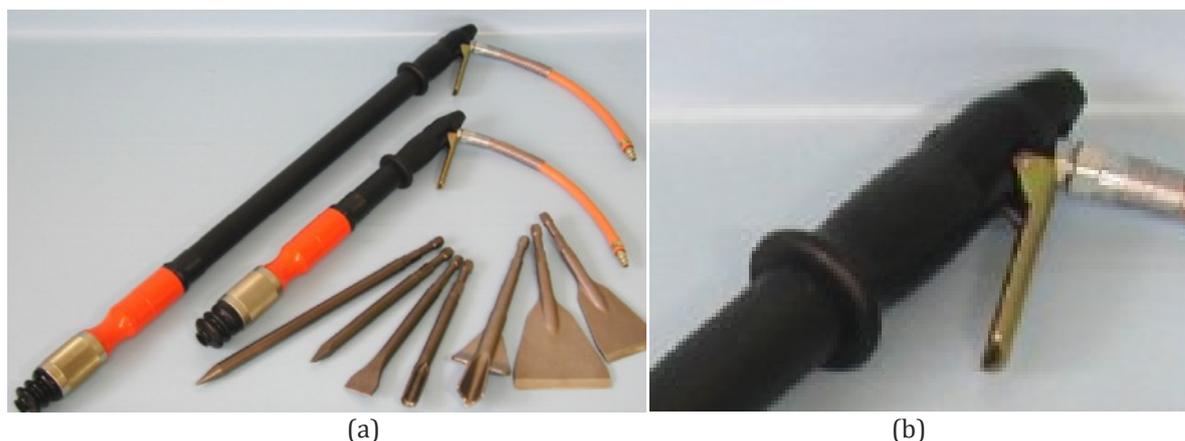


FIG. 90 — Marteau burineur pneumatique Scrap'air (a) et le sous-ensemble « vanne » (b)

### 4.3.2 Description fonctionnelle et technique

Ce sous-ensemble, que nous appelons « Vanne » dans cette partie, a pour objectif de répondre aux fonctions techniques identifiées et décomposées selon le diagramme **FAST** (Function Analysis System Technique) représenté par la FIG. 91. Par ce diagramme, la fonction de service ou principale à satisfaire est décomposée en fonctions techniques et sous-fonctions techniques, permettant ainsi de détailler les solutions technologiques. Cet arbre permet donc l'allocation des composants aux fonctions techniques, et également l'apport de plusieurs solutions technologiques pour satisfaire ces fonctions techniques. Une illustration d'un produit similaire est fournie en *Annexes*, décrivant une solution en vue assemblée (FIG. 107), et en vue éclatée (FIG. 108).

Afin d'illustrer cette partie, nous posons les hypothèses suivantes :

- les fonctions techniques de la Vanne sont connues (FIG. 91) ;
- le choix de la solution est connu, celle-ci comprend 14 composants (TAB. 21) ;

- la géométrie des composants du produit n'a pas encore été spécifiée.

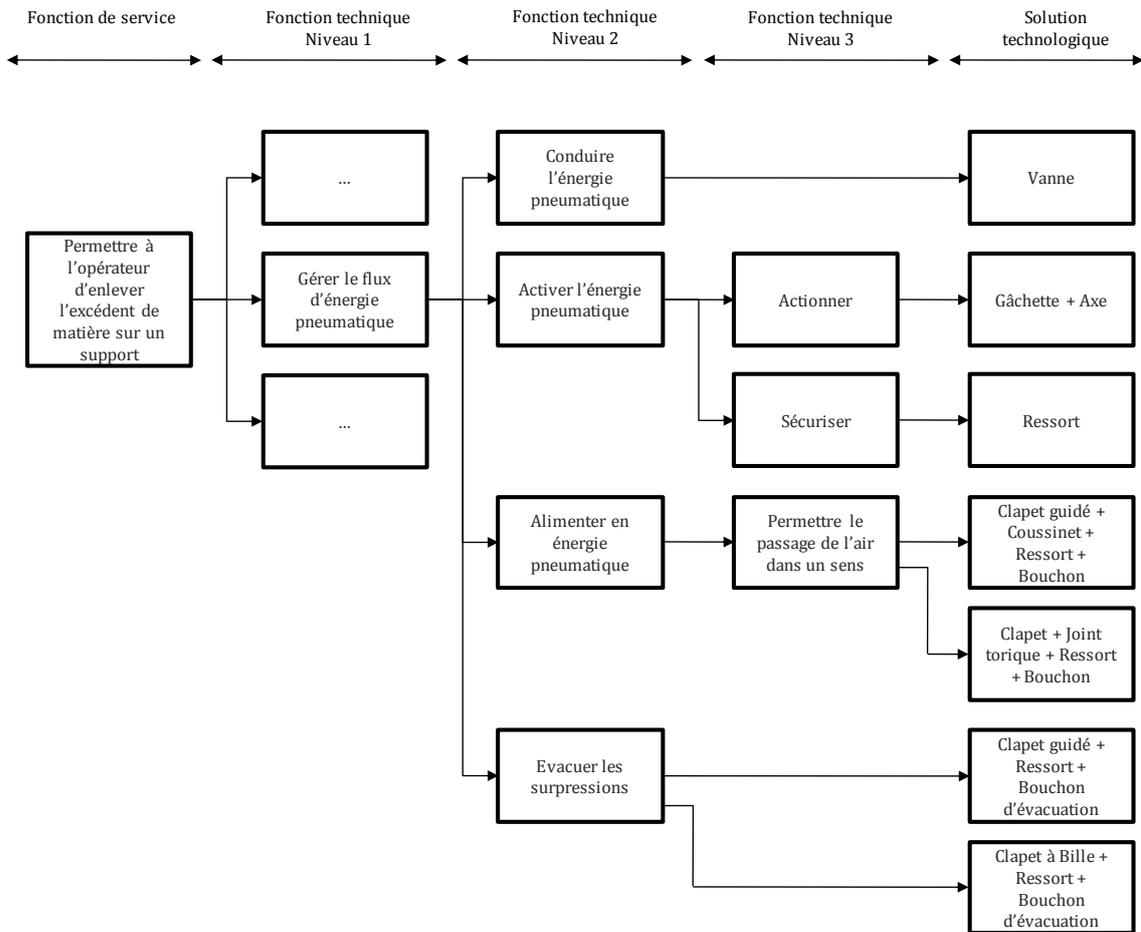


FIG. 91 — Diagramme FAST limité aux fonctions techniques associées à la vanne

TAB. 21 — Nomenclature de la solution retenue

No.	Nom du composant	No.	Nom du composant
1	Vanne	8	Bille
2	Clapet guidé	9	Bouchon d'évacuation
3	Joint torique 1	10	Ressort bille
4	Coussinet	11	Joint torique 2
5	Ressort clapet	12	Gâchette
6	Joint torique bouchon	13	Axe
7	Bouchon	14	Ressort

A partir de cette description, située à un haut niveau d'abstraction, de ce sous-ensemble, nous proposons dans le paragraphe suivant d'appliquer les approches SKL-ACD et PRM proposées. Il s'agit donc, ici, de partir de la définition des relations et de la séquence d'assemblage de ce sous-ensemble, pour obtenir un modèle à base de squelettes, géré par l'application PEGASUS Assistant CAO, et exploité dans l'environnement CATIA v5, à l'interface des systèmes PDM et MPM.

## 4.4 Approche SKL-ACD et PRM expérimentées

### 4.4.1 Description du protocole

Nous allons appliquer, dès les phases préliminaires du processus de développement du produit, les approches SKL-ACD et PRM à ce cas d'étude. La FIG. 92 présente l'implémentation des approches par l'introduction de différents systèmes PLM, à savoir :

- ACSP, qui est une plateforme PLM développée à l'UTBM, dédiée principalement à la gestion du projet et du produit, et qui est considérée comme système PDM pour l'expérimentation ;
- NOTIXIA, qui est une plateforme existante dans le commerce pour la gestion des informations du processus d'assemblage, et qui est considérée comme système MPM pour l'expérimentation ;
- CATIA v5 comme système CAO, qui est introduit pour la définition/visualisation des squelettes d'assemblage du produit.
- PEGASUS, qui est considérée comme application PRM pour la gestion des relations ;
- PEGASUS Assistant CAO, qui est considéré comme application passerelle entre l'application PEGASUS et le système CATIA v5.

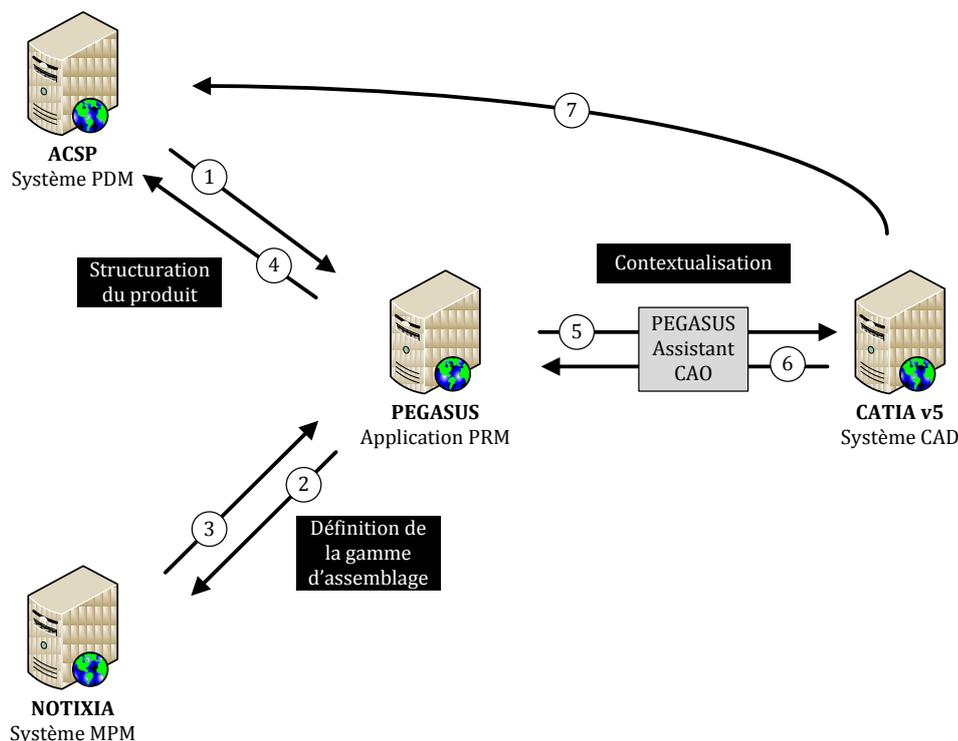


FIG. 92 — Implémentation des approches SKL-ACD et PRM dans les systèmes ACSP, NOTIXIA, CATIA v5, PEGASUS, et PEGASUS Assistant CAO

De ce fait, et conformément au protocole défini par la FIG. 92, l'expérimentation peut se décomposer de la manière suivante :

1. Définition de la nomenclature produit initiale dans le système PDM (dans notre cas ACSP) ;
2. Définition de la séquence d'assemblage, par l'introduction d'informations relationnelles couplées à la nomenclature produit initiale, dans l'application PRM (dans notre cas PEGASUS) ;
3. Définition des opérations d'assemblage dans le système MPM (dans notre cas NOTIXIA) ;
4. Mise à jour de la nomenclature produit, en fonction de la séquence d'assemblage dans le système PDM (ACSP) ;
5. Définition de la structure produit intégrant des squelettes d'assemblage, et des entités squelettiques, issues des informations relationnelles et des opérations d'assemblage, dans le système CAO (dans notre cas CATIA v5) ;
6. Capitalisation des squelettes d'assemblage et des publications associées dans la macro PEGASUS Assistant CAO ;
7. Enregistrement des documents CAO générés ou mis à jour dans la plateforme PDM.

Nous allons, dans le paragraphe suivant, décrire de manière détaillée les différentes étapes mentionnées ci-dessus, en mettant l'accent sur la définition des entités squelettiques pour le sous-ensemble « Vanne » (étape 5 de la FIG. 92).

## 4.4.2 Description détaillée de l'expérimentation

### 4.4.2.1 Définition de la nomenclature initiale dans la plateforme ACSP

A partir du diagramme FAST (FIG. 91), décrivant les différentes fonctions techniques du sous-ensemble « vanne », l'architecte produit définit la nomenclature initiale du produit dans le module PDM de la plateforme ACSP (étape 1 de la FIG. 92).

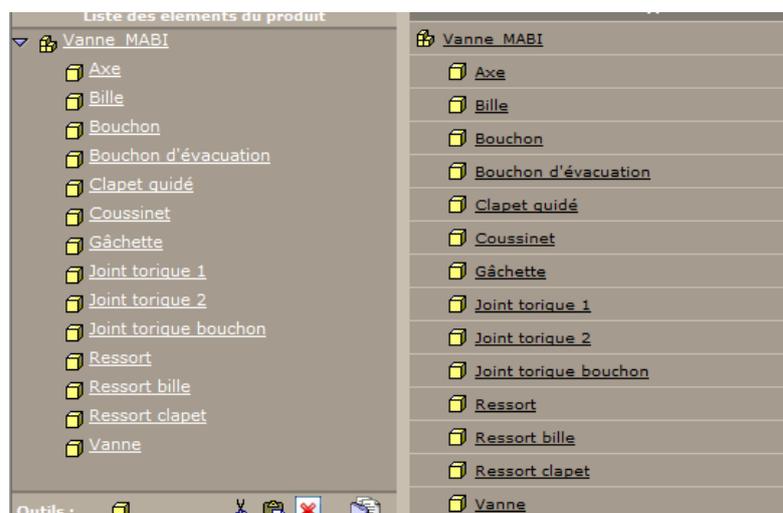


FIG. 93 — Nomenclature produit initiale, définie dans le module PDM de la plateforme ACSP

La FIG. 93 présente la nomenclature créée, et la structure produit associée, où tous les composants du sous-ensemble « vanne » sont, pour le moment, situés au même niveau hiérarchique.

#### 4.4.2.2 Définition des relations dans l'application PEGASUS

Une fois définie, cette nomenclature est exportée de la plateforme ACSP, via un fichier .xml, vers l'application PEGASUS, où l'architecte produit doit définir les relations entre les composants du produit à différents niveaux d'abstraction, à savoir les relations de contact direct, d'ordonnancement, cinématiques, etc. Dans ce contexte, le Tab. 22 présente les relations définies pour les différents niveaux d'abstraction. Ces informations définies par le Tab. 22, peuvent être modélisées dans l'application PEGASUS.

La FIG. 94 présente l'interface de définition des relations, à partir de la nomenclature produit définie dans le module PDM de la plateforme ACSP. Ainsi, l'application PEGASUS, permet à l'architecte produit, de définir les informations relationnelles, et de les capitaliser de manière indépendante de la nomenclature produit.

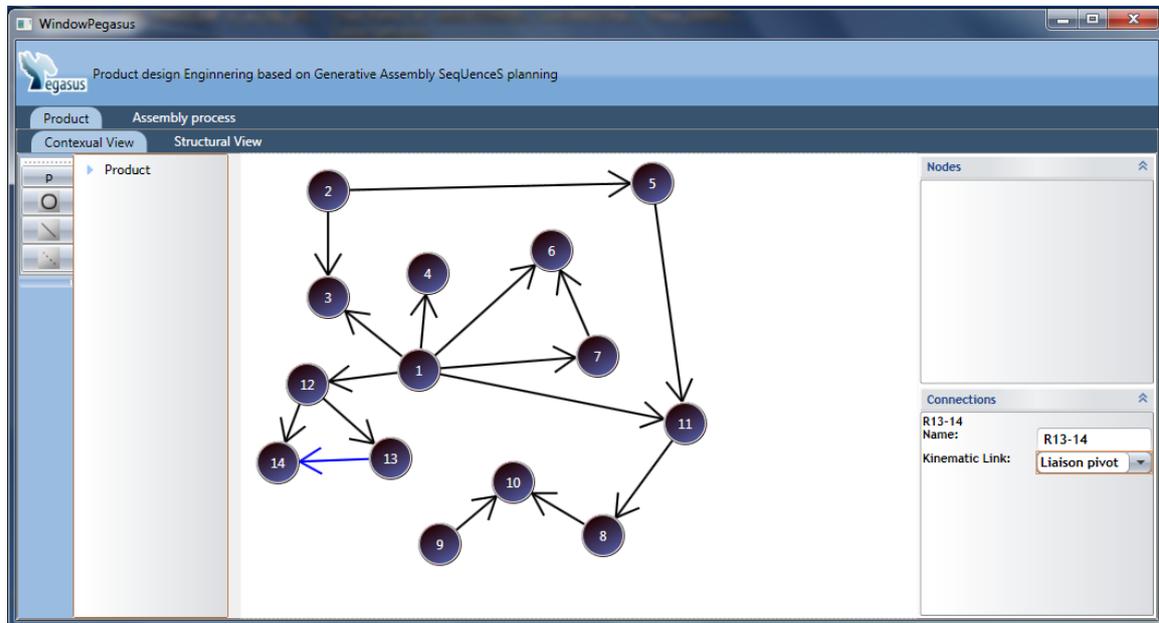


FIG. 94 — Définition des relations entre les composants du produit dans l'application PEGASUS

Tab. 22 — Description des différents niveaux d'abstraction des relations du sous-ensemble « vanne »

Relations					Squelettes	
Nom	Ordonnancement	Cinématique	Technologique	Contrainte	Entité	Contrainte
R <sub>1-3</sub>	1 positionne 3	Linéaire annulaire d'axe Y	/	Courbe-Courbe	Courbe	/
R <sub>1-4</sub>	1 positionne 4	Pivot glissant d'axe Y	Monté serré H7g6	Axe-Axe	Ligne	/
R <sub>1-6</sub>	1 positionne 6	Linéaire annulaire de normale Y	/	Courbe-Courbe	Courbe	.
R <sub>1-7</sub>	1 positionne 7	Hélicoïdale d'axe Y	/	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité
R <sub>1-11</sub>	1 positionne 11	Linéaire annulaire de normale X	/	Courbe-Courbe	Courbe	/
R <sub>1-9</sub>	1 positionne 9	Hélicoïdale d'axe X	/	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité
R <sub>1-12</sub>	1 positionne 12	Pivot glissant d'axe Z	Avec jeu	Axe-Axe	Ligne	
R <sub>2-3</sub>	2 positionne 3	Pivot d'axe Y	/	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité
R <sub>2-4</sub>	4 positionne 2	Pivot d'axe Y	Glissant H7f6	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité
R <sub>2-12</sub>	2 positionne 12	Ponctuelle de normale Y1	Contact intermittent	Point-Plan	Point + Plan	Coïncidence
R <sub>2-5</sub>	2 positionne 5	Ponctuelle de normale Y	/	Point-Plan	Point + Plan	Coïncidence
R <sub>5-7</sub>	Libre	Ponctuelle de normale Y	/	Point-Plan	Point + Plan	Coïncidence
R <sub>6-7</sub>	7 positionne 6	Pivot d'axe Y	/	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité
R <sub>12-14</sub>	12 positionne 14	Plan de normale Z	/	Plan-Plan	Plan	
R <sub>14-13</sub>	13 positionne 14	Pivot d'axe Z	/	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité
R <sub>12-13</sub>	12 positionne 13	Pivot d'axe Z	/	Axe-Axe et Plan-Plan	Ligne + Plan	Perpendicularité
R <sub>9-10</sub>	9 positionne 10	Ponctuelle de normale X	/	Point-Plan	Point + Plan	Coïncidence
R <sub>10-8</sub>	8 positionne 10	Ponctuelle de normale X	/	Point-Plan	Point + Plan	Coïncidence
R <sub>8-11</sub>	11 positionne 8	Linéaire annulaire de normale X	/	Courbe-Courbe	Courbe	

### 4.4.2.3 Définition de la séquence d'assemblage dans l'application PEGASUS et le système NOTIXIA

A partir de ces informations relationnelles définies par l'architecte produit, l'application PEGASUS génère 25707 séquences d'assemblage admissibles, sur lesquelles le gammiste doit faire un choix (FIG. 95).

