



HAL
open science

Introduction et analyse des schémas de cotation en avance de phase

Michel Socoliuc

► **To cite this version:**

Michel Socoliuc. Introduction et analyse des schémas de cotation en avance de phase. Autre. Ecole Centrale Paris, 2010. Français. NNT : 2010ECAP0022 . tel-00534810

HAL Id: tel-00534810

<https://theses.hal.science/tel-00534810>

Submitted on 10 Nov 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.



**ÉCOLE CENTRALE DES ARTS
ET MANUFACTURES
“ ÉCOLE CENTRALE PARIS ”**

THÈSE

Présentée par Monsieur SOCOLIUC Michel

pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Génie Industriel

Laboratoire d'accueil : LISMMA - SUPMECA

**SUJET : INTRODUCTION ET ANALYSE DES SCHEMAS DE COTATION EN
AVANCE DE PHASE**

soutenue le : 9 Juillet 2010

devant un jury composé de :

Alain RIVIERE

Président

Max GIORDANO

Luc MATHIEU

Rapporteurs

Didier BUYSSE

Hugo FALGARONE

Dominique GAUNET

Pierre Alain YVARS

Examineurs

2010ECAP0022

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	2
Index des Illustrations	5
Index des Tableaux	9
Préface	10
Remerciements	11
Résumé	12
Lexique - Acronymes	13
Contexte de Recherche	14
Introduction 15	
Un peu d'histoire	16
Vers un langage commun de représentation	16
Le début d'une ère " standardisée "	18
Qualité & Fabrication, vecteurs de création et modification des normes	19
Positionnement des travaux de recherche au sein du milieu industriel	21
L'intégration et l'évolution des travaux de recherche dans un processus " global "	21
Méthodes, contraintes, outils... et environnement de travail	23
La définition Fonctionnelle et Numérique	23
La Capitalisation, les Standards et les Normes	24
Le dialogue entre la théorie et la pratique	26
Enjeux et innovation	27
Etat de l'art Le tolérancement en avance de phase	32
Notions et méthodes de base utilisées	33
Utilité du tolérancement	33
1. Langage normalisé de spécification	34
2. Spécification qualitative	36
3. L'analyse et la synthèse quantitative de schémas de cotation	36
4. Impact sur le coût	37
Design for Assembly	39
1. Assemblabilité et Validation des CF	39
2. Interfaces Mécaniques	40
SATT & EGRM	42
1. Un modèle de représentation simplifié d'un système	42
2. Le squelette géométrique	43
Approche fonctionnelle	43
1. Des processus standardisés	44
2. Une modélisation globale complexe, mais pas forcément localement compliquée	45
3. Une représentation fonctionnelle par graphes	46
4. Intégration d'éléments fonctionnels dans la représentation numérique	49
Le Tolérancement, un vecteur de qualité	50
Un besoin industriel concret	51
Des modèles mathématiques existants à adapter au besoin	52

1.	Hypothèses	52
2.	Le torseur des petits déplacements.....	52
3.	Torseur écart et surfaces de substitution.....	54
4.	Domaines écart	55
5.	Domaines jeux	59
6.	Opérations sur les domaines convexes : Sommes de Minkowski et Intersections.....	59
L'avance de phase en conception mécanique		62
	Constats	62
	Premières propositions	63
	Évolution de la réflexion autour du processus de conception.....	63
1.	La MN au centre du processus de conception.....	63
2.	Les informations nécessaires à la simulation du tolérancement en avance de phase	64
3.	Création et extraction des informations nécessaires à la simulation.....	65
4.	La Maquette Fonctionnelle, base de la définition géométrique	66
	Conclusions.....	67
1.	Méthodologies et outils mathématiques	67
2.	Pilotage de la MN et intégration de la notion de défaut géométrique.....	68
La Maquette Fonctionnelle.....		69
Penser fonctionnel		70
	"Au commencement" il y a la voix du client	70
1.	Une problématique connue	70
2.	Expression et analyse du besoin	71
3.	Création du Cahier des Charges Fonctionnel.....	72
	Intégration du contexte de travail de l'industriel.....	74
1.	Définition et/ou découpage en Macro-Fonctions	74
2.	Définition des Groupes Fonctionnels	75
	La recherche des solutions.....	76
1.	Décomposition des Fonctions De Haut Niveau.....	76
2.	Décomposition du Système.....	77
3.	Capitalisation des informations relatives aux solutions techniques.....	78
Problème de structure lié au processus de déploiement des prestations		80
	Constats	80
	Solutions informatisées existantes.....	82
1.	GAIA (cf. chapitre 2).....	82
2.	TDC Need & TDC Structure.....	82
3.	CATIA V6 (Dassault Systèmes) : découpage RFLP	83
	Bilan	84
Une proposition de processus modifié		85
	Aperçu global	86
	Le découpage fonctionnel proposé	88
	Détail de chaque étape composant le processus.....	89
1.	R (Requirements) : Recenser et structurer les Prestations.....	89
2.	T (Technological) : Traduction des Prestations en “ paramètres de conception ”	90
3.	F (Functional) : Définition des fonctions produit	93
4.	A (Architecture) : Définition de l'architecture détaillée du produit	94
	Définition du modèle de représentation par graphes (squelette fonctionnel).....	97
1.	Déclaration des Entités Modélisées.....	98
2.	Détail de la modélisation.....	99
3.	Détail des Entités Modélisées.....	101
	Pilotage fonctionnel	106
1.	Problématique	106

2.	Besoin d'une passerelle entre les modélisations	106
3.	Définition de la MN simplifiée	107
4.	Pilotage et synchronisation en avance de phase.....	113
5.	Application dans le cadre de CATIA V6 / Processus RFLP	113
	Bilan – Maquette Fonctionnelle.....	122
<i>Un nouveau processus de spécification et validation</i>		<i>123</i>
La place de la cotation fonctionnelle dans le cycle de conception.....		124
	Introduction - Constats.....	124
	Proposition - Innovation.....	124
1.	Intégration en Avance de Phase	125
2.	Capitalisation – Réutilisation	126
3.	Tolérancement par « Interfaces »	126
La place de la simulation des schémas de cotation		129
	Gestion des supports numériques pour la simulation.....	129
1.	Définition de la Maquette Numérique Simplifiée	131
2.	Définition du concept d'inter-pièce pour la simulation d'assemblages 3D	133
	Processus de validation proposé	136
1.	Hypothèses & contexte numérique à respecter	136
2.	Spécification et implémentation d'un prototype d'analyse de tolérances.....	138
3.	Bilan	147
	Proposition d'un processus d'optimisation « hybride »	148
1.	La robustesse du pire des cas « à un coût réduit ».....	148
2.	Méthodologie d'optimisation.....	149
<i>Bilan et voies d'amélioration</i>		<i>150</i>
1.	Bilan	150
2.	Une cible.....	152
3.	Voies d'amélioration.....	152
<i>Annexes</i>		<i>159</i>
Extraction CdC Prototype DS (calcul contour quelconque)		160
	Calcul du défaut engendré par un contact plan.....	160
1.	Hypothèses.....	160
2.	Calcul du déplacement en chaque point du contour	161
3.	Calcul pour N points appartenant au même contour	162
	Calcul du défaut engendré par un contact plan.....	164
1.	Retour sur les torseurs.....	164
2.	Traitement des liaisons.....	164
Extraction du CdC Prototype DS (méthodes de calcul ConvexHull)		169
	Macro étapes qui devront être abordées lors du développement.....	169
	Algorithmes d'élimination de points.....	170

Index des Illustrations

<i>Fig. 1 : Domaines connexes au sujet de thèse.</i>	15
<i>Fig. 2 : Plans des coques de bateau créés par Matthew Baker</i>	18
<i>Fig. 3 : Planches de l'artillerie rationalisée par De Gribeauval</i>	19
<i>Fig. 4 : Plan de la boîte de vitesse inventée par Louis Renault en 1898</i>	20
<i>Fig. 5 : Domaines connexes à l'étape d'analyse</i>	22
<i>Fig. 6 : Pourcentage de réutilisation des données numériques (Longview Advisors, 2008)</i>	24
<i>Fig. 7 : Processus RTFAS</i>	29
<i>Fig. 8 : Représentation synoptique de la première moitié de la thèse de doctorat</i>	30
<i>Fig. 9 : Représentation synoptique de la seconde moitié de la thèse de doctorat</i>	30
<i>Fig. 10: Jeux fonctionnels au niveau des interfaces et assemblabilité d'un ensemble mécanique</i>	34
<i>Fig. 11 : Schématisation des processus d'analyse de tolérances (Chase & Greenwood, 1988)</i>	36
<i>Fig. 12 : Schématisation des processus de synthèse de tolérances (Chase & Greenwood, 1988)</i>	36
<i>Fig. 13 : Exemple simple d'empilage unidirectionnel</i>	38
<i>Fig. 14 : Impact du tolérancement sur le coût d'un produit. (Petit, 2004)</i>	38
<i>Fig. 15 : Définition et évolution des interfaces mécaniques durant le développement du produit</i>	41
<i>Fig. 16 : Processus GASAP : enchaînement et lien entre les différents domaines (Ballu et al., 2006)</i>	46
<i>Fig. 17 : Exemple d'étude GALA (Buysse, 2007)</i>	47
<i>Fig. 18 : Graphe des liaisons élémentaires</i>	48
<i>Fig. 19 : Graphe orienté d'analyse (LMECA)</i>	48
<i>Fig. 20 : Graphe de contact et graphe des tolérances (Giordano & Hernandez, 2006)</i>	49
<i>Fig. 21 : Changement de base</i>	53
<i>Fig. 22 : Association des torseurs aux surfaces nominales</i>	54
<i>Fig. 23 : Tolérancement d'une surface plane rectangulaire en localisation et orientation</i>	56
<i>Fig. 24 : Domaine écart associé à la tolérance d'orientation</i>	57
<i>Fig. 25 : Domaine écart d'une tolérance de localisation appliquée à une surface plane de contour rectangulaire</i>	57
<i>Fig. 26 : Domaine écart associée à une tolérance de localisation et d'orientation</i>	58
<i>Fig. 27 : Torseurs jeu au niveau d'une liaison (Petit, 2004)</i>	59
<i>Fig. 28 : Somme de Minkowski de deux domaines écart (Socoliuc et al., 2007)</i>	60
<i>Fig. 29 : Intersection de deux domaines (Petit, 2004)</i>	61
<i>Fig. 30 : Schématisation du cycle actuel de développement produit</i>	62
<i>Fig. 31 : Parallélisme des modélisations par la Maquette Fonctionnelle et la Maquette Numérique</i>	66
<i>Fig. 32 : Enchaînement des processus de pilotage, synchronisation et validation entre la MF et la MN</i>	67
<i>Fig. 33 : Bête à Cornes</i>	72

<i>Fig. 34 : Du besoin vers le Produit final</i>	72
<i>Fig. 35 : Diagramme Pieuvre</i>	73
<i>Fig. 36 : Décomposition/Structuration du projet en Fonctions de Haut-Niveau</i>	74
<i>Fig. 37 : Décomposition du projet en systèmes regroupant des fonctions à réaliser</i>	75
<i>Fig. 38 : Diagramme FAST</i>	77
<i>Fig. 39 : Questions liées au diagramme FAST</i>	77
<i>Fig. 40 : Schéma de Flux</i>	78
<i>Fig. 41 : Entrées et sorties du processus fonctionnel</i>	81
<i>Fig. 42 : Modélisation "Fonctionnelle" du système</i>	83
<i>Fig. 43 : Modélisation "Logique" du système</i>	83
<i>Fig. 44 : Cycle en V</i>	85
<i>Fig. 45 : Points à intégrer dans le processus d'analyse fonctionnelle</i>	86
<i>Fig. 46 : Point de départ de la création du découpage du processus fonctionnel</i>	86
<i>Fig. 47 : Les trois « Macro-Processus Fonctionnels »</i>	87
<i>Fig. 48 : Interaction entre le domaine fonctionnel et le numérique</i>	87
<i>Fig. 49 : Découpage en cinq processus distincts</i>	88
<i>Fig. 50 : Processus de traitement des Prestations</i>	89
<i>Fig. 51 : Découpage Produit</i>	90
<i>Fig. 52 : Exemple de décomposition d'un projet véhicule en Groupes Fonctions Élémentaires</i>	91
<i>Fig. 53 : Déclinaison descendante des prestations</i>	92
<i>Fig. 54 : Précisions sur l'analyse et la décomposition des fonctions principales</i>	93
<i>Fig. 55 : Introduction des alternatives techniques à comparer dans la suite du processus</i>	94
<i>Fig. 56 : Evolution du niveau de définition au fur et à mesure de l'analyse du système mécanique</i>	95
<i>Fig. 57 : Exemple de processus global permettant d'arriver à l'étape de spécification du tolérancement</i>	96
<i>Fig. 58 : Place de la définition et de la création du squelette fonctionnel dans le cycle de conception</i>	97
<i>Fig. 59 : Exemple de lien existant entre l'entité Assemblage et l'entité Pièce</i>	97
<i>Fig. 60 : Vue Globale du Modèle</i>	98
<i>Fig. 61 : Modélisation du lien Assemblage-Pièce</i>	99
<i>Fig. 62 : Modélisation du lien Pièce-Interface</i>	99
<i>Fig. 63 : Modélisation des liens Pièce-Surfaces Fonctionnelles</i>	100
<i>Fig. 64 : Hiérarchisation des entités principales dans le processus de création</i>	100
<i>Fig. 65 : Décomposition d'une liaison Globale en Liaisons élémentaires</i>	103
<i>Fig. 66 : Cas des liaisons élémentaires faisant intervenir des groupes de surfaces</i>	104
<i>Fig. 67 : Réconciliation des domaines « Fonctionnel » & « Numérique »</i>	106
<i>Fig. 68 : Catégorisation des différents concepts, selon qu'ils sont ou non intégrés dans la MN</i>	108
<i>Fig. 69 : Passage de la MF vers la MN simplifiée</i>	109
<i>Fig. 70 : Equivalence souhaité entre les différentes structures manipulées</i>	110

<i>Fig. 71 : Structure du Squelette Fonctionnel Géométrique</i>	111
<i>Fig. 72 : Réorganisation du SFG et évolution de la MN.</i>	112
<i>Fig. 73 : Définition du concept d'inter-pièce au niveau fonctionnel.</i>	112
<i>Fig. 74 : Différentes étapes de « pilotage » rencontrées tout au long du cycle de conception.</i>	113
<i>Fig. 75 : Couverture du cycle de conception par le processus RFLP.</i>	115
<i>Fig. 76 : Première proposition d'enrichissement de la vue « Logical »</i>	116
<i>Fig. 77 : Proposition d'une vue « Logical » Multi-Niveaux</i>	117
<i>Fig. 78 : Terminologie choisie pour la schématisation des liens et surfaces</i>	118
<i>Fig. 79 : Scénario de retranscription des informations de la vue « Logical » vers la vue « Physical »</i>	119
<i>Fig. 80 : Scénario de retranscription des informations de la vue « Physical » vers la vue « Logical »</i>	119
<i>Fig. 81 : Scénario de gestion des modélisations asynchrones</i>	120
<i>Fig. 82 : Impossibilité de lier une entité Logique à une Surface appartenant à une CatPart</i>	121
<i>Fig. 83 : Problème de liens entre pièces</i>	121
<i>Fig. 84 : Evolution de la place accordée à la cotation dans le cycle de conception</i>	125
<i>Fig. 85 : Etape de spécification des schémas de cotation</i>	127
<i>Fig. 86 : Place dans le cycle de conception</i>	129
<i>Fig. 87 : Processus relatif à la création d'une modélisation vouée à la simulation (Lionel Fine, EADS, 2008)</i>	130
<i>Fig. 88 : Scénario de création de la MNS à partir de la MN</i>	131
<i>Fig. 89 : Equivalence entre les modélisations</i>	131
<i>Fig. 90 : Scénario de création de la MNS à partir de la MF</i>	132
<i>Fig. 91 : Equivalence entre les modélisations d'un point de vue fonctionnel</i>	132
<i>Fig. 92 : Simulation d'un assemblage faisant intervenir des défauts géométriques au niveau des interfaces</i>	133
<i>Fig. 93 : Création d'un assemblage en utilisant les inter-pièces</i>	134
<i>Fig. 94 : Cas d'étude & points de vérification</i>	135
<i>Fig. 95 : Processus de validation des schémas de tolérancement proposé</i>	136
<i>Fig. 96 : Processus suivi et Intégration des fonctionnalités dans le prototype</i>	138
<i>Fig. 97 : Interface pour la sélection déclaration des liaisons</i>	139
<i>Fig. 98 : Processus associé à la déclaration d'une liaison</i>	140
<i>Fig. 99 : Intégration dans l'environnement CATIA V5 des liaisons et des chaines étudiées</i>	140
<i>Fig. 100 : Boucle étudiée</i>	141
<i>Fig. 101 : Exemple de décomposition et paramétrage de liaison</i>	142
<i>Fig. 102 : Discrétisation du polytope contenant l'espace de faisabilité pour tout point M</i>	142
<i>Fig. 103 : Processus de création de l'espace de faisabilité</i>	143
<i>Fig. 104 : Processus suivi lors de la création des polytopes</i>	144
<i>Fig. 105 : Intégration des résultats dans l'environnement CAO</i>	145
<i>Fig. 106 : Visualisation de la participation de chaque liaison à l'écart global engendré</i>	146
<i>Fig. 107 : Intégration du concept d'inter-pièce.</i>	146

<i>Fig. 108 : Bilan des fonctionnalités d'analyse du tolérancement</i>	<i>147</i>
<i>Fig. 107 : Processus d'optimisation des tolérances intégrant une approche statistique</i>	<i>148</i>
<i>Fig. 110 : Intégration d'une couche statistique en plus des écarts au pire des cas</i>	<i>148</i>
<i>Fig. 111 : Bilan & couverture fonctionnelle</i>	<i>151</i>

Index des Tableaux

Tableau. 1 :	Tableau récapitulatif des symboles utilisés en tolérancement (ASME Y14.5M)	35
Tableau. 2 :	Tableau récapitulatif des 7 classes d'invariance (SATT)	42
Tableau. 3 :	Torseurs des petits déplacements associés aux différents SATT	55
Tableau. 4 :	Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique Renault (TAFT).....	79
Tableau. 5 :	Comparaison des trois solutions informatiques existantes	84
Tableau. 6 :	Attributs associés aux interfaces globales.....	101
Tableau. 7 :	Attributs associés aux interfaces au niveau des pièces.....	102
Tableau. 8 :	Attributs associés aux interfaces au niveau des pièces.....	102
Tableau. 9 :	Attributs associés aux surfaces fonctionnelles	103
Tableau. 10 :	Attributs associés aux groupements de surfaces fonctionnelles.....	103
Tableau. 11 :	Attributs associés aux liaisons globales	103
Tableau. 12 :	Attributs associés liaisons élémentaires	104
Tableau. 13 :	Tableau utilisé pour récapituler les informations des différentes entités créées	104
Tableau. 14 :	Attributs associés aux fonctions techniques élémentaires.....	105
Tableau. 15 :	Attributs associés à la notion de cotation.....	105
Tableau. 16 :	Caractérisation des liaisons standardisées (extraction de la liste globale).....	139

Préface

Ce mémoire retranscrit, près d'une année après la « fin » de mon doctorat, les travaux de recherche qui ont été menés durant celui-ci enrichis de références au domaine informatique et cela pour deux raisons: la première est tout simplement liée à une curiosité personnelle, quand aux solutions informatiques que l'on pourrait transposer au domaine de la conception mécanique, la seconde étant due au fait que la fin de ce mémoire a été rédigée après avoir changé de branche et avoir bifurqué vers un poste lié à l'informatique (expliquant certaines sources qui sont citées).

De nature assez pragmatique, j'ai toujours essayé de lier le sujet de recherche que je traitais, à une application dans le monde industriel ou tout du moins j'ai essayé de trouver les implications qu'un tel choix pouvait entraîner.

Etonnamment, le sujet de départ, traitant de l'introduction du tolérancement en avance de phase, a débouché sur une approche plus globale et visant à réfléchir sur la mise en place de processus de validation du tolérancement tout au long du cycle de conception. Cela nous a fait pencher sur la notion de Maquette Fonctionnelle et les liens qui devaient être mis en place entre celle-ci et l'environnement numérique afin d'avoir une bijection entre la définition fonctionnelle et la définition numérique d'un ensemble mécanique.

Toutefois, pour des raisons de compréhension de l'ensemble des travaux qui ont été menés, j'ai en quelque sorte déroulé le doctorat de la « fin vers le début », puisque le support nous servant à l'introduction du tolérancement en avance de phase reposait sur la notion de maquette fonctionnelle ainsi que sur la notion de cycle de conception redéfini afin d'intégrer celle-ci. Ne soyez donc pas surpris, par le fait que la chronologie ne soit pas respectée tout au long du document.

Remerciements

Ce mémoire marque la concrétisation de mes travaux de recherche menés au Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des MAériaux (LISMMA) dirigé par Alain Rivière, que je remercie pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, pour avoir dirigé mes travaux de recherche et aussi pour m'avoir conseillé durant ces dernières années. Qu'il trouve ici toute ma gratitude et mes sincères remerciements pour m'avoir aussi permis de rencontrer et d'échanger avec des chercheurs intéressants et qui à leur tour ont su et voulu partager leur savoir avec le jeune doctorant que je fus.

Je suis très reconnaissant à Messieurs Max Giordano (Professeur à l'Université de Savoie) et Luc Mathieu (Professeur à l'École Normale Supérieure de Cachan), d'avoir accepté de rapporter sur ce mémoire de doctorat.

Je remercie Monsieur Didier Buisse pour m'avoir conseillé tout comme pour avoir partagé, tout au long de la thèse, son savoir dans de nombreux domaines et sa bonne humeur, ainsi que Monsieur Michel Poss (Professeur à l'École Normale Supérieure de Cachan) pour m'avoir donné envie de poursuivre en thèse après le master recherche.

Mes remerciements vont aussi à tous les membres du LISMMA – Supmeca qui ont rendu ce doctorat très enrichissant en tout point de vue et surtout très agréable.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu, motivé, ainsi que ceux qui, dernièrement, ont accepté de relire ce mémoire quand bien même le contenu leur était totalement étranger voire incompréhensible de la première à la dernière page.

Merci à tous de m'avoir permis de finaliser ce que j'avais commencé quatre années auparavant.

Il y a peu, j'ai pu lire « qu'on pouvait qualifier les ponts romains de l'Antiquité, d'inefficaces au regard des standards actuels : ils utilisaient trop de pierre et énormément de travail était nécessaire à leur construction. Au fil des années, pour répondre à une problématique équivalente, nous avons appris à utiliser moins de matériaux et à réduire la charge de travail ».

Ces problématiques nous les retrouvons aussi en conception mécanique où l'on essaye en continu de proposer des systèmes de plus en plus performants mais devant être conçus en moins de temps, étant moins cher à produire et fournissant des prestations au moins équivalentes à ce qui a déjà été conçu.

Au cours d'un processus de conception classique, les concepteurs définissent une géométrie ne présentant aucun défaut puis, étant donné que les moyens de production ne permettent pas d'obtenir de telles pièces finales, ils spécifient les schémas de cotation définissant les écarts acceptables garantissant le bon fonctionnement du système.

Seulement, cela est fait après avoir produit les dessins détaillés, c'est à dire trop tard. Pour répondre à cette problématique, ce mémoire présentera l'intégration très tôt dans le cycle de vie de conception, d'un processus de validation optimisé, basé sur une maquette numérique en lien avec sa représentation fonctionnelle (maquette fonctionnelle), et permettant de valider des schémas de cotation 3D standardisés.

Je vais d'abord décrire ce que l'on entend par « maquette fonctionnelle » et surtout ce que cette nouvelle définition apporte en plus de la définition numérique. Une fois ce point abordé, je détaillerai les liens qui permettent d'avoir une unicité de l'information au sein de l'environnement de travail, tout comme les processus qui permettent de lier les représentations fonctionnelles et numériques.

Ensuite je détaillerai les processus basés sur ces concepts, et qui ont pour but de valider les choix qui sont effectués en avance de phase au niveau des schémas de cotation. Pour ce faire, je commencerai par présenter l'analyse au pire des cas (utilisant les modèles de domaines écarts notamment), permettant de garantir le bon fonctionnement de l'ensemble mécanique, dans le cas où tous les écarts se retrouvent à l'intérieur des zones respectives (définies par les tolérances).

Enfin, je finirai par introduire ce qu'une couche statistique, couplée à l'analyse au pire des cas utilisant les enveloppes convexes, peut amener dans le contexte industriel et notamment sous la contrainte temporelle.

Lexique - Acronymes

MN :	Maquette Numérique
DMU	Anglicisme signifiant Digital Mock-Up et désignant la Maquette Numérique
MNS	Maquette Numérique Simplifiée
MF	Maquette Fonctionnelle
SF	Squelette Fonctionnel
SFG	Squelette Fonctionnel Géométrique
DFA	Design For Assembly
CF	Condition Fonctionnelle
OEM	Anglicisme signifiant « Original Equipment Manufacturer » et pouvant se traduire par « Equipementier » ou « Sous-traitant ».
TAFT	Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
AFB	Analyse fonctionnelle du Besoin
AFT	Analyse fonctionnelle Technique
FTE	Fonction Technique Élémentaire

Contexte de Recherche

SOMMAIRE

Introduction

Un peu d'histoire

- Vers un langage commun de représentation
- Le début d'une ère "standardisée"
- Qualité & Fabrication, vecteurs de création et modification des normes

Positionnement des travaux de recherche au sein du milieu industriel

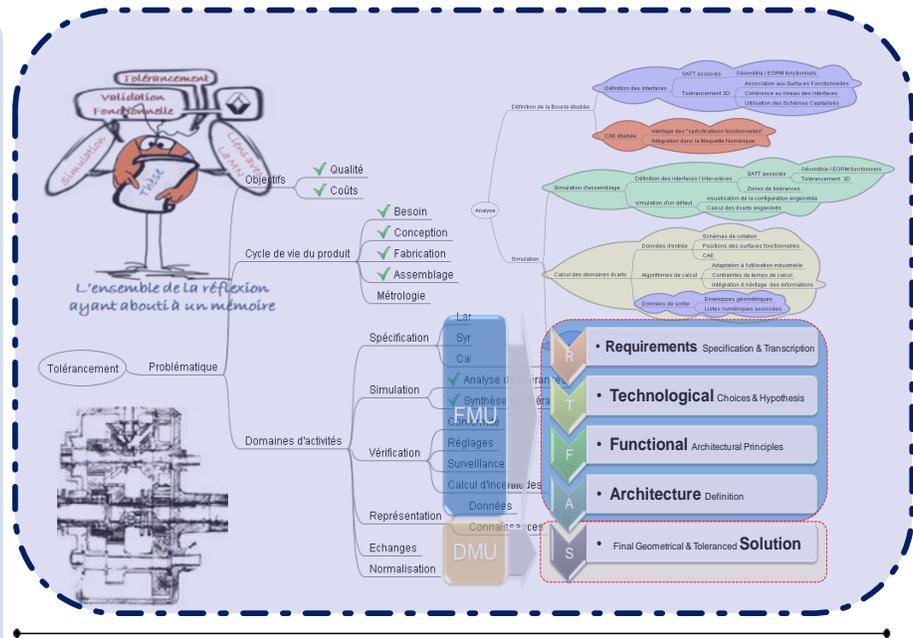
- L'intégration et l'évolution des travaux de recherche dans un processus "global"

Méthodes, contraintes, outils... et environnement de travail

- La définition Fonctionnelle et Numérique
- La Capitalisation, les Standards et les Normes
- Le dialogue entre la théorie et la pratique
- Enjeux et innovation

MOTS-CLES

- ▶ Contexte
- ▶ Historique
- ▶ Standardisation
- ▶ Méthodes
- ▶ Contraintes
- ▶ Outils
- ▶ Enjeux



Ce chapitre a pour but de présenter succinctement la logique que j'ai suivie durant mes travaux de recherche effectués durant ces quatre dernières années et aussi de situer le sujet de recherche au sein de la communauté française effectuant des travaux de recherche dans le domaine du tolérancement.

Grâce au partenariat industriel qu'il y a eu tout au long des travaux de recherche, je présenterai aussi de quelle manière ceux-ci se sont intégrés et adaptés aux contraintes que cet environnement de recherche présentait. Comme nous pourrons le voir, les notions de standardisation, capitalisation et validation ne sont nullement nouvelles, mais elles ont été et sont, un des principaux vecteurs d'amélioration qui ont poussé les équipes de recherche à aller encore plus loin dans leur réflexion sur l'optimisation du processus de tolérancement.

Au travers du "dialogue" permanent entre la théorie et la pratique, j'introduirai dans les grandes lignes, les enjeux et les innovations auxquelles mes années de recherche ont abouti et qui seront détaillées dans les chapitres 3 et 4.

Introduction

Ce mémoire est le résumé de près de quatre années de recherche dans le domaine du tolérancement et de son application dans le monde industriel. Cela a tout d'abord commencé par un Master Recherche qui avait pour premiers objectifs de valider, dans le mode de la mécanique automobile, l'approximation des petits déplacements par rapport aux grands déplacements. Il a aussi permis de montrer que l'application des enveloppes convexes, couplée à l'analyse des schémas de cotation, pouvait être utilisée dans le contexte industriel et notamment sous la contrainte temporelle (Socoliuc, 2006).

Les résultats ayant été concluants, cela m'a permis de continuer dans le cadre d'une thèse CIFRE dont je vais présenter les résultats, conduite en collaboration avec l'industriel Renault et le LISMMA-SUPMECA. En reprenant le graphique introduit par Frédéric Vignat et adapté dans l'ouvrage "Tolérancement Géométrique des Produits" afin de présenter les domaines et les travaux menés par le Groupe de Recherche en Tolérancement (GRT) (Mathieu & Villeneuve, 2007), j'ai, dans un premier temps, essayé de situer et caractériser le sujet de recherche au sein de la communauté scientifique en essayant de mettre en lumière les sujets que l'on retrouvera dans la suite de ce mémoire.

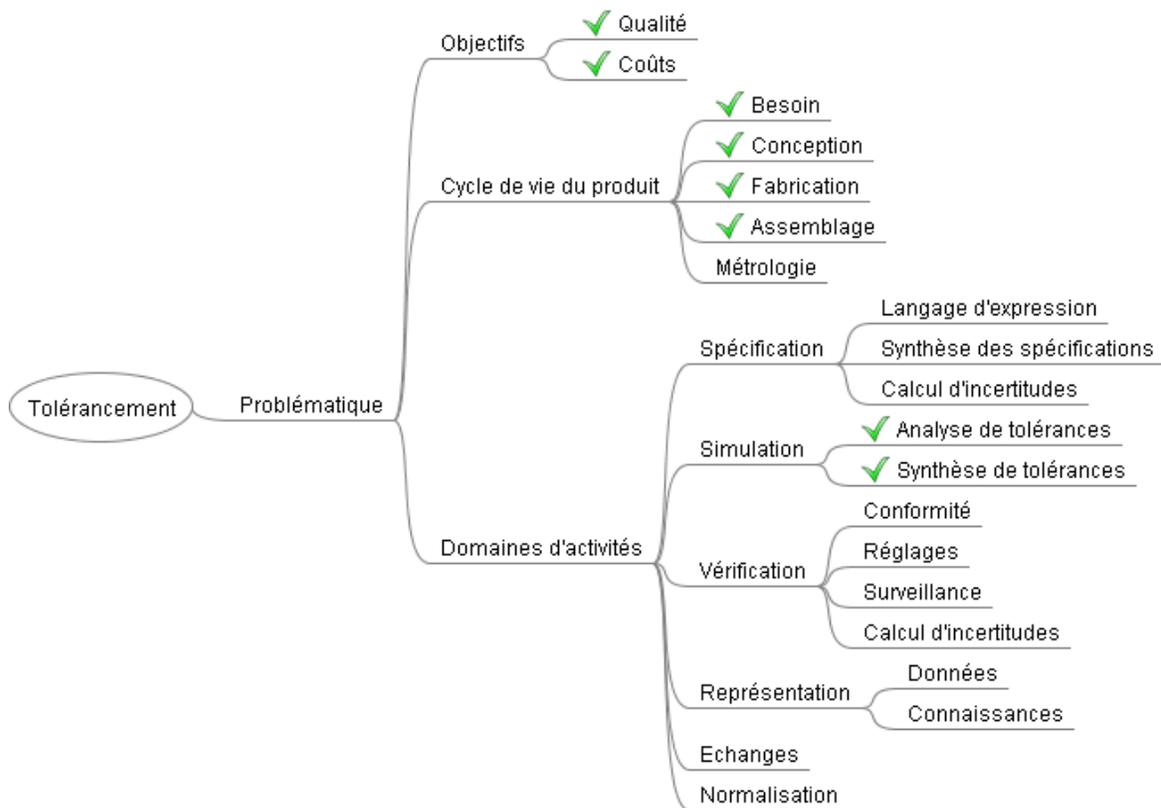


Fig. 1 : Domaines connexes au sujet de thèse.

Un peu d'histoire

Tout au long de ces quatre années, la partie historique m'a beaucoup intéressé et notamment la façon dont les découvertes se sont enchaînées pour aboutir aux notions actuelles, telles que “conception routinière”, “innovante” ou “robuste”, “standardisation”, “tolérancement”, “capitalisation” etc... et qui, de nos jours, nous semblent couler de source.

La notion de conception pourrait se résumer comme étant un processus itératif dont le résultat final répond à un besoin initialement formulé par un client ou une demande du marché. On peut aisément comprendre que la notion de besoin n'a pas énormément évolué au fil du temps, mais si nous examinons l'évolution du processus qui vise à répondre à cette demande, nous remarquons qu'il s'est complexifié et cela surtout durant les deux derniers siècles.

Si nous essayons de retrouver le cheminement que l'esprit humain a suivi tout au long des siècles afin d'arriver au processus actuel de conception, nous nous rendons compte que globalement, nous retrouvons les mêmes grandes macro-étapes et notions auxquelles nous sommes confrontés de nos jours, à une autre échelle.

Ainsi l'homme a surtout essayé de concrétiser jusqu'à la Renaissance :

- La recherche d'idées et la proposition de concepts.
- La théorisation scientifique mais qui, malheureusement, était souvent séparée des applications techniques.
- Les processus de fabrication suivant des “règles qualité” empiriques mais qui se sont révélées être un frein à l'innovation.

Entre la Renaissance et le XVIIIème siècle, on a vu apparaître :

- Les notions de rationalisation des solutions techniques.
- L'introduction de la standardisation, de l'interchangeabilité et de la maintenance.
- La recherche d'une validation scientifique des concepts techniques.

Entre le XIXème siècle et le XXIème siècle, on a vu apparaître :

- La pensée orientée fabrication à grande échelle.
- L'amélioration et l'optimisation de tout le processus de conception.

Enfin entre la fin du XXème siècle et le début du XXIème nous avons assisté à l'explosion des moyens de validation, simulation...

Vers un langage commun de représentation

Comme on peut le remarquer, jusqu'à une époque où l'industrialisation n'a pas poussé à la fabrication de masse, les processus de fabrication se sont enrichis au fil du temps. En essayant de trouver des traces écrites, on se retrouve dans un premier temps, face à de simples “Recettes” et autres “Livres des métiers” qui étaient des recueils décrivant le processus de fabrication et qui n'incluaient pas les raisons qui ont poussé les “inventeurs” à agir de la sorte. Les évolutions à l'époque médiévale se faisant par des simples variations dans les recettes et en se basant sur les observations, les processus de fabrication s'apprennent et se transmettent par la parole.

“N’oublions pas qu’on ne peut juger sainement du mérite d’une invention qu’en se transportant, par la pensée, au temps où elle naquit ; qu’en écartant momentanément de son esprit toutes les connaissances que les siècles postérieurs à la date de cette invention y ont versé ” (François Arago¹)

Ainsi jusqu’au XVIIIème siècle, beaucoup de progrès techniques ont été effectués en se basant sur une “vérité empirique” que l’on peut retrouver sous la forme de “carnets d’ingénieurs”, de “théâtres de machines²” ou autres “traités”. Un des points les plus remarquables lors de ces évolutions, c’est la place que prend le dessin dans la description des mécanismes allant même jusqu’à relayer la description littérale au second plan.

Principales sources de connaissances sur les techniques mécaniques précédant l’époque moderne (Dolza & Vérin, 2004), ces planches sont à l’origine des futurs dessins techniques que l’on connaît de nos jours. En se penchant un peu plus sur ce qu’il nous est présenté dans ces “livres”, on se rend compte que ce sont principalement des recueils techniques dont l’auteur se déclare l’inventeur et qui mettent l’accent sur la transmission de l’information de façon non verbale, contrairement à ce qui se faisait habituellement jusqu’alors.

“ Alors que la plupart des hommes sont myopes, les inventeurs se distinguent par l’acuité de leur regard, de sorte qu’ils sont nommés inventeurs, non pour avoir eux-mêmes créé une chose qui n’existait pas, mais pour l’avoir découverte alors qu’elle était cachée ” (Juan Luis Vivès³)

Ainsi les “ inventeurs ” de mécanismes de l’époque, ou plus précisément les “ techniciens ” qui tentaient d’innover, pouvaient être considérés, par certains de leurs contemporains, comme des plagiaires ne faisant que publier ce qui pouvait déjà exister depuis l’antiquité. D’un autre côté, ils sont aussi considérés comme des “inventeurs” à part entière car ils ont su intégrer des technologies et les appliquer dans un domaine bien précis décrit, la plupart du temps, comme étant d’utilité publique. Toutefois, bien que répondant à un problème concret, certains concepts n’ont jamais pu être mis en pratique, soit à cause de leur coût trop important, soit à cause de difficultés d’ordre technique lors de la réalisation grandeur nature et qui dépassaient la “ simple mise en plan ”, purement graphique, incorporée aux représentations destinées à être imprimées.

On pourrait toutefois considérer que ces représentations constituent, dans le langage actuel, une bibliothèque de “ sous ensembles mécaniques ” dont on pourrait se servir en tant qu’aide à la conception de systèmes plus complexes. Cela peut renvoyer aux modèles génériques que l’on utilise de nos jours lors de la conception d’un nouveau système grâce à la Conception Assistée par Ordinateur⁴. Malheureusement ce qui faisait défaut aux planches de l’époque, c’est que peu d’éléments étaient paramétrés, ce qui rendait la réutilisation très difficile dans un autre environnement ou avec des proportions différentes.

¹ François Arago (26 février 1786 - 2 octobre 1853) est un astronome, physicien et homme politique français.

² Les "théâtres de machines" sont des livres imprimés avec des gravures de qualité, associés à des projets de machines édités de 1570 à 1630 sous la Renaissance. Résultant de la collaboration d’un « ingénieur » et d’un dessinateur, ils contiennent souvent plus de dessin que de texte.

³ Juan Luis Vivès (le 6 mars 1492 - 6 mai 1540), était un théologien, un philosophe et un pédagogue. Il livra des réflexions neuves sur l’organisation de la société et fut un des grands représentants de l’humanisme nordique, porté par une morale de l’action concrète à la politique.

⁴ Ils intègrent la notion de modèle paramétrique tout comme celle de règles métiers qui permettront de valider le modèle dans son nouveau environnement

Pourtant, en nous écartant un peu de l'innovation à proprement parlé et en se penchant sur la conception routinière, telle que celle des bateaux, qui représentaient à l'époque un vecteur économique très important, on trouve des plans et des tables de fabrication de navires et notamment celles de Matthew Baker¹.

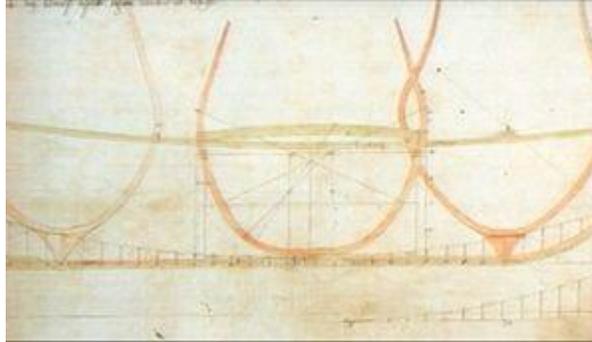


Fig. 2 : Plans des coques de bateau créés par Matthew Baker

Vers la fin du XVII^{ème} siècle et le début du XVIII^{ème} siècle, l'heure n'étant plus à proposer ou recenser les techniques, on assiste à une transformation des derniers "théâtres de machines" qui ont conservé l'outil universel qu'est le dessin, mais qui l'ont associé à des descriptions qui n'axent pas l'intérêt du document sur l'esthétisme mais sur le fond technico-scientifique qu'il renferme. Les contraintes économiques et les garanties exigées par les commanditaires ont fait évoluer les écrits et les pensées afin de prendre en compte le critère de faisabilité et de gain que cela pouvait entraîner.

Le début d'une ère "standardisée"

Par la suite, l'Académie des Sciences² fondée par Colbert, va lancer la réforme des poids et mesures, qui au cours du XVIII^{ème} siècle va déboucher sur l'adoption du « système métrique³ », plus simple d'utilisation et uniforme dans le temps. Au même moment "Les Traités" et les "Encyclopédies" qui en regroupent un certain nombre, commencent à faire leur apparition et amènent avec eux ce qu'on appellerait de nos jours "des dessins d'ensemble".

Ainsi on voit apparaître la notion de dessin industriel coté et tabulé des systèmes mécaniques composant les machines devant être produites de façon industrielle. Sans grande surprise, nous retrouvons les premières notions de prise en compte du processus de fabrication de façon "industrielle" dans le domaine militaire et cela en introduisant les notions de "standardisation et d'interchangeabilité" de certaines pièces composant l'artillerie lourde (Balliet, 2003).

¹ Matthew Baker (1530-1613) était un ingénieur naval anglais, pionnier dans sa discipline et qui a permis aux Anglais d'avoir une supériorité maritime au XVI^{ème} et XVII^{ème} siècle

² Nommée l'Académie royale des sciences lors de sa création

³ La création du Système métrique décimal au moment de la Révolution française et le dépôt qui en a résulté, le 22 juin 1799, de deux étalons en platine représentant le mètre et le kilogramme aux Archives de la République à Paris, peuvent être considérés comme la première étape ayant conduit au Système international d'unités actuel (Bureau international des poids et mesures, 7^e édition 1998). L'adoption du système métrique se fera progressivement durant le du XIX^{ème} siècle d'abord en Europe et Amérique latine, puis progressivement au du XX^{ème} siècle dans le reste du monde.

Ce que De Gribeauval¹ avait implémenté sur les machines de guerre de l'époque, correspondrait de nos jours à du “ carry over ” de pièces mécaniques et que l'on retrouve aussi dans l'industrie automobile. Concrètement, cela s'est traduit d'une part par une segmentation de la gamme des machines de guerre, et d'autre part par un nombre minimum de plateformes mieux réparties entre toutes les machines de guerre, chaque canon correspondant à un usage bien précis. Cette rationalisation², associée à la standardisation de leur production de par la création de “ tables ”, a été à l'époque non seulement appréciée d'un point de vue financier mais aussi en terme de réparation sur le champ de bataille.

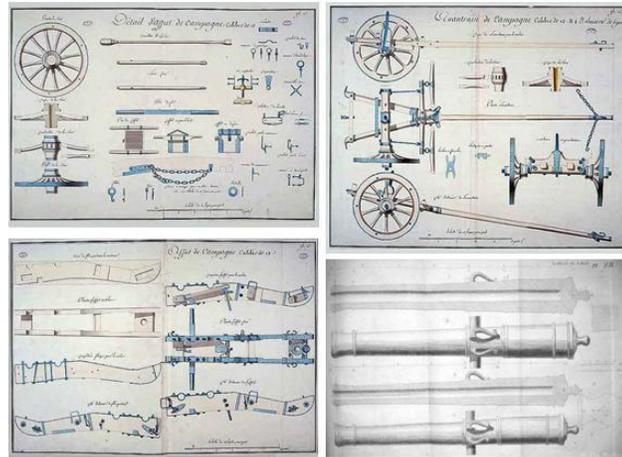


Fig. 3 : Planches de l'artillerie rationalisée par De Gribeauval

Qualité & Fabrication, vecteurs de création et modification des normes

Outre atlantique dès 1800 on retrouve la même politique menée par le gouvernement américain qui va même plus loin, en imposant une standardisation et une interchangeabilité accrue des pièces dans l'industrie de l'armement, tout comme le principe de division du travail.

Par la suite, cette politique a été appliquée à l'horlogerie tout comme à la fabrication des machines agricoles, mais il faudra attendre le XXème siècle avant que la “ taylorisation ” du travail puis le “ fordisme ” ne soient appliqués à l'ensemble des industries produisant en masse, et surtout que ces méthodes soient utilisées dans le domaine de l'automobile. Pour y parvenir, il a fallu non seulement se pencher sur un référentiel commun pour la conception, mais aussi et surtout pour la fabrication.

La notion de normalisation, n'est pas apparue à l'époque industrielle, mais dès que les hommes ont commencé à assembler des pièces mécaniques. Toutefois, si l'on se concentre sur l'industrie automobile le besoin ne s'est pas fait ressentir jusqu'à ce que les cadences de production n'augmentent de manière importante. Ainsi jusqu'à la fin du XIXème siècle, la production pouvait être encore basée sur des schémas et plans peu détaillés (Fig. 4 montrant le niveau de définition des plans de l'époque) et avoir un “ contrôle qualité ”, voire des retouches de pièces finales unitaires afin de produire un ensemble répondant entièrement aux exigences.

¹ Jean-Baptiste Vaquette de Gribeauval (15 septembre 1715 – 9 mai 1789), officier et ingénieur ayant réformé l'artillerie de campagne française. La réorganisation et le système d'artillerie de Gribeauval expliquent en partie les succès des armées françaises de l'époque.

² Deux réformes (Louvois sous Louis XIV et celle de Monsieur de Vallière sous Louis XV) avaient déjà réduit le nombre de canons au nombre de 5.

Comme les commandes augmentèrent dès le début du XXème de façon exponentielle, pour y faire face, l'industrie rationalisa sa fabrication, allant de pair avec une définition plus précise et fiable des éléments à usiner et du besoin de normaliser ces spécifications. Les méthodes américaines faisant leurs preuves outre atlantique, on assiste à une organisation industrielle calquée sur le modèle Ford, d'abord reprise par André Citroën puis par Louis Renault¹.

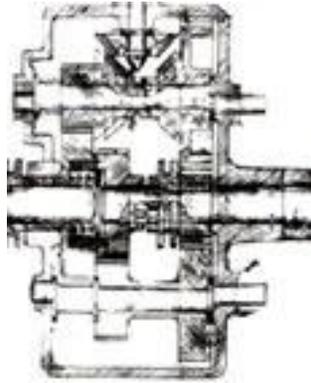


Fig. 4 : Plan de la boîte de vitesse inventée par Louis Renault en 1898

Parallèlement à ce mouvement, on commençait à peine à effectuer des contrôles de lots produits (Student² 1908) mais il faudra attendre les années 20 pour apercevoir ce que l'on appelle de nos jours “ un contrôle en cours de production ” avec les recherches de Fischer³ (Analyse des variances, plans d'expérience), Shewhart⁴ (carte de contrôle) et Pareto⁵ (diagramme classifiant les phénomènes suivant leur gravité).

Au même moment, avec la création des organismes de normalisation (AFNOR en 1926, Standards militaires américains publiés en 1940, l'American Society for Quality Control (ASQC) en 1946, puis enfin l'ISO en 1947) on assistait aux débuts de la spécification et de la normalisation de la qualité. Cette notion de qualité a continué depuis à évoluer, en passant entre autres par exemple par les méthodes “ 0 défauts (programme spatial APOLLO), et je clôturerai cette partie par les définitions qui ont été retenues par l'AFNOR et l'ISO :

“ La qualité c'est l'aptitude d'un produit ou d'un service à satisfaire les besoins de ses utilisateurs”
(selon la norme française NF-X-50-109)

“ Ensemble des caractéristiques qui confèrent au produit l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites” (selon ISO/DIS8402)

¹ Louis Renault (15 février 1877 - 24 octobre 1944) voulait surtout combattre le gaspillage et insistait sur l'autocontrôle des travailleurs, ce qui est en somme une volonté d'accroître la qualité des produits finis afin de diminuer les rebuts donc les coûts

² William Sealy Gosset (13 juin 1876 - 16 octobre 1937) est un statisticien anglais ayant publié en 1908 en Irlande sous le pseudonyme Student. Employé de la brasserie Guinness pour stabiliser le goût de la bière, il a ainsi inventé « Test de Student ».

³ Sir Ronald Aymler Fisher, (17 février 1890 — 29 juillet 1962) était un biologiste et statisticien britannique. Ses travaux sur les statistiques lui valurent la médaille Darwin en 1948, la médaille Copley en 1955 et la médaille d'argent Darwin-Wallace en 1958.

⁴ Walter Andrew Shewhart (18 mars 1891 - 11 mars 1967), a outre ses travaux statistiques, introduit des méthodes comme le PDCA (Plan Do Check Act) qui sont toujours utilisées dans le milieu industriel.

⁵ Vilfredo Pareto (15 juillet 1848 - 19 août 1923) était un sociologue et économiste italien rendu célèbre pour son observation des 20% de la population qui possèdent 80% des richesses, généralisée plus tard en distribution de Pareto.

Positionnement des travaux de recherche au sein du milieu industriel

En revenant aux travaux de recherche ayant été effectués durant la thèse, outre les domaines pointés dans la Fig. 1 directement liés au tolérancement et qui représentent les principaux axes de recherche (analyse du tolérancement et intégration dans le cycle de développement), nous retrouverons aussi par la suite les notions de :

- conception “ innovante ”
- conception “ collaborative ” et surtout “ internationale ”
- intégration du savoir de l’entreprise préalablement capitalisé
- conception assistée par ordinateur, respectant des normes ... tout comme orientée “ user-friendly ”.

et elles ont aussi été prises en compte puisqu’étant directement liées à l’environnement industriel dans lequel ont été menés les travaux de recherche.

L’intégration et l’évolution des travaux de recherche dans un processus “ global ”

Pour introduire le besoin d’assemblabilité dans le monde industriel, je me suis demandé à quel moment il avait été exprimé de la façon la plus pertinente et ce qui avait poussé les industriels de l’époque à soulever ce problème. Ainsi, il semble que cela soit devenu un réel problème il y a moins d’une centaine d’années, époque où l’on commençait à assembler des éléments provenant d’usines distinctes. L’idée, qui de nos jours est somme toute assez banale, était d’arriver à assembler le système sans que l’on ait à faire la moindre retouche et que l’on retrouve dans l’extrait suivant, où E. Lhoste¹ justifiait la mise en place de la normalisation.

“(…) il est indispensable que le bâtiment “ s’industrialise ”. Pour cela, il faut que de nombreux éléments soient préparés d’avance. Il va donc être nécessaire que les différents corps d’état qui concourent à une construction puissent travailler séparément chacun dans son usine et qu’ensuite leurs différents produits, apportés aux chantiers, puissent s’emboîter sans retouche ”

Toutefois cette question se pose encore aujourd’hui mais sous un autre angle, à savoir que la “ définition numérique ” d’un système, résultant du travail collaboratif d’acteurs prenant part à la conception, doit aboutir à la production d’un ensemble montable² et assemblable³. Ces définitions font ressortir la notion de validation et surtout celle de spécification de la définition numérique, définition qui se fait actuellement pour la géométrie au travers de la Maquette Numérique.

Peut-on alors se contenter de la représentation géométrique ? La réponse est bien entendu non (Buisse, 2007) et c’est ce qu’on montrera au travers de la partie dédiée à la Maquette Fonctionnelle. Ainsi se pose aussi la question de l’information que doit aussi incorporer la géométrie afin de pouvoir répondre aux différentes étapes de validation durant le cycle de développement.

¹ Ernest Lhoste (1880-1948), statisticien, administrateur, directeur de l’AFNOR.

² Marguet entend par montable que le système non seulement est assemblable mais remplit les fonctions attendues. (Marguet, 2001)

³ De même, il définit un système comme assemblable si tous les composants le constituant sont correctement connectés entre eux.

Comme on pourra le voir dans la suite de ce mémoire, l'objectif initial était l'analyse des schémas de cotation, mais au fur et à mesure que les travaux résolvait un des points intermédiaires, une nouvelle voie de recherche s'ouvrait et élargissait la problématique à des domaines connexes qu'il fallait aussi prendre en compte. Il ne s'agissait non plus seulement de s'intéresser au résultat des analyses de tolérances, mais aussi d'identifier et lier les différents domaines qui interagissaient avec l'étape de spécification des tolérances des pièces mécaniques.

“Les hommes construisent trop de murs et pas assez de ponts” (Isaac Newton¹)

Ce qui suit, représente synthétiquement le cheminement qui nous a conduit au final à réfléchir sur la continuité numérique, la transmission et l'évolution des informations fonctionnelles depuis le CdC jusqu'à la validation des spécifications, en ayant comme contrainte de clarifier le rôle des acteurs lors de chaque étape du processus.

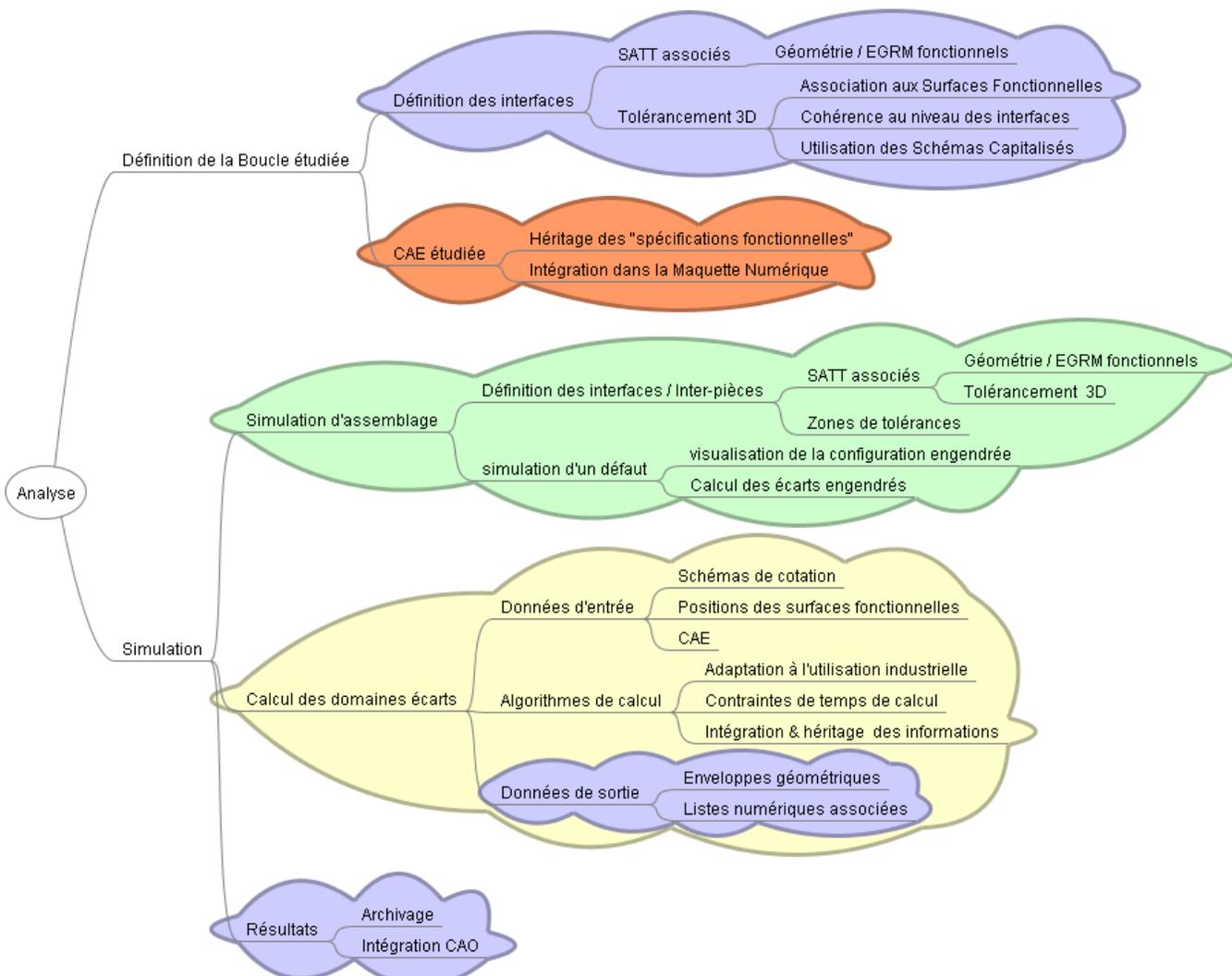


Fig. 5 : Domaines connexes à l'étape d'analyse

¹ Sir Isaac Newton (4 janvier 1643 – 31 mars 1727) est un philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste et astronome anglais surtout reconnu pour sa théorie de la gravitation universelle.

Nous sommes ainsi passés de :

- l'analyse de schémas de cotations 3D,
- à une nouvelle définition des interfaces mécaniques¹ (Socoliuc et al., 2007),
- puis, en essayant d'obtenir des résultats d'analyses de tolérances visuellement intelligibles, nous avons aussi intégré le point de vue de l'utilisateur, travaillant dans un contexte industriel, afin de ne pas restreindre l'utilisation de cette méthodologie à quelques experts en tolérancement (Socoliuc, 2006),
- aux travaux qui nous ont poussés à reformuler le modèle devant être utilisé et sa place dans le cycle de développement (cycle que nous avons modifié et détaillé en conséquence) en nous penchant aussi sur la continuité numérique entre la spécification fonctionnelle (Socoliuc et al., 2007) et la validation finale, en lien direct avec la modélisation 3D,
- ce qui finalement nous a poussés à développer la notion de maquette fonctionnelle introduite par D. Buysse (Buysse, 2007), son positionnement par rapport à la maquette numérique tout comme les liens entre ces deux définitions du même système étudié (Socoliuc et al., 2009).

Méthodes, contraintes, outils... et environnement de travail

La définition Fonctionnelle et Numérique

Avant de rentrer dans les détails de la thèse, il faut revenir succinctement sur les processus et les outils de définition fonctionnelle et numérique.

En ce qui concerne les processus de définition fonctionnelle, nous sommes repartis en prenant PROCAR² comme base pour les méthodologies d'aide à la spécification des tolérances. La notion de Maquette Fonctionnelle en « conception mécanique », est un concept mis en œuvre en partie dans des outils tels que GAIA (développé par CIMPA-EADS), TDC Need & Structure (Knowllence) et esquissé dans l'approche RFLP (développée par Dassault Systèmes).

On montrera dans un premier temps et dans la partie consacrée à la Maquette Fonctionnelle, la manière d'introduire en avance de phase le tolérancement grâce à cette notion, puis en second lieu, comment le pré-dimensionnement peut être effectué très tôt dans le processus de conception et enfin de quelle manière la définition numérique peut être pilotée par la définition fonctionnelle en avance de phase.

En ce qui concerne la Maquette Numérique, comme on pourra le voir par la suite, le modeleur utilisé tout au long de la thèse était CATIA V5. Toutefois, l'outil développé par Dassault Systèmes nous a servi de démonstrateur pour les différentes méthodologies et prototypes qui vont être présentés et il ne faudrait pas restreindre la portée des travaux effectués uniquement à ce modeleur CAO.

¹ On appelle Interface mécanique la frontière commune entre deux pièces élémentaires ou aussi entre deux sous systèmes.

²PROcessus de CARactérisation : Méthodologie, utilisée par les concepteurs de Bureau d'Étude, afin de définir le dessin de définition fonctionnel d'une pièce tout en utilisant les normes internationales ISO de dessin technique, cotation et tolérancement. PROCAR est le fruit d'une collaboration entre RENAULT et l'École Normale Supérieure de Cachan, et est diffusée et appliquée chez RENAULT depuis 1997.

Les travaux résultant des partenariats existant entre l'éditeur (Dassault Systemes), l'industriel (Renault) et les équipes de recherche (LISMMA), montrent la faisabilité d'intégration dans un environnement utilisé par les industriels de solutions proposées par le monde de la recherche. Nous continuerons à nous appuyer sur des exemples reposant sur CATIA V5, tout en montrant que notre méthodologie peut être indépendante de la plateforme pour le pilotage de la géométrie associée à la définition fonctionnelle.

La Capitalisation, les Standards et les Normes

En plus des standards imposés par les outils, il ne faut pas oublier les plus importants c.à.d. provenant et ayant été imposés au sein de l'entreprise elle-même et qui traduisent le savoir capitalisé.

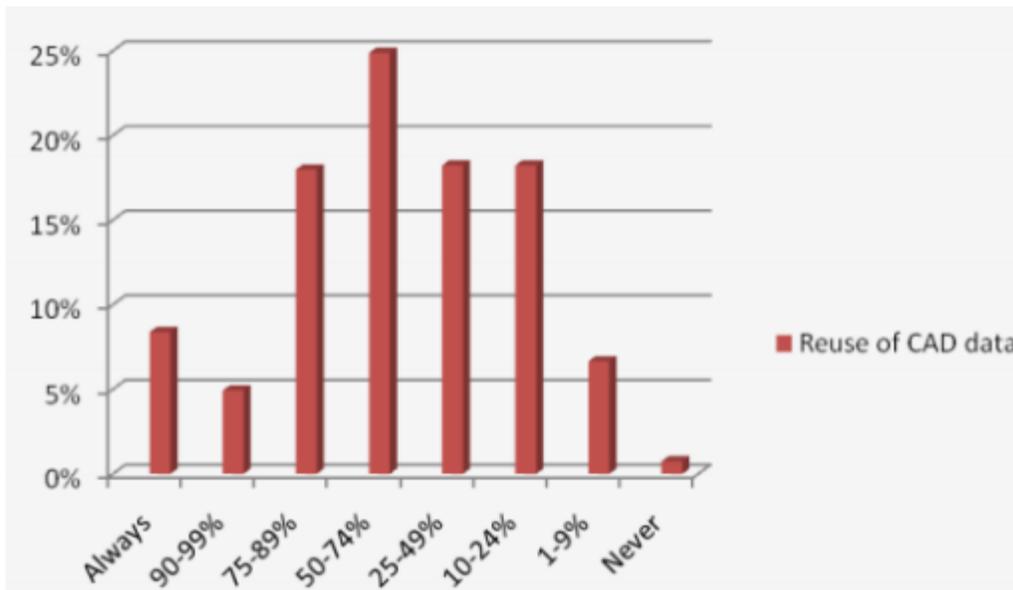


Fig. 6 : Pourcentage de réutilisation des données numériques (Longview Advisors, 2008)

Dernièrement, l'étude menée par Longview Advisors (Fig. 6 : Pourcentage de réutilisation des données numériques) auprès de grands industriels et de leurs fournisseurs, a tenté d'établir une répartition des entreprises selon le pourcentage de réutilisation de la donnée numérique lors de la conception d'un nouveau système.