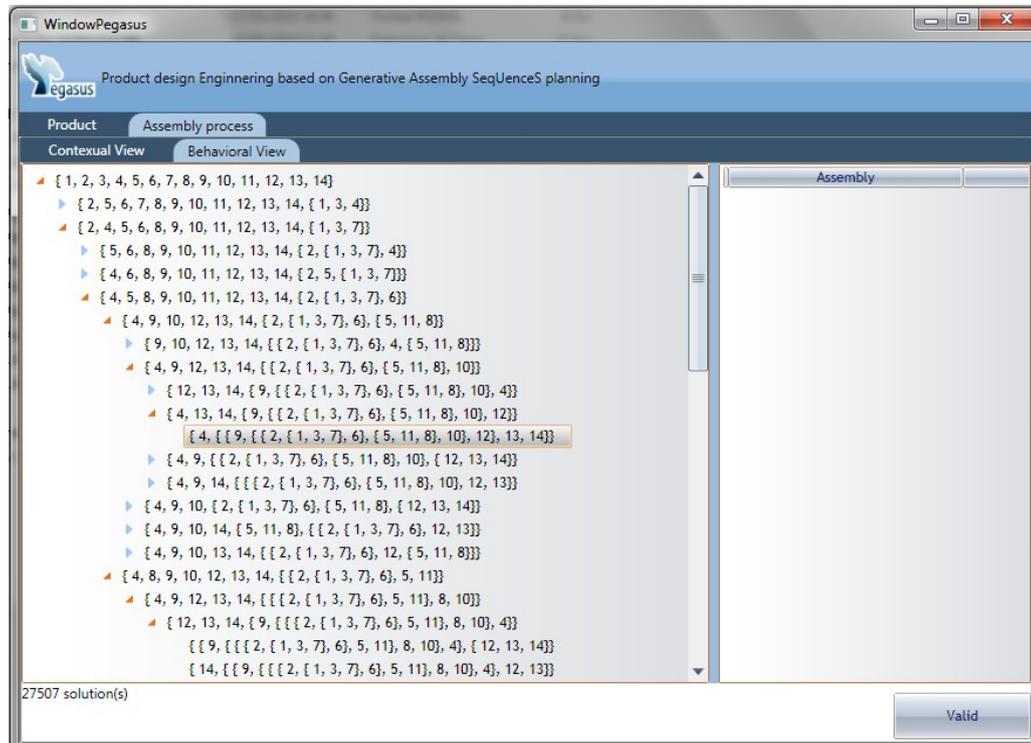


FIG. 95 — Génération des séquences d'assemblage admissibles par l'application PEGASUS

Dans notre cas, la séquence choisie par le gammiste est exprimée ci-dessous :

$$S = \{(1, 11, 8, 10, 9), (4, 3, 2, 5, 6, 7), (12, 13, 14)\}$$

Cette séquence d'assemblage est constituée de :

$$3 \text{ sous-assemblages en série : } \begin{cases} SA_1 = (1, 11, 8, 10, 9) \\ SA_2 = (4, 3, 2, 5, 6, 7) \\ SA_3 = (12, 13, 14) \end{cases}$$

Pour cette séquence, quatre éléments de base ont été définis, à savoir le composant 1 pour le sous-assemblage  $SA_1$ , le composant 4 pour le sous-assemblage  $SA_2$ , le composant 12 pour le sous-assemblage  $SA_3$ , et le sous-assemblage  $SA_1$  pour l'assemblage final du produit.

Une fois la séquence d'assemblage choisie par le gammiste dans l'application PEGASUS, celle-ci est exportée dans le système NOTIXIA (étape 2 de la FIG. 92), en apportant des liens chronologique et de précédence via un fichier .xml. De cette manière, le gammiste peut travailler dans son propre domaine en définissant les différentes opérations d'assemblage constituant la gamme d'assemblage, telles que représentées par la FIG. 96. Ainsi, la définition des opérations d'assemblage va permettre d'apporter des contraintes au niveau des

directions d'insertion des composants, c'est la raison pour laquelle, nous allons prendre en compte ces informations dans l'application PEGASUS (étape 3 de la FIG. 92)

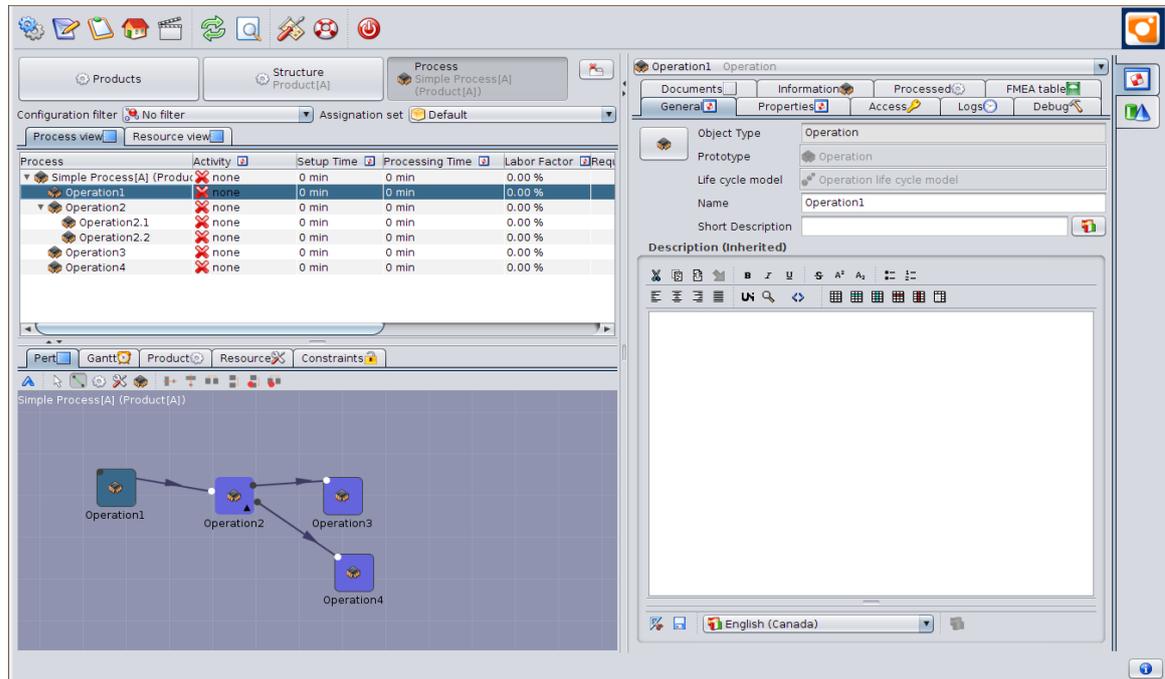


FIG. 96 — Définition des opérations d'assemblage et récupération des liens de précédence dans le système NOTIXIA

#### 4.4.2.4 Mise à jour de la nomenclature produit et de la structure produit dans la plateforme ACSP

De manière parallèle, la séquence d'assemblage, choisie par le gammiste dans l'application PEGASUS, va impacter la nomenclature produit et la structure produit, préalablement établie dans la plateforme ACSP (étape 4 de la FIG. 92).

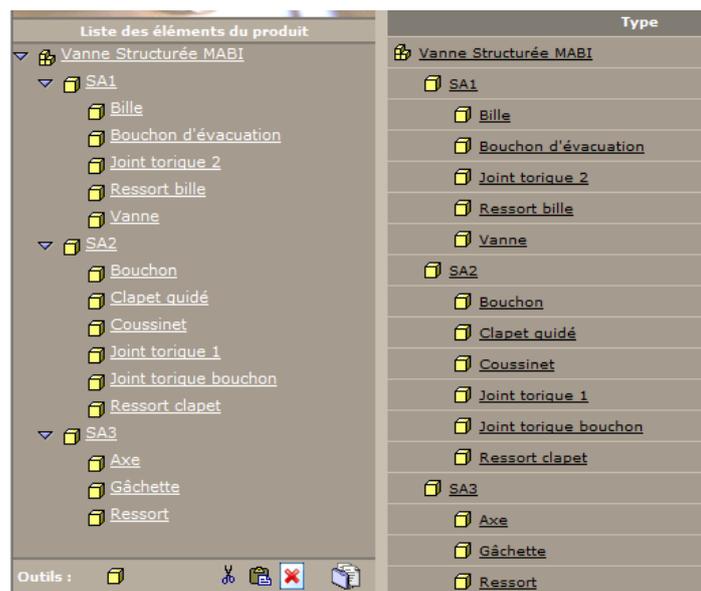


FIG. 97 — Mise à jour de nomenclature produit et de la structure produit

Pour ce faire, l'application PEGASUS, via un fichier .xml, va créer des liens de composition et des nouvelles entités, telles que les sous-ensembles  $SA_1$ ,  $SA_2$ ,  $SA_3$ , afin de procéder à la mise à jour des informations dans la plateforme ACSP. La FIG. 97 présente la nomenclature produit et la structure produit mises à jour dans le module PDM de la plateforme ACSP.

#### 4.4.2.5 Contextualisation des informations du couple produit-process dans PEGASUS Assistant CAO et CATIA v5

Une fois les informations du couple produit-process définies dans les systèmes ACSP et NOTIXA, l'application PEGASUS va procéder à la contextualisation de ces informations dans le système CATIA v5 (étape 5 de la FIG. 92). En effet, l'objectif principal du cadre méthodologique PASODE est de pouvoir définir une séquence d'assemblage, le plus tôt possible dans le processus de développement des produits, et de l'exploiter pour apporter un contexte d'assemblage pour le(s) concepteur(s). Ceci sous-entend donc de pouvoir gérer les informations du couple produit-process, et de pouvoir prendre en compte des modifications bidirectionnelles de ces informations.

Pour ce faire, PEGASUS Assistant CAO, exploite la liste des relations (BOR) issue de l'application PEGASUS, et intégrant les différents niveaux d'abstraction (Tab. 22). Afin de faciliter la compréhension du lecteur, nous avons extrait les différents graphes de l'application PEGASUS, et nous allons décrire les étapes permettant de définir le modèle squelette minimal pour le sous-ensemble « vanne ».

A partir du graphe orienté valué  $\mathcal{G}$ , défini pour le sous-ensemble « vanne », représenté par la FIG. 98, et des tableaux de correspondances TAB. 14 et TAB. 15, nous obtenons le graphe des contraintes entre les composants de la vanne, qui est représenté par la FIG. 99. Celui-ci permet de traduire les relations cinématiques, sous la forme de contraintes de positionnement entre les composants du produit.

Une fois ces contraintes de positionnement définies, PEGASUS Assistant CAO, identifie les entités squelettiques, telles que représentées par la FIG. 100. Par exemple, une contrainte de coïncidence entre l'axe du composant 2 et l'axe du composant 3 fera émerger une entité squelettique de type « ligne ». De même, une contrainte de coïncidence entre le plan du composant 1 et le plan du composant 7 fera émerger une entité squelettique de type « plan ». De plus, en fonction du type de relation cinématique et conformément aux TAB. 14 et TAB. 15, PEGASUS Assistant CAO affectera automatiquement des contraintes entre les entités squelettiques identifiées entre deux composants. Par exemple, la relation  $R_{2-3}$  est une relation cinématique de type Pivot, qui induit deux contraintes de coïncidence Axe 2-Axe 3 et Plan 2- Plan 3, ce qui, par conséquent, fait émerger deux entités squelettiques « Ligne » et « Plan » reliées par une contrainte de perpendicularité.

A partir de cet embryon de réseau squelettique, l'architecte a la possibilité, via PEGASUS Assistant CAO, d'introduire des contraintes entre les entités squelettiques issues de relations cinématiques différentes. Ces contraintes peuvent être visualisées par la FIG. 101 et nous permettent de définir le graphe des squelettes  $\mathcal{G}_{SKL}$ . Dans ce contexte, il est possible de contracter ce graphe, en fonction des contraintes apportées par l'architecte produit, en un graphe minimal des squelettes, afin de simplifier le contexte d'assemblage et la gestion des entités associées (FIG. 102).