" Across all respondents, the majority of new designs reuse between 50%-74% of existing CAD data. " (Longview Advisors, 2008)

Sans grande surprise, la capitalisation occupe une place importante dans la majorité des entreprises qui réutilisent les définitions numériques, mais cela ne se résume pas seulement à la valorisation de l'information incluse au sein de la modélisation géométrique 3D et il faut aussi inclure dans la notion de capitalisation & réutilisation tout comme les standards de conception qui ont été et sont créés au sein de l'entreprise pour être réutilisés.

Dans notre cas cela se traduira par la suite par l'utilisation et l'enrichissement des bibliothèques de savoir, comme les bibliothèques de cotation et les bibliothèques de solutions techniques pré-validées auxquelles nous pourrions faire appel.

En ce qui concerne les normes, l'ASTM résume assez simplement et de façon claire leur utilité au sein des entreprises :

“Standards are a vehicle of communication for producers and users. They serve as a common language, defining quality and establishing safety criteria. Costs are lower if procedures are standardized. Training is simplified. And consumers accept products more readily when they can be judged on intrinsic merit.” (American Society of Testing and Materials (ASTM), 1991)

et Renault ne fait pas exception à la règle en imposant les normes ISO de dessin pour le processus de conception.

“Document établi par consensus et approuvé par un organisme reconnu, qui fournit, pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné.”¹

Ainsi imposer des référentiels communs à tous les acteurs prenant part au projet, pour le développement et la fabrication de ses produits, se traduit au final par une augmentation de la qualité et de la productivité. En ce qui concerne le tolérancement, les normes appliquées chez Renault sont les normes ISO 8015-1985, 1101-2004, 5459-1981, 5458-1998, 3040-1990, 10578-1992, 10579-1992 et 2692-1992 et la qualité des modèles numériques finaux est renforcée par le fait que les templates² (construits d'après les standards de conception validés par les ingénieries) et la spécification se font au travers du module FTA³ et qui produit des schémas de cotations conformes aux normes.

En associant les méthodologies de conception propres à Renault et des solutions informatiques respectant les normes, cela permet de minimiser les erreurs d'interprétation et en utilisant la cotation 3D, cela permettrait aussi d'assurer la cohérence de la cotation au niveau des interfaces, tout comme de s'inscrire ainsi dans le mouvement lancé par les avionneurs visant à réduire au maximum l'utilisation des plans 2D. Comme cela a été présenté dans le début de cette introduction, la standardisation des représentations et des moyens d'échange est un des vecteurs de progrès des industriels impactant non seulement les échanges de données au sein de l'entreprise, mais aussi, plus largement, ceux réalisés avec les fournisseurs et les partenaires d'étude prenant part au développement d'un projet.

Toujours en reprenant certains résultats de l'étude menée par Longview Advisors (Longview Advisors, 2008), il est aussi intéressant de faire ressortir le problème relatif au partage actuel des données entre les différents acteurs prenant part au projet. Tel qu'il est actuellement effectué, il représente une perte importante de temps et donc d'argent.

“Finding: Suppliers are less efficient in translating and cleaning CAD data than the average OEM⁴ OEMs tend towards having full-time employees that deal with interoperability, while Suppliers tend to have engineers devoting 3-10 hours every week tackling the problem. It seems to be

¹Définition de l'ISO (International Organization for Standardization) et la CEI (Commission Électrotechnique Internationale)

² Anglicisme utilisé en informatique pour désigner un modèle générique de conception, un gabarit réutilisable incorporant des informations prédéfinies et pouvant être réincorporées dans un nouvel environnement. En tolérancement, on retrouvera par ex des schémas de cotation standard définissant de manière partielle ou complète le tolérancement d'un système à tolérer.

³ Functional Tolerancing and Annotations : module de tolérancement incorporé à CATIA V5

⁴ OEM : Original Equipment Manufacturer : Terme désignant un fabricant de pièces et/ou systèmes et que l'on rencontre plus généralement sous l'appellation de « Equipementier » ou de « Sous-traitant ».

more of a problem for suppliers, with more engineers spending 3-10 hours a week on translating and cleaning CAD data, while OEMs have more engineers spending 1-2 hours per week. ”

L'enseignement qu'il est intéressant de tirer de ces chiffres, concerne la relation client-fournisseur qui peut largement être améliorée afin que cela soit bénéfique pour les deux parties. Pour y arriver, il faut à la fois repenser les modèles d'échanges utilisés ainsi que l'information qui y est incluse. Nous précisons ce point lorsque nous détaillerons la notion d'interface et de maquette fonctionnelle (Chap 3).

Le dialogue entre la théorie et la pratique

Si l'on devait globalement schématiser ce dialogue, on placerait d'un côté les équipes de recherche et de l'autre les équipes de développement produit, les uns possédant un package de méthodologies et de théories, tandis que les autres proposent les problématiques industrielles à résoudre ainsi que leur savoir faire dans le domaine. L'objectif final de ce dialogue est d'arriver à adapter les solutions provenant du monde de la recherche, au monde industriel qui ne fonctionne pas avec les mêmes contraintes, que ce soit en termes de temps, de précision, de coût, d'interface et d'utilisation...

Ainsi pour introduire un concept dans un environnement industriel, il faut au préalable l'expérimenter et le valider auprès des experts métiers. Toutefois il n'est pas nécessaire de fournir, aux utilisateurs finaux, toutes les explications scientifiques relatives aux méthodes qui y sont incluses. L'outil qui sera proposé aux utilisateurs devra être conforme aux méthodes ainsi qu'être simple mais faisant ressortir les informations à forte valeur ajoutée pour l'utilisateur. Ainsi il faut retravailler les résultats et les rendre compréhensibles presque de façon instantanée, ce qui dans notre cas nous a poussé à réfléchir et proposer les résultats sous forme visuelle directement intégré à la maquette numérique.

Toutefois, il n'y a pas que les utilisateurs qu'il faut prendre en compte et intégrer au cœur des méthodologies, il faut aussi se placer par rapport à tout l'environnement et le passé de l'entreprise, en termes d'organisation et processus de conception existants. Les questions qui viennent dès lors à l'esprit sont : Quelles sont les modifications à apporter au processus de développement pour avoir une démarche innovante? Peut-on tout entreprendre ?

L'extrait suivant montre un point de vue (Siemens) qui est partagé par bon nombre de grands industriels qui ne peuvent pas se permettre d'investir du temps et de l'argent dans des solutions qui ne seraient pas rentables dans des délais convenables. On peut voir dans les processus de développement tout comme dans les technologies proposées, des innovations ayant non pas pour but de révolutionner, mais pour but de créer une évolution d'un système déjà rendu robuste par les nombreuses années d'étude passées.

“The company needs to innovate in order to remain competitive, but must be pragmatic in its product development. [...] but we must make sure we're putting our money into those that will deliver real benefit. [...] The company does not chase niche markets, it cannot afford to. Instead, it must focus its energies on the products that will have the largest take-up in the market [...] (Donald, 2008)”

Toutefois, cela ne veut pas dire que l'innovation de rupture n'existe pas, bien au contraire, mais elle met plus de temps à s'imposer comme standard et pour arriver en “ production ”. Comme nous le présenterons dans la suite de ce mémoire, nous avons dans un premier temps essayé d'apporter une solution innovante pour la spécification et le pré-dimensionnement en avance de phase, en présentant les résultats de l'analyse des tolérances au travers d'éléments visuels, ce qui est

une évolution du processus actuel. Dans notre cas, ce qui relève de l'innovation de rupture, sera introduit au travers des travaux effectués autour de la notion de Maquette Fonctionnelle.

Plus globalement, que ce soit pour inscrire le changement sur le court ou moyen terme, les contraintes, que l'on retrouvera par la suite, prennent en compte le fait que la méthodologie proposée, ainsi que les outils associés, sont pensés :

- pour une fabrication à grande échelle,
- pour intégrer rapidement les standards et autres éléments capitalisés par l'entreprise,
- pour créer de la « valeur » réutilisable afin de pouvoir répondre aux besoins de réduction du temps de développement et des coûts.
- plus ergonomiques / « user friendly ».

Enjeux et innovation

Le déroulement de la thèse a été articulé afin de pouvoir, à la fois répondre à un problème concret, et pour pouvoir proposer une alternative innovante à la conception habituelle afin d'en améliorer les pratiques actuelles. On y inclut d'une part la volonté de lier et d'introduire la validation des conditions fonctionnelles en avance de phase et d'autre part la proposition d'un cycle de développement innovant, réaliste et qui prenne en compte le contexte et les contraintes industrielles.

En reprenant le découpage de l'acte de conception fait par Pahl & Beitz¹ (Pahl et al., Réédition 2007) :

- Product planning and clarifying the task (correspondant à la définition fonctionnelle durant laquelle on précise les fonctionnalités que le système doit remplir)
- Conceptual design (correspondant à la définition conceptuelle qui précise les principes physiques permettant de répondre aux exigences fonctionnelles)
- Embodiment design (correspondant à la définition technique des solutions choisies)
- Detail design (correspondant quant à lui, à la description des interactions entre les pièces composant le système étudié et du mode d'obtention de ces pièces)

nous avons dans un premier temps situé les étapes du processus où s'effectue le tolérancement, et les différents éléments qui s'y rattachent, et posé le problème de façon à essayer de trouver une solution à la pré-validation des schémas de cotation non plus au stade de la conception détaillée du système, c.à.d. dans les dernières étapes, mais bel et bien en avance de phase.

Tout d'abord, pour bien comprendre l'intérêt de cette approche, revenons succinctement sur l'intérêt que présentent les étapes de tolérancement dans le processus de conception, et qui sera bien entendu détaillé plus longuement par la suite.

Une des notions que nous devons souligner est celle du processus de validation qui se

¹ On parle de Conception Systématique (Systemic Design). La première publication de leur ouvrage *Konstruktionlehre* date de 1977 et réédité sous le nom "Engineering Design: A Systematic Approach", aux éditions Springer en 2007. On trouve une version partielle électronique sur <http://books.google.fr>

retrouve scindé en deux étapes. Au cours de la première étape, il est important de faire ressortir le fait qu'en avance de phase, nous associons également au processus de pré-validation du tolérancement, le processus de pré-dimensionnement qui au fil du temps conduiront à des “ gels de l'architecture ”¹ consécutifs. La deuxième étape quant à elle, rajoute l'étape de répartition des dimensions et des tolérances, une fois la géométrie détaillée et gelée.

Ainsi en se fixant comme but premier de conserver et valider la meilleure hypothèse afin de la détailler par la suite, nous avons considéré le tolérancement comme étant le moyen permettant de “ définir la plus grande classe d'objets », équivalents d'un point de vue fonctionnel, interchangeables durant l'étape d'assemblage et permettant ainsi d'obtenir un système assemblable et montable (Marguet, 2001). Cela est effectué en définissant les variations maximales des différents objets de cette classe par rapport à une référence, de façon analogue par rapport au point de vue de Chen, mais qui l'applique à un domaine bien précis (Chen et al., 2002),

“ The goal of tolerancing is to define a class of objects that are interchangeable in assembly operations and functionally equivalent (Requicha, 1983). During assembly, variation can cause processes such as fixturing and feeding to fail, resulting in damage and costly production delays. ” (Chen et al., 2002)

Cependant, le tolérancement fait appel à la fois à des conditions fonctionnelles et à des surfaces fonctionnelles, définies que lors de l'apparition de la définition géométrique au travers de la Maquette Numérique. En ayant pour objectif d'introduire le tolérancement en avance de phase et d'en tirer bénéfice en terme de pré-dimensionnement, il a fallu s'intéresser et détailler quelles seraient les informations qui devaient être spécifiées au plus tôt et de quelle manière elles seraient intégrées dans ce qu'on appellera la « Maquette Fonctionnelle ».

Plus globalement, par la suite nous allons détailler quelles informations apparaîtront dans la Maquette Fonctionnelle tout comme celles qui seront incluses dans la Maquette Numérique. Pour ce faire, nous avons eu recours non pas à un découpage du processus de conception en quatre grandes parties, proposé par Pahl & Beitz, mais en cinq bien distinctes : les quatre premières définissant le processus allant de la définition fonctionnelle jusqu'à la définition technique et la dernière correspond à la définition géométrique détaillée du système.

Je détaillerai par la suite ces différentes notions qui sont d'ordre plus global et je présenterai aussi le cheminement qui m'a fait m'y intéresser puisque le début de la réflexion concernait le tolérancement.

Je décrirai en plus de ce choix de découpage en cinq macro-processus, ce qu'il apporte de manière plus générale, de quelle façon il gère la passation de l'information, et de quelle manière la spécification du tolérancement est introduite en avance de phase. De même, je m'attarderai sur l'intégration et l'utilisation de la maquette fonctionnelle, tout au long du cycle de développement d'un produit. Pour ce faire, nous montrerons le parallélisme et le pilotage qu'il existe entre la représentation fonctionnelle et celle géométrique qui, comme il le sera montré par la suite, n'est pas unidirectionnel suivant le moment où l'on se trouve dans le cycle de développement.

¹ Le gel d'une solution correspond au fait que les entités concernées ne peuvent plus être modifiées à partir de ce moment.

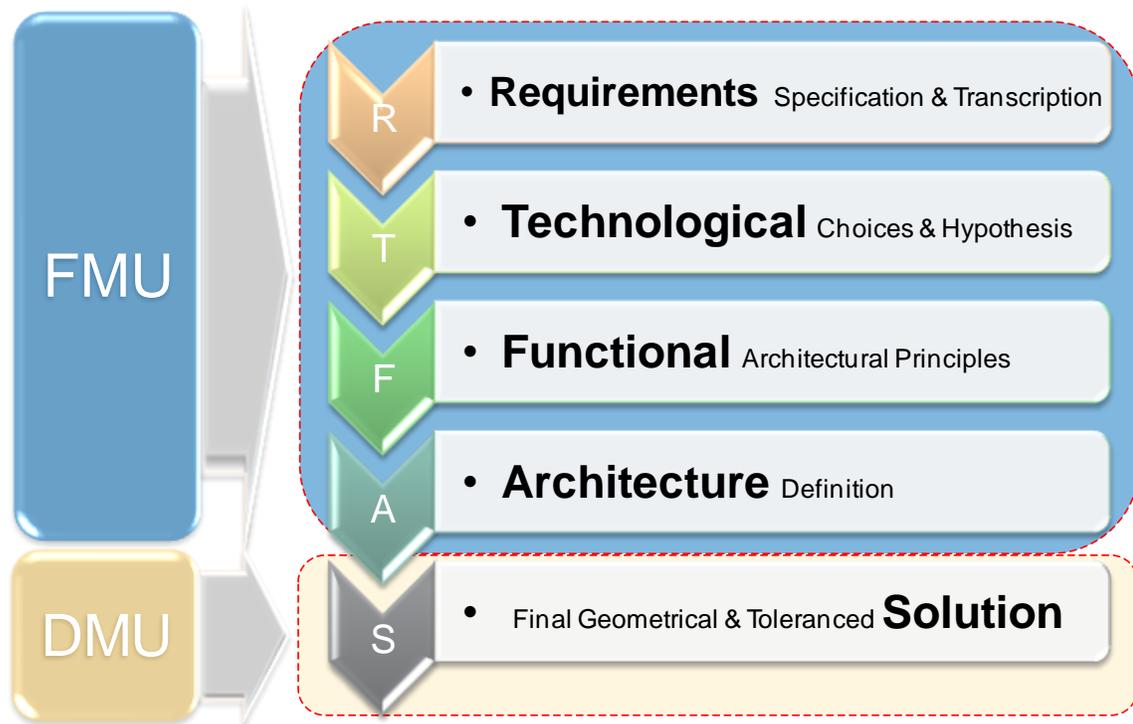


Fig. 7 : Processus RTFAS

L'acronyme RTFAS provient de l'Anglais et cela est dû au fait qu'il a été présenté tel quel dans un des articles soumis à une conférence internationale (en Anglais).

Le R étant associé à la spécification des prestations de haut niveau, le T à l'étape d'intégration des hypothèses et choix propres au projet et à l'entreprise, le F à la définition fonctionnelle, le A à la définition de l'architecture du système étudié et finalement le S à la définition géométrique au sein du modèleur 3D.

De la même manière nous retrouvons FMU et DMU pour désigner la Maquette Fonctionnelle (Functional Mock-Up) et la Maquette Numérique (Digital Mock-Up).

Remarque

Lorsque je me suis intéressé à ce qui pourrait me permettre d'amener l'étape de validation en avance de phase, l'option la plus réalisable et sur laquelle j'ai basé la suite des travaux, fut celle qui visait à créer et détailler un "squelette fonctionnel". A partir de celui-ci, il serait possible de calculer la future définition géométrique et notamment une « Maquette Numérique Simplifiée », directement liée à ce squelette. Cette représentation Géométrique sert à traduire géométriquement toutes les informations spécifiées dans la partie fonctionnelle, afin d'avoir une représentation du système permettant de faciliter la validation de la conformité avec les exigences fonctionnelles dans un environnement CAO 3D.



Fig. 8 : Représentation synoptique de la première moitié de la thèse de doctorat

De même tout au long du processus de conception, en plus du contrôle de la cohérence entre la maquette fonctionnelle et la façon dont le système est représenté dans la Maquette Numérique¹, cette maquette simplifiée nous sert de support au pré-dimensionnement des valeurs des tolérances qui répondent aux exigences spécifiées à l'instant T et permettent d'effectuer des gels de solutions d'architecture plus rapidement.

Une des innovations de la thèse que j'ai mise en place (Socoliuc et al., 2008), est fondée sur l'étude de la maquette simplifiée précédemment introduite, intégrant non seulement une définition géométrique des surfaces fonctionnelles, mais aussi les tolérances associés spécifiées en 3D.

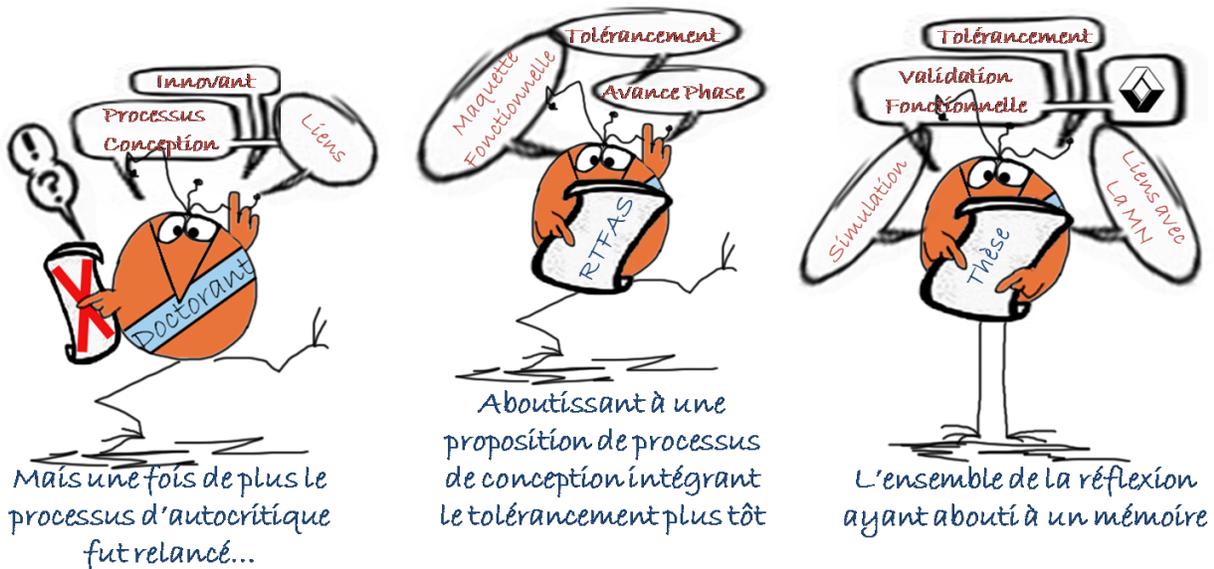


Fig. 9 : Représentation synoptique de la seconde moitié de la thèse de doctorat

¹ Dans la suite du document nous retrouverons aussi la notion de Maquette Numérique sous l'abréviation MN.

L'analyse qui suit, correspond à l'étude d'une boucle cinématique ayant pour but de calculer les espaces écarts engendrés par les schémas de cotation au pire des cas et cela sans l'intervention d'un expert. Au cours de cette analyse, le processus de validation est divisé en deux étapes et les calculs qui y sont effectués reposent sur l'utilisation des torseurs des petits déplacements et celle des domaines écarts et des domaines jeu.

Alors que la première étape compare les domaines écart résultants calculés au pire des cas aux domaines écart associés aux exigences fonctionnelles étudiés, la seconde étape quant à elle est une couche d'optimisation faite de façon statistique et qui permet de dire si le taux de non-conformité simulé est acceptable ou non.

La suite de ce mémoire reprendra globalement la même logique et pour ce faire je commencerai par faire un état de l'art de l'analyse de tolérances. Cela permettra d'introduire le détail de l'évolution de notre réflexion et de quelle manière nous en sommes arrivés à proposer un nouveau cycle de développement faisant apparaître la notion de "Maquette Fonctionnelle". Cette dernière fera ainsi le lien avec le processus de pré-validation en avance de phase que nous avons précédemment présenté succinctement.

Etat de l'art

Le tolérancement en avance de phase

SOMMAIRE

Notions et méthodes de base utilisées

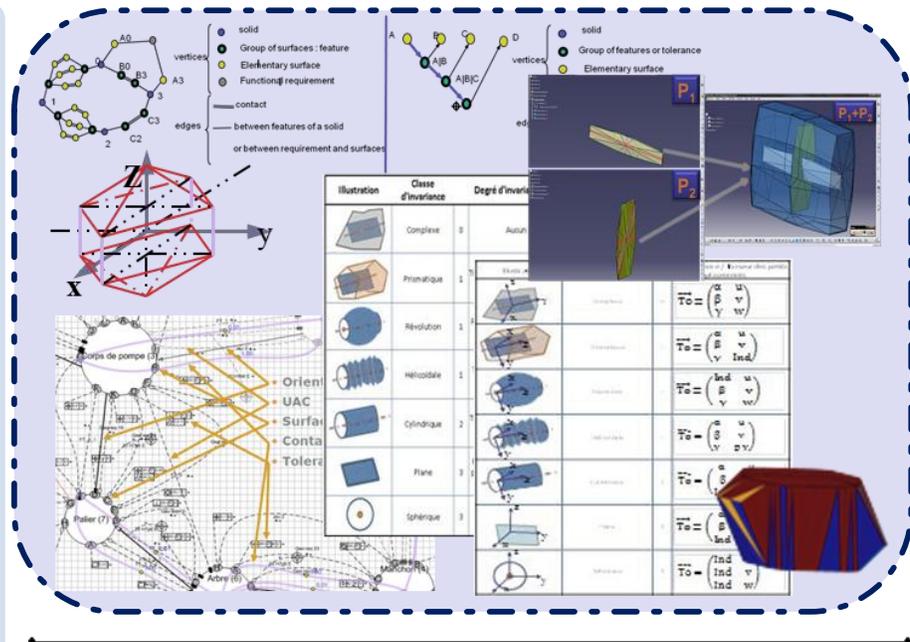
- Utilité du tolérancement
- Design for Assembly
- SATT & EGRM
- Approche fonctionnelle

Le Tolérancement, un vecteur de qualité

- Un besoin industriel concret
- Des modèles mathématiques existants à adapter au besoin

L'avance de phase en conception mécanique

- Constats
- Premières propositions
- Évolution de la réflexion autour du processus de conception
- Conclusions



MOTS-CLES

- ▶ Qualité
- ▶ Tolérancement
- ▶ Avance de phase
- ▶ Méthodes
- ▶ SATT / EGRM
- ▶ Domaines jeu & écart
- ▶ Processus

Ce chapitre a pour but de présenter différentes notions que l'on trouve dans la littérature et qui sont en lien direct avec la problématique de l'analyse du tolérancement en avance de phase.

Dans un premier temps je précise quels sont les outils mathématiques utilisés dans nos travaux de recherche, puis, je présente l'intérêt que présente l'utilisation du tolérancement (spécification, analyse et optimisation) dès le début de la conception produit.

Cela débouche finalement sur l'évolution de notre réflexion sur l'intégration des spécifications fonctionnelles dans la maquette numérique et sur l'introduction de la Maquette Fonctionnelle tant que pilote de la Maquette Numérique durant les premières étapes du cycle de développement.

Notions et méthodes de base utilisées

Comme je l'ai précisé dans l'introduction, j'ai essayé d'utiliser le tolérancement le plus tôt possible pour optimiser le cycle de conception, de rendre plus profitable son utilisation et donc de démarrer les activités associées en avance de phase.

Toutefois il est important de commencer par introduire les notions que l'on retrouve dans la littérature, et qui ont été utilisées dans les travaux présentés par la suite, telles que les notions d'interfaces mécaniques, de représentation des squelettes géométriques au travers SATI & EGRM, des différentes représentations fonctionnelles par graphes ainsi que les modèles mathématiques (torseur des petits déplacements, domaines écart et jeu ...).

J'expliquerai pourquoi ces choix ont été préférés à d'autres méthodes, tout en focalisant le travail effectué au niveau des Bureau des Études¹, mais sans me pencher sur les problématiques que la fabrication et la métrologie peuvent aussi rencontrer.

Utilité du tolérancement

Ce que j'ai montré dans l'introduction de ce mémoire, c'est qu'il a fallu attendre le siècle dernier pour avoir des dessins d'ensemble détaillés des systèmes mécaniques produits en série et qui la plupart du temps, suivaient des principes qui variaient d'un concepteur à un autre. Cette étape a été suivie au XXème siècle par la création de normes et l'introduction de langages standardisés de spécification de la géométrie compréhensible par tous les acteurs prenant part à la conception du système mais aussi par ceux qui doivent le fabriquer.

A noter que la cotation devient fonctionnelle², comme nous le verrons par la suite peut être considérée, en plus d'un langage standardisé, comme un processus permettant de garantir l'interchangeabilité des pièces en vue de répondre aux exigences QCD³.

Dans le domaine de la conception de pièces mécaniques rigides, malgré une augmentation de la précision des machines servant à leur fabrication, les écarts existeront toujours entre la géométrie conçue et spécifiée par l'équipe BE et celle du produit final présentant des imperfections inhérentes aux processus de fabrication. Les causes sont multiples et on pourrait citer par exemple : la précision des outils, la matière et la forme du produit, l'expertise opérateur ou l'environnement de fabrication.

Les conséquences des variations de dimensions, de forme, ou bien des défauts de positionnement et/ou d'orientation se traduisent par une dégradation des caractéristiques fonctionnelles (Dantan et al., 2001), et donc par la même occasion par une baisse de la qualité du produit, pouvant aller jusqu'à l'obtention d'un ensemble pas toujours assemblable⁴ ou montable⁵ (Marguet, 2001). A noter qu'au sein de Renault ces notions n'ont pas la même signification puisqu'un système est montable si l'ensemble des éléments le constituant peuvent être assemblés et

¹ Nous retrouverons par la suite la notion de Bureau des Études sous l'appellation BE

² On parle aussi de tolérancement.

³ On fait référence à l'Amélioration de la Qualité, la Réduction des Coûts & la Réduction des Délais.

⁴ Marguet définit un système comme assemblable si tous les composants le constituant sont correctement connectés entre eux.

⁵ De même, il entend par montable que le système non seulement est assemblable mais remplit toutes les fonctions attendues.

il est tout simplement qualifié comme remplissant les conditions fonctionnelles, si en plus d’être assemblable, il fonctionne tel qu’il a été prévu.

Pour faire en sorte que la pièce une fois usinée puisse malgré tout répondre aux exigences fonctionnelles, le concepteur fixe les limites acceptables sur les écarts dimensionnels et géométriques des pièces. Pour cela, les tolérances liées aux interfaces mécaniques¹ sont analysées puis optimisées afin d’assurer à l’issue de la phase de conception un produit assemblable et qui remplisse l’ensemble des fonctions pour lesquelles il a été conçu.

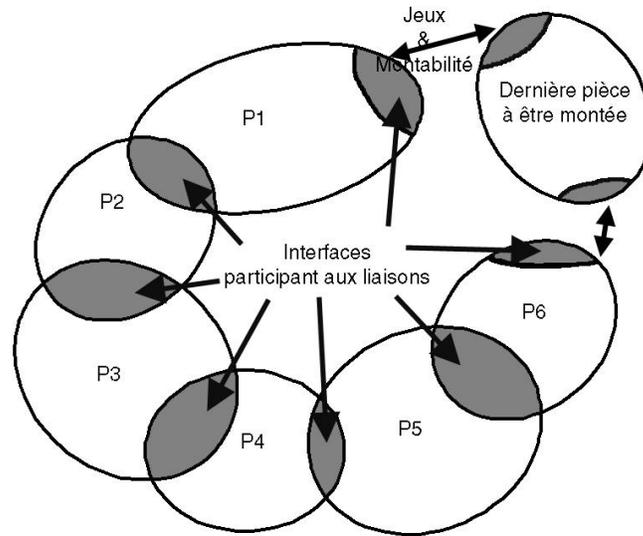


Fig. 10: Jeux fonctionnels au niveau des interfaces et assemblabilité d’un ensemble mécanique

1. Langage normalisé de spécification

Si nous prenons l’exemple de la norme ISO, elle propose à ses utilisateurs un langage graphique permettant d’exprimer les zones à l’intérieur desquelles les surfaces réelles peuvent se trouver, par rapport au modèle, dit parfait, et qui lui provient du modéleur CAO. Comme nous pouvons le voir tableau 1, le même concept s’applique aussi aux normes telles que celles de l’ASME.

A noter que dans la communauté francophone la notion de spécification/tolérancement, sous-entend : spécification de tolérances dimensionnelles et spécification de tolérances géométriques, alors que les anglo-saxons parlent de “ Geometric Dimensioning and Tolerancing ” (GD&T) appellation qui en soi, est plus explicite.

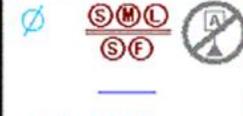
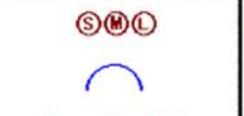
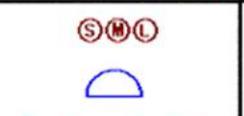
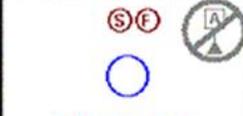
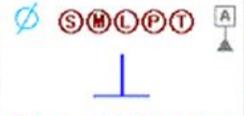
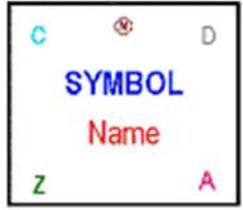
Définition

Geometric Dimensioning and Tolerancing Specifications are used as follows:

- *Dimensioning Specifications define the nominal, as-modeled or as-intended geometry.*
- *Tolerancing Specifications define the allowable variation for the form and possibly the size of individual features and the allowable variation in orientation and location between features.*

¹ On appelle Interface mécanique la frontière commune entre deux pièces élémentaires ou aussi entre deux sous systèmes.