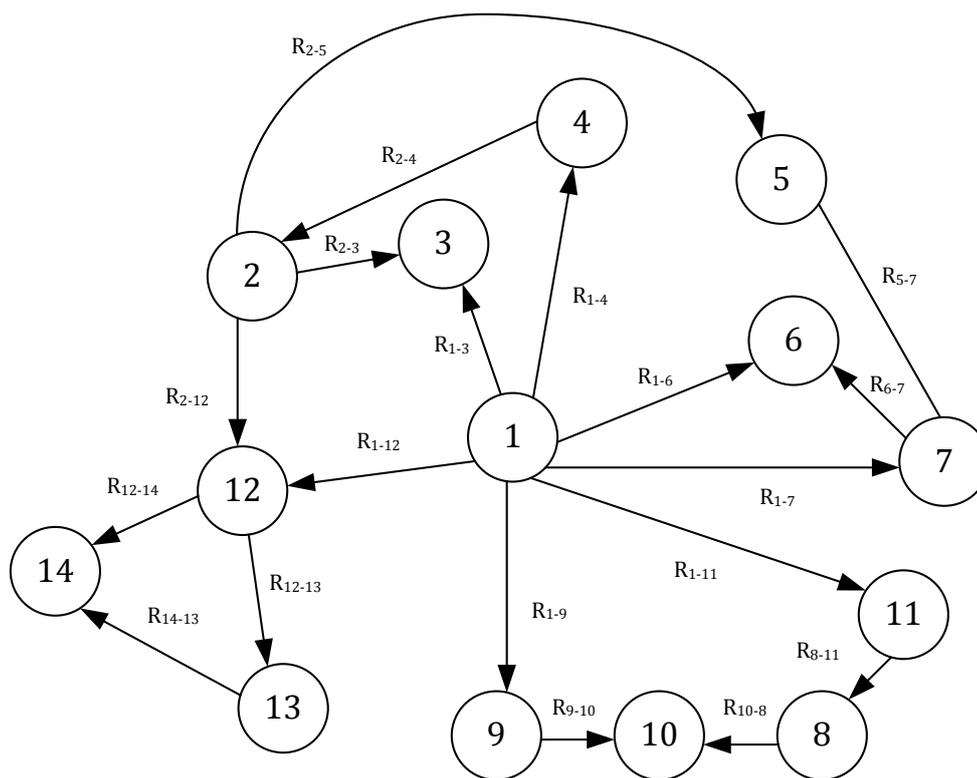


FIG. 98 — Graphe orienté défini pour la vanne

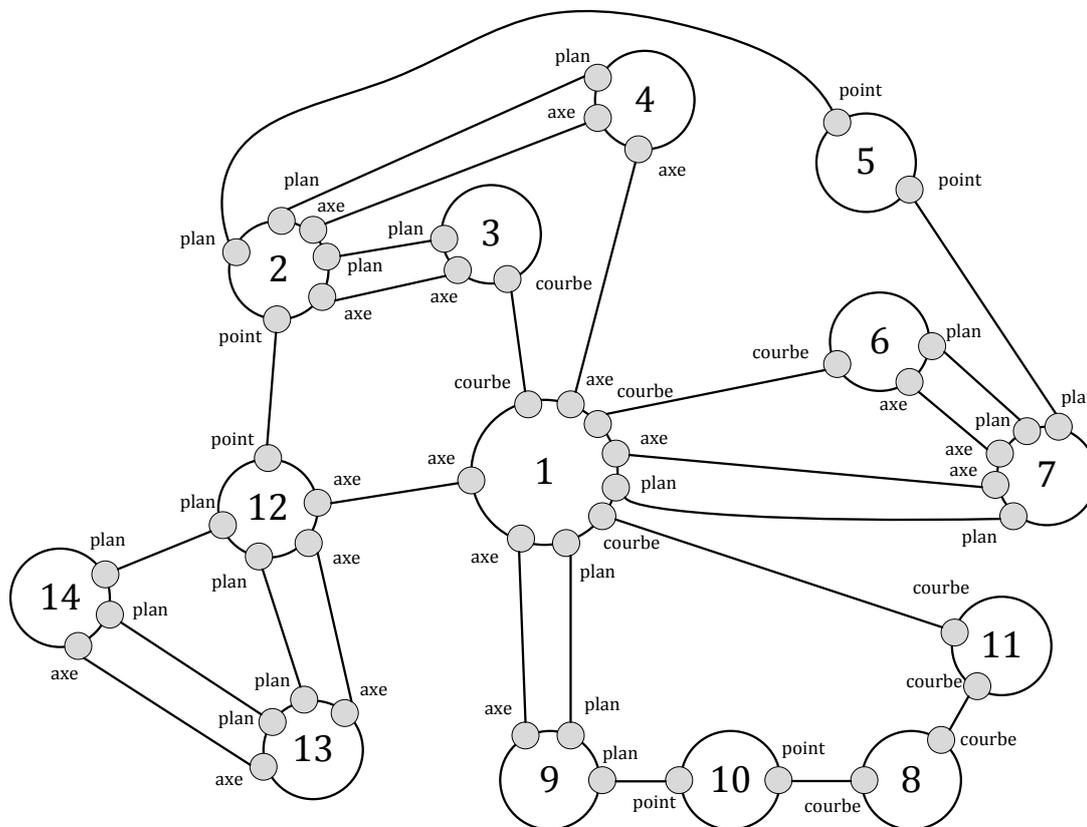


FIG. 99 — Emergence des contraintes entre les composants de la vanne

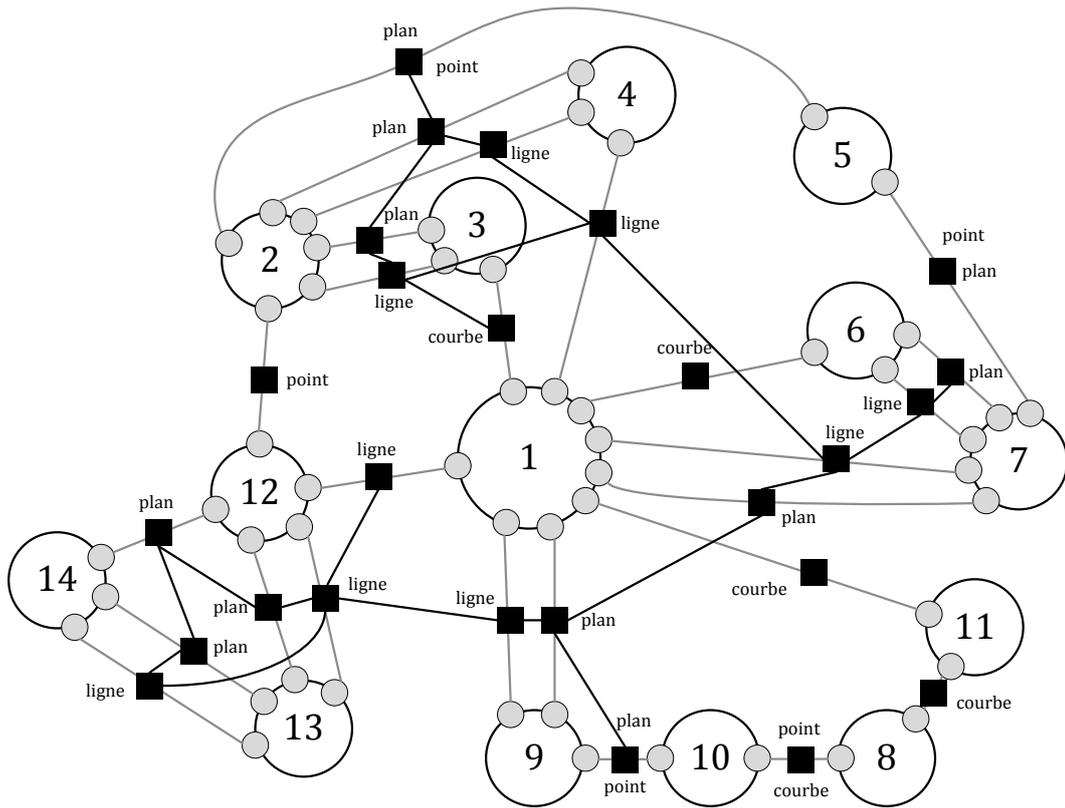


FIG. 100 — Emergence d'entités squelettiques de la vanne

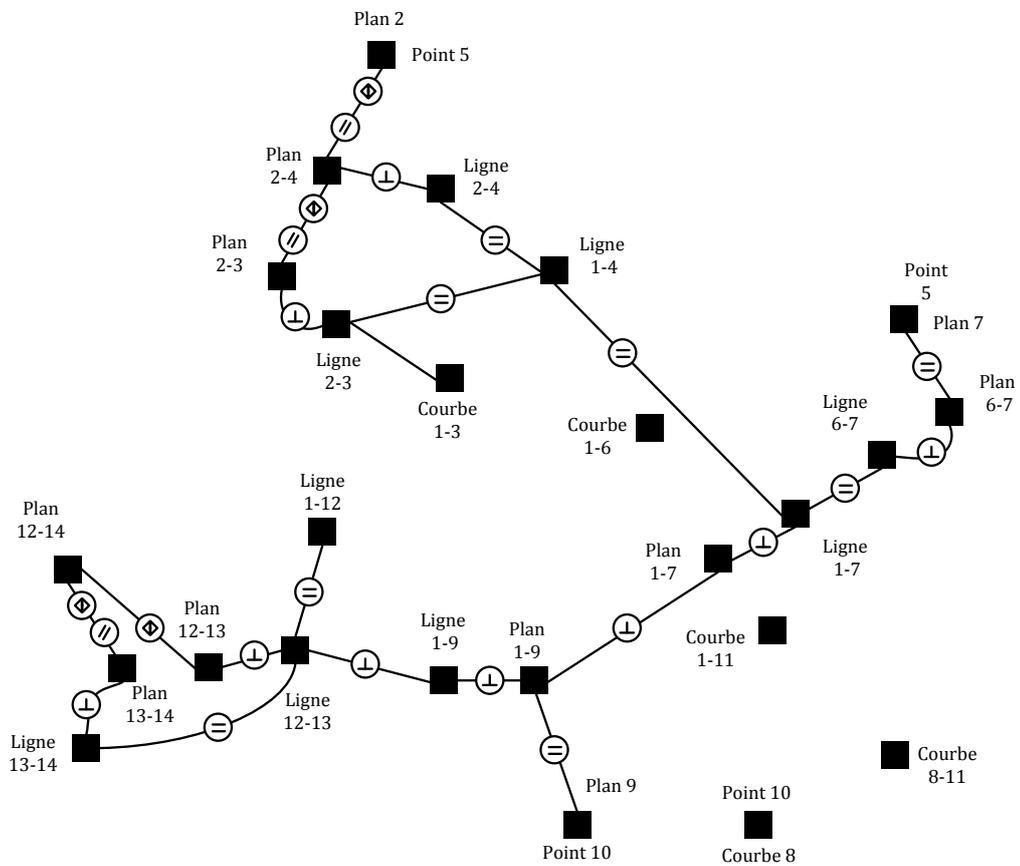


FIG. 101 — Graphe des squelettes d'assemblage de la vanne

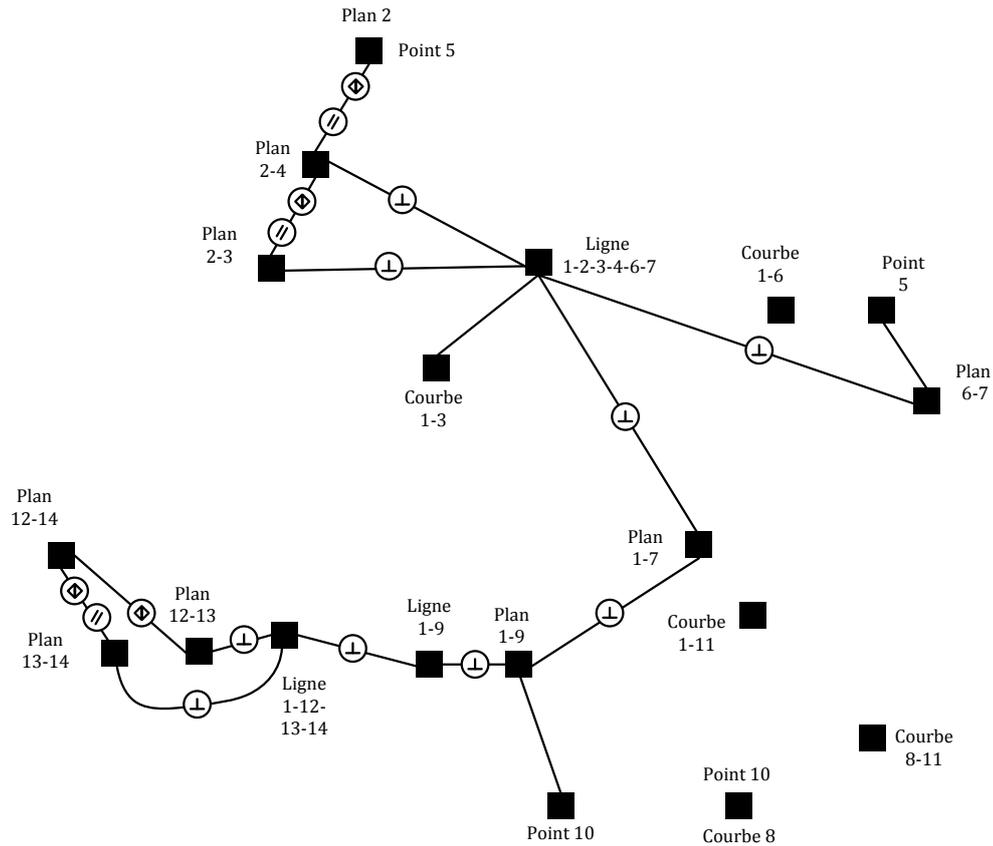


FIG. 102 — Graphe minimal des squelettes d'assemblage de la vanne

A partir du graphe minimal des squelettes d'assemblage, nous allons pouvoir apporter les informations issues de la séquence d'assemblage, à savoir les différents sous-assemblages et les niveaux associés, les repères d'assemblage en fonction des retournements et des directions d'assemblage. Ces informations vont nous permettre de regrouper les entités squelettiques dans les squelettes d'assemblage associés à chaque niveau d'assemblage.

Nous pouvons remarquer que la séquence d'assemblage a introduit 4 éléments de base, sur lesquels 4 repères d'assemblage seront associés. De ce fait, nous proposons 4 repères d'assemblage, tels que le repère associé au sous-assemblage SA<sub>1</sub>, le repère associé au composant 1, le repère associé au composant 4, et le repère associé au composant 12. Ces repères peuvent être visualisés dans CATIA v5 (FIG. 103).

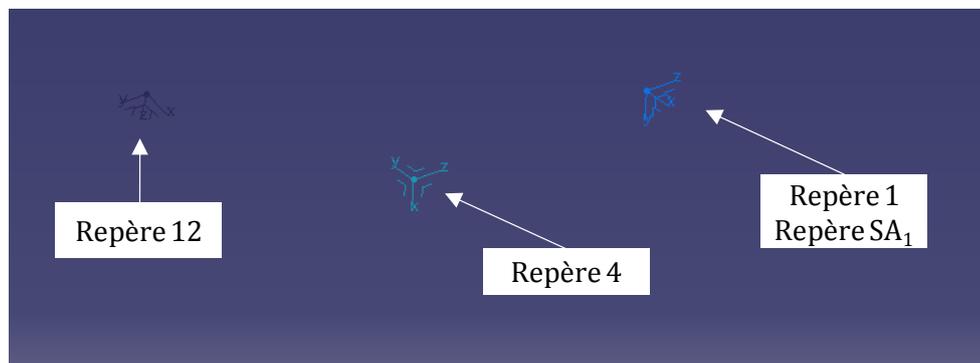


FIG. 103 — Repères d'assemblage définis dans CATIA v5, en fonction de la séquence d'assemblage

Une fois les repères d'assemblage identifiés et définis, en fonction des retournements, des directions d'assemblage et de leur position spatiale (FIG. 103), nous proposons d'introduire des contraintes, afin de chaîner les entités squelettiques associées au squelette d'assemblage dans lequel le repère se situe (cf. *Chapitre 4 Partie 2 Paragraphe 2.6*).

La FIG. 104 présente le graphe minimal des squelettes d'assemblage intégrant les informations issues de la séquence d'assemblage, définie par le gammiste via l'application PEGASUS et le système NOTIXIA. Nous pouvons visualiser les regroupements d'entités squelettiques, les différentes contraintes entre elles, ainsi que les entités directrices publiées et référencées en fonction des niveaux d'assemblage du produit.

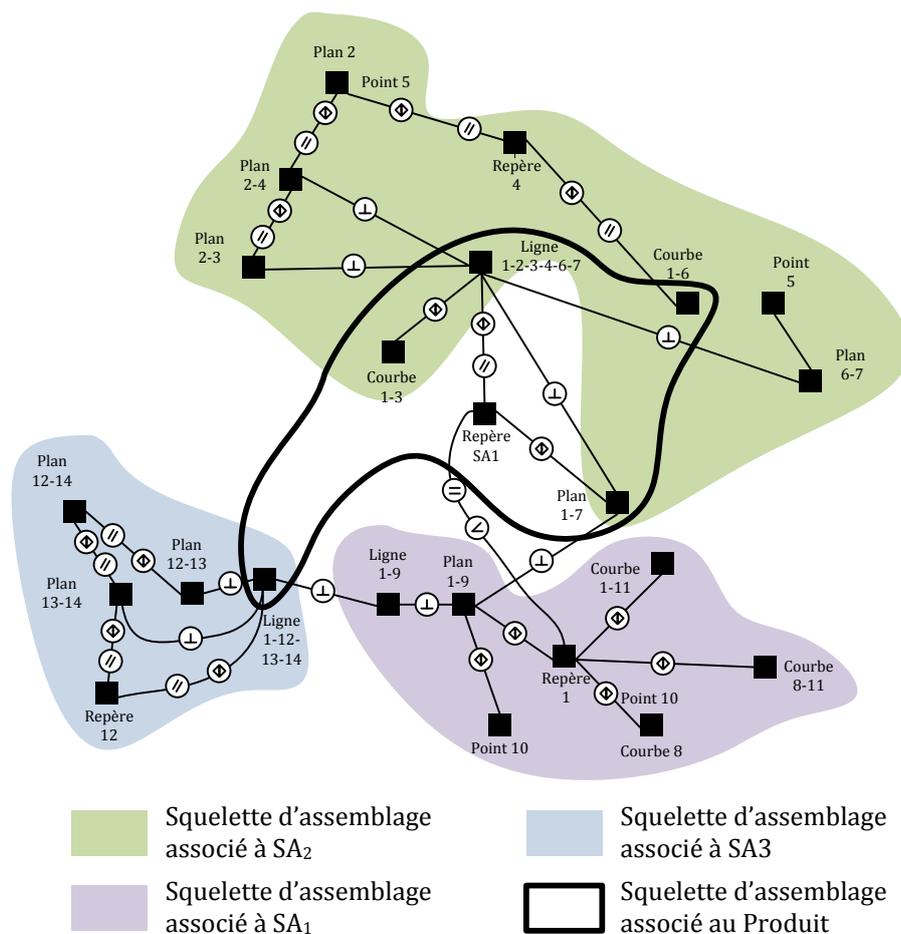


FIG. 104 — Graphe minimal des squelettes intégrant les informations issues de la séquence d'assemblage

Ce type de graphe peut être construit de manière semi-automatique via la macro PEGASUS Assistant CAO, tel que représenté par la FIG. 105. En effet, nous avons spécifiquement développé cette macro, afin de faciliter la définition des entités squelettiques. Pour ce faire, l'architecte produit doit reprendre la liste des relations (BOR), issue de l'application PEGASUS, pour créer les entités squelettiques. Par contre, il devra insérer manuellement les contraintes entre les entités, telles que décrit via le graphe minimal des squelettes d'assemblage (FIG. 104). Pour chaque entité squelettique définie dans un squelette d'assemblage, une publication est créée dans CATIA v5. Pour les entités squelettiques situées à l'interface de deux squelettes d'assemblage, telles que la Ligne 1-12-13-14, la

Courbe 1-6, le Plan 1-7, la Ligne 1-2-3-4-6-7 et la Courbe 1-3, nous définirons dans CATIA v5 une publication pour chacune de ces entités au niveau du squelette d'assemblage supérieur, dans notre cas au niveau du squelette d'assemblage associé au produit.