Sans rentrer dans un descriptif détaillé des différentes normes usuelles, on retiendra qu'un concepteur possède, la plupart du temps, une boîte à outils d'aide à la spécification¹ qu'il peut, suivant l'outil informatique utilisé, retrouver dans le modèleur utilisé, ce qui lui permet d'effectuer la spécification des tolérances soit sur un plan 2D ou bien dans une vue 3D. Celles-ci respectent non seulement la symbolique mais aussi et surtout permettent de garantir la cohérence entre le type de surfaces tolérancées et le type des tolérances qui y sont associées.

FORM	ORIENTATION	PROFILE	RUNOUT	LOCATION
 Straightness = 6.4.1	 Parallelism = 6.6.3	 Line Profile ≈ 6.5.2(b)	 Circular Runout ☑ 6.7.1.2.1	 Position = 5.2
 Flatness ☑ 6.4.2	 Angularity ☑ = 6.6.2	 Surface Profile ☑ 6.5.2(a)	 Total Runout ☑ 6.7.1.2.2	 Symmetry ☑ 5.13
 Circularity ☑ 6.4.3	 Perpendicularity ☑ = 6.6.4	 SYMBOL Name Z A		 Concentricity ☑ 5.12
 Cylindricity ☑ 6.4.4	C indicates whether total wide tolerance zone can be modified to a cylindrical shape. D indicates whether a datum is required or not allowed. Z indicates the total wide tolerance zone shapes. A indicates the ASME Y14.5M-1994 Section that describes this control. M indicates the modifiers allowed with this control.			

Thomas Allsup 11/5/98

Tableau. 1 : Tableau récapitulatif des symboles utilisés en tolérancement (ASME Y14.5M)

Toutefois il ne faut pas oublier que les différentes normes ne sont que des outils pouvant amener, dans le cas où ils seraient bien utilisés, des gains considérables. Le principal atout résidant non pas seulement dans le fait de connaître un langage mais surtout dans le fait de l'utiliser correctement afin de réussir à transmettre des idées claires, concrètes et intelligibles.

Pour y parvenir, il faut créer des méthodes et cela suivant l'objectif que l'on se donne (« cotation produit » ou « cotation process » par exemple), et ce sont ces méthodes qui représentent le savoir faire de l'entreprise. Les modèles 3D que l'on retrouve en bout de processus, sont respectueux des normes, mais aussi un outil de communication associé à la géométrie, liant les métiers et la fabrication.

¹ L'outil que nous avons utilisé dans le cadre de nos recherches était le module FTA de CATIA V5.

2. Spécification qualitative

Comme nous venons de le voir, les concepteurs peuvent avoir accès à des outils mais doivent développer des méthodologies qualitatives pour la spécification des tolérances, l'empirisme ne pouvant pas toujours répondre aussi de manière précise et quantitative.

Ces méthodes et plus globalement le savoir de l'entreprise, ne seraient pas aussi performants s'ils n'étaient pas capitalisés ou pensés à être capitalisés. En effet, on peut très bien spécifier des schémas de cotations respectant les normes mais sans qu'ils répondent correctement aux caractéristiques fonctionnelles.

C'est à ce niveau qu'intervient le savoir et l'empirisme relatifs à l'entreprise et que l'on va voir apparaître des méthodologies d'aide à la spécification des tolérances comme PROCAR ou comme les bibliothèques de cotation (que l'on retrouvera plus loin) constituées de solutions déjà validées technologiquement.

Une fois les tolérances spécifiées, il faut aussi estimer quantitativement si les conditions fonctionnelles sont validées par ces jeux de paramètres (analyse) ou bien, à l'inverse, trouver les valeurs qui permettraient de satisfaire des caractéristiques fonctionnelles bien précises (synthèse).

3. L'analyse et la synthèse quantitative de schémas de cotation

Ainsi, que ce soit dans le domaine de la mécanique ou dans tout autre domaine où les tolérances interviennent (tel que l'électronique, la robotique avec l'utilisation de pièces virtuelles lors de la fermeture de chaînes cinématiques...) l'analyse (Chase et al., 1997) du tolérancement permet d'estimer l'impact des écarts géométriques et dimensionnels (dus à la fabrication) sur les dimensions de l'assemblage final, tout comme sur les performances spécifiées.

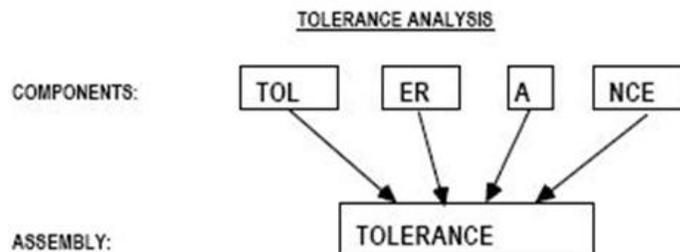


Fig. 11 : Schématisation des processus d'analyse de tolérances (Chase & Greenwood, 1988)

A l'opposé, la synthèse (ou l'allocation) quantitative de tolérances détermine quels doivent être les valeurs des tolérances qui permettront à l'assemblage d'atteindre les spécifications voulues.

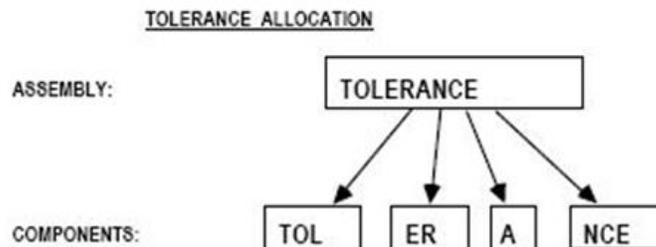


Fig. 12 : Schématisation des processus de synthèse de tolérances (Chase & Greenwood, 1988)

Cependant, un autre point sur lequel il faudrait aussi se pencher afin de gagner beaucoup de temps dans le processus de conception, c'est la Maquette Numérique qui nous permettrait de faire appel à de telles méthodologies. Toutefois, actuellement, elle n'intègre pas encore un outil d'analyse et de synthèse de tolérances suffisamment complet¹ ou assez puissant, et il reste encore des fonctionnalités qui ne sont pas complètement intégrées et qui lui permettraient d'être utilisé en avance de phase².

Partant de ce constat tout comme de la littérature, nous avons répertorié les différentes grandes catégories de méthodes d'analyse de tolérancement (Chase & Greenwood, 1988) (Dabling, 2001) (Chase & Parkinson, 1991) :

- méthode analytique au pire des cas faisant intervenir les développements limités, l'algèbre et les méthodes de linéarisation, les équations, les inéquations, les fermetures de chaînes cinématiques...
- méthode statistique dont l'utilisation se fait à travers des simulations de type Monte Carlo (la plus utilisée aux États-Unis), Méthodes utilisant les Moments Système, [...] et on soulignera aussi les derniers travaux autour de l'inertie effectués depuis quelques années par M. Pillet (Pillet, 2006).

Un autre point caractéristique de la problématique, est celui du coût engendré par les deux méthodes de validation des schémas de cotation et c'est ce que j'aborderai dans la partie qui suit.

4. *Impact sur le coût*

D'un côté le tolérancement au pire des cas permet de garantir l'assemblage de toutes les configurations possibles³, ce qui a pour effet d'augmenter le coût puisqu'il diminue les intervalles de tolérance⁴, et de l'autre côté le tolérancement statistique établit les probabilités d'assemblages de configurations peu probables et peut permettre d'élargir les IT afin de faire diminuer le coût total (mais en acceptant d'avoir des rebuts potentiels).

Pour illustrer cette opposition, j'ai pris l'exemple d'un empilage unidirectionnel de trois IT et dont le résultat est comparé à une condition fonctionnelle. Cela montre bien que pour satisfaire une condition fonctionnelle, il faudrait réduire les IT qui peuvent contribuer à son non respect (en effectuant une analyse au pire des cas).

Comme je le détaillerai par la suite, le pire des cas va de pair avec la notion de sur-qualité et donc de coût global de production plus élevé, alors que si l'on prend en compte des dispersions⁵ de type gaussiennes à l'intérieur des IT, l'étude statistique des résultats permet de montrer que la part des rebuts peut se révéler infime et donc permettre soit de garder les IT tels quels, soit de les agrandir (cf Fig 12).

¹ Les critères principaux sont non seulement le respect des normes, mais aussi la façon dont sont intégrés et interprétés celles-ci au sein des algorithmes utilisés par les différents logiciels (exemple des localisations et orientations des surfaces de type plan) et aussi l'intégration des outils dans l'environnement de conception et simulation.

² On pourrait ici parler d'adaptation de ces outils par rapport à l'utilisation qu'on voudrait en faire.

³ On considère une configuration comme possible dès lors que les surfaces fonctionnelles sont à l'intérieur des zones tolérancées.

⁴ On notera aussi IT par la suite pour désigner les Intervalles de Tolérances.

⁵ On suppose que l'on a des variables indépendantes et que les lois de probabilités sont centrées.

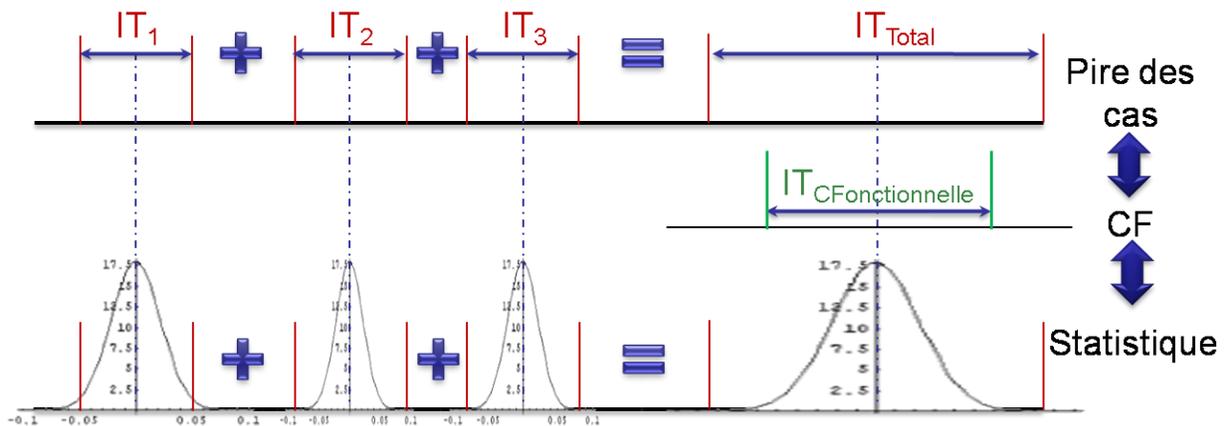


Fig. 13 : Exemple simple d'empilage unidirectionnel

Pour bien se rendre compte de l'antagonisme des deux approches, il suffit de se reporter au graphique suivant et qui traduit bien la situation : doit-on garantir une qualité irréprochable mais impliquant un coût à priori supérieur ou inversement doit on piloter la conception par le coût en risquant d'avoir une qualité non optimale?

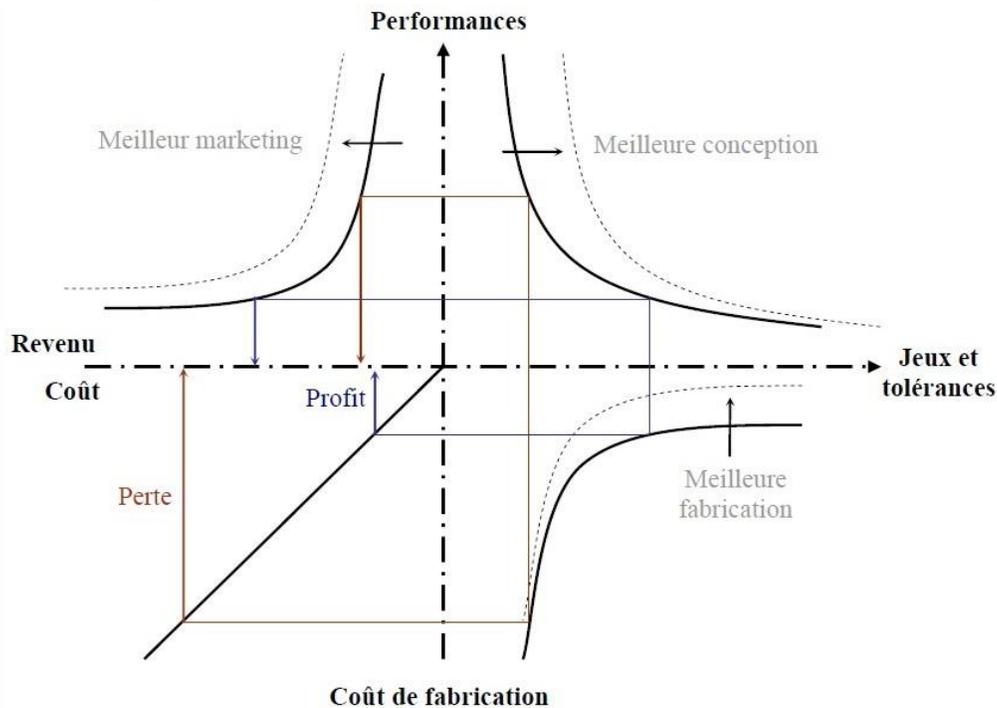


Fig. 14 : Impact du tolérancement sur le coût d'un produit.

Bien entendu, la réponse n'est pas simple et dépend surtout du contexte industriel et du cahier des charges auquel doit répondre le système étudié. Ainsi on misera sur la qualité dans le domaine de mécanique de précision alors qu'à l'inverse on essaiera d'augmenter les profits sur de nombreux produits de grande consommation. Ce qu'on verra aussi dans la dernière partie c'est une méthode d'analyse qui repose sur une couche au pire des cas et optimisation qui est effectuée de façon statistique.

Toutefois, la modification ou l'optimisation des schémas de cotation afin de répondre aux différentes contraintes n'est pas aussi aisée et surtout nécessite d'avoir une vue fonctionnelle d'ensemble du système étudié. Les notions de "Design For Assembly"¹ tout comme celles de définition d'un système par ses interfaces mécaniques, de cohérence des schémas de cotation font partie des points qui seront détaillés dans la partie qui suit et qui nous permettront de présenter les outils qui nous ont servi à créer dans un premier temps les "Maquettes Numériques Simplifiées".

Design for Assembly

En effet, globalement, l'étude des schémas de cotation menée, vise à simuler et optimiser les mécanismes. Quand bien même, à l'aide des modeleurs CAO, l'on produise des représentations parfaites (dimensions nominales) permettant de satisfaire les conditions fonctionnelles, dès lors que l'on fait intervenir des défauts géométriques au niveau des surfaces fonctionnelles, l'assemblabilité et le respect des conditions fonctionnelles² ne sont plus forcément garanties.

En associant ces problématiques à celles des coûts qu'elles peuvent engendrer sur les chaînes de montage, on comprend pourquoi le DFA est mis en place par les industriels, lors de la conception. Comme on pourra le voir par la suite, la définition d'un assemblage présentant des défauts géométriques au niveau des surfaces fonctionnelles composant les interfaces afin de pouvoir simuler l'assemblabilité, a été une des premières étapes que nous avons traitées.

1. Assemblabilité et Validation des CF

Ces notions ainsi que celles de "Key Characteristics", nous les retrouvons dans les travaux de Marguet (Marguet & Mathieu, 2003) qui montrent que ces domaines de recherche suscitent un intérêt croissant et sont communs³ aux industriels concevant et ayant à gérer des ensembles mécaniques. En reformulant et globalisant la problématique, nous pourrions la traduire par :

Peut-on définir précisément les variations géométriques maximales pour lesquelles le produit étudié puisse être assemblable et satisfaire toutes les conditions fonctionnelles?

Tout comme, peut-on trouver les chaînes de tolérances ayant le plus d'influence et en établir des classements suivant leur importance?

Cela peut paraître une évidence, mais ces deux objectifs sont loin d'être aisés et surtout d'être traités dès les premières étapes de la conception produit, ne serait-ce qu'en raison de la position actuelle du tolérancement dans le cycle de développement. En effet, celui-ci arrivant après la définition détaillée des géométries dans la plupart des cas, cela a pour conséquence de retarder d'autant certaines simulations ou d'empêcher leur réalisation en avance de phase.

Pourtant, celles-ci permettent de réduire les coûts lors de la phase d'assemblage en minimisant les rebuts, et d'éviter dans le respect du CDCF des problèmes d'assemblabilité sur les chaînes d'assemblage. De même, il ne faut pas aussi oublier qu'un produit doit aussi être réparable sans engendrer un coût prohibitif et c'est dans cette perspective qu'il faut aussi avoir des pièces qui soient interchangeables sans avoir à re-conformer les autres pièces voisines de l'élément défectueux (Dalglish et al., 2000).

¹ On utilisera pour "Design For Assembly" l'acronyme DFA.

² On utilisera pour Condition Fonctionnelle l'acronyme CF.

³ On les retrouve sous des appellations diverses mais font référence aux mêmes domaines de recherche.

Ainsi ce que l'on s'impose à travers ces notions, c'est d'intégrer au plus tôt, des éléments complémentaires et prépondérants du cycle de vie du produit, ou du moins certaines phases telles que l'assemblage, la réparation et le démontage en fin de vie. Par conséquent, pour que les liaisons soient bien effectives et donc que le produit puisse être conforme (sans arriver à la rupture que ce soit en dynamique ou en statique) il faudrait que :

- L'ordre et les directions d'assemblages soient spécifiés.
- Le tolérancement soit adéquat et que du jeu ait été prévu lors de la conception
- Ou que les déformations de la pièce aient été anticipées et intégrées aux simulations.

Une fois les questions posées, il faudrait aussi réfléchir à la notion de simulation d'assemblages qui prendrait en compte les défauts et cela dans un domaine industriel.

2. Interfaces Mécaniques

En lien direct avec ce qui précède, je vais introduire une autre notion primordiale: celle d'interfaces mécaniques. La première raison est directement en lien avec la notion de simulation d'assemblage (Socoliuc et al., 2007) alors que la seconde porte sur la spécification des tolérances par interface (Toulorge et al., 2003), et c'est ce que je vais détailler par la suite.

N'ayant pas trouvé de définition partagée et validée par la communauté scientifique, je vais dans un premier temps décrire ce que j'inclus dans la notion "d'Interface Mécanique". Ainsi si l'on se place d'un point de vue "général", une interface peut être considérée comme étant un :

Plan ou surface de discontinuité formant une frontière commune à deux domaines aux propriétés différentes et unis par des rapports d'échanges et d'interaction réciproques. (Larousse)

En considérant le point de vue de l'informaticien, cela devient une :

Jonction entre deux matériels ou logiciels leur permettant d'échanger des informations par l'adoption de règles communes physiques ou logiques (B.O., 16 févr. 1981, no 8).

Et finalement dans notre cas, en se plaçant dans l'environnement CAO associé à la conception de pièces mécaniques, cela pourrait très bien être défini comme étant :

Une zone (réelle ou virtuelle) de contacts et/ou d'échanges, qui sépare deux pièces élémentaires ou deux sous-systèmes.

Plus précisément la notion d'interface désigne tout ce que chaque pièce (ou sous système) a besoin de connaître de l'autre pour pouvoir remplir les fonctions qui lui sont associées.

Comme je le détaillerai pas la suite, la notion d'interface est primordiale, pour la simulation numérique des assemblages, de par le fait qu'un assemblage est déclaré, au sein des modeleurs CAO, en utilisant les surfaces fonctionnelles, relatives aux pièces en lien. Il suffit donc que les interfaces soient déclarées et associées les unes aux autres pour pouvoir lancer la simulation. Or si l'on se place dans le cadre de l'avance de phase, les interfaces sont les premières à être créées de façon simplifiée ou non.

Ainsi, que l'on soit en avance de phase où lors de la définition détaillée des pièces, un système peut être modélisé au travers d'une représentation composée de l'ensemble des entités interfaces. De plus, ce qu'il faut aussi prendre en compte, est le fait que l'interface pointe vers des entités géométriques qui changent et qui suivent l'évolution du produit auquel elles sont rattachées. Ce

point sera abordé dans le chapitre suivant, lorsque j'aborderai et détaillerai d'une part la notion de Maquette Simplifiée, et d'autre part le lien existant entre celle-ci et la Maquette Numérique en cours de développement, tout au long du cycle de développement.

De plus, pour un industriel qui communique énormément avec des partenaires externes, l'élément interface peut être un des moyens de communication et d'échange, voire peut faire partie du cahier des charges pour son fournisseur et qui devra correspondre à un ensemble mécanique devant s'insérer dans l'environnement imposé par la ou les interfaces imposées.

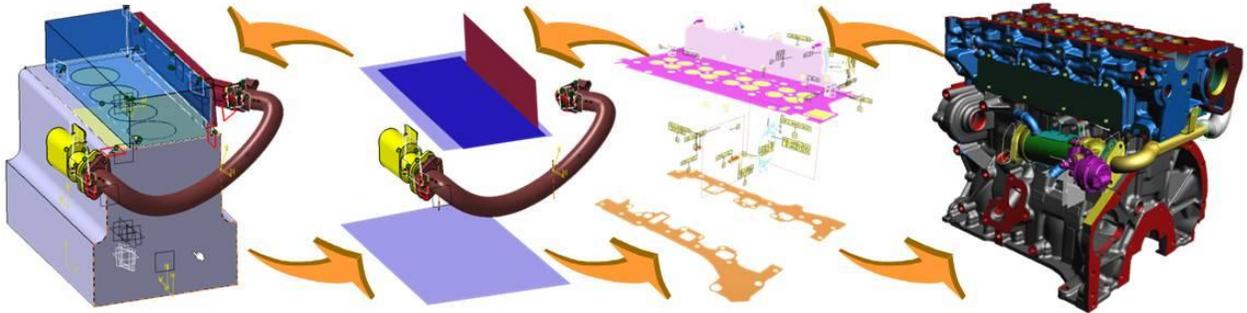


Fig. 15 : Définition et évolution des interfaces mécaniques durant le développement du produit

En continuant dans cette logique, nous trouvons aussi dans la littérature, (Toulorge, 2004) l'interface comme étant une entité qui permettrait de procéder à des vérifications de cohérence des schémas de cotation des ensembles se situant de part et d'autre de celle-ci. Ainsi, en plus de l'information purement géométrique que l'interface renferme, elle peut aussi dans un second temps inclure des informations de nature fonctionnelle et dont on verra l'utilité lorsque je détaillerai la notion "d'Inter-Pièce" (Socoliuc et al., 2007).

J'ai enrichi la notion d'interface et ai proposé celle d'inter-pièce, qui en somme peut être résumé comme étant un conteneur, déclaré dans un environnement CAO, afin de retrouver au sein d'une même entité la géométrie (SATT¹ & EGRM² associés), le tolérancement ainsi que les différentes spécifications fonctionnelles qu'il faut valider.

Ce qui va donc apparaître au fur et à mesure, c'est le passage :

- D'une représentation purement géométrique (que l'on retrouve dans la plupart des systèmes étudiés)
- Vers un modèle numérique de représentation des systèmes plus complets notamment en intégrant des entités et informations fonctionnelles (qu'elles soient purement informatives ou qu'elles servent à la validation).

¹ SATT : Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement

² EGRM : Élément Géométrique de Référence Minimum

SATT & EGRM

Ainsi deux des notions qui seront largement utilisées par les modèles proposés, sont celles de SATT et EGRM. Comme nous venons de le voir précédemment, les notions d'interfaces mécaniques pointent vers les surfaces fonctionnelles, dont on retrouve une représentation géométrique détaillée au sein des modeleurs CAO.

1. Un modèle de représentation simplifié d'un système

L'idée de Maquette Numérique Simplifiée (en incluant aussi le tolérancement), précédemment introduite, repose sur ces notions. Ainsi, pour définir les liaisons existant entre les pièces d'un mécanisme, je me suis appuyé sur les modèles SATT et EGRM introduits par Clement (Clement et al., 1994), notions qui sont actuellement aussi intégrées dans des outils CAO tels que CATIA.

Définitions

SATT : paire de surfaces appartenant au même solide et liées pour des raisons fonctionnelles. On en dénombre 7 classes et la composition de SATT est aussi considérée comme un SATT.

EGRM : Associé à un SATT cela désigne l'ensemble minimum de points, droites et plans nécessaire et suffisant laissant globalement invariant le SATT associé.

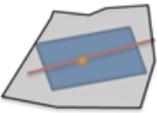
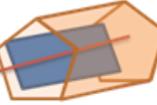
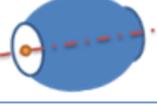
Illustration	Classe d'invariance	Degré d'invariance	Eléments de référence minimum (EGRM)	
	Complexe	0	Aucun	Plan, Droite, Point
	Prismatique	1	Translation suivant une droite appartenant à un plan	Plan, Droite
	Révolution	1	Rotation autour d'une droite pointée	Droite, Point
	Hélicoïdale	1	Translation et rotation liées (mouvement hélicoïdal)	Droite (axe de la vis)
	Cylindrique	2	Translation et rotation autour d'un même axe	Droite
	Plane	3	Rotation perpendiculaire au plan et 2 translations dans le plan	Plan
	Sphérique	3	3 Rotations centrées en un point	Point

Tableau. 2 : Tableau récapitulatif des 7 classes d'invariance (SATT)

La partie géométrique des chaînes cinématiques, d'un ensemble mécanique, peut être ainsi décrite de façon "standardisée" et avoir une représentation associée à l'aide des EGRM. L'avantage qui peut être tiré de ces notions, c'est surtout qu'elles permettent d'avoir une représentation épurée de la géométrie du système étudié très en amont, bien avant la définition détaillée.

2. *Le squelette géométrique*

Ce que nous retrouvons aussi dans la littérature en lien direct avec la modélisation des systèmes à l'aide des SATT & EGRM, c'est la définition des squelettes géométriques associés. Ainsi recherchant les travaux qui se rapprochent le plus de notre approche, on trouve ceux de Mathieu (Mathieu & Belingard, 2005) qui proposaient de représenter les pièces composant le système par leurs surfaces fonctionnelles. Celles-ci étaient obtenues après une analyse fonctionnelle technique, puis étaient assemblées en les contraignant selon les besoins fonctionnels spécifiés par l'analyse.

La méthode proposée pour la modélisation géométrique repose sur le principe de ne modéliser en CAO que les éléments géométriques, ponctuels, linéiques, surfaciques et volumiques justes nécessaires aux étapes de l'ingénierie. D'un point de vue théorique, elle s'appuie sur la théorie des SATT développée par A. Clement pour l'aspect nominal [...] (Mathieu & Belingard, 2005)

Cette approche peut s'accorder avec la représentation en avance de phase que je présenterai par la suite, puisqu'il y a représentation du système tel qu'il est décrit dans l'analyse fonctionnelle et cela de façon minimaliste sans se préoccuper du détail de la géométrie finale. Elle permet ainsi de proposer une base de travail pour l'ingénierie qui aura quand à elle, la lourde tâche de finaliser l'ensemble mécanique dans les moindres détails.

Au travers de cette étude, Mathieu présente une méthodologie de représentation pièce par pièce, intégrée à un modèleur CAO, et il manque la notion d'interface qui certes pourrait être créée en partie¹ à partir des informations incluses lors de la déclaration des liaisons cinématiques.

En rebondissant sur ces travaux, il devient nécessaire de compléter la notion de processus fonctionnel au même titre que celui numérique.

Approche fonctionnelle

Comme dans tout processus de conception rigoureux, nous trouvons une analyse fonctionnelle dans l'approche précédente qui aboutit à une représentation par graphes des informations relatives au système mécanique étudié, représentation pouvant se révéler très utile en avance de phase non seulement en ce qui concerne la traçabilité ou la capitalisation de l'information mais aussi en terme de simulation et pré-dimensionnement.

Toutefois avant d'arriver aux représentations je me suis aussi intéressé aux processus de conception (au sens plus global) intégrant des volets associés à l'avance de phase et surtout si la notion de "Maquette Fonctionnelle" pouvait déjà exister dans d'autres domaines et si elle était antérieure à notre approche.

¹ On peut en partie le déduire car les liaisons pointent uniquement vers les surfaces nécessaires et suffisantes à l'assemblage numérique.

1. *Des processus standardisés*

Pour rappel, l'approche de Pahl & Beitz (Pahl et al., Réédition 2007), sous l'appellation de "conception systémique", nous proposait le découpage suivant:

- Product planning and clarifying the task
- Conceptual design
- Embodiment design
- Detail design

et décrivaient ainsi l'enchaînement des différentes étapes du processus de conception, le tolérancement se retrouvant dans la dernière étape. Ils rappelaient aussi que ce processus est logiquement en train d'évoluer, notamment à cause des avancées de l'informatique.

En élargissant le point de vue et en regardant ce qu'il y a déjà eu comme travaux par rapport aux processus de conception, on retrouve parallèlement au découpage de Pahl & Beitz, ceux proposés par la communauté¹ travaillant sur les "Bases de Données²". Ainsi elle aussi s'était penchée sur les processus de conception et dans un premier temps avait proposé une description³ non pas du cycle de développement des BDD, mais du produit final. Par la suite, avec l'arrivée des modèles "Entité Relation"⁴ on a pu voir apparaître des processus de conception à trois étapes :

- Conceptual Layer
- Logical Layer
- Physical Layer.

Enfin, une nouvelle "couche" avait par la suite été rajoutée (dans la littérature anglophone le terme de "Layer" est utilisé) et cela pour définir le "Contexte". Pour un industriel tel que Renault cela serait l'équivalent des "Exigences de Haut Niveau" et donc nous retomberions vraisemblablement sur les mêmes quatre macro-étapes proposées par Pahl & Beitz.

Si j'insiste sur le parallélisme qu'il peut y avoir entre les deux découpages des processus de conception (domaine informatique et mécanique/CAO) c'est qu'ils ont notamment été pensés à la même époque, mais que faute d'outils informatiques performants, celui associé à la conception mécanique a évolué moins rapidement.

Toutefois on peut aussi se demander ce que ces découpages des processus peuvent amener et s'ils sont vraiment efficaces. Dans le domaine informatique la question ne se pose plus et les évolutions continuent à ce jour vers des processus encore plus performants et moins "lourds" (par exemple dans le domaine de la conception de logiciels, on assiste à un abandon des méthodes Merise notamment au profit des méthodes Agiles).

¹ Je n'ai pas développé la bibliographie et les références associées à ces procesus.

² On utilisera pour Base de Données l'acronyme BDD.

³ En 1975, l'ANSI / SPARC, un groupe d'étude travaillant sur les systèmes de gestion de base de données a publié un schéma d'architecture (associé aux bases de données) à trois niveaux: le schéma conceptuel, le schéma interne et le schéma externe.

⁴ Traduction erronée (mais largement répandue) à partir de l'anglais "*Entity relationship diagram*" (ERD) et qui se traduirait mieux par "Diagramme entité-association".

Why Have Conceptual, Logical, and Physical Data Modeling?

...to enforce standards and reduce confusion.

On en vient donc à se poser la question, somme toute naturelle : pourquoi continuer dans une logique qui semble de plus en plus abandonnée par les informaticiens?

Ou bien, en reprenant une remarque que l'on m'a faite lors de la présentation du dernier article (Socoliuc et al., 2009) : Pourquoi ne pas s'inspirer des fondateurs de microprocesseurs qui utilisent un processus de conception standardisé?