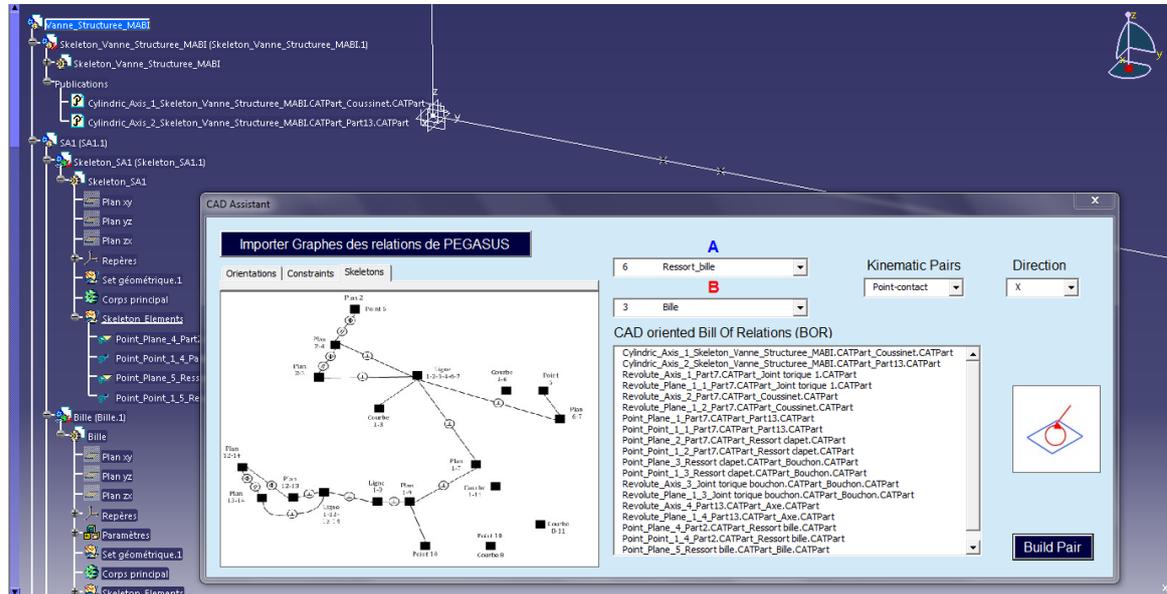


FIG. 105 — Définition des entités squelettiques via PEGASUS Assistant CAO dans CATIA v5

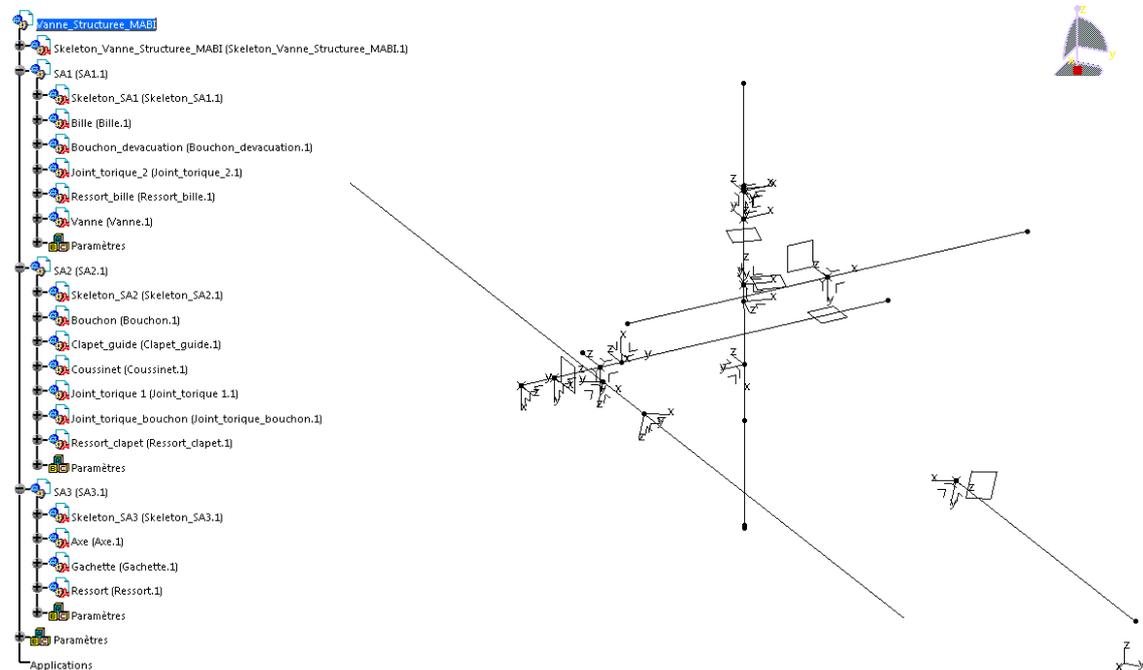


FIG. 106 — Modèle minimal des squelettes dans CATIA v5

Au final, l'architecte produit peut capitaliser les entités squelettiques définies, et visualiser la liste des publications créées automatiquement dans CATIA v5 via PEGASUS Assistant CAO (FIG. 105) (étape 6 de la FIG. 92). La FIG. 106 présente le modèle minimal des squelettes d'assemblage défini par l'application PEGASUS Assistant CAO. Une fois les entités squelettiques définies et les publications créées, l'architecte pourra envoyer les documents CAO dans les systèmes PDM (ACSP dans notre cas) (étape 7 de la FIG. 92).

## 4.5 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie, l'application des approches SKL-ACD et PRM à un cas industriel concret : la conception d'un sous-ensemble « vanne » appartenant à un marteau piqueur pneumatique, pour l'entreprise MABI. Cette expérimentation illustre l'intérêt de définir une séquence d'assemblage, dès que possible dans le processus de développement, afin d'apporter un contexte d'assemblage à base de squelettes.

Pour ce faire, nous pouvons souligner le développement de la macro VB PEGASUS Assistant CAO, utilisée comme passerelle entre l'application PEGASUS et CATIA v5, afin que l'architecte produit puisse définir les entités squelettiques traduisant les intentions de conception et d'assemblage du produit (dans notre cas la « vanne »).

Pour ce cas d'étude, l'application PEGASUS et l'application PEGASUS Assistant CAO ont su jouer un rôle d'orchestration des flux d'informations, en gérant les informations relationnelles et les associations dans les systèmes PLM. En effet, l'intérêt des applications PEGASUS et PEGASUS Assistant CAO réside en la gestion d'entités différentes des entités manipulées par les systèmes PDM, MPM, et CAO, de manière indépendante, facilitant ainsi la prise en compte aussi bien des intentions de conception que des intentions d'assemblage, via la séquence d'assemblage. Il en résulte qu'un modèle squelette final, défini de manière semi-automatique dans CATIA v5, est le fruit de cette intégration dite « proactive » de la gamme d'assemblage au sein du processus de développement des produits.

## 5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons appliqué notre contribution scientifique, à savoir le modèle MUVOA et le cadre méthodologique PASODE, à trois cas industriels de secteurs d'activité différents. Ces trois expérimentations nous ont permis de faire évoluer nos approches proposées dans le cadre méthodologique PASODE, et de développer plusieurs applications prototypes. Ces applications prototypes ont fait émerger le développement d'une application de type PRM, baptisée PEGASUS, à l'interface des systèmes PDM, MPM, et CAO. De plus, nous avons proposé, lors de la dernière expérimentation, une application passerelle entre l'application PEGASUS et le système CATIA v5, afin de valider nos approches proposées, plus particulièrement les approches SKL-ACD et PRM. Cette macro VB fera l'objet d'un développement futur, afin d'être intégrée à l'application PEGASUS.

# Chapitre 6 .

## Conclusion générale et perspectives

*« Je suis réellement un homme quand mes sentiments, mes pensées et mes actes n'ont qu'une finalité : celle de la communauté et de son progrès. »*

*Albert Einstein.*

### Contenu du chapitre

---

<b>1. Conclusion générale.....</b>	<b>191</b>
<b>2. Perspectives de recherche .....</b>	<b>193</b>
2.1 Perspectives à court terme : amélioration du cadre méthodologique PASODE.....	193
2.2 Perspective à moyen terme : approche d'ingénierie ontologique en contexte PLM .....	194
2.3 Perspective à long terme : prise en compte des phases de désassemblage et de recyclage .....	195



Ce dernier chapitre a pour objectif, de faire la synthèse de notre contribution scientifique, et d'apporter des perspectives de recherche, permettant de concrétiser et valider nos propositions, et enfin, d'élargir les domaines abordés dans la thèse. De ce fait, la première partie apporte une conclusion générale sur l'ensemble des propositions développées dans la thèse. La seconde partie décrit, quant à elle, les perspectives de travaux dans la continuité de ce que nous avons proposé.

## 1. Conclusion générale

Nos travaux de thèse se sont inscrits dans le projet de recherche et de transfert de technologie baptisé **CoDeKF (Collaborative Design and Knowledge Factory)**. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés aux domaines de la conception pour l'assemblage, de la définition/génération de séquences d'assemblage, et de la gestion du cycle de vie des produits. Bien que les questions d'intégration du couple produit-process aient fait l'objet de nombreux travaux de recherche, notamment dans le domaine de la définition de la gamme de fabrication via le projet RNTL USIQUICK [Candlot *et al.*, 2008], nous nous sommes focalisés sur les informations liées au processus d'assemblage, et plus particulièrement à la gamme d'assemblage. En effet, que ce soit dans le secteur automobile ou aéronautique, les problématiques d'assemblage du produit nécessitent d'être considérées, le plus tôt possible dans le processus de développement des produits, car ayant un impact non négligeable sur les différents aspects du produit, tels que les aspects fonctionnel, structurel, géométrique, etc.

C'est la raison pour laquelle, *l'objectif* de nos travaux de recherche a été de proposer une approche de conception et de gestion des informations techniques intégrant, dès les phases amont du processus de développement, les problématiques d'assemblage du produit.

Dès lors, le premier chapitre a présenté les enjeux industriels et le contexte scientifique, qui ont permis de définir le périmètre et la problématique de nos travaux de recherche. De cette manière, nous avons pu définir l'implication de la thèse à travers différents objectifs à poursuivre.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique des travaux déjà réalisés et ceux toujours en cours, au regard de la problématique posée. Nous avons donc abordé les domaines de la conception intégrée, de la conception pour l'assemblage, et de la gestion des informations du couple produit-process en contexte PLM. Cet état de l'art nous a permis de nous situer, de manière précise, par rapport aux travaux majeurs dans les domaines concernés. Il en résulte des besoins en un modèle cohérent et flexible, capable de travailler avec des informations préliminaires sur divers aspects du produit et du processus d'assemblage, et en une méthodologie de conception et de gestion intégrée des informations du couple produit-process.

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé la *première partie de notre contribution*. Tout d'abord, celle-ci a consisté en la définition d'un *modèle*, baptisé **MUVOA (Multi-Vues Orienté Assemblage)**, intégrant des vues spécifiques (fonctionnelle, comportementale, structurelle, technologique, géométrique et contextuelle) associées aux domaines du « produit » et du « processus d'assemblage » [Demoly *et al.*, 2010b]. Nous avons également décrit un *cadre méthodologique* de conception proactive orientée assemblage, baptisé **PASODE (Proactive**

**AS**sembly-**O**riented **D**esign), qui vise à définir la séquence d'assemblage optimale en phase préliminaire du processus de développement du produit, afin d'apporter un contexte d'assemblage à l'architecte produit et au(x) concepteur(s). Ce cadre méthodologique PASODE peut être décomposé en plusieurs *approches* (au total 3), dont une a été décrite dans ce chapitre (chapitre 3). L'approche en question se base sur un *algorithme* de définition de séquences d'assemblage admissibles, baptisé **ASDA** (**A**ssembly **S**equences **D**efinition **A**lgorithm), qui permet de générer, soit de manière pas à pas, soit de manière automatique, les séquences d'assemblage admissibles du produit, en fonction d'informations relationnelles définies à différents niveaux d'abstraction [Demoly *et al.*, 2010a] [Demoly *et al.*, 2010c]. Cet algorithme a ensuite subi une évolution, afin d'identifier, parmi l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles, la séquence d'assemblage permettant de satisfaire, de manière optimale, toutes les exigences géométriques du produit [Demoly *et al.*, 2010d].

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté la *seconde partie de notre contribution*. Pour ce faire, nous avons apporté *deux nouvelles approches* qui sont cohérentes avec les objectifs du cadre méthodologique PASODE, à savoir la définition d'un contexte d'assemblage dans les phases préliminaires du processus de développement des produits, et la gestion intégrée des informations du couple produit-process. Il en résulte la description d'une première approche, baptisée **SKL-ACD** (**SK**Leton-based **A**ssembly **C**ontext **D**efinition), qui permet de considérer les informations relationnelles du produit (relations) et les informations issues de la séquence d'assemblage préalablement définie pour la définition d'un contexte d'assemblage. Par conséquent, ce contexte, composé d'entités squelettiques, se base sur les intentions de conception et d'assemblage du produit. Ce contexte à base de squelettes servira de support au(x) concepteur(s) pour définir la géométrie du produit. La seconde approche, décrite dans ce quatrième chapitre, est la dernière approche constituant le cadre méthodologique PASODE. Baptisée **PRM** (**P**roduct **R**elationships **M**anagement), cette approche tend à gérer les relations du produit, à l'interface des systèmes PLM de type PDM, MPM et CAO [Demoly *et al.*, 2010e]. Cette approche permet de gérer des entités actuellement non exploitées dans les systèmes PLM du marché : à savoir les informations relationnelles du produit et les associations. Traduisant les intentions de conception et d'assemblage des composants, ces entités nécessitent d'être gérées, de manière indépendantes et en fonction des flux d'informations du couple produit-process, via les vues définies dans le modèle MUVOA. Il en résulte un apport en une meilleure interaction entre les systèmes de gestion des informations du produit (PDM, CAO) et du process (MPM).

Dans le cinquième chapitre, nous avons appliqué le modèle et les approches proposées, car faisant partie intégrante du cadre méthodologique PASODE, à trois cas industriels provenant de secteurs d'activités différents, afin d'illustrer au mieux la validité de notre contribution. Pour ce faire, nous avons développé des outils logiciels prototypes sous les environnements logiciels MATLAB et CATIA v5, afin d'appliquer notre modèle et nos approches. Ces outils prototype ont contribué au développement d'une nouvelle application logicielle, baptisée **PEGASUS** (**P**roduct design **E**ngineering based on **G**enerative **A**ssembly **S**equences **S** planning), comme outil de **Product Relationships Management (PRM)**, support du modèle MUVOA et du cadre méthodologique PASODE proposés, et en connexion étroite avec les systèmes PDM, MPM et CAO. Cette nouvelle famille d'application permet d'apporter une meilleure interaction dans la gestion des informations du produit et du process, en

gérant les relations du produit, à différents niveaux d'abstraction, à l'interface des systèmes PLM.

En résumé, notre contribution, portant sur la conception intégrée et la gestion d'informations techniques appliquées à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage, se compose d'un modèle multi-vues **MUVOA**, d'un cadre méthodologique **PASODE** intégrant trois approches telles que **ASDA**, **SKL-ACD** et **PRM**, et d'une nouvelle application logicielle **PEGASUS**. Nous pouvons souligner l'originalité de la contribution, car permettant d'intégrer, de manière proactive, les informations définies dans la phase de définition de gamme d'assemblage au sein du processus de développement des produits, plus particulièrement dans les phases préliminaires. Introduite dans le contexte plus large du PLM, notre contribution a permis de gérer, de manière intégrée, les informations du couple produit-process avant que la géométrie du produit soit complètement spécifiée. Plusieurs nouveaux concepts ont pu émerger de cette contribution, tels que les « **graphes des squelettes** » ou encore la « **gestion des informations relationnelles** » (*Product Relationships Management*), soulignant par conséquent l'originalité de la thèse. Le paragraphe suivant vise à apporter nos perspectives de recherche en vue de valider, d'améliorer, et d'élargir nos propositions.

## 2. Perspectives de recherche

Devant l'étendue des domaines abordés dans notre contribution, les perspectives peuvent être multiples, tant dans le domaine de la conception des produits que dans le domaine de définition/planification des gammes d'assemblage. Nous allons donc proposer des perspectives en fonction des objectifs fixés dans le cadre méthodologique PASODE, à savoir l'intégration de l'ingénierie des gammes d'assemblage au sein du processus de développement, et la gestion des informations du couple produit-process en contexte PLM. Il s'agit, ici, d'apporter un regard extérieur à nos travaux, afin de proposer des perspectives qui permettent, soit de valider, soit d'améliorer, soit d'adapter nos travaux à d'autres domaines de recherche. Pour ce faire, nous proposons trois perspectives de recherche, étroitement liées aux deux objectifs mentionnés ci-dessus, dont une vision à court terme destinée à concrétiser nos approches proposées, et deux autres à moyen et long terme, afin d'adapter notre contribution aux contextes du PLM et de la production durable (*Sustainable manufacturing*). Nous décrivons ces perspectives à travers les trois paragraphes ci-dessous.

### 2.1 Perspectives à court terme : amélioration du cadre méthodologique PASODE

Dans ce paragraphe, nous allons aborder les perspectives à court terme pour l'amélioration des approches développées dans le cadre méthodologique PASODE, à savoir l'approche intégrant l'algorithme ASDA et l'approche SKL-ACD.

Tout d'abord, l'approche intégrant l'algorithme ASDA et son évolution ont mis en avant des faiblesses au niveau du choix de la séquence d'assemblage optimale. En effet, la séquence d'assemblage optimale doit résulter d'un compromis entre les paramètres issus du contexte de production, les exigences géométriques à satisfaire, voire d'autres critères liés aux phases situées en fin de cycle de vie des produits (*End of Lifecycle – EOL*), telles que la phase

de désassemblage et la phase de recyclage. C'est la raison pour laquelle une approche d'optimisation multi-objectif doit être mise en place, afin de trouver la séquence d'assemblage capable de satisfaire les contraintes liées aux phases du cycle de vie du produit.

La deuxième perspective à court terme porte sur l'approche SKL-ACD proposée, et plus particulièrement sur l'étape de définition du graphe minimal des squelettes d'assemblage. En effet, l'étape de définition manuelle des contraintes entre les entités squelettiques peut devenir fastidieuse, de part le nombre d'entités à contraindre, et par conséquent offre la possibilité à l'architecte produit de commettre des erreurs dans leurs affectations. Par conséquent, il conviendra de définir des mécanismes complémentaires à ceux existants, afin de vérifier la cohérence des contraintes de positionnement entre les diverses entités.

De plus, cette nouvelle forme de représentation des entités squelettiques en graphe peut se voir accompagner d'une phase de définition des « interfaces » et des « volumes-enveloppes » associé à chaque composant et sous-ensemble. Par exemple, pour le cas du montage d'un cylindre dans un alésage (liaison pivot), nous définirons la « ligne » comme entité squelettique, et un « cercle » comme entité squelettique d'interface. De cette manière, nous pourrions nous appuyer sur ces types d'entités pour définir les surfaces fonctionnelles. Une fois les surfaces fonctionnelles définies, nous pourrions proposer d'affecter des volumes-enveloppes intégrant des contraintes de symétrie, tels que représentés dans [Boothoyd & Dewhurst, 1983], afin de contrôler les temps associés aux opérations de manipulation et d'insertion des composants/sous-ensembles tout en définissant la géométrie du produit.

La dernière perspective à court terme que nous pouvons proposer, porte sur les développements de l'application PEGASUS. Afin d'être en cohérence avec la première perspective, il sera nécessaire d'intégrer l'algorithme d'optimisation multi-objectif dans l'application, ceci afin de calculer automatiquement, pour l'ensemble des séquences d'assemblage admissibles, les différents critères à optimiser, tels que mentionné dans le TAB. 13, et de fournir une véritable aide à la décision. Il pourrait être intéressant d'intégrer directement dans l'application PEGASUS, la macro PEGASUS Assistant CAO développée dans l'environnement CATIA v5, de manière à générer, au final, les documents CAO, la structure produit, la structure de squelettes et le réseau d'entités squelettiques associé. Le dernier point, que nous pouvons identifier en terme de développement, consiste à travailler sur les problématiques d'interopérabilité entre l'application PEGASUS et les systèmes PLM de type, PDM, MPM et CAO, afin de faciliter les échanges d'information et la propagation des informations du couple produit-process.

## **2.2 Perspective à moyen terme : approche d'ingénierie ontologique en contexte PLM**

Sur la base du modèle MUVOA et de l'approche PRM présentés, nous pouvons proposer une perspective à moyen terme qui consiste à maintenir la traçabilité des informations et des connaissances du couple produit-process en début de cycle de vie de du produit (*Beginning of Lifecycle – BOL*). Dans ce contexte PLM, la mise en place d'une approche d'ingénierie ontologique, pour manipuler les informations relationnelles et les connaissances associées [Hui *et al.*, 2007] [Lanz *et al.*, 2008], permettrait d'apporter une assistance proactive aux

acteurs métier impliqués dans les questions de conception orientée assemblage. De cette manière, une approche de ce type, accompagnée d'un système multi-agents [Zha, 2002] [Monticolo, 2008], intégrant par exemple des agents médiateurs au niveau des informations relationnelles, permettra d'apporter une aide à la décision centrée sur les acteurs métier, en raisonnant sur les informations et connaissances capitalisées lors de précédents projets [Mountney & Gao, 2006] [Yu-liang & Wei, 2009]. Cette approche permettra également de renforcer l'aspect intégration des données-informations-connaissances pour notre contexte [Morris *et al.*, 2004] [Kang & Peng, 2010].

### **2.3 Perspective à long terme : prise en compte des phases de désassemblage et de recyclage**

La dernière perspective à long terme, que nous pouvons proposer, est de considérer les contraintes des métiers situés en fin de cycle de vie des produits, à savoir la phase de désassemblage et la phase de recyclage des produits dans les phases préliminaires du processus de développement [Haoues, 2006], ainsi que dans la phase de définition/planification de gammes d'assemblage. Dans ce contexte, nous nous attacherons à concevoir et gérer les différentes gammes associées aux phases du cycle de vie des produits, telles que la gamme d'assemblage, la gamme de désassemblage et la gamme de recyclage. De ce fait, nous apporterons à l'architecte produit et au(x) concepteur(s), un contexte issu des phases du cycle de vie du produit, et basé sur les différentes gammes. Pour ce faire, nous nous attacherons à enrichir notre modèle MUVOA en intégrant les domaines et vues associés à ces phases, et à un fournir une approche de gestion efficace et cohérente des différentes gammes associées au produit.



# Références bibliographiques

## 1. Valorisation des travaux de thèse

### 1.1 Revues internationales avec comités de lecture

- [Demoly *et al.*, 2010e] Demoly F., Yan X.-T., Eynard B., Gomes S., (2010) Product relationships management: en enabler for integrated product and assembly process design to support PLM, *Journal of Engineering Design*, under review.
- [Demoly *et al.*, 2010d] Demoly F., Falgarone H., Fricero B., Troussier N., Eynard B., Gomes S., (2010) Integrated product-process design based on the deployment of functional requirements, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, under review.
- [Demoly *et al.*, 2010c] Demoly F., Yan X.-T., Eynard B., Rivest L., Gomes S., (2010) An Assembly-Oriented Design Framework for Product Structure and Assembly Sequence Planning, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, DOI:10.1016/j.rcim.2010.05.010.
- [Demoly *et al.*, 2010b] Demoly F., Eynard B., Rivest L., Gomes S., (2010) Towards a assembly-oriented multiple views model, *International Journal in Interactive Design and Manufacturing*, under review.
- [Toussaint *et al.*, 2010] Toussaint L., Demoly F., Lebaal N., Gomes S., (2010) PLM-based approach for design verification and validation using manufacturing process knowledge, *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-7.
- [Demoly *et al.*, 2010a] Demoly F., Eynard B., Rivest L., Gomes S., (2010) PLM-based approach for Assembly Process Engineering, *International Journal of Manufacturing Research*, Vol. 5, No.4, pp. 414-428.

### 1.2 Chapitre d'ouvrage international

- [Gomes *et al.*, 2008] Gomes S., Demoly F., Mahdjoub M., Sagot J-C., (2008) Integration of Design for Assembly into a PLM environment, in Yan X.-T., Eynard B., Ion W.J. (Eds.), *Global Design to Gain a Competitive Edge – An Holistic and Collaborative Design*

*Approach based on Computational Tools*, Springer, London, pp. 117-126.

### 1.3 Conférence internationales avec comités de lecture

- [Demoly *et al.*, 2009b] Demoly F., Gomes S., Eynard B., Sagot J-C., (2009) Assembly-oriented product structure based on preliminary assembly process engineering, *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED'09*, 24-27 august 2009, Stanford, San Francisco, CA, USA, Vol. 7, ISBN 9 781904 670117.
- [Demoly *et al.*, 2008b] Demoly F., Gomes S., Eynard B., Sagot J-C., (2008) Towards a Design for Assembly Approach based on SysML Paradigm and PLM Systems, *2nd CIRP International Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS)*, 21-23 September 2008, Toronto, Canada, pp. 100-113.

### 1.4 Colloques nationaux avec comités de lecture

- [Demoly *et al.*, 2009a] Demoly F., Gomes S., Eynard B., Rivest L., Sagot J-C., (2009) Vers un modèle multi-vues orienté assemblage, *11ème Colloque National AIP-Primeca de La Plagne*, 22-24 avril 2009, La Plagne, France.
- [Demoly *et al.*, 2008a] Demoly F., Gomes S., Eynard B., Sagot J-C., (2008) Towards a DFA approach based on PLM system using SysML, *15ème Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception*, Angers, 3-4 juillet.
- [Demoly *et al.*, 2007] Demoly F., Gomes S., Sagot J-C., (2007) Intégration du Design for Assembly dans un environnement PLM, *14ème Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception*, Paris, 6-7 juillet.

## 2. Références externes

### A

---

- [Aberdeen Group, 2006] Aberdeen Group, Inc., (2006) The PLM for Small Mid- size Manufacturers Benchmark Report.
- [Abramovici & Sieg, 2002] Abramovici M., Sieg O.C., (2002) Status and Development Trends of Product Lifecycle Management System, in *Proceedings of IPPD 2002*, Wroclaw, Poland.
- [Abramovici, 2007] Abramovici, M, (2007) Future Trends in Product Lifecycle Management, in *The Future of Product Development*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 665-674.
- [Agard, 2002] Agard B., (2002) Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité, Thèse de doctorat de l'INPG.
- [Amann, 2002] Amann K., (2002) Product lifecycle management: empowering the future of business, CIM Data, Inc.

- [Ammar-Khodja, 2007] Ammar-Khodja S., (2007) Processus d'aide à la spécification et à la validation d'ingénierie à base de connaissances, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [Ammar-Khodja *et al.*, 2008] Ammar-Khodja S., Perry N., Bernard A., (2008) Processing Knowledge to Support Knowledge-based Engineering Systems Specification, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 16, pp. 89-101.
- [Andreasen *et al.*, 1983] Andreasen M.M., Kahler S., Lund T., (1983) Design for Assembly
- [Andreasen & Hein, 1985] Andreasen M., Hein L., (1985) *Integrated Product Development*, IFS Springer-Verlag.
- [Andreasen, 1991] Andreasen M.M., (1991) The Theory of domains, *Workshop on Understanding Function and Function to Form Evolution*. Cambridge University, USA.
- [Aoussat & Le Coq, 1998] Aoussat A., Le Coq M., (1998) Contraintes d'assemblage, In Tollenaere M., *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, Paris, Hermès, ISBN 2-86601-694-7, pp. 185-200.
- [Aoussat, 1990] Aoussat A., (1990) La pertinence en innovation : la nécessité d'une approche plurielle, Thèse de doctorat, ENSAM Paris.

---

**B**

- [Baldwin *et al.*, 1991] Baldwin D.F., Abell T.E., Max Lui M.-C., De Fazio T.L., Whitney D.E., (1991) An Integrated Computer Aid for Generating and Evaluation Assembly Sequences for Mechanical Products, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 1, pp. 78-??.
- [Barnes, 1999] Barnes C.J., (1999) A methodology for the concurrent design of products and their assembly sequence, Ph.D Thesis, Cranfield University.
- [Barnes *et al.*, 1997] Barnes C.J., Dalglish G.F., Jared G.E.M., Swift K.G., Tate S.J., (1997) Assembly Sequence Structures in Design For Assembly, *Proceedings of the 1997 IEEE, International Symposium on Assembly and Tasks Planning*, pp. 164-169.
- [Barnes *et al.*, 2004] Barnes C.J., Jared G.E.M., Swift K.G., (2004) Decision support for sequence generation in an assembly oriented design environment, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 20, pp. 289-300.
- [Becket & Scholl, 2006] Becket C., Scholl A., (2006) A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, pp. 694-715.
- [Belloy, 1994] Belloy P., (1994) Intégration de connaissances métier dans la conception : Un modèle pour les pièces mécaniques. Application à l'usinage et à l'estampage, Thèse de l'University Joseph Fourier, Grenoble 1.
- [Benhabib, 2003] Benhabib B., (2003) *Manufacturing: Design, Production, Automation, and Integration*, Marcel Dekker, New York, USA.

- [Bergsjö *et al.*, 2007] Bergsjö D., Burr H., Malvius D., Mueller M., Vielhaber M., (2007) Product Lifecycle Management for cross-x engineering design, ICED'07, Paris.
- [Bergsjö *et al.*, 2008] Bergsjö D., Catic A., Malmqvist J., (2008) Implementing a service oriented PLM architecture using PLM services 2.0, *International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia, May 19-22.
- [Bernard, 1996] Bernard A., (1996) Contribution à la modélisation des produits et à l'intégration des technologies productrices dans un environnement multi-acteurs, Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Nancy 1.
- [Bernard & Perry, 2003] Bernard A., Perry N., (2003) Fundamental concepts of product/technology/process informational integration for process modelling and process planning, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 16, No. 7-8, pp. 557-565.
- [Bley & Bossmann, 2006] Bley H., Bossmann M., (2006) Automated Assembly Planning Based on Skeleton Modelling Strategy, *IFIP International Federation for Information Processing*, Springer Boston, Vol. 198, pp. 121-131.
- [Bocquet, 1998] Bocquet J-C., (1998) Ingénierie simultanée, conception intégrée, *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, sous la direction de M. Tollenaere, Editions Hermès, pp. 29-52.
- [Bollobás, 2002] Bollobás B., (2002) *Modern Graph Theory*, Springer-Verlag New York, ISBN 0-387-98488-7, 394p.
- [Bonneville *et al.*, 1995] Bonneville F., Perrard C., Henrioud J-M., (1995) A genetic algorithm to generate and evaluate assembly plans, *IEEE Symposium Emerging Technology Factory Automation*, Vol. 2, pp. 231-239.
- [Boothroyd & Dewhurst, 1983] Boothroyd, G., and Dewhurst, P., Design for Assembly, University of Massachusetts, 1983.
- [Boothroyd *et al.*, 1994] Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W., *Product Design for Manufacture and Assembly*, Marcel Dekker, 1994.
- [Bordegoni, 1995] Bordegoni M., (1995) Demonstrator, FEAST Technical Report, University of Parma.
- [Borg & MacCallum, 1997] Borg C.J., MacCallum K.J., (1997) A life-cycle consequences model approach to the design for multi-X of components, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design*, Tampere, Finland, pp. 647-652.
- [Borg *et al.*, 1999] Bord J.C., Yan X.T., Juster N., (1999) Guiding component form design using decision consequence knowledge support, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 13, pp. 387-403.
- [Bouikni, 2005] Bouikni N., (2005) Ingénierie Simultanée et Gestion du Cycle de Vie du Produit: Modèle de Validation des Evolutions des Caractéristiques du Produit, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke.

- [Bouikni *et al.*, 2008] Bouikni N., Rivest L., Desrochers A., (2008) A Multiple Views Management System for Concurrent Engineering and PLM, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 16, No. 1, pp. 61-72.
- [Boujut & Laureillard, 2002] Boujut J-F., Laureillard P., (2002) A co-operation framework for product-process integration in engineering design, *Design Studies*, Vol. 23, pp. 497-513.
- [Bourjault, 1984] Bourjault A., (1984) Contribution d'une approche méthodologique de l'assemblage automatisé: élaboration automatique des séquences opératoires, Thèse d'Etat Université de Franche-Comté.
- [Bourjault *et al.*, 1987a] Bourjault A., Henrioud J.-M., (1987) Détermination des sous-assemblages d'un produit à partir des séquences temporelles d'assemblage, *Automatique-Productique Informatique Industrielle*, Vol. 21, No. 2, pp. 117-127.
- [Bourjault *et al.*, 1987b] Bourjault A., Chappe D., Henrioud J.-M., (1987) Elaboration automatique des gammes d'assemblage à l'aide de réseaux de Petri, *Automatique-Productique Informatique Industrielle*, Vol. 21, No. 2, pp. 323-342.
- [Bowland *et al.*, 2003] Bowland N.W., Gao J.X., Sharma R., (2003) A PDM- and CAD-integrated assembly modelling environment for manufacturing planning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, pp. 82-88.
- [Boysen *et al.*, 2007] Boysen N., Flidner M., Scholl A., (2007) A classification of assembly line balancing problems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, pp. 674-693.
- [Bradley & Maropoulos, 1998] Bradley H., Maropoulos P., (1998) A relation-based product model for computer-supported early design assessment, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 76, pp. 88-95.
- [Brissaud & Garro, 1996] Brissaud D., Garro O., (1996) An Approach to Concurrent Engineering using Distributed Design Methodology, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 4, No. 3, pp. 303-311.
- [Bronsvoort & Noort, 2004] Bronsvoort W.F., Noort A., (2004) Multiple-view feature modeling for integral product development, *Computer-Aided Design*, Vol. 36, pp. 929-946.
- [Brown, 2006] Brown, J., (2006) Managing Product Relationships: Enabling Iteration and Innovation in Design. Business Value Research Series, June, AberdeenGroup.
- [Burr *et al.*, 2005] Burr, H., Vielhaber, M., Deubel, T., Weber, C. and Haasis, S., 2005. CAx/engineering data management integration: enabler for methodical benefits in the design process. *Journal of Engineering Design*, 16(4), 385-398.
- [Burman, 1992] Burman R., (1992) Designing for minimum lead times, *Automotive Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 61-65.

C

---

- [Candlot *et al.*, 2008] Candlot A., Perry N., Bernard A., Ammar-Khodja S., (2008) Case Study, USIQUICK Project: Methods to Capitalize and Reuse Knowledge in Process Planning, *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management*, Eds. A. Bernard and S. Tichkiewitch, Springer Verlag, 2008, pp. 487-305.
- [Chen *et al.*, 2006] Chen G., Zhou J., Cai W., Lai X., Lin Z., Menassa R., (2006) A framework for an automotive body assembly process design system, *Computer-Aided Design*, Vol. 38, pp. 531-539.
- [Chen *et al.*, 2009] Chen X., Gao S., Yang y., Zhang S., (2009) The skeleton in the multi-level assembly model for top-down innovation design of mechanical product, *International Conference on Product Lifecycle Management*, Bath, UK.
- [Cittolin, 1997] Cittolin A., (1997) Etude de filtres universels en vue d'une détermination et d'une sélection automatique de gammes d'assemblage de produits industriels, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [CIMdata, 1997] CIMdata Incorporated, (1997) Product data management - The definition, An Introduction to Concepts Benefits, and Terminology, Fourth Edition.
- [CIMdata, 2001] CIMdata Incorporated, (2001) Product Data Management and Computer-Aided Software Engineering.
- [CIMdata, 2009] CIMdata Incorporated, (2009) PLM Market Growth in 2008 "A Mid-Year Look in 2009 – Weathering the Storm", White Paper, August.
- [Csabai *et al.*, 2002] Csabai A., Stroud I., Xirouchakis P.C., (2002) Container spaces and functional features for top-down 3D layout design, *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 13, pp. 1011-1035.