2. Une modélisation globale complexe, mais pas forcément localement compliquée

Les réponses que je peux à l'heure actuelle apporter, peuvent se résumer par :

- le processus de conception des ensembles mécaniques n'est pas toujours numériquement structuré et continu, et c'est un manque à combler :
 - les différentes études et modélisations qui sont effectuées en avance de phase correspondent à un niveau d'abstraction,
 - la traduction de l'information d'un niveau vers un autre n'est pas automatisée et le lien entre les informations découlant les unes des autres n'existe pas encore.
- le multi-physique est parfois difficile à modéliser.

Ainsi, en "conception mécanique" la passation et la traduction de l'information entre plusieurs niveaux d'abstraction est difficile à l'heure actuelle, contrairement au domaine traitant de la conception de solutions informatiques. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que d'une modélisation informatique à une autre (différence de langage de programmation ou de modélisation par exemple), cela fait des années que des méthodes de transposition ont été mises au point (ou tout du moins les différentes communautés s'y sont penchées).

Dans le monde de la CAO, à l'heure actuelle cela ne fait que quelques années que l'on voit apparaître des méthodologies (ainsi que les outils qui les implémentent) qui esquissent les différents niveaux d'abstraction et liant l'avance de phase à la définition finale détaillée. Ce qu'il faut aussi préciser, c'est que localement les modélisations sont possibles mais c'est l'assemblage et la traduction d'une vue à une autre qui font que le tout devient rapidement complexe.

Dernièrement avec l'arrivée de CATIA V6, Dassault Systèmes a présenté le RFLP¹ qui reprend exactement le même découpage que Pahl & Beitz et propose d'obtenir une définition fonctionnelle associée à la définition numérique. Cependant pour le moment outre la partie "Requirement" qui est incluse à MatrixOne et le "Physical" qui repose sur la définition produite par CATIA V6, les définitions "Fonctionnelles" et "Logiques" sont encore au stade de concepts en cours de développement, comme je le détaillerai par la suite.

Associés à la vue logique, certes des langages comme Modelica² ont fait d'énormes progrès, mais ils sont encore loin de pouvoir fournir tous les "outils" (au sens des "fonctions") nécessaires à la description globale d'un système devant être conçu.

¹ Requirements, Functional, Logical, Physical

² Langage de modélisation orienté objet, destiné à permettre une modélisation pratique de systèmes complexes, par exemple, des systèmes comportant des composantes mécaniques, électriques, hydraulique, thermique, [...].

En se penchant sur la vue fonctionnelle, dans la littérature actuelle, les études les plus proches et aussi les plus avancées, concernent l'approche GASAP¹ dont on retient surtout la représentation graphique de l'analyse fonctionnelle au travers de schémas créés à l'aide du logiciel GAIA².

L'ensemble des informations ainsi incluses au sein de cette représentation par graphes (on y reviendra dans la partie suivante) représente la "Maquette Fonctionnelle". Ainsi à la différence des approches précédemment introduites, les personnes ayant travaillé sur ce découpage ont décidé de placer tout ce qui ne relevait pas des "prestations" ou de la définition géométrique au sein d'une seule et même catégorie : la définition fonctionnelle (ici au sein du "Functional Domain").

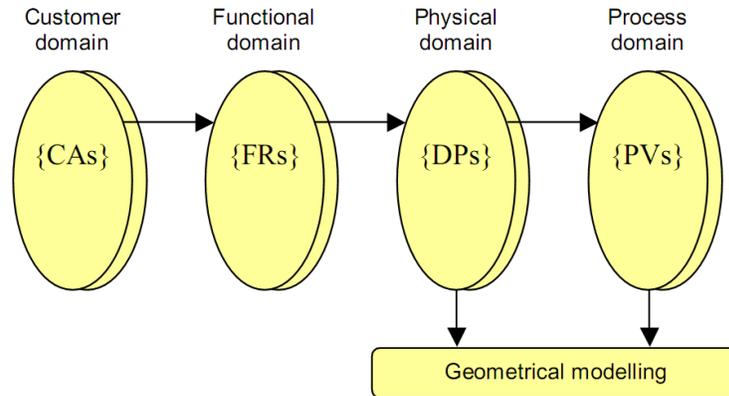


Fig. 16 : Processus GASAP : enchaînement et lien entre les différents domaines (Ballu et al., 2006)

C'est un choix qui ne peut pas être critiqué en soi, puisque chaque entreprise adapte le processus et le découpage, selon ses besoins et sa manière de fonctionner (Childs et al., 2006). Quid du tolérancement au sein de tels processus? Dans la logique actuelle, il serait en partie présent au niveau "fonctionnel" et surtout présent au niveau "physique". Chez Renault, ce qui a été mis en place est un jalonnement des différents projets mais sans qu'il y ait eu jusqu'ici un découpage semblable à ceux présentés précédemment.

Associé au processus fonctionnel, PROCAR³ a été déployé depuis 1997, comme méthodologie de référence aux concepteurs de Bureau d'Étude, pour la spécification et la validation des schémas de cotation. Cette méthodologie, permet de répondre au CdC et de capitaliser l'ensemble des informations au sein d'un TAFT⁴, mais comme on pourra le voir, c'est aussi associé à une Maquette Fonctionnelle que ce dernier serait le plus performant.

3. Une représentation fonctionnelle par graphes

En ce qui concerne le sens que je donne à la "Maquette Fonctionnelle", il faut surtout faire le parallèle avec le sens donné à la notion de "Maquette Numérique". Précédemment j'ai introduit les niveaux d'abstraction, et de la même manière qu'une représentation numérique englobe tout ce qui est lié à la géométrie, ici il s'agit d'une représentation dans le "domaine fonctionnel".

¹ GASAP : Geometry As Soon As Possible (Ballu et al., 2006)

² GAIA : Graph Analysis for Interfaces of Assembly, est un outil développé au sein d'EADS.

³ Je ne fais référence qu'à PROCAR Produit et non pas aussi à PROCAR Process.

⁴ TAFT : Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique (Dufailly & Poss, n.d.)

Ainsi le terme "Fonctionnel" est largement différent de celui qui est utilisé dans bon nombre de cas et cela depuis bon nombre d'années:

Une maquette fonctionnelle est une représentation d'un système ou d'un objet afin d'en tester et valider certains comportements.

C'est ainsi la définition que l'on retrouve en informatique et même en mécanique selon la culture de l'entreprise et que nous appellerions un prototype montrant la faisabilité. Dans notre cas, la notion de "Maquette Fonctionnelle", a été introduite par D. Buysse au sein de Renault en 2004, et a aussi été l'objet de plusieurs publications. Basée sur une représentation par graphes dans GAIA, le besoin d'une telle maquette a été détaillé par Buysse (Buysse, 2007) et a été enrichi par la suite en rajoutant les voies qu'une telle maquette ouvrirait en termes de validation de tolérancement (Socoliuc et al., 2008).

La représentation multi-niveaux par graphes dans GAIA est, en somme, un pont entre l'analyse fonctionnelle et la représentation géométrique et, même si l'entité d'interface n'existe pas en tant que telle, elle est prise en compte lors du basculement du modèle fonctionnel au modèle numérique.

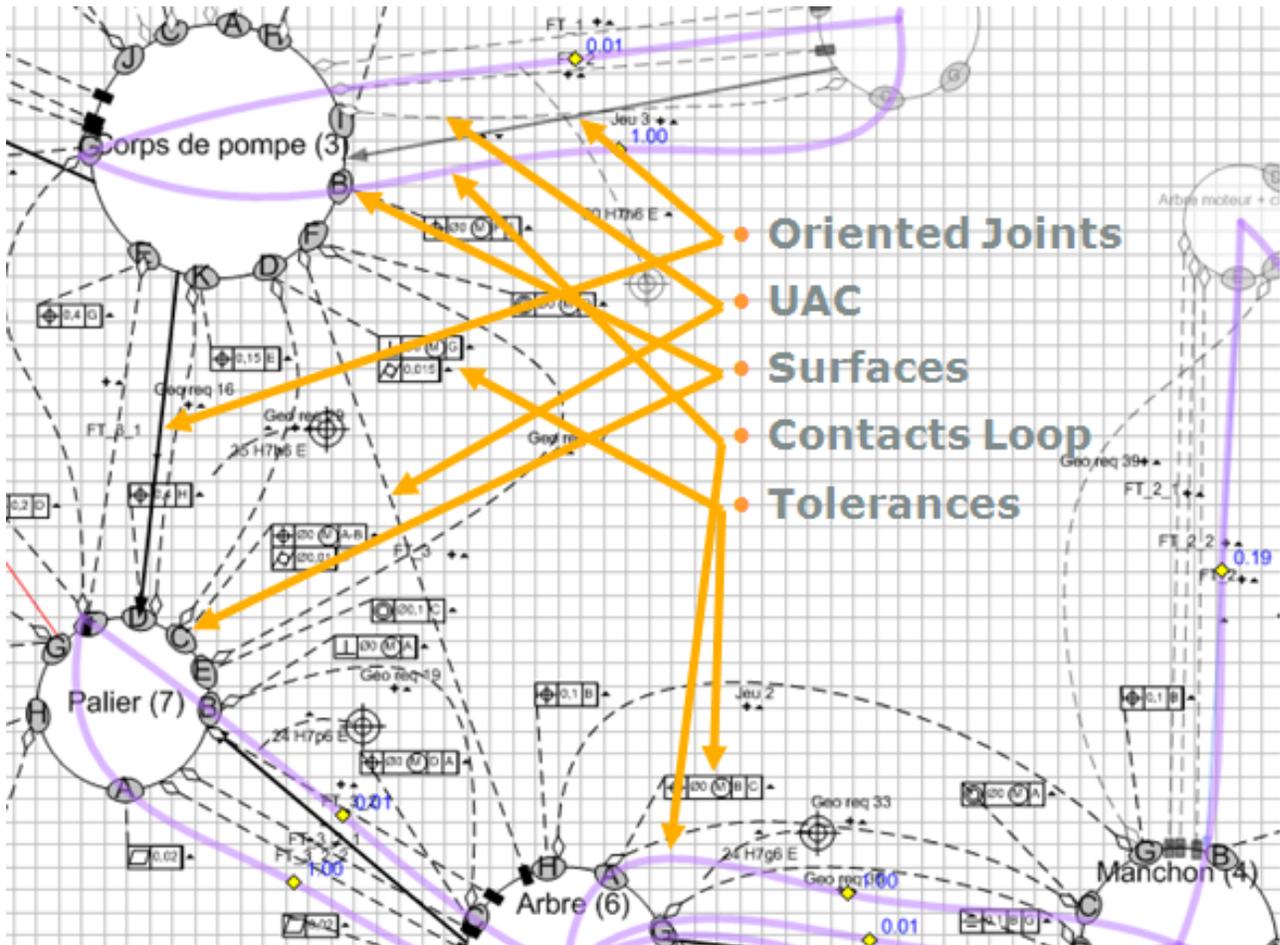


Fig. 17 : Exemple d'étude GAIA (Buysse, 2007)

Parmi les informations délivrées par les analyses GAIA, il y a les différentes données provenant d’un TAFT dans le cas de RENAULT et plus globalement d’une AMDEC¹ ou d’une Analyse Fonctionnelle Technique (AFT). Il intègre aussi, comme nous pouvons le voir sur la figure 16, les cotations fonctionnelles au niveau des pièces élémentaires, les boucles de contact [...] et en remontant d’un niveau de décomposition, on a aussi accès à une vue système à laquelle est liée l’AFB (Analyse Fonctionnelle du Besoin) notamment.

Dans la même logique Mathieu s’appuie sur une représentation (Ballu et al., 2005) à deux niveaux (graphe de liaisons / graphe de spécification des tolérances intra-pièces) mais il présente moins d’informations que celui fourni par GAIA (ce dernier étant un produit commercialisé).

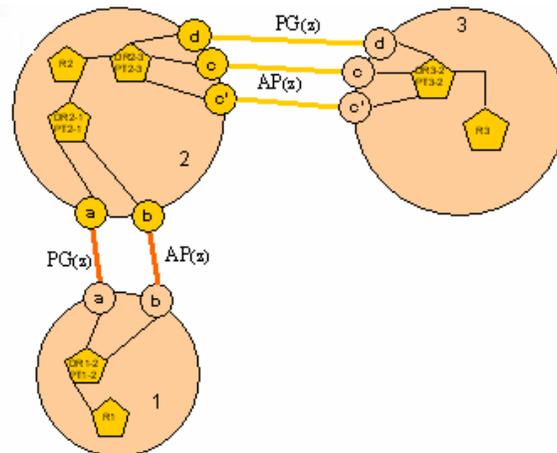


Fig. 18 : Graphe des liaisons élémentaires

Toujours dans le domaine des représentations par graphes, on trouve aussi dans la littérature celui proposé par le laboratoire LMECA², et qui est surtout axé « analyse des tolérances », celles-ci étant traduites en torseurs écarts et torseurs jeu. Comme nous pouvons le voir ce type de graphe est surtout destiné à faciliter la représentation globale d’un système et de ses schémas de cotation avant de procéder au processus d’analyse.

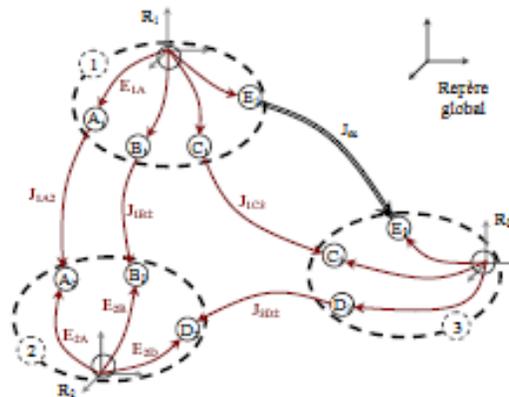


Fig. 19 : Graphe orienté d’analyse (LMECA)

¹ Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

² Laboratoire de Mécanique Appliquée : Ecole Supérieure d’Ingénieurs d’Annecy,

De plus, associé à ce type de représentation, Giordano (Giordano & Hernandez, 2006) propose aussi l'utilisation des hyper-graphes qui permettent de décrire des ensembles mécaniques ainsi que leur topologie mais aussi de déterminer et de représenter, de façon qualitative, les schémas de cotation associés après une étape de synthèse.

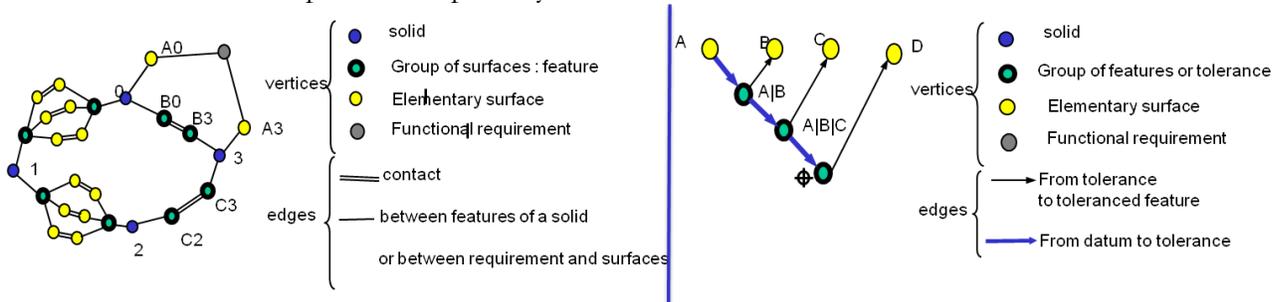


Fig. 20 : Graphes de contact et graphes des tolérances (Giordano & Hernandez, 2006)

Ainsi, globalement en regardant ces différentes représentations, nous voyons que la spécification des éléments fonctionnels peut se faire de diverses manières¹ mais ce qui manque c'est le lien avec la représentation géométrique finale. La définition fonctionnelle, certes, précède la description géométrique, mais elle a aussi pour rôle de la suivre en parallèle tout au long du cycle de développement afin de faciliter les étapes de validation, optimisation et modification.

4. Intégration d'éléments fonctionnels dans la représentation numérique

Actuellement c'est un des domaines qui demanderait le plus de recherche afin de permettre d'avoir une continuité numérique dans tout le processus de conception. Malgré le fait que l'on puisse exporter certaines informations de GAIA vers CATIA V5, nous ne pouvons pas dire que les informations fonctionnelles se retrouvent liées aux surfaces fonctionnelles associées dans la représentation 3D de la Maquette Numérique.

Si on examine l'approche de Mathieu, ce n'est qu'une fois la définition fonctionnelle effectuée, que le concepteur procède à la spécification des tolérances sur le squelette géométrique créée à l'aide du modeler CAO. A noter que les travaux ne font pas état de l'absence de bijection entre les deux représentations (toute modification sur l'un des supports ne sera pas forcément répercutée sur la seconde) et c'est par contre un point que nous avons essayé de valoriser.

A l'heure actuelle, outre les travaux de Toulorge (Toulorge, 2004), qui ont abouti à un prototype permettant d'intégrer les CAE² au sein de la maquette numérique et d'y lier les schémas de cotation qui la validaient, les travaux effectués par le CCR³ dans le cadre du projet GAIA et dernièrement Dassault Systèmes avec l'approche RFLP, on dénombre peu de recherches dans le domaine de la "Maquette Fonctionnelle", pour le moment.

¹ Auxquels on rajoutera par la suite la description au travers du TAFT, se présentant sous la forme d'un tableau EXCEL et la méthode CLIC (Cotation en Localisation avec Influence des Contacts) permettant d'obtenir des schémas de cotation fonctionnelle respectant les normes ISO.

² CAE : Condition Aptitude Emploi

³ CCR : Centre Commun de Recherche du groupe EADS.

Le Tolérancement, un vecteur de qualité

Dans la partie précédente, nous avons introduit l'environnement dans lequel le tolérancement était traité, tout comme la façon dont il était spécifié, représenté, et quelles étaient globalement les méthodologies de validation et d'optimisation garantissant un certain niveau de qualité.

Dans cette partie, nous allons détailler les outils mathématiques, qui une fois appliqués aux schémas de cotation, permettent de vérifier leur adéquation avec les exigences fonctionnelles du système.

Dans la littérature nous pouvons rencontrer de nombreuses approches et dont la classification est plus ou moins aisée de par le fait:

- que certaines méthodes ont les mêmes bases, mais divergeant par les hypothèses, les cas d'utilisation...
- qu'elles tentent :
 - soit de s'attaquer aux problèmes de représentation, d'écriture et de compréhension univoque des spécifications fonctionnelles
 - soit de créer des méthodes et modèles mathématiques pour l'analyse ou la synthèse des schémas de cotation.

•

Ainsi de façon synthétique, les modèles les plus représentés et aussi les plus pertinents sont :

- les modèles à base d'offsets (Requicha), l'approche par des frontières virtuelles (Jayaraman, Srinivasan...), l'approche par zones enveloppes, les approches traitant des pièces au maximum et au minimum de matière
- les modèles vectoriels (Wirtz...)
- les modèles cinématiques (Rivest, (Joskowicz & Ostrovsky-Berman, 2005) (Joskowicz & Ostrovsky-Berman, 2004)...))
- le modèle SATT ((Clement et al., 1994), (Gaunet, 1994)...))
- les modèles torsoriels (Ballot, Bourdet, . . .), torsoriels intégrant des intervalles (Laperrière et Desrochers), modèles utilisant les domaines jeu et écarts ((Giordano et al., 2003), (Petit, 2004)...))
- les modèles paramétriques (Clément, . . .), ceux utilisant les espaces de faisabilité (Turner), modèles utilisant les TMaps (Davidson & Shah, 2004)....
- – la méthode CLIC (Anselmetti, 2005) (Anselmetti, 2005)
- – ...

Si nous nous référons aux travaux de Salomons (Salomons et al., 1996) (Salomons et al., 1996), celui-ci avait identifié et décrit les problématiques relatives à l'étape du tolérancement de manière quantitative. Un des points qu'il avait relevé et qui reste toujours d'actualité, c'est le fait que si l'on veut comparer les exigences et les spécifications géométriques, il faut qu'ils aient le même modèle d'expression.

Ce premier problème passé, il faut réussir à définir de façon cohérente et qualitative les conditions fonctionnelles, tout comme les schémas de cotation. Dans le même temps, si l'on veut aussi définir de façon quantitative les tolérances, il faut aussi être capable de traduire les différentes informations géométriques en modèles mathématiques, sans quoi nous ne pouvons pas procéder à l'étape d'analyse et de synthèse de tolérances.

Dans notre cas, le besoin était dans un premier temps de pouvoir traduire et visualiser l'impact des solutions techniques capitalisées dans le cas d'une réutilisation, ce qui rentre dans le cadre de l'analyse de tolérances. Toutefois comme nous pourrions le voir dans la dernière partie de ce mémoire, l'optimisation n'est pas mise de côté.

Un besoin industriel concret

Actuellement, les modèles utilisés ne sont pas parfaits et les processus associés sont perfectibles. Ainsi, en ce qui concerne la conception 3D, l'allocation de tolérances n'est pas faite de façon optimisée en termes d'assemblage car les usages les plus courants concernent l'étude des chaînes de cote 1D ou 2D projetées. A ce constat s'ajoute le fait que de par les outils et les méthodes existantes, la validation s'effectue trop tard et cela souvent pour optimiser les nominaux et les tolérances dans le même processus.

Les questions que nous nous sommes posées dans un premier temps étaient :

- *De quelle manière doit-on présenter les méthodologies d'analyse et les résultats associés, afin de permettre aux concepteurs d'aller le plus loin possible dans leur étude sans avoir à faire appel à un expert?*
- *Comment peut-on tirer au maximum profit de l'environnement 3D dans lequel les utilisateurs sont habitués à travailler?*

Remarque

Le point de départ, permettant de répondre au mieux à la première question, était de proposer une visualisation 3D des écarts engendrés par les schémas de cotation étudiés et provenant de bibliothèques propres à l'entreprise.

Concernant les bibliothèques de savoir, il fallait enrichir le modèle rapidement et facilement avec des schémas de cotation et concernant la visualisation 3D, les méthodes qui nous ont paru les plus aptes à répondre au besoin étaient celles présentées par M. Giordano (Giordano & Duret, 1993) au début des années 90, développant les méthodes des domaines (jeu et écart) que l'on trouve aussi utilisés dans des publications plus récentes (Giordano et al., 2003) (Petit, 2004) (Germain, 2007).

Des modèles mathématiques existants à adapter au besoin

1. Hypothèses

Les modèles que je vais présenter par la suite ont été utilisés dans nos travaux de recherche en faisant quelques hypothèses :

- Les systèmes mécaniques étudiés sont composés de pièces rigides.
- Dans notre cas d’application (celui de la mécanique automobile) :
 - Les défauts de forme sont négligés, mais ils deviennent cependant non négligeables dans le cas notamment des microsystèmes (où les défauts géométriques se confondent avec les problèmes de rugosité) tout comme pour les systèmes ayant des dimensions importantes (la robotique par exemple) mais qui demandent une précision plus importante.
 - La modélisation des défauts n’oblige pas d’utiliser les grands déplacements et permet de simplifier les calculs en utilisant les torseurs des petits déplacements.
- Les schémas de cotation sont orientés¹.

2. Le torseur des petits déplacements

Ce concept a été introduit² par P. Bourdet et A. Clément au début des années 1970, en métrologie tridimensionnelle, afin de résoudre le problème d’association d’une surface quelconque à un nuage de points. Depuis, il a été utilisé dans des logiciels de machines à mesurer tridimensionnelles, dans des logiciels de simulation cinématique des mécanismes avec prise en compte des défauts géométriques tout comme dernièrement dans des méthodes d’analyse et synthèse de tolérances.

Ainsi pour bien comprendre cet outil, on va étudier le déplacement d’un point M, appartenant à un solide indéformable S, durant le mouvement de ce dernier dans l’espace transportant M en M’.

On appellera $\overrightarrow{D}_O = \overrightarrow{O_0O_1}$ et $\overrightarrow{D}_M = \overrightarrow{MM'}$ ce qui nous permet d’écrire les relations dans R_0 :

$$\begin{cases} \overrightarrow{MM'} = \overrightarrow{MO_0} + \overrightarrow{O_0O_1} + \overrightarrow{O_1M'} \\ \overrightarrow{D}_M = \overrightarrow{O_0O_1} + \overrightarrow{O_1M'} - \overrightarrow{O_0M} \\ \overrightarrow{D}_M = \overrightarrow{D}_O + \overrightarrow{O_1M'} - \overrightarrow{O_0M} \end{cases}$$

Étant donné que l’on a fait l’hypothèse de corps rigides, les coordonnées de M dans le repère R_0 sont identiques à celles du point M’ dans R_1 et par conséquent on peut en déduire³ :

¹ On parle de schémas de cotation orientés lorsque l’on parcourt toujours dans le même sens la lecture des tolérances (surface tolérancée par rapport à une autre qui sert de référence) lorsque l’on décrit la boucle cinématique au travers des surfaces fonctionnelles qui la composent.

² P. BOURDET & A. CLEMENT, 1976: “Controlling a Complex Surface with a 3 Axis Measuring Machine”. Anals of CIRP, Vol 25, p. 354-361.

³ \overline{R}_{01} est la matrice de passage entre la base 0 et la base 1.

$$\overrightarrow{O_1M'} = \overline{\overline{R_{01}}} \cdot \overrightarrow{O_0M}$$

soit :

$$\overrightarrow{D_M} = \overrightarrow{D_O} + \overline{\overline{R_{01}}} \cdot \overrightarrow{O_0M} - \overrightarrow{O_0M}$$

ou bien ¹:

$$\overrightarrow{D_M} = \overrightarrow{D_O} + (\overline{\overline{R_{01}}} - \overline{\overline{I}}) \cdot \overrightarrow{O_0M}$$

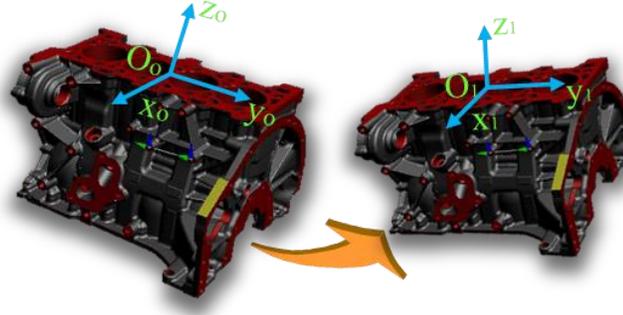


Fig. 21 : Changement de base

La matrice de passage est le produit des 3 matrices traduisant les rotations autour des 3 axes $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ et d'angles respectifs (α, β, γ) :

$$\overline{\overline{R_{01}}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Soit :

$$\begin{pmatrix} \cos \gamma \cdot \cos \alpha & & -\sin \gamma \cdot \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \gamma \cdot \cos \alpha + \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha & \cos \gamma \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha & -\cos \beta \cdot \sin \alpha & \\ \sin \gamma \cdot \sin \alpha - \cos \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha & \cos \gamma \cdot \sin \alpha + \sin \gamma \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha & \cos \beta \cdot \cos \alpha & \end{pmatrix}$$

En considérant le cas des petites rotations, nous pouvons approximer les fonctions cosinus et sinus par leurs développements limités à l'ordre 1. La matrice de passage devient :

$$\overline{\overline{R_{01}}} = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{pmatrix}$$

Ce qui nous donne pour $\overline{\overline{R_{01}}} - \overline{\overline{I}}$ une matrice antisymétrique :

$$\overline{\overline{R_{01}}} - \overline{\overline{I}} = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{pmatrix} \text{ ce qui nous donne donc } \overrightarrow{D_M} = \overrightarrow{D_O} + \begin{pmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{pmatrix} \cdot \overrightarrow{O_0M}$$

Étant donné que le produit par une matrice antisymétrique peut être ramené à un produit vectoriel, nous pouvons réécrire le « petit déplacement » du point M comme étant égal à :

¹ $\overline{\overline{I}}$ est la matrice identité

$$\vec{D}_M = \vec{D}_O + \vec{MO}_0 \wedge \vec{\Omega}$$

Le déplacement d'un solide peut être caractérisé en un point O, par un vecteur translation \vec{D}_O , et une matrice rotation \vec{R} . Cette rotation peut être exprimée par trois angles (α, β, γ) représentant les rotations successives d'un système d'axes liés au solide autour de trois axes fixes $(O; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. Cette dernière relation nous permet d'arriver à la définition que P. Bourdet (Bourdet & Schneider, 2007) donne du torseur de petits déplacements :

Le couple $\{\vec{D}_O, \vec{\Omega}\}$ constitue un torseur que l'on appelle torseur de petits déplacements. Le déplacement \vec{D}_M de tout point M d'un solide sera déduit du déplacement au point O par la formule fondamentale $\vec{D}_M = \vec{D}_O + \vec{MO}_0 \wedge \vec{\Omega}$, la rotation $\vec{\Omega}$ étant un invariant du mouvement d'un solide.

3. Torseur écart et surfaces de substitution

Par la suite, en faisant l'hypothèse que les déplacements des surfaces de substitution à l'intérieur des zones tolérancées sont de faible amplitude¹, les torseurs de petits déplacements peuvent être utilisés afin de décrire les déplacements nécessaires pour passer de la surface nominale² à la surface de substitution, transformation que l'on trouve sous l'appellation "Torseur Écart".

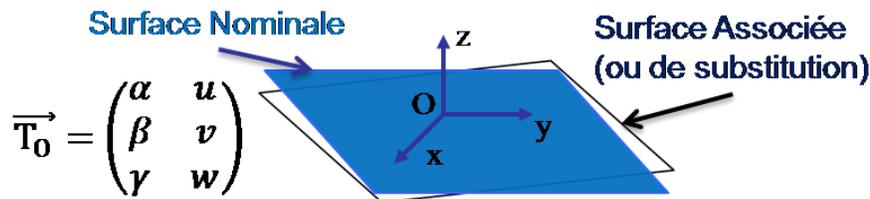


Fig. 22 : Association des torseurs aux surfaces nominales

En associant de la sorte un torseur aux surfaces fonctionnelles (après y avoir défini un point et un repère nominal), nous pouvons modéliser mathématiquement les défauts géométriques. Précédemment j'avais introduit la notion de SATT, tout comme les degrés de liberté associés, et, afin d'enrichir et généraliser l'approche aux différentes classes de surfaces, il est possible de spécifier les 6 composantes du torseur associé (3 rotations et 3 translations).

Comme nous pouvons le voir (Tabl. 3), certaines variables (les degrés de liberté) sont spécifiées au niveau des torseurs par des indéterminées, car elles ne représentent pas des écarts de géométrie mesurables.

Toutefois cela nous permet de leur attribuer une valeur arbitraire (nulle par exemple). Le torseur écart représente donc l'écart d'une surface par rapport à une position nominale. S'il y a plusieurs surfaces tolérancées sur une même pièce, il peut être intéressant de calculer les écarts relatifs entre ces surfaces et c'est ce que Giordano définit comme étant le torseur écart relatif :

¹ Par rapport aux dimensions de l'entité géométrique tolérancée.

² On suppose que la surface nominale correspond à la surface idéale.

Le torseur d'écart relatif (ou torseur défaut) représente l'écart entre deux surfaces par rapport à une position relative théorique parfaite. Par exemple, pour deux surfaces A et B, on notera E_{AB} le torseur d'écart. (Mathieu & Villeneuve, 2007)

Illustration	Classe d'invariance	Degré d'invariance / Torseur des petits déplacements
	Complexe	0 $\vec{T}_0 = \begin{pmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ \gamma & w \end{pmatrix}$
	Prismatique	1 $\vec{T}_0 = \begin{pmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ \gamma & Ind\ w \end{pmatrix}$
	Révolution	1 $\vec{T}_0 = \begin{pmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ Ind\ \gamma & w \end{pmatrix}$
	Hélicoïdale	1 $\vec{T}_0 = \begin{pmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ Ind\ \gamma & Ind\ \gamma * p + w \end{pmatrix}$
	Cylindrique	2 $\vec{T}_0 = \begin{pmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ Ind\ \gamma & Ind\ w \end{pmatrix}$
	Plane	3 $\vec{T}_0 = \begin{pmatrix} \alpha & Ind\ u \\ \beta & Ind\ v \\ Ind\ \gamma & w \end{pmatrix}$
	Sphérique	3 $\vec{T}_0 = \begin{pmatrix} Ind\ \alpha & u \\ Ind\ \beta & v \\ Ind\ \gamma & w \end{pmatrix}$

Tableau. 3 : Torseurs des petits déplacements associés aux différents SATT

4. Domaines écart

Le domaine écart est la représentation dans un espace 6D des déplacements limites associés aux torseurs écarts, et qui gardent l'entité tolérancée à l'intérieur de la zone de tolérance. Ainsi tout "N-uplet" (où $N \leq 6$), ayant des valeurs situées à l'intérieur du domaine écart, correspond à une configuration de la surface tolérancée et valide de façon quantitative la cotation associée.

Le tolérancement géométrique respectant la norme ISO 1101, fixe les limites, des entités géométriques tolérancées, en termes de déplacements/position par rapport à une ou plusieurs références. La position de l'élément géométrique réel doit être comprise dans une zone associée à la cotation.

Remarque

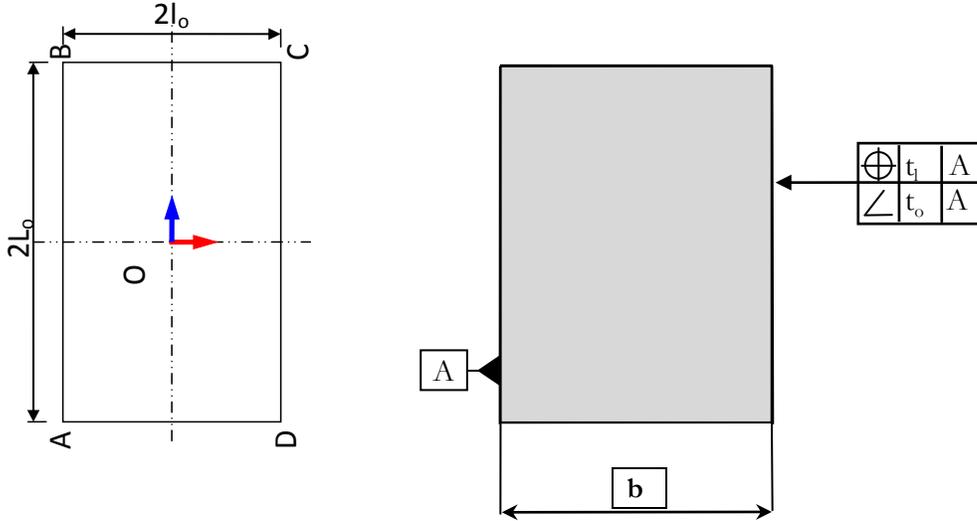


Fig. 23 : Tolérancement d'une surface plane rectangulaire en localisation et orientation

Pour illustrer ce concept, je vais prendre comme exemple l'étude d'une surface plane rectangulaire à laquelle une tolérance de localisation et une autre d'orientation sont appliquées par rapport à une référence A. Cela signifie que la surface réelle étudiée :

- doit se situer dans une zone délimitée par deux plans distants de t_p et dont le plan médian est parallèle à la référence A et distant de b de celle-ci (pour satisfaire la tolérance de localisation).
- doit se situer dans une zone définie par deux plans parallèles et distants de t_o et qui se trouve à l'intérieur de la zone précédente (pour satisfaire la tolérance d'orientation)

Tout d'abord comme je l'ai précisé plus haut, on définit le torseur écart associé et qui dans le cas du plan vaut $\vec{E}_O = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ \beta & 0 \\ 0 & w \end{pmatrix}$. La seconde étape consiste à modéliser les deux conditions d'orientation et localisation du plan de manière analytique, et cela équivaut à contraindre les déplacements de tous les points M_i appartenant au contour selon la normale au plan.

Ce déplacement peut être calculé pour tout point d'après la formule de changement de point d'un moment :

$$\begin{aligned} \vec{\delta M}_i \cdot \vec{z} &= (\vec{\delta O} + \vec{M}_i \vec{O} \wedge \vec{\Omega}) \cdot \vec{z} \\ \vec{\delta M}_i \cdot \vec{z} &= \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \pm l_o \\ \pm L_o \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{pmatrix} \right) \cdot \vec{z} \\ \vec{\delta M}_i \cdot \vec{z} &= w \pm l_o \beta \mp L_o \alpha \end{aligned}$$

Étant donné que pour la tolérance d'orientation, on ne prend pas en compte la translation suivant la normale, le déplacement $\vec{\delta M}_i \cdot \vec{z}$ sera compris entre $-\frac{t_o}{2}$ et $\frac{t_o}{2}$. En appliquant ce principe à l'ensemble des quatre points M_i du contour, il est possible d'écrire 8 inéquations à partir de :

$$-\frac{t_o}{2} \leq \pm l_o \beta \mp L_o \alpha \leq \frac{t_o}{2}$$

En supprimant les inéquations redondantes nous réduisons le nombre d'inéquations à 4 ce qui nous permet de définir le domaine écart associé :

$$\begin{cases} -\frac{t_o}{2} \leq l_o\beta + L_o\alpha \leq \frac{t_o}{2} \\ -\frac{t_o}{2} \leq l_o\beta - L_o\alpha \leq \frac{t_o}{2} \end{cases}$$

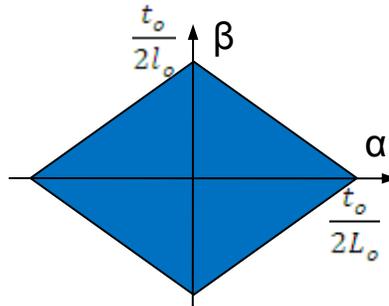


Fig. 24 : Domaine écart associé à la tolérance d'orientation

En ce qui concerne la tolérance de localisation, il faut revenir aux déplacements des points du contour et prendre en compte aussi la translation (puisque le plan médian de la zone tolérancée est contraint par rapport à la référence A).

$$\begin{cases} -\frac{t_l}{2} \leq w + l_o\beta + L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \\ -\frac{t_l}{2} \leq w + l_o\beta - L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \\ -\frac{t_l}{2} \leq w - l_o\beta - L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \\ -\frac{t_l}{2} \leq w - l_o\beta + L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \end{cases}$$

Les 8 inéquations précédentes permettent de définir le domaine écart associé à la tolérance de localisation et il peut être représenté en 3 dimensions (espace α, β, w) par le octaèdre suivant.

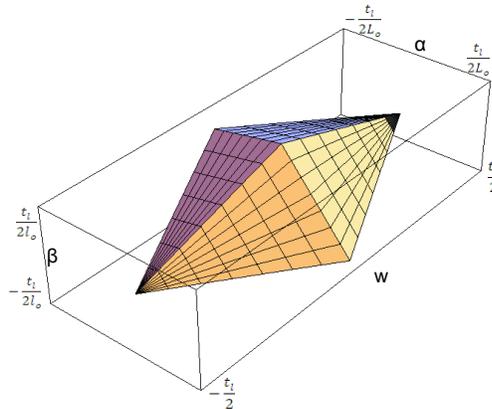


Fig. 25 : Domaine écart d'une tolérance de localisation appliquée à une surface plane de contour rectangulaire

Cependant telles qu'elles sont spécifiées, nous devons prendre en compte à la fois la tolérance de localisation et celle d'orientation, ce qui équivaut à chercher le domaine écart satisfaisant à la fois les inéquations associées à la tolérance de localisation tout comme celles associées à la tolérance d'orientation :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{t_o}{2} \leq l_o\beta + L_o\alpha \leq \frac{t_o}{2} \\ -\frac{t_o}{2} \leq l_o\beta - L_o\alpha \leq \frac{t_o}{2} \\ -\frac{t_l}{2} \leq w + l_o\beta + L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \\ -\frac{t_l}{2} \leq w + l_o\beta - L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \\ -\frac{t_l}{2} \leq w - l_o\beta - L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \\ -\frac{t_l}{2} \leq w - l_o\beta + L_o\alpha \leq \frac{t_l}{2} \end{array} \right.$$

Le domaine résultant est défini par le polytope suivant à 10 sommets :

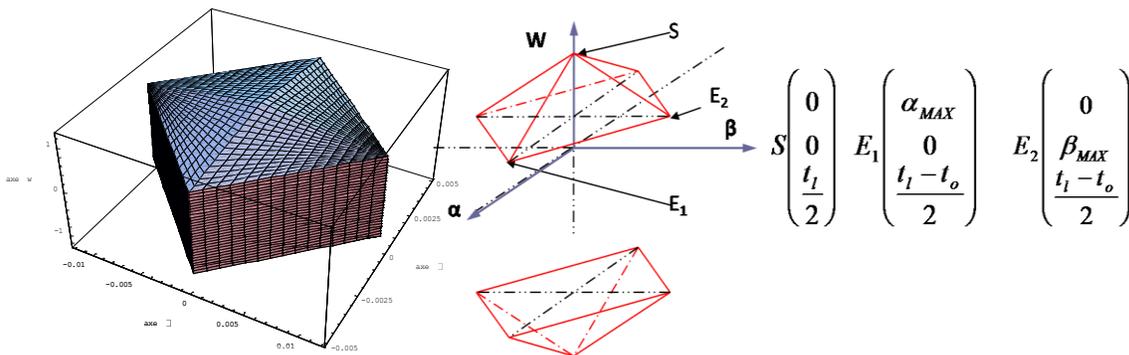


Fig. 26 : Domaine écart associée à une tolérance de localisation et d'orientation¹

Le cas étudié comporte une surface de contour rectangulaire, mais nous montrerons par la suite que peu importe la façon dont on discrétise le contour il est toujours possible de définir le domaine écart associé

Remarque

Les domaines correspondent à l'espace de conception autorisé par les zones tolérancées. Comme on a pu le voir au travers de l'exemple d'une surface de type plan, les domaines sont la traduction sous la forme de polytopes, d'un ensemble d'inéquations liant les composantes des torseurs écarts et les tolérances spécifiées.

¹ appliquée à une surface plane de contour rectangulaire

5. Domaines jeux

En passant de l’étude de la pièce isolée à celle de l’assemblage de pièces mécaniques indéformables, on est amené à étudier les liaisons entre les surfaces des pièces en vis-à-vis. La définition que l’on peut donner du domaine jeu serait : l’ensemble des déplacements (3 rotations et 3 translations) autorisés par la liaison d’un solide i par rapport à un solide j .

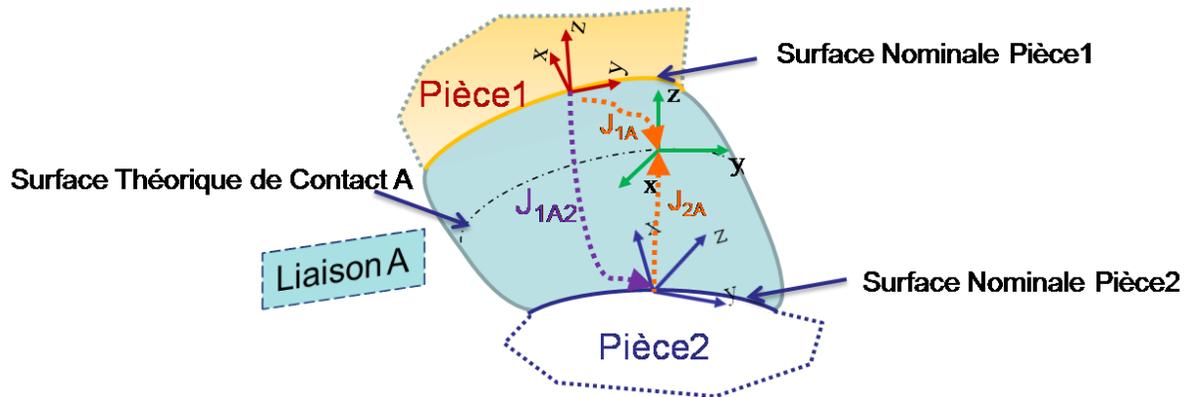


Fig. 27 : Torseurs jeu au niveau d’une liaison (Petit, 2004)

De la même manière que pour la représentation des défauts géométriques, il est possible d’exprimer les degrés de liberté au niveau de la liaison A entre les deux pièces 1 et 2 par un torseur

$$J_{1A2} = \begin{pmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ \gamma & w \end{pmatrix} \text{ et c'est ce qu'on appelle le torseur jeu}^1.$$

6. Opérations sur les domaines convexes : Sommes de Minkowski et Intersections

En appliquant la même méthode pour décrire par des inéquations représentant la liaison étudiée, et en intégrant les conditions d’impénétrabilité entre pièces, il est possible de représenter des coupes du domaine jeu.

Précédemment, j’ai introduit la traduction grâce à des inéquations, des positions des surfaces tolérancées à l’intérieur des zones de tolérance définies suivant les normes ISO, tout comme des déplacements autorisés par les jeux présents dans les liaisons entre deux pièces. De plus, ces ensembles d’inéquations peuvent être représentés par des domaines en 6D ce qui permet de les intégrer dans des méthodes quantitatives d’analyse et de synthèse des tolérances.

Définition

Un sous-ensemble P de R^d est appelé polyèdre convexe s’il représente l’ensemble des solutions d’un système fini d’inéquations linéaires, et est appelé polytope convexe s’il désigne un polyèdre convexe et borné. Lorsqu’un polyèdre convexe (ou un polytope) est de dimension k , on l’appelle k -polyèdre (ou k -polytope). (Fukuda, 2004)

Nous reprendrons les résultats de Petit (Petit, 2004) et considérerons que les domaines jeux et les domaines écarts que nous utiliserons sont des polytopes convexes.

¹ J_{1A} et J_{2A} sont appelés torseur jeu “absolu” alors que J_{1A2} est appelé “torseur jeu relatif” pouvant être défini par $J_{1A2} = J_{1A} - J_{2A}$

La notion de Somme de Minkowski sera utile lors de l’étude d’un assemblage ayant des liaisons en série. Cela permettra de procéder à l’étape d’analyse des tolérances et de quantifier l’impact global des schémas de cotation de chaque pièce sur l’assemblabilité ou les différentes CF de l’ensemble auquel elles appartiennent. On retrouve ces outils mathématiques détaillés dans les travaux de Fukuda (Fukuda, 2004) (Fukuda & Weibel, 2005) pour la partie mathématique, et Petit (Petit, 2004) en ce qui concerne l’application au tolérancement.

Définition

Soit P1 et P2 deux polytopes. La somme de Minkowski des deux ensembles est définie par :

$$P_1 \oplus P_2 = \{x \in \mathbb{R}^d \mid x = x_1 + x_2, x_1 \in P_1, x_2 \in P_2\}$$

De façon plus claire, cette opération correspond à la somme des vecteurs positions de chaque point appartenant au polytopes P1 avec ceux des points appartenant au polytope P2. Graphiquement cela se traduit par le balayage le long des arêtes de P1 du centre du polytope P2 et mathématiquement nous pouvons écrire : $P_1 \oplus P_2 = \bigcup_{x_1 \in P_1} \{x_1 + x_2 \mid x_2 \in P_2\}$

Propriétés

La somme de Minkowski de deux polytopes est un polytope.

La somme de Minkowski est une opération commutative et associative.

(Fukuda & Weibel, 2005), (Fukuda, 2004)

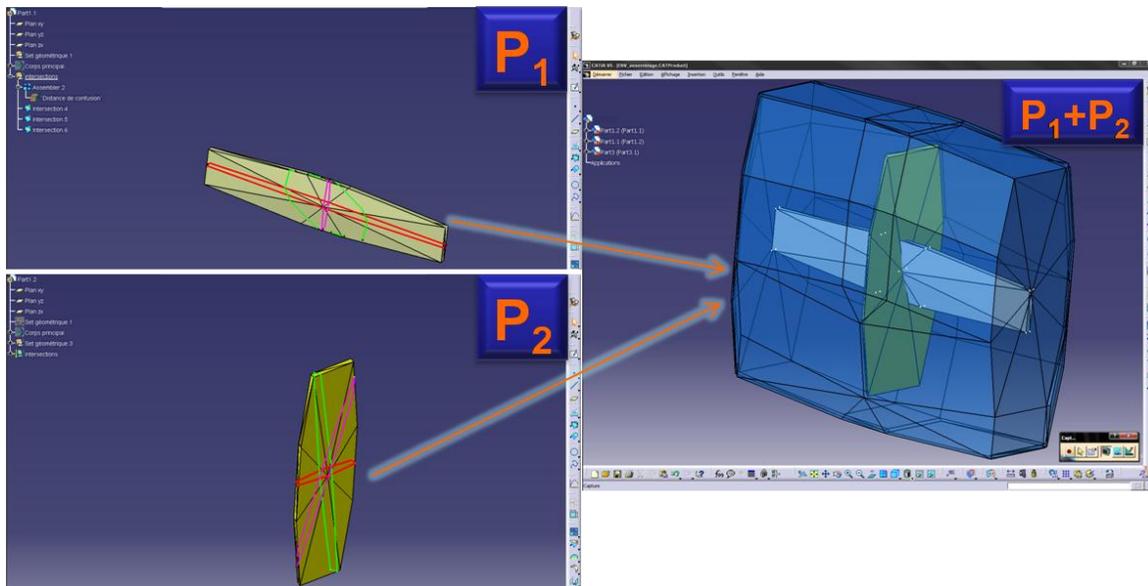


Fig. 28 : Somme de Minkowski de deux domaines écart (Socoliuc et al., 2007)

En ce qui concerne le calcul des sommes de domaines d’un point de vue informatique, bien qu’il existe déjà des bibliothèques pour effectuer ces calculs à l’aide du programme cdd+, j’ai choisi pour des questions de contraintes d’intégration dans un environnement industriel, de régénérer un nouveau code à partir des algorithmes décrits par Fukuda tout comme ceux présents dans QHull (fonctions que l’on trouve notamment dans Matlab).

En sommant des domaines écart, nous décrivons les écarts engendrés par les imprécisions dues aux défauts géométriques et cela était considéré aussi comme un écart.

En étudiant par exemple la position relative de deux solides 1 et 2, liés par une liaison A , il faut aussi prendre en compte le domaine jeu J_{1A2} associé à la liaison A . Le nouveau domaine ainsi obtenu est appelé domaine d'imprécision I_{1A2} :

$$I_{1A2} = J_{1A2} \oplus (E_{1A} \oplus E_{2A})$$

Par la suite on retrouvera cette notion d'imprécision en considérant le jeu comme défavorable.

Remarque

En ce qui concerne l'étude des liaisons parallèles, l'outil mathématique utilisé c'est l'intersection des domaines. En effet, en étant écrits au même point, ils permettent de déterminer les déplacements autorisés par l'ensemble des liaisons (donc influant les unes sur les autres) et non plus prises individuellement une à une.

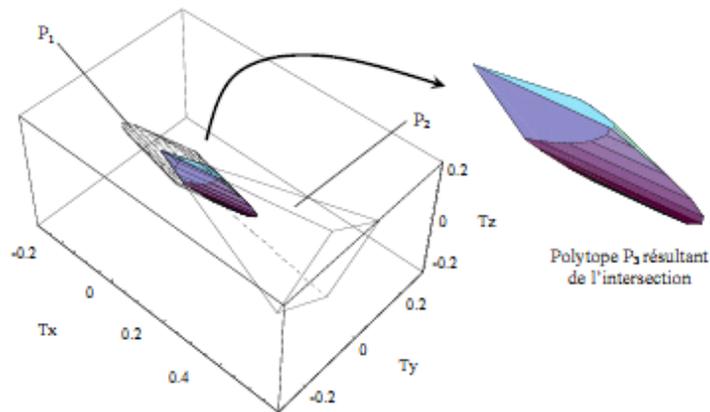


Fig. 29 : Intersection de deux domaines (Petit, 2004)

Propriété

L'intersection de deux polytopes est un polytope convexe.

Pour plus de détails nous pouvons nous référer aux travaux de J.Ph. Petit (Petit, 2004) qui abordent ces notions plus en détail (et incluent aussi la notion de Sweeping & Intersection que nous n'avons pas utilisée dans nos travaux).

L'avance de phase en conception mécanique

Concernant le tolérancement, le constat global est qu'il est effectué tardivement dans le cycle de développement du produit, comme nous pouvons le voir sur la Fig. 30 représentant de façon épurée les différents stades du projet. Pourtant le tolérancement apparait de façon qualitative très tôt et cela bien avant l'obtention d'une maquette numérique détaillée et finale.

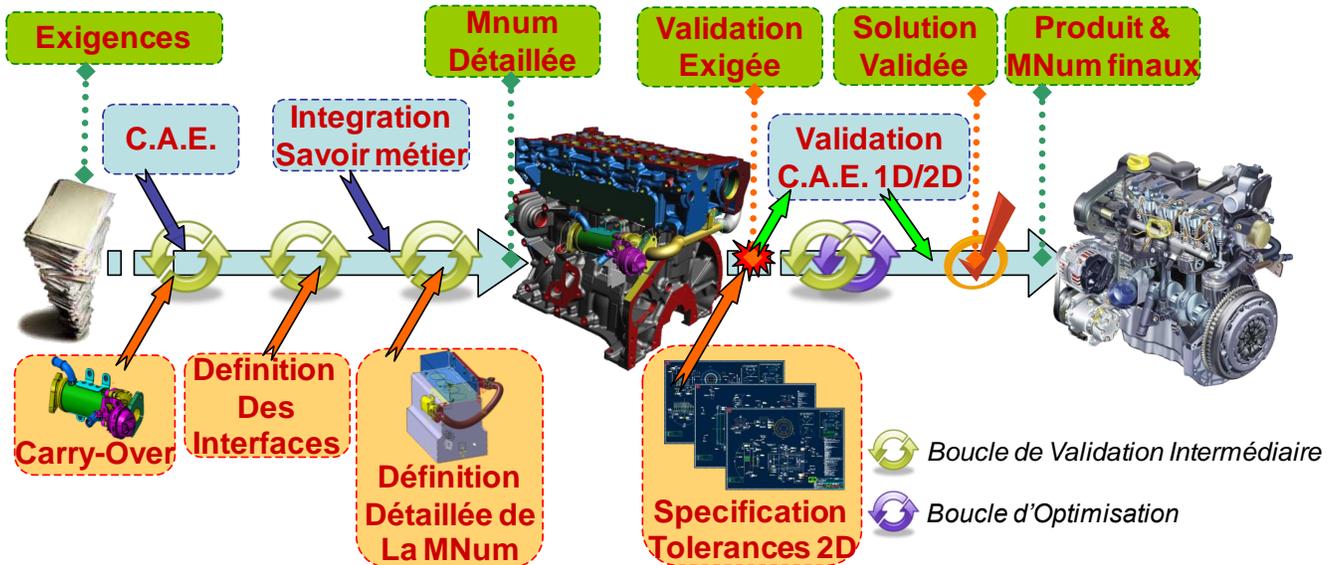


Fig. 30 : Schématisation du cycle actuel de développement produit

Constats

Ce que j'ai voulu traduire au travers de cette représentation, c'est :

- d'une part, l'approche séquentielle du processus global et la place tardive que prend le processus de validation du tolérancement
- d'autre part, l'état de définition du support numérique lors de cette validation :
 - on considère que la représentation géométrique 3D est gelée
 - on spécifie le tolérancement en 2D.
 - les étapes de validation n'exploitent pas au maximum les avantages de la Maquette Numérique puisqu'il faut retraduire les informations de façon manuelle avant de lancer les calculs en dehors du modeleur.
 - Suivant l'outil de validation utilisé, la validation ne se fait pas en 3D.
- mais aussi :
 - la séparation du monde fonctionnel (cadres bleus) du monde numérique (cadres oranges) et notamment l'absence des F.T.E. dans la Maquette Numérique.
 - La diversité d'avancement des définitions géométriques des différentes pièces en début de conception

Premières propositions

Il est important de signaler que dans le monde industriel, le processus de conception mis en place, ne peut pas être changé du tout au tout, de par les coûts que cela engendre et aussi par l'impact que cela a sur le mode de fonctionnement des équipes devant s'adapter à ce changement.

Toutefois, à l'extrême, de petites modifications permettent rarement d'arriver à optimiser un processus dans un temps raisonnable et le coût global de l'opération peut devenir plus important que si l'on avait tout changé d'un coup.

La solution miracle n'existant pas, il faut trouver un juste milieu et bien définir les étapes à créer et celles qui sont à modifier. Dans notre cas ce qui nous semble important, c'est :

- Définir au même niveau que la MN, une Maquette Fonctionnelle dont les informations sont inter-opérantes et synchronisées, tout en pointant vers l'information géométrique associée.
- Enrichir la MN avec des éléments fonctionnels, notamment en incluant les F.T.E. (C.A.E. / C.F.G.) dans la vue géométrique du modèleur CAO.
- Démarrer le processus de validation de cotation plus tôt
- Réduire le nombre d'étapes séquentielles et paralléliser la spécification et la validation (cela a pour conséquence de réduire la durée, les coûts, de laisser plus de temps pour optimiser et valider les solutions techniques étudiées...)

Évolution de la réflexion autour du processus de conception

1. La MN au centre du processus de conception

Tout d'abord, pour bien décrire notre démarche, je vais commencer par donner une définition de la MN, usuelle et acceptée de tous ceux qui l'utilisent :

Définition

Une maquette numérique ("Digital Mock-Up" ou DMU en anglais) est une représentation géométrique d'un produit, réalisée sur ordinateur en vue de le définir, de l'analyser, de le contrôler et d'en simuler certains comportements.

Or précédemment, j'ai soulevé le fait que la création de la MN doit prendre en compte les résultats provenant des analyses fonctionnelles et qui précèdent la modélisation géométrique.

S'il ne s'agissait que d'un simple besoin de représentation afin d'avoir le modèle le plus complet possible, on pourrait concevoir que les exigences n'apparaissent pas au même niveau que la géométrie. Malheureusement elles n'existent pas du tout, alors que durant les étapes de validation finale de la géométrie (avant le gel de la solution) le concepteur a besoin de ces informations fonctionnelles, s'il veut conserver une continuité numérique et une seule référence.

Ainsi en continuant à développer la notion de référence unique pour la simulation, il m'a paru important de réfléchir à la construction de la géométrie ainsi qu'à la déclinaison de la MN selon les besoins de validation et de simulation à tout moment du cycle de vie du produit.

Dans le cas de la thèse, cela concerne surtout les parties amont de la conception et en termes de création de la MN plusieurs questions m'ont paru importantes par rapport aux étapes de validation du produit :

- Est-elle suffisante du point de vue géométrique?
- Que contient-elle également?
- Que devrait-elle contenir?
 - Géométrie
 - Autres données
- Quels processus de construction faut-il mettre en place afin d'incorporer toutes ces informations?
- Selon le contexte d'utilisation, quelles peuvent être les utilisations?

A l'heure actuelle un des points durs, associés à la MN et étant souvent sources de perte de compétitivité, concerne la modélisation en soi. Les concepteurs sont ainsi confrontés :

- *aux conversions de données afin d'obtenir des modèles qu'ils peuvent intégrer dans leur environnement de simulation,*
- *aux créations de modèles simplifiés, mais qui ne sont pas en lien avec la géométrie mère dont ils devraient découler,*
- *à la passation de l'information et des résultats, d'un domaine à un autre [...]*

Remarque

2. Les informations nécessaires à la simulation du tolérancement en avance de phase

Le problème auquel j'ai été confronté, lorsqu'il a fallu généraliser le processus de validation et l'adapter à une utilisation en avance de phase, s'est révélé être plus global puisqu'il s'étend aussi au processus de conception. En effet, contrairement aux étapes en aval, où toutes les entités sont précisément définies et les solutions gelées, en amont de la solution finale il peut exister une grande différence de maturité entre les pièces constituant une boucle cinématique, par exemple.

Cela semble logique et peut être anodin, mais si l'on essaie dans un premier temps, ne serait-ce que de retrouver les surfaces fonctionnelles ayant été décrites durant l'analyse fonctionnelle précédant la création de la MN, on se rend compte que, suivant les pièces, elles peuvent ne pas encore avoir été définies.

Ainsi, la traduction de façon géométrique du squelette fonctionnel, est un des points qu'il faut fortement prioriser. A noter qu'il faut aussi vérifier que les pièces provenant de carry-over sont quand à elles cohérentes avec la description fonctionnelle de l'environnement dans lequel elles sont insérées. Ce second point montre quant à lui la nécessité d'avoir une bijection entre le monde fonctionnel et celui géométrique, ou tout du moins d'avoir la possibilité de lancer les vérifications de façon automatisée.

Il va de soi que la description fonctionnelle actuelle, au travers des fichiers (formats bureautiques) ne pouvant nullement être mis en lien avec l'environnement CAO, est une voie qu'il faudra abandonner tôt ou tard afin d'améliorer le processus global de conception.

Pour pouvoir lancer les simulations en avance de phase, il faut :

- non seulement créer un squelette fonctionnel géométrique en 3D sur lequel reposeront les tolérances précédemment citées
- mais aussi, traduire les informations fonctionnelles en données intégrées dans la MN comme les C.A.E. (Toulorge et al., 2003) et les mettre en lien avec les surfaces fonctionnelles associées
- et enfin, revoir le support numérique contenant l'ensemble des informations fonctionnelles, afin de pouvoir permettre la création de ponts entre le domaine Fonctionnel et Numérique.

3. Création et extraction des informations nécessaires à la simulation

Comme je l'ai précisé précédemment, il faut s'affranchir des limitations des outils et créer un environnement, sur lequel nos méthodologies peuvent reposer. Ainsi le support numérique, une des premières entités à définir, serait tolérancé en avance de phase.

Or, dans les premiers constats, la MN actuelle ne présentait pas encore les bases nécessaires à une validation finale du produit et cela déjà en ne se basant que sur la façon dont le tolérancement était "présenté". En effet, les concepteurs partaient de la description géométrique 3D et en tiraient des plans 2D qui ne seraient plus numériquement liés aux évolutions potentielles de la MN dans le cas où une modification tardive était répercutée sur la géométrie. Toutefois, il faut se remettre dans le contexte actuel de spécification, et rappeler le fait que ces plans de cotation seraient forcément créés après le gel de la définition détaillée des pièces, ce qui rend les risques d'incohérence entre les deux représentations quasi-nuls.

Dans le cas de la validation, le lien numérique entre les schémas de cotation et la géométrie tolérancée, est surtout nécessaire pour pouvoir récupérer les informations relatives aux surfaces fonctionnelles, dans le même environnement et de façon automatique. Cela permet de faciliter les étapes de calcul/validation et:

- d'assurer la cohérence entre les modèles 3D/2D
- d'assurer la cohérence entre les spécifications et les C.A.E.
- d'assurer la cohérence entre les surfaces et les spécifications.