D

---

- [Dagleish *et al.*, 2000] Dagleish G.F., Jared G.E.M., Swift K.G., (2000) Design for Assembly: influencing the design process, *Journal of Engineering Design*, Vol. 11, No. 1, pp. 17-29.
- [Daahub & Abdalla, 1999] Daahub A.M., Abdalla H.S., (1999) A Computer-based Intelligent System for Design for Assembly, *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 37, pp. 111-115.
- [Danesi *et al.*, 2006] Danesi F., Gardan N., Gardan Y., (2006) Collaborative Design: from concept to application, *Geometric Modeling and imaging – New Trends*, pp. 90-96.
- [Danesi *et al.*, 2007] Danesi F., Gardan N., Gardan Y., Reimeringer M., (2007) P4LM: A methodology for product lifecycle management, *Computers in Industry*, Vol. ?, pp. ?-?.
- [Danilovic & Browning, 2007] Danilovic M., Browning T.R., (2007) Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices, *International Journal of Project Management*, Vol. 25, pp. 300-314.

- [De Fazio & Whitney, 1987] De Fazio T., Whitney D., (1987) Simplified all mechanical assembly sequences, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 6, pp. 640-658.
- [De Fazio *et al.*, 1999] De Fazio T.L., Rhee S.J., Whitney D.E., (1999) Design-specific approach to design for assembly (DFA) for complex mechanical assemblies, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 5, pp. 869-881.
- [de Kraker *et al.*, 1995] de Kraker K.J., Dohmen M., Bronsvort W.F., (1995) Multiple-way feature conversion to support concurrent engineering, in C. Hoffmann and J. Rossignac, eds, 'Solid Modeling 95', *Third Symposium on Solid Modeling and Applications*, ACM Press, New York, pp. 105-114.
- [De Lit *et al.*, 2001] De Lit P., Latinne P., Rekiek B., Delchambre A., (2001) Assembly planning with an ordering genetic algorithm, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 16, pp. 3623-3640.
- [De Lit, 2001] De Lit P., (2001) A comprehensive and integrated approach for the design of a product family and its assembly system, Ph.D. Thesis, Université Libre de Bruxelles.
- [Debaecker, 2004] Debaecker D., (2004) PLM, la gestion collaborative du cycle de vie des produits, *Product Lifecycle Management*, Hermès – Lavoisier, Paris.
- [Defaux, 1989] Defaux M., (1989) Conception des produits : simplifier l'assemblage, *TECHNOLOGIES*, No. 61.
- [Deglin & Bernard, 2000] Deglin A., Bernard A., (2000) A knowledge-based environment for capitalization and Computer-Aided Process Planning of rapid product development processes, *Concurrent Engineering*, Lyon, July 2000, pp. 650-659.
- [Deisenroth *et al.*, 1992] Deisenroth M., Terpenney J.P., Eyada O.K., (1992) Design For Competitiveness: Case Studies Developed in Concurrent Engineering And Design For Manufacturability, *Design for Manufacture ASME*, Vol. 51, pp. 29-34.
- [Delchambre, 1996] Delchambre A., (1996) CAD Method For Industrial Assembly: Concurrent Design Of Products, *Equipment and Control Systems*, John Wileys & Sons, Chichester, UK, 279p.
- [Denker *et al.*, 2009] Dencker K., Fasth A., Stahre J., Martensson L., Lundholm T., Akillioglu H., (2009) Proactive assembly systems – realising the potential of human collaboration with automation, *Annual Reviews in Control*, Vol. 33, No. 2, pp. 230-237.
- [Deneux, 1999] Deneux D., (1999) Introduction to assembly features: an illustrated synthesis methodology, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 10, pp. 29-39.
- [Deneux, 2002] Deneux D., (2002) Méthodes et modèles pour la conception concourante, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Valenciennes.
- [Derigent, 2005] Derigent W., (2005) Méthodologie de passage d'un modèle CAO vers un modèle FAO pour des pièces aéronautiques :

- Prototype logiciel dans le cadre du projet USIQUICK, Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [Dini & Santocchi, 1992] Dini G., Santocchi M., (1992) Automated sequencing ly detection in assembly planning, *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1.
- [Dolgui & Proth, 2006] Dolgui A., Proth J-M., (2006) *Les systèmes de production modernes – Volume 1 : conception, gestion et optimisation*, Lavoisier, Eds. Hermès Science Publications, ISBN 2-7462-1249-8.
- [Dong *et al.*, 2007] Dong T., Tong R., Zhang L., Dong J., (2007) A knowledge-based approach to assembly sequence planning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, No. 11-12, pp. 1232-1244.
- [Ducellier, 2009] Ducellier G., (2008) Gestion de règles expertes en ingénierie collaborative : application aux plateformes PLM, Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Troyes.
- [Durruvu, 1989] Durruvu S. *et al.*, (1989) Knowledge based systems applications in engineering design: research at MIT, *AI Magazine*, Vol. 10, No. 3, pp. 79-96.

---

## E

- [Eppinger *et al.*, 1997] Eppinger S.D., Krishnan V., Whitney D.E., (1997) A Model-Based Framework to Overlap Product Development Activities, *Management Science*, Vol. 43, No. 4.
- [Eskilander, 2001] Eskilander S., (2001) Design for Automatic Assembly - A method for Product Design DFA2, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [Everhart, 1960] Everhart J.L., (1960) Handbook of parts, forms, processes and materials in design engineering, Van-Nostrand-Reinhold, New York.
- [Eversheim *et al.*, 1995] Eversheim W., Rozenfeld H., Bochtler W., Graessler R., (1995) A methodology for an Integrated Design and Process Planning based on Concurrent Engineering Reference Model, *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 1, pp. 403-406.
- [Eynard *et al.*, 2004] Eynard B., Gallet T., Nowak P., Roucoules L., (2004) UML based specifications of PDM product structure and workflow, *Computers in Industry*, Vol. 55, pp. 301-316.
- [Eynard, 2005] Eynard B., (2005) Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielles en conception intégrée, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne.

---

## F

- [Falgarone & Chevassus, 2004] Falgarone H., Chevassus N., (2004) An innovative Design Method and Tool for Structural and Functional Analysis, *Proceedings of CIRP Design Seminar*, Cairo, Egypt.

- [Falkenauer, 1998] Falkenauer E., Genetic Algorithms and Grouping Problems. John Wiley and Sons, Inc., Chichester, United Kingdom, First edition, 1998.
- [Fathi *et al.*, 2007] Fathi M., *et al.*, (2007) Advanced Condition Monitoring Services in Product Lifecycle Management, *IEEE International Conference on Information Reuse and Integration*.
- [FEMOD, 1994] FEMOD project publishable final report, Joint Research Centre, BRITE-EURAM program, 75 rue Montoyer, Brussels, 1040 Belgium.
- [Fenves, 2001] Fenves J., (2001) A Core Product Model for representing design information, USA : National institute of Standards and Technology, Report No. NISTIR 6736, Gaithersburg, MD 20899, USA.
- [Fenves *et al.*, 2004] Fenves S.J., Foufou S., Bock C., Bouillon N., Sriram R.D., (2004) CPM2 : A Revised Core Product Model for Representing Design Information, National Institute of Standards and Technology, Report No. NISTIR 7185, Gaithersburg, MD, USA.
- [Fenves *et al.*, 2008] Fenves S.J., Foufou S., Bock C., Sriram R.D., (2008) CPM2 : A Core Model for Product Data, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 8.
- [Fournier, 2007] Fournier J.-C., (2007) *Théorie des graphes et applications*, Hermès Lavoisier, ISBN 2-7462-1247-1, 288p.

**G**

- [Gao, 1999] Gao J., (1999) A Market Survey of Industrial - Requirements for Product Data Management and Manufacturing Planning Systems, *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, Porto, Portugal, July 1999.
- [Gao & Bowland, 2002] Gao J.X., Bowland N.W., (2002) A Product Data Management Product Configuration and Assembly Process Planning environment, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 216, No.3, p.407-418.
- [GAMA, 1990] Groupe GAMA, (1990) *La gamme automatique en usinage*, recueil de textes du séminaire GAMA réunis par Bourdet P. et Villeneuve F., Editions Hermès, Paris, 196p., ISBN 2-86601-255-0.
- [Garey & Johnson, 1979] Garey M. R., Johnson D. S., Computers and Intractability – A Guide to the Theory of NP-completeness, W. H. Freeman, San Francisco, California, 1979.
- [Garetti & Terzi, 2007] Garetti M. and Terzi E.b.S, (2007) A new point of view on Product Lifecycle Management, University of Bergamo, Italy.
- [Gero, 1990] Gero J.S., (1990) Design prototypes: A knowledge representation scheme for design, *AI Magazine*, Vol. 11, pp. 26-36.

- [Gero & Kannengiesser, 2007] Gero J.S., Kannengiesser U., (2007) A Function-Behavior-Structure ontology of processes, *AIEDAM*, Vol. 21, No. 2, pp. 379-391.
- [Guiguère *et al.*, 2002] Guiguère F., Rivest L., Desrochers A., (2002) Improving Design Productivity and Product consistency – From Design Intent to Solid Models through technological Links, In *Feature Based Product Life-Cycle Modelling*, R. Soenen and G.J. Olling Eds., November, Hardbound, Kluwer Academic Publisher, pp. 77-91.
- [Gomes, 2008] Gomes S., (2008) Ingénierie à base de connaissances pour une conception, productive, optimisée, collaborative et innovante du système Projet-Produit-Process-Usage, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [Gomes & Sagot, 2002] Gomes S., Sagot J-C., (2002) A concurrent engineering experience based on a cooperative and object oriented design methodology. In Best papers book from 3rd *International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, Kluwer Publishers.
- [Grabowsky *et al.*, 1995] Grabowski H., Lossack R.S., Weis C., (1995) Supporting the design process by an integrated knowledge-based design system, *Advances in Formal Design Methods for CAD, IFIP International Conference*, Mexico.
- [Gross & Yellen, 2005] Gross J.L., Yellen J., (2005) *Graph Theory and Its Applications*, Chapman & Hall/CRC, ISBN 1-58588-505-X, 800p.
- [Guyot *et al.*, 2006] Guyot E., Ducellier G., Remy S., Eynard B., Girard P., Gallet T., (2006) IT Applications enabling Product Data Exchange in Collaborative Product Development, *International Conference on Interactive Design – Virtual Concept*, Cancun, Mexico.

## H

---

- [Haoues, 2006] Haoues N., (2006) Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage dès les premières phases de conception de produits, Thèse de l'ENSAM.
- [Hamer & Lepoeter, 1996] Hamer P. van den, Lepoeter K., (1996) Managing Design Data: The five Dimensions of CAD Frameworks, Configuration Management and Product Data Management, *Proceedings of IEEE*, Vol. 84, No. 1.
- [Hamilton, 1866] Hamilton W.R., (1866) *Elements of Quaternions*, Longmans Green, London.
- [Harani, 1997] Harani, Y., (1997) une approche multi-modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception, Thèse de doctorat de l'Université de Metz.
- [Hauser & Clausing, 1988] Hause J.R., Clausing D., (1988) The house of quality, *Harvard Business Review*, pp. 63-73.

- [Helms, 2002] Helms R.W., (2002) Product Data Management as enabler for Concurrent Engineering, PhD Thesis, Eindhoven University of Technology.
- [Henrioud, 1989] Henrioud J-M., (1989) Contribution à la Conceptualisation de l'Assemblage Automatisé : Nouvelle Approche en Vue de la Détermination des Processus d'Assemblage, Thèse d'Etat, Université de Franche-Comté.
- [Holt & Barnes, 2009] Holt R., Barnes C., (2009) Towards an integrated approach to "Design for X": an agenda for decision-based DFX research, *Research in Engineering Design*, Original Paper, Springer London.
- [Homem de Mello & Sanderson, 1991] Homem de Mello L.S., Sanderson A.C., (1991) Representations of Mechanical assembly sequences, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, No. 2, pp. 211-227
- [Homem de Mello & Sanderson, 1988] Homem de Mello L.S., Sanderson A.C., (1988) Automatic generation of mechanical assembly sequences, *Technical report: Carnegie Mellon University*.
- [Huang, 1996] Huang Q., (1996) Design for X: concurrent engineering imperatives, Chapman & Hall Edition.
- [Huang et al., 2000] Huang G.Q., Shi J., Mak K.L., (2000) Synchronized system for "Design for X" guidelines over the WWW, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 107, pp. 71-78.
- [Huang, 2002] Huang G.Q., (2002) Web-based support for collaborative product design, *Computers in Industry*, Vol. 48, No. 1, pp.71-88.
- [Hubka & Eder, 1988] Hubka V., Eder W.E., (1988) *Theory of technical systems*, Springer-Verlag, Berlin.
- [Hui et al., 2007] Hui W., Dong X., Guanghong D., Linxuan Z., (2007) Assembly semantic modeling approach, *Computers in Industry*, Vol. 58, pp. 227-239.
- [Hung & Fan, 2004] Hung S., Fan Y., (2004) Overview of product lifecycle management, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-9.
- [Hwang et al., 2009] Hwang J., Mun D., Han S., (2009) Representation and Propagation of Engineering Change Information in Collaborative Product Development using a Neutral Reference Model, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 17, No. 2, pp. 147-157.

---

**I**

- [IBM & Dassault Systèmes, 2008] IBM, Dassault Systèmes, (2008) IBM and Dassault Systèmes: Business Process Accelerators for Systems Engineering – Integrated Product Development from needs identification through to final product validation.
- [INCOSE, 2004] INCOSE-TP-2003-016-02 (2004) Systems engineering handbook. INCOSE Technical Product

- [Ishii *et al.*, 1993] Ishii K., Eubanks C.F., Marks M., (1993) Evaluation Methodology for Post-manufacturing Issues in Life-cycle Design, *Concurrent Engineering*, Vol. 1, pp. 61-68.

**J**

---

- [Jagdev & Brown, 1998] Jagdev H.S., Browne J., (1998), The extended enterprise – a context for manufacturing, *Production Planning & control*, Vol. 9 No. 3, pp. 216-229.
- [Jared *et al.*, 1994] Jared G., Limage M., Sherrin I., Swift K., (1994) Geometric Reasoning and Design For Manufacture, *Computer Aided Design*, Vol. 7, pp. 528–536.

**K**

---

- [Kabilan, 2007] Kabilan V., (2007) Ontology for Information Systems Design Methodology – Conceptualizing, Designing and Representing Domain Ontologies, Thesis.
- [Kanai *et al.*, 1996] Kanai S., Takahashi H., Makino H., (1996) ASPEN : Computer-Aided Assembly Sequence Planning and Evaluation System Based on Predetermined Time Standard, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 35-39.
- [Kang & Peng, 2010] Kang, X., Peng J., (2010) Data integration from product design to assembly planning in a collaborative environment, *International Journal of Manufacturing Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 120-137.
- [Karcher & Glander, 2003] Karcher A., Glander Matthias, (2003) Global distributed engineering – integrating different process paradigms, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, pp. 131-137.
- [Kazan, 2003] Kazan A., (2003) Intégration des aspects robotique, tolérancement et comportement mécanique pour la conception assistée par ordinateur de systèmes poly-articulés, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Kim *et al.*, 2004] Kim K-Y., Wang Y., Muogboh O.S., Nnaji B.O., (2004) Design collaborative assembly design, *Computer-Aided Design*, Vol. 36, pp.849-871.
- [Kim *et al.*, 2006] Kim, K.-Y., Manley, D.G. and Yang, H., (2006) Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development, *Computer-Aided Design*, Vol. 38, pp. 1233-1250.
- [Kiritsis *et al.*, 2003] Kiritsis D., Bufardi A., Xirouchakis P., (2003) Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 17, No. 3-4, pp. 189-202.
- [Koning & van Vliet, 2006] Koning H., van Vliet H., (2006) A method for defining IEEE Std 1471 viewpoints, *Journal of Systems and Software*, Vol. 79, pp. 120-131.