Actuellement, la cotation 3D nous permet non seulement de répondre aux problèmes de liaison entre l'élément géométrique et les tolérances associées, mais aussi de les réutiliser de façon automatique au sein de méthodologies dans des outils de validation et simulation. Elle permet aussi de pouvoir commencer la spécification de tolérances très tôt dans le processus de conception en faisant reposer les schémas de cotation sur des représentations géométriques qui peuvent être épurées en avance de phase.

Ainsi, le support géométrique qui sera utilisé pour le tolérancement sera composé uniquement des surfaces fonctionnelles 3D obtenues soit par extraction à partir du modèle 3D (cas des pièces provenant d'un carry-over ou des pièces en cours de définition détaillée) soit créées à partir de la définition donnée par l'analyse fonctionnelle.

4. La Maquette Fonctionnelle, base de la définition géométrique

Ainsi, une fois de plus on se retrouve avec la nécessité de récupérer et d'intégrer des informations provenant de l'analyse fonctionnelle et cela, non seulement par rapport à la cotation, mais aussi pour la création du support géométrique précédemment introduit. La définition fonctionnelle doit non seulement être intégrée à l'environnement CAO mais elle doit aussi présenter des ponts avec la MN afin de pouvoir intégrer toutes les spécifications fonctionnelles durant la conception qui sont les éléments de référence utilisés lors de la validation.

Cet ensemble de remarques m'a amené à la notion de Maquette Fonctionnelle et à en proposer une définition comme ci-dessous, ainsi que les processus de conception associés à la création d'une telle représentation et que je vais détailler par la suite.

Définition

Une Maquette Fonctionnelle ou MF ("Functional Mock-Up" ou FMU en anglais) est une représentation informatisée d'un produit et englobant tous les processus associés à l'analyse fonctionnelle et les informations qu'elle produit.

La Maquette Fonctionnelle est créée et utilisée en tant que base à partir de laquelle la Maquette Numérique doit représenter en 3D le système étudié, mais aussi à partir de laquelle se fera la validation de la géométrie finale.

La Maquette Fonctionnelle permet ainsi de gérer à la fois les processus fonctionnels et les données qui en dépendent, le tout en lien avec la MN qui leur est associée.

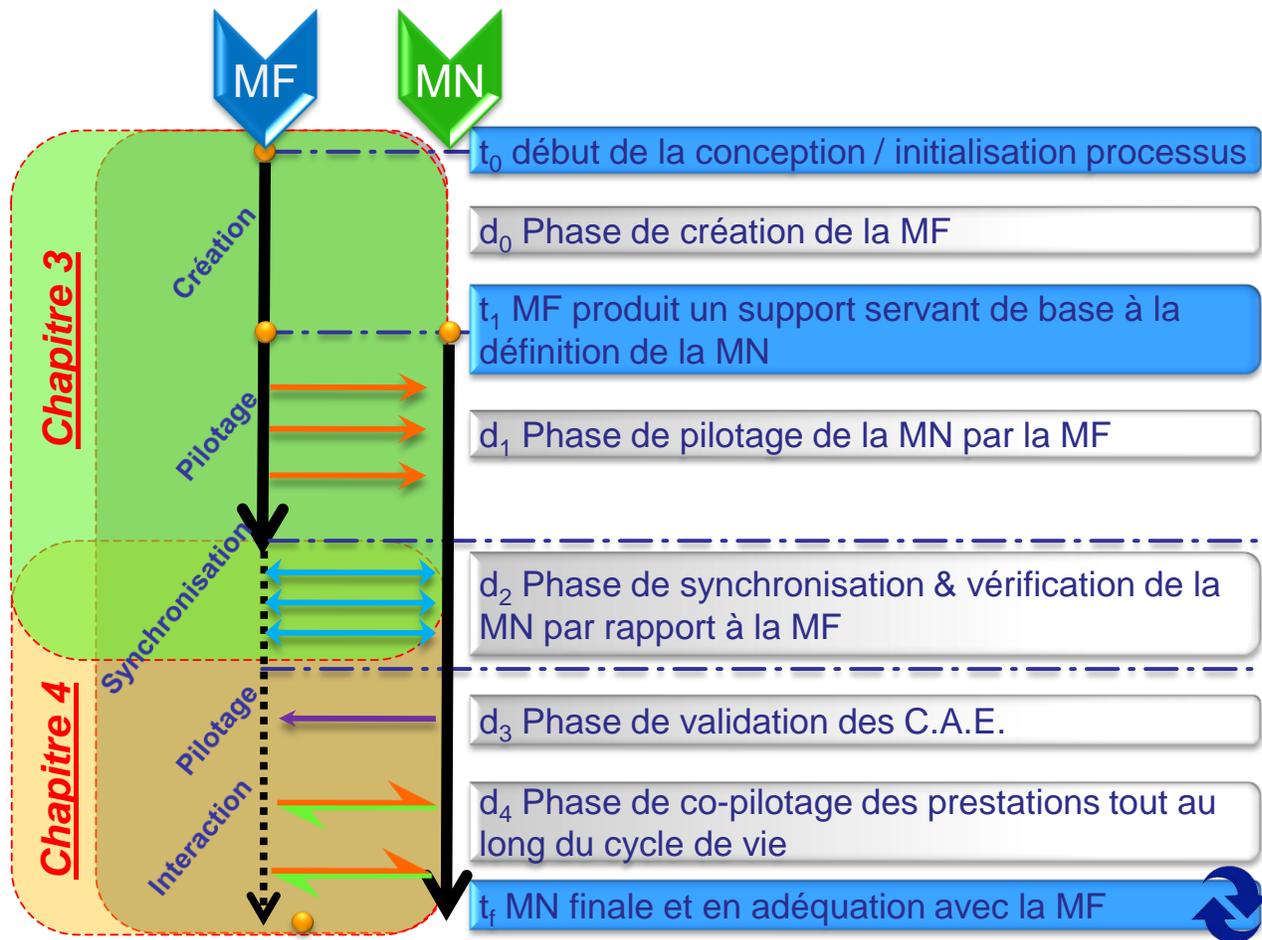
Remarque



Fig. 31 : Parallélisme des modélisations par la Maquette Fonctionnelle et la Maquette Numérique

Cela m'a amené à me pencher sur le parallélisme (Fig. 30) qu'il y a entre les deux modélisations, mais aussi à décrire les interactions qu'il pouvait y avoir entre ces deux maquettes selon le moment dans le cycle de vie du produit (Fig. 31) et enfin à définir les supports d'échanges, voire de pilotage, qui permettraient la passation de l'information d'un environnement à l'autre.

Un autre point qu'il a fallu que je prenne en compte, c'est le fait que la MN est en constante évolution et qu'il faut par conséquent que les ponts et les méthodologies de pilotage entre les deux maquettes puissent s'adapter et suivre les évolutions qui auront lieu tout le long du cycle de développement.



Légende :



Fig. 32 : Enchaînement des processus de pilotage, synchronisation et validation entre la MF et la MN

Conclusions

1. Méthodologies et outils mathématiques

Au travers de ce chapitre, j'ai introduit les différents outils, que j'ai utilisé durant les étapes calculatoires (approches torsorielles, utilisation des domaines et les opérations appliquées à ceux-ci), mais aussi les concepts sur lesquels reposent les modélisations des systèmes étudiés (description des interfaces par les SATT & EGRM, intégration d'informations fonctionnelles dans la MN et les liens entre la MF et la MN).

Dans le but d'analyser les schémas de cotation au pire des cas, dans la dernière partie de ce mémoire je décrirai comment l'ensemble de ces informations est articulé afin de répondre au besoin.

2. Pilotage de la MN et intégration de la notion de défaut géométrique

Dans la dernière partie de ce chapitre, j'ai introduit la notion de maquette fonctionnelle tout comme les enrichissements qu'il faut amener afin de pouvoir mieux répondre à la problématique de la simulation des schémas de cotation en avance de phase. Je présenterai plus en détail ce que nous incluons dans ce concept tout comme le lien qu'elle a avec la MN dans le chapitre suivant au travers :

- d'une synchronisation des informations fonctionnelles entre la MN et la MF (ce qui inclut le squelette fonctionnel, les tolérances et les F.T.E.).
- des différents rôles que joue la MF selon l'activité menée dans le cycle de développement (comprenant la pré-validation de la cotation en avance de phase)

De plus, je montrerai qu'il ne s'agit pas seulement d'une traduction des informations fonctionnelles dans un environnement géométrique 3D afin de pouvoir lancer des étapes de calcul, mais qu'il s'agit aussi de pouvoir simuler un assemblage présentant des défauts géométriques.

La Maquette Fonctionnelle

SOMMAIRE

Penser fonctionnel

- "Au commencement" il y a la voix du client
- Intégration du contexte de travail de l'industriel
- La recherche des solutions

Problème de structure lié au processus de déploiement des prestations

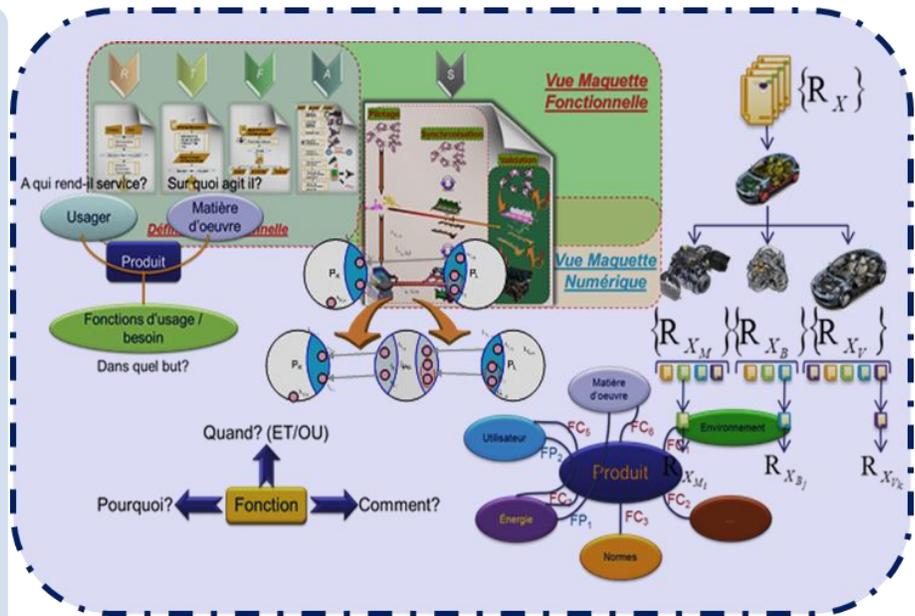
- Constats
- Solutions informatisées existantes
- Bilan

Une proposition de processus modifié

- Aperçu global
- Le découpage fonctionnel proposé
- Détail de chaque étape composant le processus
- Définition du modèle de représentation par graphes (squelette fonctionnel)
- Pilotage fonctionnel

MOTS-CLES

- ▶ Maquette Fonctionnelle
- ▶ Prestations
- ▶ Avance de phase
- ▶ Pilotage
- ▶ Solutions informatique
- ▶ Squelette fonctionnel
- ▶ Processus



Ce chapitre a pour but de présenter la notion de Maquette Fonctionnelle ainsi que le processus de conception qui est associé à son introduction dans un processus en avance de phase.

Dans un premier temps, je reviens sur les notions qui sont utilisées lorsque l'on parle d'analyse fonctionnelle, de représentation d'un système par les fonctions [...].

Une fois les concepts définis, je détaillerai d'une part le processus fonctionnel visant à produire la Maquette Fonctionnelle et d'autre part le lien qu'il doit exister entre l'environnement fonctionnel et celui numérique.

Penser fonctionnel

Dans le chapitre précédent nous avons introduit le besoin d'une Maquette Fonctionnelle au même titre que la Maquette Numérique afin de pouvoir disposer, au début de la définition dans l'environnement CAO, de tous les éléments fonctionnels nécessaires à sa validation, tout comme pour la construction de la représentation géométrique du système étudié.

Dans l'état actuel des choses, le processus associé à l'analyse fonctionnelle, semble aux premiers abords clair et simple à mettre en œuvre. Cependant dans la pratique, les équipes projet rencontrent des problèmes assez fréquemment dès que les systèmes deviennent complexes, et cela même si les méthodologies élémentaires sont connues. Les causes majeures de ces problèmes sont de deux types :

- d'une part, le support d'écriture et de stockage, ne permet pas d'avoir une passation des résultats d'une étape à l'autre au sein du processus d'analyse.
- d'autre part, l'absence de structure a pour conséquence de complexifier inutilement le processus suivi et de le rendre difficilement lisible.

Dans ce chapitre, je commencerai tout d'abord par revenir sur quelques basiques de tout processus de conception qui me permettront de faire ressortir certains constats associés aux outils et processus fonctionnels actuels. Que ces méthodologies (ou outils) aient été présentées au sein de textes de normes, soient présentées comme des « bonnes pratiques » industrielles ou issues de travaux de recherche, cela ne change en rien au problème majeur : leur juxtaposition (ou superposition) afin d'obtenir un processus sans « trou fonctionnel » et qui soit numériquement continu.

Cette présentation me permettra, dans un second temps, de décrire de manière détaillée le processus fonctionnel que j'ai proposé dans le dernier article (Socoliuc et al., 2009) ainsi que la notion de Maquette Fonctionnelle lui étant associée et qui permet de répondre aux problématiques présentées ci dessus.

"Au commencement" il y a la voix du client

Cela peut prêter à sourire, mais que ce soit dans le monde de l'automobile ou tout autre qui se veut rigoureux, la réussite d'un projet passe par une analyse, compréhension et formalisation du besoin "client" et qui est cependant une des tâches des plus "délicates" à effectuer.

1. Une problématique connue

Ainsi, comme l'ont fait remarquer les pères du langage UML¹, il n'est pas rare de voir des projets démarrer sans que le besoin n'ait été clairement défini.

« La tâche de capture des besoins est tellement délicate qu'il n'est pas rare de voir des équipes de projet commencer l'écriture du code (ce qui est relativement simple), avant d'avoir clairement établi ce

¹ L'UML (en anglais Unified Modeling Language, « langage de modélisation unifié ») est un langage graphique de modélisation des données et des traitements. C'est une formalisation très aboutie et non-proprétaire de la modélisation objet utilisée en génie logiciel.

qu'est supposé faire le code (ce qui est nettement plus compliqué). » - Ivar Jacobson, Grady Booch, James Rumbaugh¹

A cela l'on peut tout aussi bien citer F.P. Brooks connu dans le monde du génie logiciel pour ses travaux mais aussi souvent pour ses remarques et citations qui sont toujours d'actualité.

« La partie la plus difficile dans la construction d'une application informatique est de définir précisément ce qui est à faire. Il n'y a pas de tâche plus difficile que d'établir le détail des spécifications. Par ailleurs, aucune autre partie n'a une incidence aussi préjudiciable lorsqu'elle est faite incorrectement. Aucune autre partie n'est plus difficile à rectifier ultérieurement. » (Frederick P. Brooks, 1986)

Ainsi, en parlant de son livre (Frederick P. Brooks, 1975, 1995) "The Mythical Man-Month",

"The Bible of Software Engineering" because everybody reads it but nobody does anything about it!

ironiquement, il le qualifie de "Bible dans le domaine du génie logiciel" de par le fait qu'il soit lu, mais que personne n'en prenne vraiment note. Il soulève ainsi les problématiques liées aux premiers choix liés à un projet, soulevées il y a de cela des décennies, mais qui sont toujours rencontrées de nos jours.

A cela, je citerai aussi les normes qui ont été publiées par l'AFNOR concernant l'analyse fonctionnelle et l'analyse de la valeur (Yannou, 1998) :

NF X 50-150 : Guide pour l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel (AFNOR, 1984)

NF X 50-151 : Analyse de la valeur (AFNOR, 1991)

FD X 50-101 : L'analyse fonctionnelle, Outil interdisciplinaire de compétitivité (AFNOR, 1995)

NF X 50-100 : Analyse Fonctionnelle - Caractéristiques fondamentales (AFNOR, 1996)

Le besoin (qu'il soit exprimé, suscité, latent ou exigé) dans une des normes ci-dessus (AFNOR, 1984), est défini comme suit:

Le besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par un utilisateur.

Son analyse et sa caractérisation, sont non seulement les premières étapes dans la vie d'un projet mais font aussi ressortir, les « prestations client » qui seront traduites et déclinées en exigences fonctionnelles au niveau de l'industriel.

2. Expression et analyse du besoin

Habituellement lorsque l'on parle d'expression et analyse du besoin, dans le domaine de la conception mécanique, on se réfère souvent à l'outil graphique "Bête à Cornes". Celui-ci permet d'explicitier ce qui justifie le développement du Produit au travers des trois questions suivantes :

- À qui le "Produit" rend-il service ?
- Sur quoi le "Produit" agit-il ?
- Dans quel but le "Produit" existe-t-il?

¹ Grady Booch, James Rumbaugh et Ivar Jacobson, dont les travaux ayant respectivement abouti aux langages de modélisation objet Booch, OMT, OOSE, sont les pères du langage UML, résultant de la fusion de leurs recherches.

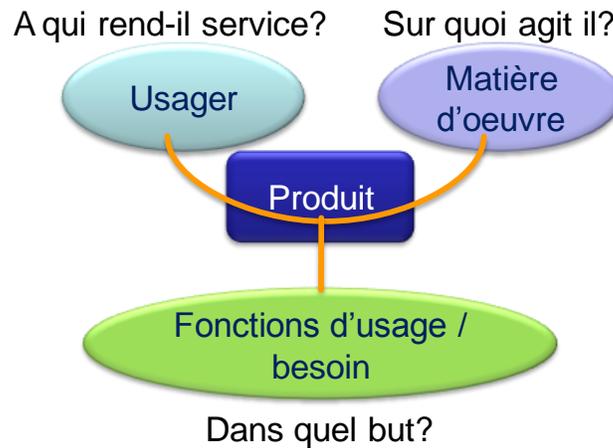


Fig. 33 : Bête à Cornes

A cette étape il faut aussi rajouter celle de validation du besoin et durant laquelle il faut se poser les questions concernant la validité du système par rapport à l'environnement dans lequel il s'insère et par rapport aussi à sa pérennité, d'un point de vue économique par exemple.

- Pourquoi le besoin existe-t-il ?
- Qu'est ce qui pourrait faire évoluer le besoin ?
- Qu'est ce qui pourrait faire disparaître le besoin ?

Cette première étape est complétée par une quantification des critères validant la satisfaction du client ce qui aboutit à la spécification des prestations à atteindre.



Fig. 34 : Du besoin vers le Produit final

La suite du processus d'analyse fonctionnelle va suivre une approche « Top-Down » et aboutir aux exigences de haut niveau qui seront répertoriées dans le CdCF.

3. *Création du Cahier des Charges Fonctionnel*

Une fois, le besoin clairement défini et validé il faut, au travers de l'analyse fonctionnelle (AFNOR NF X 50-151), rechercher, ordonner, détailler, hiérarchiser et valoriser les fonctions du produit, attendues par l'utilisateur.

Ainsi avant d'aboutir à la création d'un Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF) cette méthodologie est découpée en cinq macro-étapes:

- Définition du profil de vie du Produit

Il s'agit de définir l'environnement selon toutes les phases du cycle de vie du produit et cela non seulement lors de l'utilisation pour laquelle il est prévu, mais en incluant aussi la conception (produit/process), la fabrication, les étapes logistiques, le montage, l'utilisation client dégradée, la maintenance, tout comme son retrait de service (récupération, destruction, recyclage...).

Ainsi lors de chaque phase l'ensemble des éléments avec lequel le produit peut interagir doit être listé afin de pouvoir spécifier dans les étapes suivantes, décrire les fonctions/interactions associées.

- Recherche, définition et ordonnancement des fonctions

Pour chaque phase de vie il faut rechercher de manière exhaustive les relations du produit avec son environnement, ce qui se traduit par la spécification des différentes fonctions de service (déclinées en fonctions principales FP et contraintes FC) et que l'on peut représenter sous forme graphique par un diagramme pieuvre.

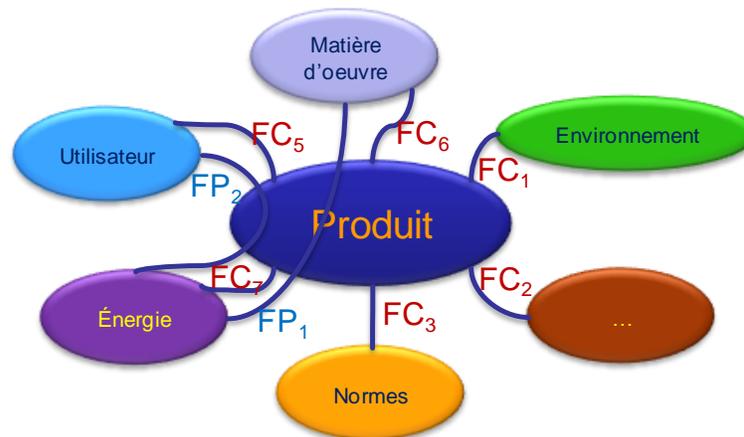


Fig. 35 : Diagramme Pieuvre

- Caractérisation et quantification des fonctions

Pour l'ensemble des fonctions de services, il faut définir les critères qui permettront de déterminer les fonctions techniques associées. Pour ce faire, il faut principalement définir les critères d'appréciation (manière dont la fonction est remplie), le niveau et la flexibilité associés au critère, mais suivant la politique de l'entreprise on peut aussi trouver d'autres critères à renseigner comme le taux d'échange par exemple (rapport acceptable entre les variations de niveaux de deux critères d'appréciation).

- Hiérarchisation des fonctions

Afin de pouvoir avoir une vue d'ensemble des fonctions sur lesquelles il faudra surtout se concentrer, il faut pouvoir les hiérarchiser et leur attribuer des coefficients ou bien les comparer entre-elles au travers de qualificatifs simples (plus important / moins important que).

Intégration du contexte de travail de l'industriel

Une étape qui est effectuée de manière quasi-automatique, c'est le découpage du système comme cela pourrait être effectué dans le domaine du génie logiciel :

- soit en fonctions de haut niveau à décomposer (définissant l'architecture fonctionnelle du système),
- soit en paquets fonctionnels, chaque « paquet » étant un groupement de fonctions et qui seront gérées par le même sous système au final.

1. Définition et/ou découpage en Macro-Fonctions

La première façon d'aborder la structuration et la décomposition du système c'est de repartir directement des « fonctions de haut niveau » associées au système étudié, précédemment déclarées au niveau du CdCF. Cela permet de poser la structure à laquelle devront se raccrocher toutes les informations qui seront déclarées par la suite.

En effet, ces « Fonctions de Haut Niveau » devront être remplies par la solution finale, et pour ce faire, elles seront décomposées en sous fonctions et cela jusqu'à la définition des fonctions élémentaires, tout au long du processus de conception.

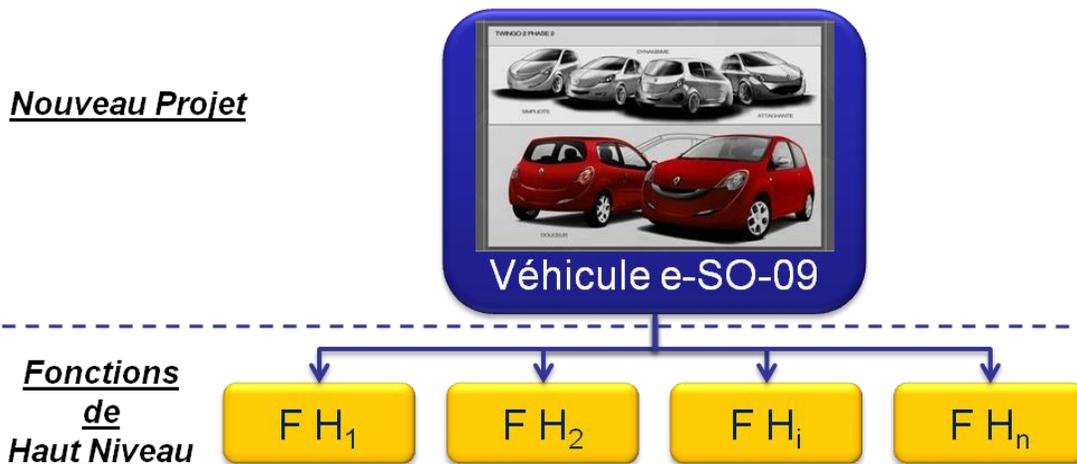


Fig. 36 : Décomposition/ Structuration du projet en Fonctions de Haut-Niveau

Par exemple, ayant entre-autres comme « Fonctions de Haut Niveau » :

- FH_1 : Permettre aux utilisateurs de se déplacer.
- FH_2 : Utiliser les énergies renouvelables / propres.
- FH_i : [...]
- FH_n : Respecter les réglementations.

2. Définition des Groupes Fonctionnels

La seconde manière d'organiser « fonctionnellement » un projet, c'est de procéder comme cela est fait dans le domaine des Systèmes d'Information où l'on parle souvent « d'Urbanisme »¹ découpant la solution informatique à mettre en place en :

- Zones,
- Quartiers,
- Ilots
- et finalement blocs fonctionnels.

Dans le domaine de la conception mécanique, la transposition la plus appropriée de cette notion, pourrait se rapprocher du découpage en Macro-« Zones d'Architecture » (chez Renault la notion de Systèmes est aussi rajoutée).

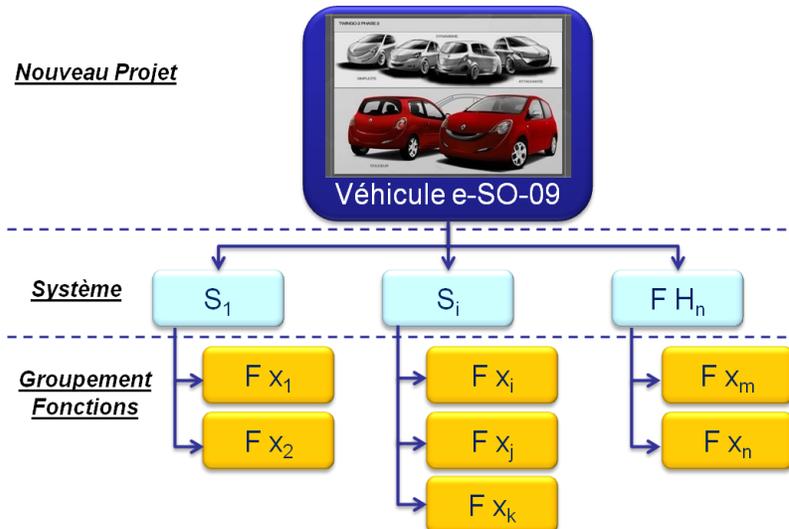


Fig. 37 : Décomposition du projet en systèmes regroupant des fonctions à réaliser

Par exemple, si l'on décide de travailler en regroupant les fonctions nous pourrions avoir :

- S₁ : Générateur de puissance.
 - Fx₁ : Utiliser les énergies renouvelables / propres pour charger les batteries.
 - Fx₂ : Transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.
 - Fx₃ : Récupérer & stocker l'énergie électrique
 - Fx₄ : Transformer l'énergie mécanique en énergie électrique lors des freinages
 - [...]
- S₂ : Transmission de Puissance.
 - Fx_j : [...]

¹ Dans le domaine des SI on utilise le terme d'Urbanisme par analogie à l'aménagement territorial des villes (ou zones urbaines).

Toutefois, ce qu'il faut souligner c'est le fait que, dans cette seconde option d'organisation fonctionnelle, les regroupements de fonctions font intervenir des fonctions d'un niveau inférieur : les « fonctions techniques ». Par conséquent il faut quand même avoir recours à un minimum de décomposition des « Fonctions de Haut Niveau », afin de pouvoir travailler selon cette architecture fonctionnelle.

La recherche des solutions

Ainsi, que l'on choisisse l'organisation en « Groupe de Fonctions » ou la décomposition des « Fonctions de Haut Niveau » jusqu'aux fonctions élémentaires, nous sommes obligés de passer par une étape de recherche de solutions techniques permettant de répondre au besoin formulé par le client et qui est défini de manière normalisée au sein du CdCF.

Comme je l'ai précisé en introduction de cette partie, l'AFNOR a mis en place, au travers la norme NFX 50-150, le contenu ainsi que le vocabulaire associé à l'élaboration du CdCF et au travers de la NFX 50-151, la notion d'analyse fonctionnelle du besoin. Directement en lien avec le processus de recherche de solutions techniques, je reprendrai en tant qu'introduction un extrait de la NFX 50-151 :

"La démarche de conception, pour être rationnelle et efficace, commence toujours par une formulation exhaustive et aussi claire que possible de ce besoin. L'énoncé du besoin sous une forme fonctionnelle, c'est à dire en termes de finalités, sans référence aux solutions techniques susceptibles d'y répondre, préserve toutes les chances d'émergence de l'innovation au moment de sa conception. Cette formulation constitue l'expression fonctionnelle du besoin" (NFX 50-151).

Cela permet "de parvenir à une meilleure optimisation du couple besoin-solution en matière de coût, sans mettre en cause les performances attendues" (NFX 50-151). Toutefois comme nous pourrons le voir par la suite, le CdCF dans un environnement numérique, et notamment intégrant la CAO, doit être enrichi voire modifié afin d'intégrer des éléments de l'environnement numérique, en plus de la description fonctionnelle traditionnelle.

Après avoir bien ciblé le besoin et l'avoir spécifié de façon claire, on passe à l'analyse fonctionnelle technique interne qui va étudier les manières dont une solution va répondre au besoin spécifié.

Plusieurs processus existent, mais j'en ai retenu deux qui vont montrer deux approches ayant des objectifs légèrement différents : le diagramme FAST (Functional Analysis System Technique) et le Schéma de Flux (ou Bloc Diagramme Fonctionnel).

1. Décomposition des Fonctions De Haut Niveau

Le diagramme FAST part de la définition des fonctions à assurer décrites par l'AFB qui la précède et les décompose en sous-fonctions de plus en plus élémentaires et précises pour arriver jusqu'aux composants du produit.