- [Kuo *et al.*, 2001] Kuo T-C., Huang S.H., Zhang H-C., (2001) Design for manufacture and design for X: concepts, applications, and perspectives, *Computers & Industrial Engineering*, 41(3), pp. 241-260.
- [Kvan, 2000] Kvan, T., 2000, "Collaborative Design: What is it", *Automation in construction*, Vol. 9, No. 4, pp. 409-415.
- 
- L**
- 
- [Labrousse & Bernard, 2008] Labrousse M., Bernard A., (2008) FBS-PPRE, an Enterprise Knowledge Lifecycle Model, *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management*, Eds. A. Bernard and S. Tichkiewitch, Springer Verlag, pp. 285-305.
- [Lanz *et al.*, 2008] Lanz M., Kallela T., Velez G., Tuokko R., (2008) Product, Process and System Ontologies with Knowledge Base for Managing the Assembly Specific Knowledge between Different Clients, *IEEE International Conference on Distributed Human-Machine Systems*, March 9-12, Athens, Greece.
- [Laperrière & ElMaraghy, 1996] Laperrière L., ElMaraghy H.A., (1996) GAPP: A Generative Assembly Process Planner, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 282-293.
- [Lavoie & Laperrière, 1996] Lavoie A., Laperrière L., (1996) A High Level Stability Model for Assembly Operation's Evaluation in Assembly Planning, *Proceedings of Mechanics in Design-CSME Forum'96*, Toronto, pp. 551-563.
- [Le Duigou, 2010] Le Duigou J., Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue : application aux PME mécaniciennes, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [Le Moigne, 1990] Le Moigne J.-L., (1977) *La théorie du Système Général, théorie de modélisation*, P.U.F., Paris, 1977, 3ème édition mise à jour.
- [Lee & Thornton, 1996] Lee D., Thornton A.C., (1996) The identification and use of key characteristics in the product development process, *Design Theory and Methodology Conference, ASME Design Technical Conferences*, Irvine, CA, USA.
- [Lee & Yi, 1993] Lee S., Yi C., (1993) Subassembly Stability and Reorientation, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 521-526.
- [Li *et al.*, 2005] Li W.D., Lu W.F., Fuh J.Y.H., Wong Y.S., (2005) Collaborative computer-aided design – research and development status, *Computer-Aided Design*, Vol. 37, pp.931-940.
- [Li & Qiu, 2006] Li W.D., Qiu Z.M., (2006) State-of-the-art technologies and methodologies for collaborative product development systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 13, pp. 2525-2559.
- [Lim *et al.*, 1995] Lim S.S., Lee I.B.H., Lim L.E.N., Ngoi, B.K.A., (1995) Computer-Aided Concurrent Design of Product and Assembly Processes: a Literature Review, *Journal of Design and Manufacturing*, Vol. 5, pp. 67-88.

- [Lin *et al.*, 2008] Lin M-C., Tai Y-Y., Chen M-S., (2008) A Rule Based Assembly Sequence Generation Method for Product Design, *Concurrent Engineering and Research Applications*, Vol. 15, pp. 291-308.
- [Liu *et al.*, 2001] Liu D.T., Xu X.W., (2001) A review of web-based product data management systems, *Computers in Industry*, Vol. 44, pp. 2551-262.
- [Liu *et al.*, 2009] Liu W., Zeng Y., Maletz M., Brisson D., (2009) Product Lifecycle Management : A Review, *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering technical Conference IDETC*, August 30 – September 2, San Diego, USA.
- [Lohse *et al.*, 2005] Lohse L., Hirani H., Ratchev S., Turitto M., (2005) An Ontology for the Definition and Validation of Assembly Processes for Evolvable Assembly Systems, *The 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Micro Assembly and Manufacturing*, pp. 242-247.
- [Lu *et al.*, 2006a] Lu C., Fuh J.Y.H., Wong Y.S., (2006) Evaluation of product assemblability in different assembly sequences using the tolerancing approach, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 23, pp. 5037-5063.
- [Lu *et al.*, 2007] Lu S. C-Y., Elmaraghy W., Schuh G., Wilhelm R., (2007) A Scientific Foundation of Collaborative Engineering, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 56 No. 2, pp. 605-634.

---

## M

- [Ma & Fuh, 2007] Ma Y., Fuh J.Y.H., (2007) Product lifecycle modelling, analysis and management, Special issue, *Computers in Industry*, pp. 107-109.
- [Mantylas, 1990] Mantylas M., (1990) A modeling system for top-down design of assembled products, *IBM Journal Research and Development*, Vol. 34, No. 5, pp. 636-659.
- [Mantripragada, 1998] Mantripragada R., (1998) Assembly oriented design: concepts, algorithms and computational tools, Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [Mantripragada & Whitney, 1999] Mantripragada R., Whitney D.E., (1999) Modeling and Controlling Variation Propagation in Mechanical Assemblies using State Transition Models, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 1, pp. 124-140.
- [Marguet, 2001] Marguet B., (2001) Contribution à l'analyse des variations géométriques dans les ensembles structuraux en aéronautique : Démarche et Outils, Thèse de Doctorat de l'Ecole de Normale Supérieure de Cachan.
- [Marguet *et al.*, 2003] Marguet B., Chevassus B., Falgarone, H., Bourdet P., (2003) Geometrical Behavior Laws for Computer Aided Tolerancing: AnaTole a tool for structural assembly tolerance analysis, *8<sup>th</sup> International CIRP Seminar on Computer-Aided Tolerancing*, Charlotte, USA, pp. 301-310.

- [Marian *et al.*, 2006] Marian R.M., Luong H.S., Abhari K., (2006) A genetic algorithm for the optimization of assembly sequence, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 50, pp. 503-527.
- [Martin-Vega *et al.*, 1995] Martin-Vega L.A., Brown H.K., Shaw W.S., Sanders T.J., (1995) Industrial perspective on research needs and opportunities in manufacturing assembly, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 45-58.
- [Mascle *et al.*, 1997] Mascle C., Jabbour T., Maranzana R., (1997) Assembly features for mechanical product data, *Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, pp. 218-223.
- [Mascle, 2002] Mascle C., (2002) Feature-based assembly model for integration in computer-aided assembly, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 373-378.
- [Mascle, 1990] Mascle C., (1990) Approche méthodologique de détermination de gammes par désassemblage, Thèse de l'Ecole Polytechnique de Lausanne.
- [Mathieu & Marguet, 2001] Mathieu L., Marguet B., (2001) Integrated Design Method to Improve Productibility based on Product Key Characteristics and Assembly Sequences, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 85-88.
- [Matousek, 1957] Matousek R., (1957) Engineering Design – A Systematic Approach, The German edition by Springer-Verlag, Berlin: The English edition translated by A.H. Burton and Edited by D.C. Johnson, Published by Lackie & Son Ltd, London, UK.
- [Matsokis & Kiritsis, 2009] Matsokis A., Kiritsis D., (2009) An Ontology-based Approach for Product Lifecycle Management, *Computers in Industry*, accepted.
- [Maurino, 1995] Maurino M., (1995) La gestion des données techniques, technologies du concurrent engineering. Collection Organisation industrielle, Masson.
- [Merlo, 2009] Merlo C., (2009) Systèmes d'information supports aux acteurs, en conduite de la conception, Habilitation à Diriger des Recherches de l'ESTIA.
- [Michalos *et al.*, 2010] Michalos G., Makris S., Papakostas N., Mourtzis D., Chrysosouris G., (2010) Automotive assembly technologies review : challenges and outlook for a flexible and adaptive approach, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, in Press.
- [Miles & Swift, 1992] Miles B.L., Swift K.G., (1992) Working together, *Manufacturing Breakthrough*, Vol. 4, pp. 69-73.
- [Miller, 1997] Miller E., (1997) What's PDM? *Computer-Aided Engineering Magazine*, September.
- [Million, 1998] Million O., (1998) De l'intégration des métiers par les données techniques vers la maîtrise de la modélisation conceptuelle : la méthode V.I.M (Viewpoints Information Modelling), Thèse de doctorat en production automatisée, Université Henri Poincaré, Nancy.

- [Ming *et al.*, 2005] Ming X.G., Yan J.Q., Lu W.F., Ma D.Z., (2005) Technology Solutions for Collaborative Product Lifecycle Management – Status Review and Future Trend, *Concurrent Engineering*, Vol. 13, pp. 311-319.
- [Miyakawa & Ohashi, 1986] Miyakawa S., Ohashi T., (1986) The Hitachi Assemblability Evaluation Method, *Proceedings international Conference on Product Design for Assembly*.
- [Molloy *et al.*, 1998] Molloy O., Tilley S., Warman E.A., (1998) Design for Manufacturing and Assembly – Concepts, Architectures and Implementations, Chapman & Hall, London.
- [Monticolo, 2008] Monticolo D., (2008) Une approche organisationnelle pour la conception d'un système de gestion des connaissances fondé sur le paradigme agent, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [Mony, 1992] Mony C., (1992) Un modèle d'intégration des fonctions conception-fabrication dans l'ingénierie du produit, Thèse de l'Ecole Centrale de Paris, France.
- [Morris *et al.*, 2004] Morris H., Lee S., Shan E., Zang S., (2004) Information Integration Framework for Product Lifecycle Management of Diverse Data, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 352-358.
- [Mountney & Gao, 2006] Mountney S., Gao J., (2006) Manufacturing Knowledge Management: Requirements for preliminary Design, *Leading the Web in Concurrent Engineering*, Eds. P. Ghodous *et al.*, IOS Press, pp. 515-522.
- [Mun *et al.*, 2009] Mun D., Hwang J., Han S., (2009) Protection of intellectual property based on a skeleton model in product design collaboration, *Computer-Aided Design*, Vol. 41, pp. 641-648.

---

N

---

- [Nakajima, 1987] Nakajima S., (1987) *La maintenance productive totale*, AFNOR gestion, Paris, ISBN 10 : 2124651110, 139p.
- [Nederbragt *et al.*, 1998] Nederbragt W., Allen R., Feng S., Kaing S., Sriram R., Zhang Y., (1998) The NIST design/process planning integration project, *Proceedings of the Artificial Intelligence and Manufacturing Workshop*, pp. 135-139.
- [NF EN 1005-5, 2007] Norme européenne NF EN 1005-5, (2007) Sécurité des machines, Performances physiques humaine, Partie 5 : appréciation du risque relatif à la manipulation répétitive à fréquence élevée, mai.
- [Niebel & Baldwin, 1957] Niebel, Baldwin, (1957) *Designing for Production*, Irwin.
- [Noël, 2006] Noël F., (2006) A dynamic multi-view product model to share product behaviors among designers: how process model adds semantic to the behavior paradigm, *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 1, No. 4, pp. 380-390.
- [Noël & Roucoules, 2008] 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*, Vol. 21, No. 2, pp. 139-145.

## O

- [O'Grady et al., 1988] O'Grady P., Ramers D., Bowen J., (1992) AI Constraints Nets Applied to Design for economic Manufacture and Assembly, *Computer-Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 4, pp. 204-209.
- [Ohashi et al., 1985] Ohashi T., Miyakawa S., Matsunaga S., (1985) Automatic assembly line for VTR mechanisms, *Robotics*, vol.1, n.2, p.89- 96.
- [Otto & Wood, 2001] Otto K.N., Wood K.L., (2001) *Product Design - Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, ISBN 0-13-021271-7.
- [Ouertani, 2007] Ouertani M.Z., (2007) Supporting conflict management in collaborative design: An approach to assess engineering change impacts, *Computers in Industry*, Vol. 59, pp. 882-893.
- [Ouzrout et al., 2009] Ouzrout Y., Geryville H., Bouras A., Sapidis N.S., (2009) 'A product information and knowledge exchange framework : a multiple viewpoints approach', *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 4, Nos. 1/2/3, pp. 270-289.

## P

- [Pahl et al., 2007] Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.H., (2007) *Engineering Design: a Systematic Approach*, Third Edition, Springer- Verlag, London, UK.
- [Paviot et al., 2009] Paviot T., Cheutet V., Lamouri S., (2009) Federate design and logistic through Product Lifecycle Support standard, *International Conference on Product Lifecycle Management*, Bath, UK.
- [Pech, 1973] Pech H., (1973) *Designing for Manufacture*, Topics in Engineering Design series, Pitman & Sons Ltd, London, UK.
- [Peltonen, 2000] Peltonen H., (2000) Concepts and an Implementation for Product Data Management, Doctorate Thesis. Acta Polytechnica Scandinavia, *Mathematics and Computing Serie* No.105, 188pp. Published by The Finnish Academics of Technology. ISBN 951-666-538-1. ISSN 1456-9418.
- [Prasad, 1999] Prasad B., (1999) Enabling principles of concurrency and simultaneity in concurrent engineering, *Artificial for Engineering, Design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 13, pp. 185-204.
- [Prasad, 1996] Prasad B., (1996) *Concurrent Engineering fundamentals: Integrated Product and Process Organization*, Prentice Hall, p. 502.
- [Pugh, 1990] Pugh S., (1990) *Total design, integrated methods for successful product engineering*, Assison-Wesley.

R

---

- [Rachuri *et al.*, 2006] Rachuri S., Han Y.-H., Foufou S., Feng S.C., Roy U., Wang F., Sriram R.D., Lyons K.W., (2006) A Model for Capturing Product Assembly Information, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 6, pp. 11-21.
- [Rampersad, 1994] Rampersad H.K., (1994) Integrated and Simultaneous Design for Robotic Assembly, Wiley Series in Product Development: Planning, Designing, Engineering, John Wiley and Sons, Inc., Chichester, United Kingdom.
- [Rampersad, 1995] Rampersad H.K., (1995) The house of DFA, In Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 312-318.
- [Randoing, 1995] Randoing J.-M., (1995) *Les SGDT*, Hermès, Paris, ISBN 2-86601-489-8.
- [Rangan *et al.*, 2005] Rangan R.M. *et al.*, (2005) Streamlining Product Lifecycle Processes: A Survey of Product Lifecycle Management Implementations, Directions, and Challenges, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, ASME, Vol.5, p.227-237.
- [Ranky, 1994] Ranky P.G., Concurrent engineering and enterprise modeling, *Assembly Automation*, Vol. 14, No. 3, pp. 14-21.
- [Redford & Chal, 1994] Redford A., Chal J., (1994) *Design for Assembly - Principles and Practice*, McGraw- Hill Inc, England.
- [Rehman & Yan, 2007] Rehman F.U., Yan X.-T., (2007) Supporting early design decision making using design context knowledge, *Journal of Design Research*, Vol. 6, No. 1-2, pp. 169-189.
- [Rejneri, 2000] Rejneri N., (2000) Détermination et simulation des opérations d'assemblage lors de la conception de systèmes mécaniques, Thèse de doctorat de l'INPG.
- [Rodriguez & Al-Ashaab, 2005] Rodriguez K., Al-Ashaab A., (2005), Knowledge web-based system architecture for collaborative product development, *Computers in Industry*, Vol. 56, pp.125-140.
- [Roucoules, 2007] Roucoules L., (2007) Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin : des spécifications fonctionnelles du produit aux choix des procédés de fabrication, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Troyes.
- [Rouibah & Caskey, 2003] Rouibah K., Caskey K.R., (2003) Change management in concurrent engineering from a parameter perspective, *Computers in Industry*, Vol. 50, No. 1, pp. 15-34.

S

---

- [Saaksvuori & Immonen, 2005] Saaksvuori A., Immonen A., (2005) *Product Lifecycle Management*, 2<sup>nd</sup> ed., Berlin, London, Springer.
- [Sackett & Bryan, 1998] Sackett P.J., Bryan M.G., (1998) Framework for the development of a PDM strategy, *International Journal of*

- Production and Operations Management*, Vol. 18, No. 2, pp. 168-179.
- [Santochi & Dini, 1992] Santochi M., Dini G., (1992) Computer Aided Assembly Operations: The selection of assembly sequences, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 9, No. 6, pp. 439-446.
- [Sapuan *et al.*, 2006] Sapuan S.M., Osman M.R., Nukman Y., (2006) State of the art of the concurrent engineering technique in the automotive industry, *Journal of Engineering Design*, Vol. 17, No. 2, pp. 143-157.
- [Sebaaly & Fujimoto, 1996] Sebaaly M.F., Fujimoto H., (1996) A genetic planner for assembly automation, IEEE Conference on Evolutionary Computation, pp. 401-406.
- [Seidal & Swift, 1989] Seidal U., Swift K.G., (1989) Operation Networks for Co-ordinated DFA and Sequence Planning, *10<sup>th</sup> International Conference on Assembly Automation*, pp. 539-545.
- [Shah & Rogers, 1993] Shah J., Rogers M., (1993) Assembly modelling as an extension of Feature-based design, *Research in Engineering Design*, N°5, pp. 218-237.
- [Shalvi, 2003] Shalvi M., (2003) Manufacturing Process Management – A New Era in Manufacturing, White paper, September.
- [Scheder, 1997] Scheder H., (1997), Requirements of car manufacturers for Product Data Management in an Extended Enterprise, *Proceedings of STEP Forum'97*, Munich, ProSTEP GmbH.
- [Schepacz, 1991] Schepacz C., (1989) Des méthodes pour un assemblage-montage rationnel, CETIM-Informations, No. 23.
- [Schuh *et al.*, 2006] Schuh G., Assmus D., Zancul E., (2006) Product structuring – the core discipline of product lifecycle management, *13<sup>th</sup> CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*.
- [Schuh *et al.*, 2008] Schuh G., Rozenfeld H., Assmus D., Zancul E., (2008) Process oriented framework to support PLM implementation, *Computers in Industry*, Vol. 59, pp. 210-218.
- [Sierra *et al.*, 2008] Sierra J.-L., Fernandez-Manjon B., Fernandez-Valmayor A., (2008) A language-driven approach for the design of interactive applications, *Interacting with Computers*, Vol. 20, pp. 112-127.
- [Skander *et al.*, 2008] Skander A., Roucoules L., Klein Meyer J-S., (2008) Design and manufacturing interface modeling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, No. 5-6, pp. 443-454.
- [Sly, 2004] Sly D., (2004) Manufacturing Process Management (MPM), *Technology Trends in PLM*, June.
- [Smith & Smith, 2002] Smith G.C., Smith SS-F., (2002) An enhanced genetic algorithm for automated assembly planning, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, No. 5-6, pp. 355-364.

- [Sohlenius, 1992] Sohlenius G., (1992) Concurrent engineering, *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 2, pp. 645-655.
- [Srinivasan, 1998] Srinivasan V., (1998) On interpreting key characteristics, IBM Research, July 29, White paper.
- [Stadzisz, 1997] Stadzisz P.C., (1997) Contribution à une méthodologie de Conception Intégrée des Familles de Produits pour l'Assemblage, Thèse de Doctorat de l'Université de Franche-Comté.
- [Stark et al., 2004] Stark J. et al., (2004) *Product Lifecycle Management – Paradigm for 21st century*, Springer-Verlag, Berlin.
- [Stone et al., 2004] Stone R.B., McAdams D.A., Kayyalethekkel V.J., (2004) A product architecture-based conceptual DFA technique, *Design Studies*, Vol. 25, pp. 301-325.
- [Su, 2009] Su Q., (2009) Geometric computation based assembly sequencing and evaluating in terms of assembly angle, direction, reorientation, and stability, *Computer-Aided Design*, Vol. 41, pp. 479-489.
- [Suh, 1998] Suh N.P., (1998) Axiomatic Design Theory for Systems, *Research in Engineering Design*, Vol. 10, pp. 189-209.
- [Subrahmania, 1997] Subrahmania E., (1997) The NDIM approach to creating design support systems, *DETC'97/DTM-3873 ASME technical conference*, Sacramento, California, September.
- [Sudarsan et al., 2005] Sudarsan R., Fenves S.J., Sriram R.D., Wang F., (2005) A product information modeling framework for product lifecycle management, *Computer-Aided-Design*, Vol. 37, pp. 1399-1411.
- [Suh, 1990] Suh N.P., (1998) *The Principles of Design*, Oxford University Press.
- [Suzuki et al., 2001] Suzuki T., Ohashi T., Asano M., Miyakawa S., (2001) Assembly reliability evaluation method (AREM), *Proceedings of the IEEE International symposium on Assembly Task Planning*, p.294-299.
- [Swift, 1989] Swift K., (1989) Expert System aids design for assembly, *Assembly Automation*, Vol. 9, No. 3, pp. 132-136.
- [SysML Partners, 2004] SysML Partners. Systems Modeling Language: SysML, <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?ad/04-08-03>, August 2004.

---

## T

- [Tate et al., 2000] Tate S.J., Jared G.E.M., Brown J.N., Swift K.G., (2000) An introduction to the Designer's Sandpit, *Proceedings of DFM 2000 Design for manufacturing*, Baltimore, MD, USA.
- [Tate, 2000] Tate S.J., (2000) Symmetry and Shape Analysis for Assembly-Oriented CAD, PhD Thesis, Cranfield University.

- [Terzi, 2005] Terzi S., (2005) Gestion du Cycle de Vie des Produits : Définitions, Problèmes Ouverts et Modèles de Référence, Thèse, Université Henri Poincaré, Nancy-1.
- [Thornton, 1999] Thornton A.C., (1999) A Mathematical Framework for the Key Characteristic Process, *Research in Engineering Design*, Vol. 11, pp. 145-157.
- [Tichem & Storm, 1997] Tichem M., Storm T., (1997) Designer support for product structuring – development of a DFX tool within the design coordination framework, *Computers in Industry*, pp. 155-163.
- [Tichkiewitch, 1994] Tichkiewitch S., (1994) De la CFAO à la conception intégrée, *International Journal of CAD/CAM and Computer Graphics*, Vol. 9, No. 5, pp. 609-621.
- [Tichkiewitch et al., 1995] Tichkiewitch S., Chapa E., Belloy P., (1995) Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée, *Productivity in world without borders conference*, Montréal.
- [Tichkiewitch & Veron, 1998] Tichkiewitch S., Véron M., (1998) Integration of Manufacturing Processes in Design, *Annals of the CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 99-102.
- [Tollenaere, 1995] Tollenaere M., (1995) Contribution à la modélisation de connaissances pour la conception mécanique, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Joseph Fourier, Grenoble 1.
- [Tremblay et al., 2006] Tremblay T.G., Rivest L., Msaaf O., Maranzana R., (2006) The role of associations in CAD and PLM for handling change propagation during product development, *Proceeding of the 2006 conference on Leading the Web in Concurrent Engineering: Next Generation Concurrent Engineering*, pp. 507-514.
- [Tseng et al., 2007] Tseng H-E., Wang W-P., Shih H-Y., (2007) Using memetic algorithms with guided local search to solve assembly sequences planning, *Expert Systems Applications*, Vol. 33, pp. 451-467.
- [Tseng et al., 2004] Tseng H.E., Li J.D., Chang Y.H., (2004) Connector-based approach to assembly planning using a genetic algorithm, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 11, pp. 2243-2261.

---

**U**

- [Ullman, 2002] Ullman D.G., (2002) *The mechanical design process*, Mc Graw Hill, 3ème édition.
- [Ullrich & Eppinger, 2000] Ulrich K.T., Eppinger S.D., (2001) *Product Design and Development*, Fourth Edition, Mc Graw-Hill International Edition

---

**V**

- [Vasilash, 1990] Vasilash G.S., (1990) Simultaneous engineering, management's view competitive tool, *Simultaneous*

*Engineering; Integrating Manufacturing and Design*, edited by C.W. Allen, pp. 50-55.

- [Vast *et al.*, 1997] Vast T., Raucant B., Petit F., (1997) A case study of interactive design of a product and its assembly line, In Ahmad M.M. & Sullivan W.G. editors, *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Middlesbrough, UK, pp. 776-786.
- [van Holland & Bronsvoort, 2000] van Holland W., Bronsvoort W.F., (2000) Assembly features in modeling and planning, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 16, pp. 277-294
- [van Holland, 1997] van Holland W., (1997) Assembly Features in Modeling and Planning, PhD Thesis, Delft University
- [Vielhaber *et al.*, 2004] Vielhaber M., Burr H., Deubel T., Weber C., (2004) Assembly-oriented Design in automotive engineering, *International Design Conference*, Dubrovnik, May, pp. 1-8.

---

## W

- [Wang, 2009] Wang C.-S., (2009) Web-based modular interface geometries with constraints in assembly models, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 56, No. 4, pp. 1675-1686.
- [Wang *et al.*, 2005] Wang W., Chen G., Lin Z., Lai X., (2005) Automated Hierarchical Assembly System Construction in Automobile Body Assembly Planning, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, pp. 347-351.
- [Wang *et al.*, 2009] Wang L., Keshavarzmanesh S., Feng H.-Y., Buchal R.O., (2009) Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, pp. 132-144.
- [Weber *et al.*, 2002] Weber C., Werner H. Deubel T., (2002) A different view on product data management/product life-cycle management and its future potentials, *Journal of Engineering Design*, Vol. 14, No. 4, pp. 447-464.
- [Westkämper, 2003] Westkämper E., (2003) Assembly and Disassembly Processes in Product Life Cycle Perspectives, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 2, pp.579-588.
- [Whitney *et al.*, 1988] Whitney D.E., Nevins J.L., De Fazio T.L., (1988) The strategic approach to product design, Design and Analysis of Integrated Manufacturing Systems, pp. 200-223.
- [Whitney, 1992] Whitney D.E., (1992) Peugeot's manufacturing technology challenge EC assumptions, Report, Cambridge, MIT Press.
- [Whitney, 1996] Whitney D.E., (1996) The Potential for Assembly Modeling in Product Development and Manufacturing, Rapport Interne, MIT.
- [Whitney *et al.*, 1999] Whitney D.E. *et al.*, (1999) Designing Assemblies", *Research in Engineering Design*, Vol. 11, pp. 229-253.

- [Whitney, 2004] Whitney D.E., (2004) Mechanical assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development, Oxford University Press, ISBN 0-19-515782-6, 517p.
- [Wilson & Watkins, 1990] Wilson R.J., Watkins J.J., (1990) Graphs – An introductory approach, New York, John Wiley & Sons Inc.
- [Winner *et al.*, 1988] Winner R.J., Pennel J.P., Bertrand H.E., Slusarczyk M.M, (1988) The role of concurrent engineering in weapons systems acquisition, IDA R-388, Institute for Defense Analyses.
- [Wognum & Trappey, 2008] Wognum N., Trappey A., (2008) PLM Challenges, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 22, pp. 419-420.
- [Wu & O’Grady, 1999] Wu T., O’Grady P., (1999) A Concurrent Engineering Approach to Design for Assembly, *Concurrent Engineering*, Vol. 7, pp. 231-243

---

**X**

- [X35-109, 1989] X35-109, (1989) Acceptable limits of manual loads carrying for one person, French Norm, ISSN 0330-3931.

---

**Y**

- [Yamagawa, 1988] Yamagawa S., (1988) An Assembly Ease Evaluation Method for Product Engineers: DAC, *Techno Japan*, Vol. 21, No. 12.
- [Yan *et al.*, 2002] Yan X.T., Rehman F., Borg J.C., (2002) FORESEEing design solution consequences using design context information, *Proceedings of the Fifth IFP Workshop in Knowledge-intensive Computer-Aided Design*, Malta, pp. 18-33.
- [Yan *et al.*, 2008] Yan J.Q., Ming X.G., Lu W.F., Zha X.F., (2008) New Research Advances in Product Lifecycle Management, Special issue, *Concurrent Engineering: Research and Applications*.
- [Yeh, 1992] Yeh R.T., (1992) Notes on concurrent engineering, *IEEE Transaction on Knowledge Data Engineering*, Vol. 4, No. 5, pp. 407-414.
- [Ye & Urzi, 1996] Ye N., Urzi D. A., Heuristic rules and strategies of assembly planning: Experiment and implications in the design of assembly decision support system, *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 8, pp. 2211–2228.
- [Yu-liang & Wei, 2009] Yu-liang L., Wei Z.O., (2009) Development of an integrated-collaborative decision making framework for product top-down design process, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 25, pp. 497-512

---

**Z**

- [Zha *et al.*, 1998] Zha X.F., Lim S.Y.E, Fok S.C., (1998) Integrated Intelligent Design and Assembly Planning: A Survey, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, pp. 664-685.

- [Zha *et al.*, 1999] Zha X.F., Lim S.Y., Fok S.C., (1999) Development of an expert system for concurrent product design and planning for assembly, *International Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 15, pp. 153-162.
- [Zha *et al.*, 2001] Zha X.F., Du H.J., Qiu J.H., (2001) Knowledge-based Approach and System for Assembly Oriented Design, Part I: the Approach", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, No. 4, pp. 61-75.
- [Zha & Du, 2002] Zha X.F., Du H., (2002) A PDES/STEP-based model and system for concurrent integrated design and assembly planning, *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 1087-1110.
- [Zha, 2002] Zha X.F., (2002) A knowledge intensive multi-agent framework for cooperative/collaborative design modeling and decision support of assemblies, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 15, pp. 493-506
- [Zhang *et al.*, 2002] Zhang Y.Z., Ni J., Lin Z.Q., Lai X.M., (2002) Automated sequencing and sub-assembly detection in automobile body assembly planning, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp. 490-494.
- [Zhao *et al.*, 2009] Zhao Z., Bezdecny M., Lee Y, Robinson D., Bauer L., Slagle M., Coleman D., Barnes J., Walls S., (2009) Predictions of Assembly Variation During Early Design, *Journal of Computing Information and Science in Engineering*, Vol. 9, 11p.

# Glossaire

Ce glossaire permet de définir les termes utilisés dans la thèse et ainsi faciliter la compréhension des lecteurs. Les définitions sont issues de normes, documents industriels et de travaux de recherche.

**Assemblabilité** : aptitude d'un produit à autoriser la connexion physique de ses composants. C'est une condition fonctionnelle qui consiste à vérifier si le jeu spécifié entre les pièces intégrant des défauts autorise l'assemblage précontraint du mécanisme.

**Assemblage** : regroupement de pièces attachées et correspondant à une pause naturelle du processus de fabrication, par exemple pour le stockage.

**Capabilité** : aptitude d'un procédé à produire les caractéristiques sélectionnées pendant une période suffisamment longue, avec un taux théorique de rebuts inférieur aux exigences internes à l'entreprise.

**Caractéristiques d'assemblage** : caractéristique influente de type géométrique permettant de réaliser une exigence d'assemblabilité entre deux composants du produit.

**Composant de maintien** : composant temporaire permettant de maintenir un sous-assemblage instable afin de le réorienter.

**Assembly Key Characteristics (AKCs)** are the features during each assembly stage on the product, tool, fixture or procedures that significantly affect the realisation of a product KC at the next higher assembly process level during the assembly process.

**Key Characteristics (KCs)** are a product's geometric features and material properties that are highly constrained or for which minute deviations from nominal specifications (regardless of manufacturing capabilities) have a significant impact on the product's performance, function and form at each product assembly level.

**Composant** (ou pièce): constituant d'un produit.

**Élément de base** : composant ou sous-assemblage, stabilisé par un posage, sur lequel les autres composants/sous-ensembles devront se positionner et s'assembler progressivement. Cet élément est alors considéré comme primaire dans une ou plusieurs opérations d'assemblage consécutives. Il joue un rôle de support pour les autres composants/sous-ensembles et garde une orientation constante.

**Exigence** : demande formelle, exprimée en terme qualitatif et/ou quantitatif de provenance externe ou interne.

**Exigence fonctionnelle** : exigence associée à la réalisation et au fonctionnement d'un produit.

**Exigence géométrique** : exigence fonctionnelle exprimée sous forme géométrique sur un ou plusieurs composants d'un produit.

**Gamme d'assemblage** : ordre chronologique de réalisation de l'ensemble des liaisons d'assemblage existantes entre les composants du produit.

**Liaison d'attachement** : liaison élémentaire établissant un ou plusieurs contraintes surabondantes sur la position et/ou l'orientation entre deux composants déjà positionnés.

**Liaison de positionnement** : liaison élémentaire établissant une ou plusieurs contraintes sur la position et/ou l'orientation entre deux composants du produit.

**Opération d'assemblage** : réalisation physique d'une liaison élémentaire.

**Posage** ou **Gabarit** (*jig*) : organe de maintien de l'élément de base lui assurant une position, une orientation et un déplacement stable dans l'espace pour accepter les opérations d'assemblage des composants/sous-ensembles. De ce fait, un retournement de l'élément de base demandera un nouveau posage ou une configuration de celui-ci

**Produit** : ensemble des composants reliés entre eux et travaillant ensemble pour fournir les fonctions attendues par le client.

**Séquence d'assemblage** : ordre chronologique des opérations d'assemblage existant entre les composants du produit.

**Takt Time** (ou période de cadencement) : c'est le rythme correspondant à la capacité d'absorption du marché et sur lequel l'ensemble de l'entreprise doit se synchroniser afin de produire ni trop ni trop peu.

**Taux de Rendement Synthétique (TRS)** : méthode permettant aux opérateurs d'identifier et de traiter les causes de pertes de production. Mesuré généralement heure par heure, le TRS permet également à la maîtrise et à l'encadrement d'orienter au quotidien les décisions de management.

**Temps d'ouverture** : temps correspondant à l'amplitude des horaires de travail et incluant les temps d'arrêt de désengagement, tels que nettoyage, pause, maintenance préventive, etc.

**Total Productive Maintenance (TPM)** : Approche systématique de la maintenance visant une productivité maximale des équipements de production en intégrant la notion de coût global de possession

# Annexes

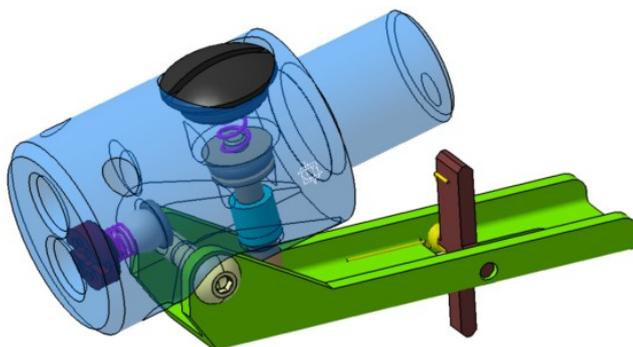
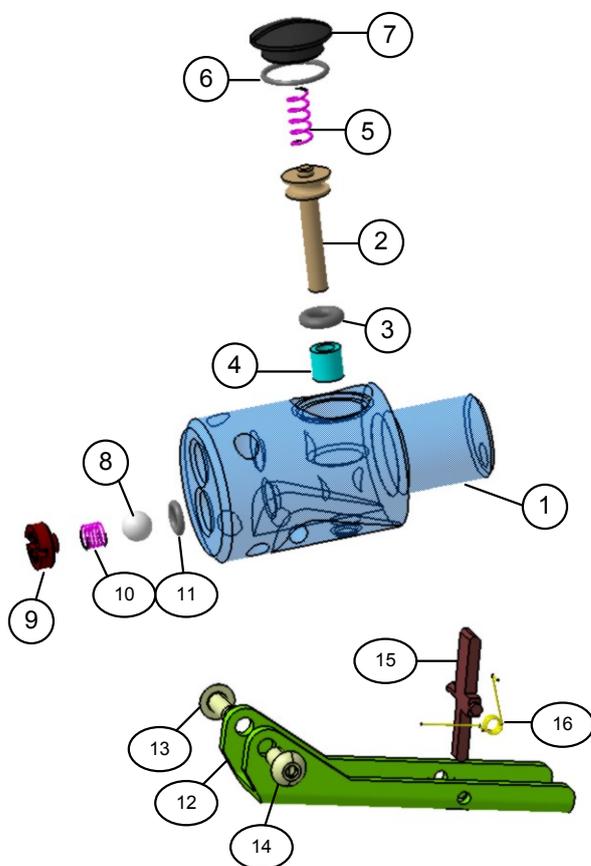


FIG. 107 — Vue assemblée d'une solution alternative de la vanne tenant compte des fonctions techniques identifiées



No.	Nom des composants
1	Vanne
2	Clapet
3	Joint torique clapet
4	Coussinet
5	Ressort clapet
6	Joint torique
7	Bouchon
8	Clapet à bille
9	Bouchon d'évacuation
10	Ressort clapet à bille
11	Joint torique clapet à bille
12	Gâchette
13	Vis 1
14	Vis 2
15	Sécurité
16	Ressort de rappel

FIG. 108 — Vue éclatée de la solution alternative et nomenclature associée