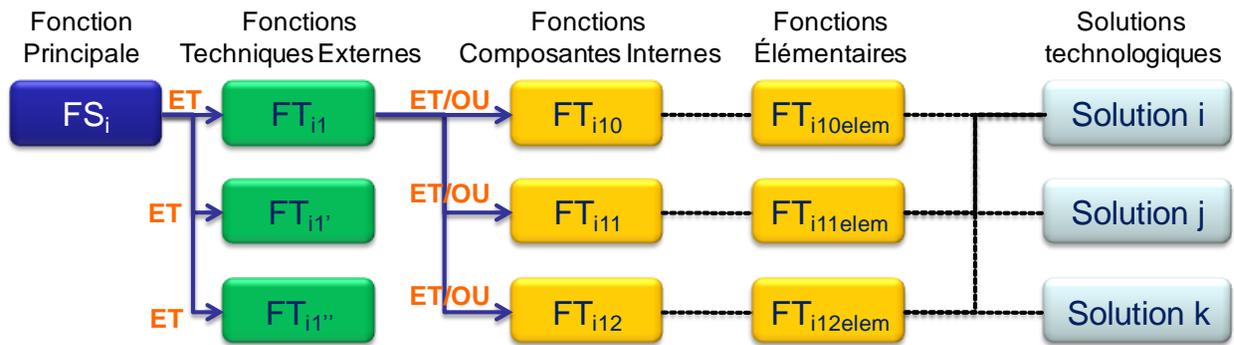


Fig. 38 : Diagramme FAST

Le processus, associé à la recherche et à la spécification des solutions, est un enchaînement logique dont les nœuds sont des conditions ET ou OU, la décomposition des fonctions en sous-fonctions composantes jusqu'aux fonctions élémentaires en posant trois questions :

- Pourquoi, dans quel but ? (la fonction la précédant dans l'arbre doit-elle être assurée?)
- Comment ? comment est remplie cette fonction? (par les fonctions situées à droite)
- Quand ? (traduite par la lecture verticale d'un nœud dans le cas d'une simultanéité)

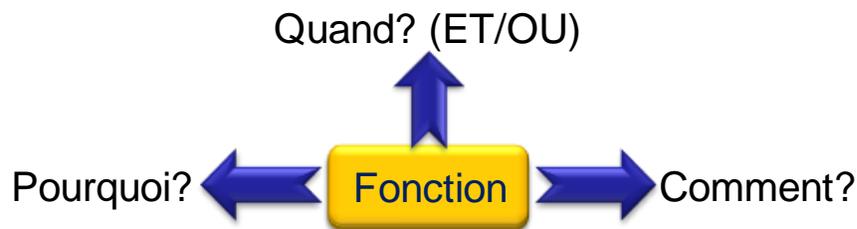


Fig. 39 : Questions liées au diagramme FAST

Cette méthodologie descendante a pour but de présenter toutes les solutions qui peuvent répondre à la fonction dont ils découlent afin de pouvoir les comparer et finalement choisir celle qui sera incorporée au système étudié. Ce vers quoi on tend au bout du processus, c'est un découpage en sous-systèmes élémentaire (composants élémentaires) qui sont reliés entre eux par les fonctions techniques élémentaires.

En revenant sur les deux choix d'organisation présentés, je ferai remarquer que le diagramme FAST se calque très bien sur l'organisation décomposant les fonctions de haut niveau, mais il faut aussi soulever le fait que la simple décomposition en Fonctions Techniques permet aussi d'adopter le choix par regroupement des fonctions.

Remarque

2. Décomposition du Système

En ce qui concerne le Schéma de Flux, l'approche est sensiblement différente puisqu'il consiste à analyser la constitution, l'organisation et le fonctionnement d'une solution choisie et

existante afin de répondre aux fonctions de service spécifiées par l'AFB. Ainsi, lors de la re-conception ou de l'intégration d'un élément existant dans un nouvel environnement, cela permet de comparer les solutions aux besoins en termes de satisfaction par rapport aux attendus et de proposer des idées d'amélioration.

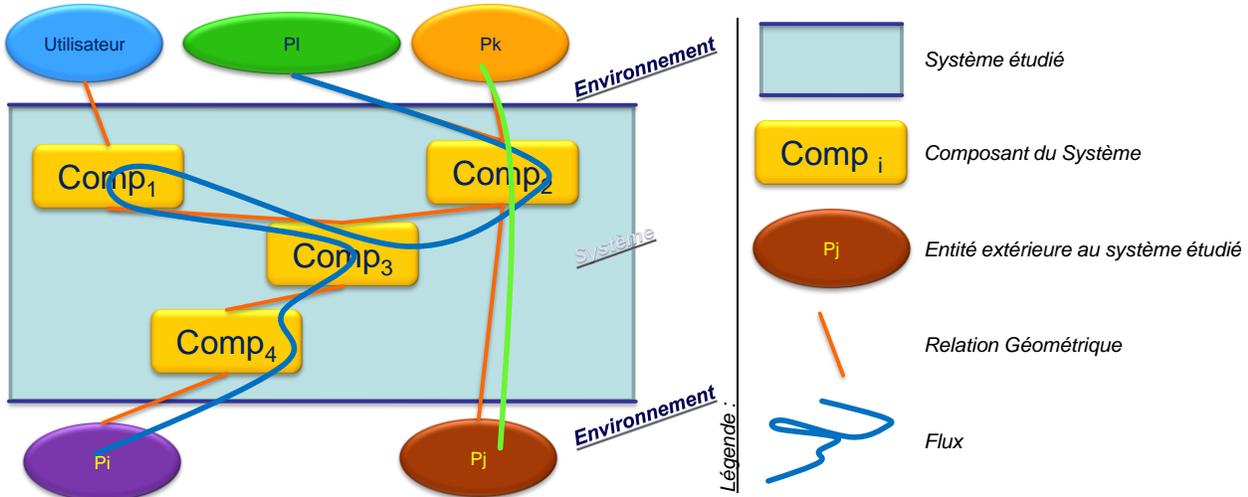


Fig. 40 : Schéma de Flux

Cette représentation permet ainsi de schématiser toutes les relations entre les composants de la solution étudiée (les rectangles) ou avec le milieu extérieur (les ovales). Pour y parvenir on spécifie au travers de traits droits (orange) les relations géométriques¹ qu'il peut exister entre les différentes entités, tout comme les flux² et leur parcours à travers le système étudié.

3. Capitalisation des informations relatives aux solutions techniques

Pendant si l'on veut décrire les relations à un niveau inférieur à celui du graphe des contacts, le bloc diagramme fonctionnel ne suffit plus et il faut se pencher sur l'utilisation de graphes comme ceux qui ont été présentés dans le chapitre 2, et qui intègrent une définition des composants plus précise, allant jusqu'à la définition des surfaces fonctionnelles et les liens qui doivent exister entre celles-ci.

De manière similaire qu'au travers d'une représentation de type SADT, où il est possible d'avoir une vision macro A0 puis une vision détaillée A1, il nous semble intéressant d'avoir des représentations multi-niveaux associées à l'utilisation d'outils type bloc diagramme.

D'un côté le bloc diagramme peut convenir durant les premières phases de conception, mais par la suite il faut pouvoir avoir une représentation plus détaillée des composants et des relations qui les lient.

Remarque

Ainsi une fois que les études techniques sont effectuées, "l'outil" utilisé à la DIM (Direction Ingénierie Mécanique) pour capitaliser l'ensemble des informations est le Tableau d'Analyse

¹ On en distingue trois types : contact, non contact, intermittent.

² Une fonction de service peut avoir recours à un ou plusieurs flux reliant deux entités extérieures au système. Ces flux peuvent être de deux types : dits de service et qui sont issus de l'AFB et ceux de conception et qui assurent l'organisation interne des composants.

Fonctionnelle Technique (TAFT (Dufailly & Poss, n.d.)). Il reprend pour chaque composant et interface par interface :

- La description des Fonctions Techniques Élémentaires (FTE)
- Les spécifications des éléments géométriques en jeu
- Les sollicitations auxquelles est soumis le composant
- Les critères qui devront être remplis afin de valider la FTE concernée
- Les informations relatives à l'AMDEC
- Les spécifications (GPS) associées aux surfaces fonctionnelles concernées

Éléments en contact				Liaisons - Surfaces				Sollicitations		Critères d'acceptations			Risques				Caractéristiques des surfaces		
Fonctions techniques élémentaires	Composant 2	Complément	Remarques complémentaires	Surf. 1	Surf. 2	Surf. 3	G F	Quoi	Combien	Quoi	Combien	Comment	Modes de Défaillance	Rep. ECR	Libellé de l'ECR	Classe	Quoi	HCP	
CARTER CYLINDRES - 8200326546 Support Bague Etanche																			
Face accouplement xxx - Section zzz - PLx																			
POSITIONNE	SUPPORT BAGUE ETANCHE	axialement par la face	Plan d'appui Réf xxxx	PL															

Tableau. 4 : Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique Renault (TAFT)¹

Comme on peut le voir, la notion de cotation fonctionnelle est incluse dans la notion du TAFT puisqu'on trouve, associé à chaque FTE, des spécifications qui existeront sur le plan de cotation final de la pièce étudiée.

Ainsi en utilisant ces méthodologies, largement rependues et utilisées par les industriels, il serait possible d'avoir une analyse fonctionnelle complète et qui semble plutôt aisée à mettre en place au premier abord. Toutefois, étant donné que les systèmes étudiés sont assez complexes, l'analyse au travers de ces méthodes peut rapidement se compliquer et ne pas répondre et/ou correspondre à tous les besoins des équipes travaillant sur le sujet.

¹ Pour plus d'informations sur le TAFT que l'on trouve dans PROCAR, mais dont la documentation n'est pas libre d'accès, il est possible de se référer à l'article présenté par F. Charpentier (Charpentier et al., 2007) détaillant l'intérêt du TAFT.

Problème de structure lié au processus de déploiement des prestations

Constats

Dans un premier temps, j'ai tenté de trouver des informations sur l'analyse fonctionnelle de manière plus globale dans le milieu industriel ainsi que sur son impact sur la réussite d'un projet. Le but étant de ne pas seulement baser les constats qui seront avancés en ne prenant que le cas d'un petit échantillon qui pourrait ne pas être représentatif.

Malheureusement, je n'ai trouvé qu'une seule étude de ce type, regroupant un nombre important d'industriels: celle du Standish Group¹ (The Standish Group, n.d.) étudiant aux États Unis les causes d'échec des projets informatiques. Or que l'on soit dans le cadre de conception de systèmes mécaniques ou de solutions informatiques, l'analyse du besoin et la gestion des exigences en découlant, sont des problématiques communes, durant les premières phases de l'étude.

Les causes pointées par cette étude, ne sont pas une découverte en soi, mais le constat donne un aperçu chiffré de l'impact, notamment du manque de description claire, détaillée et réaliste des exigences, par rapport au besoin réel, sur la réussite du projet.

*The most important aspect of the research is discovering why projects fail. To do this, The Standish Group surveyed IT executive managers for their opinions about why projects succeed. **The three major reasons that a project will succeed are user involvement, executive management support, and a clear statement of requirements.** There are other success criteria, but with these three elements in place, the chances of success are much greater. Without them, chance of failure increases dramatically. (Extrait du Rapport CHAOS)*

N'allant pas jusqu'aux chiffres assez alarmistes avancés par le Standish Group (31,1 % de projets annulés, 52,7 % de projets aboutis mais hors budget ou hors délais, 16,2 % de projets réussis) ce que je voudrais souligner, c'est le fait qu'avant d'imposer une solution ou bien une méthode existante, il faut plutôt se pencher sur la structure permettant d'analyser le besoin et d'avoir une traçabilité de l'ensemble des choix effectués.

En reprenant tout le processus théorique à partir de zéro, et en essayant de schématiser les entrées et les sorties, j'ai listé quelques remarques qui décrivent le processus actuel :

- le processus fonctionnel transforme des entrées (les prestations) en informations devant être intégrées dans la maquette numérique.
- les données auxquelles il faut aboutir, sont exprimées dans un format bien précis imposé par l'environnement dans lequel l'industriel travaille et présentées de façon structurée.
- le processus devra donc au minimum comporter :
 - une étape de recueil des prestations client.
 - une étape de formalisation des prestations ainsi qu'une étape structurant celles ci selon les contraintes et autres processus propres à l'entreprise.
 - des ponts sous la forme de représentations partagées par les deux mondes : celui de

¹ Ce rapport est mis à jour assez régulièrement et les derniers chiffres auxquels j'ai eu accès (un résumé d'une vingtaine de pages datant de 2000), n'ont changé que sensiblement par rapport à 1994, les proportions restant quasi identiques.

la représentation fonctionnelle et celui de la maquette numérique.

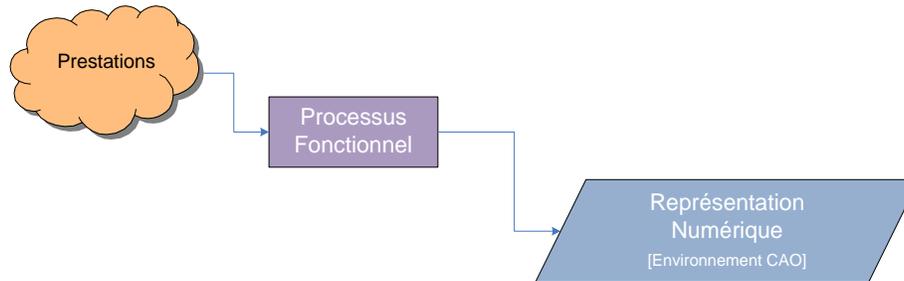


Fig. 41 : Entrées et sorties du processus fonctionnel

En se penchant sur le processus tel qu’il est mis en place chez Renault, j’ai relevé plusieurs points qui font qu’il n’est pas optimisé. Tout d’abord, la continuité numérique et la passation de l’information, sont des étapes qui, faute d’avoir les méthodologies et les outils, continuent à se faire par l’intermédiaire d’une personne retranscrivant les informations d’un environnement à un autre.

Ainsi le processus actuel est séquentiel et reprend les “ outils ” présentés précédemment et dont le résultat final est capitalisé sous la forme du TAFT. Or en travaillant avec des outils et des formats qui ne permettent pas de communiquer et partager les informations qu’ils renferment la traçabilité de l’information sera très difficile voire impossible. Jalonner un projet et fournir des livrables à un instant T permet certes d’avoir un processus globalement cohérent mais il implique beaucoup d’étapes séquentielles et rallonge les cycles de développement.

Toutefois ce qu’il faut aussi faire remarquer, c’est le fait que le jalonnement actuel a énormément été développé pour gérer la maquette numérique, alors que le point de vue fonctionnel n’a pas suivi les mêmes avancées, ou tout du moins n’est pas au même stade d’avancement. Or, c’est sur ce dernier qu’il faudrait axer les recherches afin d’optimiser les premiers jalons numériques qui sont directement liés à la définition fonctionnelle de laquelle la MN découle.

Étant donné que les informations fonctionnelles ne sont pas encore liées à la représentation numérique associée, leur validation est non seulement longue, mais aussi très difficile de par le fait que les automatisations sont quasi-impossibles et qu’il faille réintégrer, dans l’outil de calcul / validation, toutes les informations à la main.

Pour illustrer ce constat je vais prendre plusieurs exemples :

- sur un carter-cylindres il y a plusieurs milliers des chaînes de cotes et il faut récupérer manuellement les informations d’une part à partir du TAFT (format XLS) et d’autre part à partir des modélisations 3D (format associé au modeleur de l’entreprise).
- en ce qui concerne la validation de la solution proposée par un fournisseur (modélisation géométrique, plans 2D cotés, documents bureautiques annexes) en réponse à un cahier des charges (format bureautique) le problème est le même puisqu’il faut encore retravailler ces données et les réintégrer dans le bon environnement à la main et retranscrire toutes les informations afin de lancer les vérifications & validations.
- retrouver le cheminement intellectuel ayant amené une solution technique est une chose difficile, puisqu’il n’y a pas de lien direct entre l’information incluse dans le TAFT et les documents d’analyse qui l’ont précédé et desquels l’information recherchée en découle. [...]

Solutions informatisées existantes

A ce stade, le premier réflexe a été de me pencher sur les solutions en termes de méthodologies d'analyse fonctionnelle tout comme en termes d'outils, et à l'heure actuelle, à ma connaissance deux solutions informatiques seulement offrent un processus couvrant la majorité des étapes décrites et de façon structurée : GAIA (développé par le CIMPA/EADS et actuellement en évaluation chez Renault) et TDC Need & Structure (Knowllence). La troisième solution sera dans un avenir assez proche (2010) le processus RFLP (Dassault Systèmes) intégré à CATIA V6.

Globalement en comparant les solutions proposées par EADS et Knowllence, je me suis rendu compte que les deux produits étaient complémentaires, l'un ayant ses points forts là où la solution concurrente a du mal à convaincre par la solution informatique proposée.

1. GAIA (cf. chapitre 2)

Récapitulatif des points forts :

- Modélisation de l'environnement
- Identification, spécification et hiérarchisation des fonctions de service
- Description des solutions techniques au travers d'une représentation de type VISIO¹
- Lien et Export possible vers le modèleur CAO au travers de fichiers XML

GAIA réussit à créer des schémas de principe techniques bien détaillés allant jusqu'aux surfaces fonctionnelles, mais en se basant sur un seul choix puisque la recherche de plusieurs solutions n'est pas intégrée à l'outil.

De même, il faut aussi noter l'absence des vues multi-usages du produit puisqu'il faut refaire une modélisation (nouveau fichier).

Remarque

2. TDC Need & TDC Structure

Récapitulatif des points forts :

- Analyse fonctionnelle complète entre l'analyse du besoin et le TAFT.
- Les informations sont liées et la traçabilité est possible. (Monticolo et al., 2008)
- Fonctionnement sous forme de Base de Données mais il est possible d'exporter les informations de façon structurée et obtenir le CdCF ou des rapports dans un format bureautique pour la communication.

Alors que GALA manque de solution pour bien formaliser les analyses fonctionnelles, la solution TDC propose un processus complet pouvant regarder plusieurs solutions et exporter les résultats de façon structurée dans des formats d'échange bureautique.

Cependant la ou la solution TDC manque de solutions, c'est dans la modélisation du produit en intégrant les solutions technologiques choisies (point fort de GALA).

Remarque

¹ Microsoft Office Visio est un logiciel permettant la création de diagrammes et de synopsis dans un environnement Windows.

3. CATIA V6 (Dassault Systèmes) : découpage RFLP

Ce découpage du processus de conception en 4 macroétapes¹ (Requirements / Functional / Logical / Physical), je l'ai déjà introduit précédemment, en faisant le parallèle avec le monde informatique. Toutefois, quand bien même l'acronyme est identique, il n'en demeure pas moins que le sens associé aux étapes diffère entre les deux domaines d'application. Cela se traduit notamment par une difficulté de modélisation du système, que l'on retrouve au niveau des "ponts" entre les différentes vues R/F/L/P ainsi que dans les problématiques de synchronisation² des informations.

En effet, alors qu'à l'heure actuelle dans le domaine de la conception de solutions informatisées il existe des convertisseurs de modèles conceptuels en « morceaux de code » (JAVA, C++...) dans le domaine de la conception mécanique il n'y a pas encore d'outils permettant l'automatisation de la traduction d'une modélisation conceptuelle en maquette numérique.

Ainsi, à l'heure actuelle ce que l'on peut retrouver au sein des quatre niveaux de modélisation:

- Requirement

Correspond à la spécification et à l'analyse du besoin qui est déjà incorporé à la plateforme Matrixone associé à CATIA V6. A ce jour il s'agit d'une structure Base de Données dans laquelle on peut stocker des informations ou des fichiers, mais ne proposant pas encore d'outil d'analyse du besoin (domaine dans lequel TDC et GAIA sont plus avancés)

- Functional

Correspond à la description fonctionnelle du produit et se présente pour le moment sous la forme de blocs reliés entre eux par des flux.



Fig. 42 : Modélisation "Fonctionnelle" du système

- Logical

Cette vue ressemble à un diagramme de flux tel que je l'ai présenté dans l'introduction de ce chapitre. A ce jour les composants de la vue logique peuvent pointer vers des pièces 3D mais la définition logique ne descend pas jusqu'à la surface fonctionnelle pour le moment.



Fig. 43 : Modélisation "Logique" du système

- Physical

Correspond à la vue géométrique 3D du système étudié dans CATIA.

¹ A ce jour le processus a été publiquement présenté tel quel, mais les développements continuent et les collaborations avec Dassault Systèmes permettront d'intégrer les informations nécessaires à la conception (dans la même optique que GAIA).

² J'y reviendrai plus tard avec la proposition d'une méthodologie de synchronisation entre le niveau L et P.

Bilan

Pour synthétiser, ce que l'on voit à travers ces trois approches c'est d'une part que le besoin est bien réel, mais aussi qu'il diffère d'un point de vue à un autre. La méthodologie TDC s'adresse à ceux qui ont besoin d'un processus pour décrire et capitaliser l'analyse fonctionnelle sans avoir besoin de représenter la partie technique, GAIA axe son offre sur le coté représentation de l'analyse technique en lien avec le monde CAO, alors que l'approche RFLP tente de jouer la carte du tout intégré mais n'en est qu'à ses premières ébauches de processus fonctionnel en lien avec le numérique.

Pour finir, un point qui à mon avis est « majeur », est le niveau de détail auquel il est possible d'avoir accès. Alors que dans GAIA il est possible d'arriver au niveau des surfaces fonctionnelles, d'y apposer manuellement le « tolérancement adéquat », la solution Dassault Systèmes ne permet que d'avoir pour le moment accès qu'à la pièce, la solution TDC se situant entre les deux (va au delà de la pièce mais n'atteint pas le niveau de détail lié au tolérancement).

Domaine	Solution		
	TDC	GAIA	CATIA V6
Analyse du besoin	+++	++	+
Structurer et lier les Fonctions	++	+	+++
Continuité numérique	++	++	+++
Niveau de Détail fonctionnel pouvant être atteint	++	+++	+

Tableau. 5 : Comparaison des trois solutions informatiques existantes

De manière plus globale, le travail effectué jusqu'ici était surtout une préparation des bases à avoir pour la proposition de processus fonctionnel qui suit. J'ai non seulement étudié ce qui se faisait dans le domaine de la conception mécanique, mais aussi dans le domaine du génie logiciel qui a toujours de l'avance en termes de méthodologies & « processus de conception ».

En essayant de prendre le meilleur de chaque méthodologie (ou outil) il a aussi fallu réfléchir à une cohérence entre toutes ces informations, afin d'aboutir au processus (ainsi qu'à une solution informatisée) cible. Toutefois l'apport va au delà de la simple mise à plat puisque la notion de Maquette Fonctionnelle telle que présentée a surtout pour but de permettre la simulation ainsi que la validation du tolérancement et cela dès les premières phases de conception.

Une proposition de processus modifié

Ainsi, ce qui dans notre cas manque à ces approches, c'est surtout le support permettant de lancer des validations et des simulations très tôt dans le cycle de développement produit et de s'inscrire dans un processus plus global de gestion des simulations.

Dans cette partie, j'introduirai la trame de la décomposition du processus fonctionnel déployant les prestations jusqu'à leur validation. Ne perdant pas de vue qu'une formulation mauvaise ou bien incomplète des attentes, risque d'engendrer des désaccords lors de l'évaluation des solutions finales, il faut aussi prendre en compte l'adaptation et la traduction des informations selon les destinataires qui auront à la transformer en solutions techniques.



Fig. 44 : Cycle en V

Dans un processus séquentiel¹, l'ordre global des disciplines d'Ingénierie (Spécification & Déploiement des Prestations, Conception & Développement, Intégration & Validation) est connu et, afin d'obtenir un processus global robuste, chaque étape est jalonnée et produit des livrables qui permettent de passer à l'étape suivante. L'objectif de notre approche est de débiter la validation en parallèle du déploiement des prestations qui a été repensé pour pouvoir y répondre.

Toujours en gardant à l'esprit, l'objectif de processus imposant une continuité numérique entre toutes les étapes composant le processus fonctionnel, j'ai dans un premier temps réfléchi sur les méthodes de décomposition de celui-ci. Comme je l'ai introduit précédemment, les informations fonctionnelles sont formalisées selon l'utilité que l'on veut en faire, et dans notre cas, il n'est pas seulement question de capitalisation de l'analyse fonctionnelle et de représentation des résultats, mais aussi de prise en compte du fait que ces informations doivent être partagées avec la MN.

¹ Que le processus soit en cascade, en V ou bien en W cela ne change rien aux macro-étapes qui les composent.

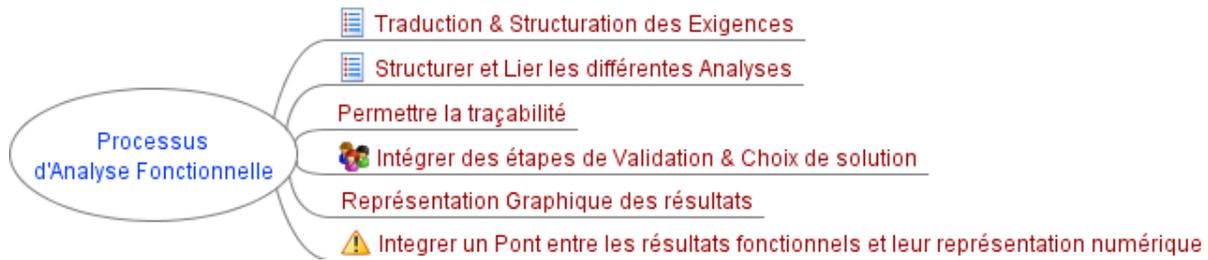


Fig. 45 : Points à intégrer dans le processus d'analyse fonctionnelle

Bien sûr, nous ne partons pas de rien et les processus déjà existants ont été rendus robustes par le nombre d'années. Cependant la question des actions à mener est plutôt compliquée : Doit-on continuer à effectuer des microévolutions, ou doit-on remettre en question le processus actuel, chose qui irait dans le sens de Francis Blanche :

Il vaut mieux penser le changement que changer le pansement (Francis Blanche¹)

mais qui s'oppose à la réalité industrielle qui limite tout changement radical pour des questions économiques et sociales (puisque'il faudrait changer les méthodologies de travail des personnes prenant part au développement). Ce qui a été décidé, c'est de continuer dans la perspective d'une solution innovante, et donc pouvant remettre en cause certains choix existants en termes de processus.

Aperçu global

Nous avons choisi comme point d'entrée de notre "processus fonctionnel" les prestations qui devront être traduites par une solution décrite au travers de la Maquette Numérique, l'ensemble de la démarche étant supporté par le PLM de l'entreprise (et se basant sur les représentations des Maquettes Fonctionnelles et Maquettes Numériques). Toujours afin de prendre en compte l'environnement industriel, le point de vue de l'utilisateur, ainsi que le savoir et l'organisation de l'entreprise, doivent piloter cette démarche et surtout l'adapter au mieux aux besoins du projet à réaliser.

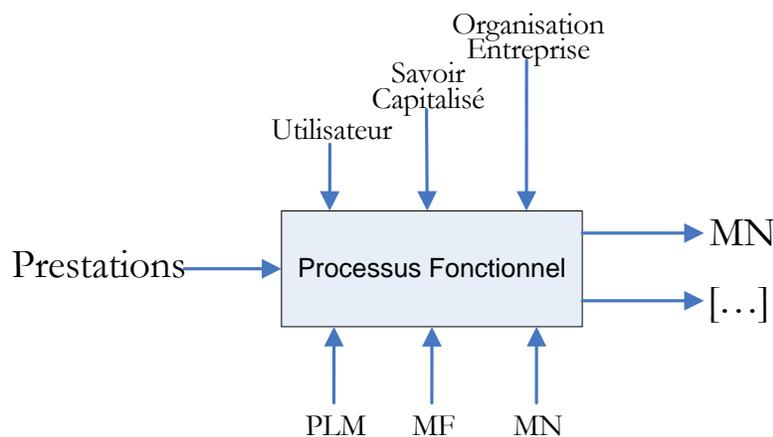


Fig. 46 : Point de départ de la création du découpage du processus fonctionnel

¹ Francis Blanche, 1921 - 1974, était un acteur et humoriste français.

Précédemment, j’ai parlé du V associé au processus global de conception, mais il ne faudrait pas toutefois s’arrêter sur une vue simplifiée, puisqu’il va de soi qu’au final, si l’on détaille étape par étape, l’ensemble du processus, nous retrouverons non pas un V mais une multitude de V (voire des W selon les points de vue, des aller retours pour d’autres etc...).

Ce qui va être détaillé par la suite, c’est le processus descendant associé au “déploiement” des prestations et que j’ai jalonné en 3 Macro-Processus (Fig. 47 -48):

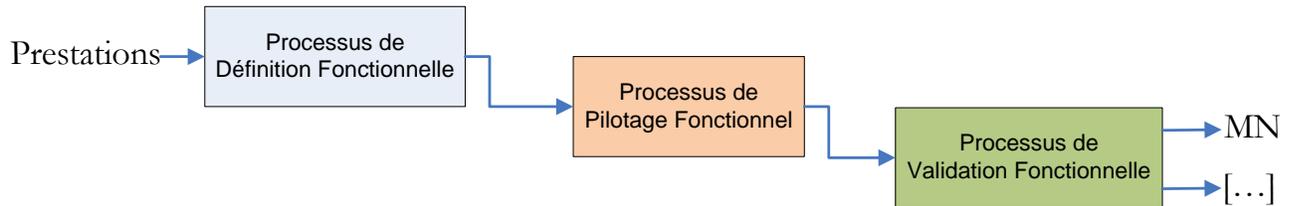


Fig. 47 : Les trois « Macro-Processus Fonctionnels »

- La “ Définition Fonctionnelle ” produisant la MF initiale et que l’on détaillera dans ce chapitre tout au long du processus proposé (RTFAS).
- Le “ Pilotage Fonctionnel ” composé :
 - D’une première étape de création d’une passerelle 3D permettant le pilotage de la MN par la MF (en vue de traduire en 3D ce qui a été spécifié dans la MF).
 - D’une seconde étape de synchronisation et vérification des deux représentations

Cette traduction 3D1 du squelette fonctionnel est non seulement utilisée comme passerelle entre les deux représentations, mais aussi comme support pour les calculs d’analyse de tolérances.

Remarque

- La “ Validation Fonctionnelle ” ayant pour objectif de valider dans un “ environnement numérique ”, les informations fonctionnelles en effectuant des allers-retours entre la MF et la MN (détaillé dans le chapitre suivant).

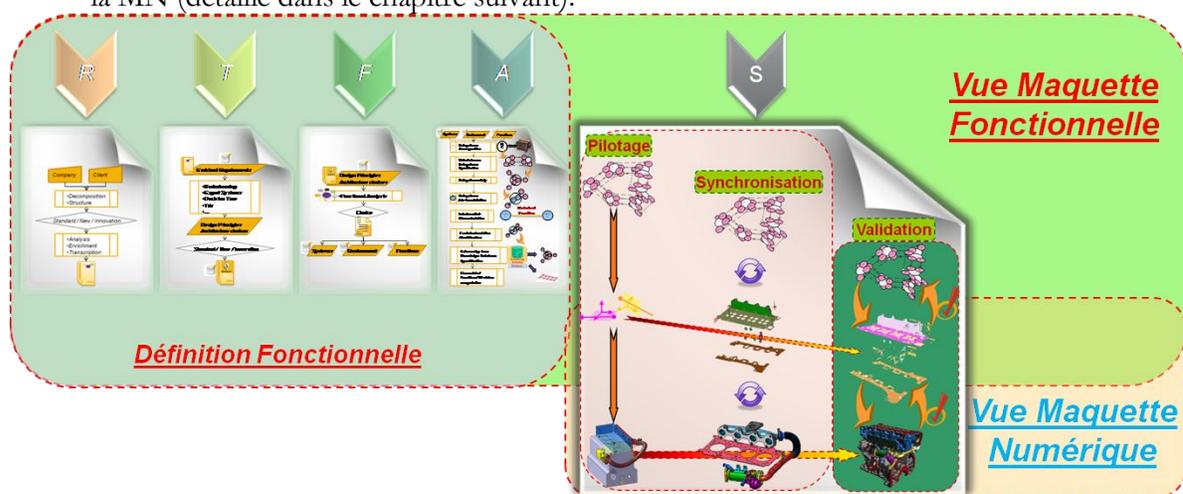


Fig. 48 : Interaction entre le domaine fonctionnel et le numérique

¹ appelée squelette fonctionnel géométrique.

Le découpage fonctionnel proposé

Le processus RTFAS (Fig. 49) se décompose en 5 macro-étapes et couvre non seulement la définition fonctionnelle mais aussi une partie qui est commune à la définition fonctionnelle et à celle numérique du système étudié et servant de pont entre les deux mondes.

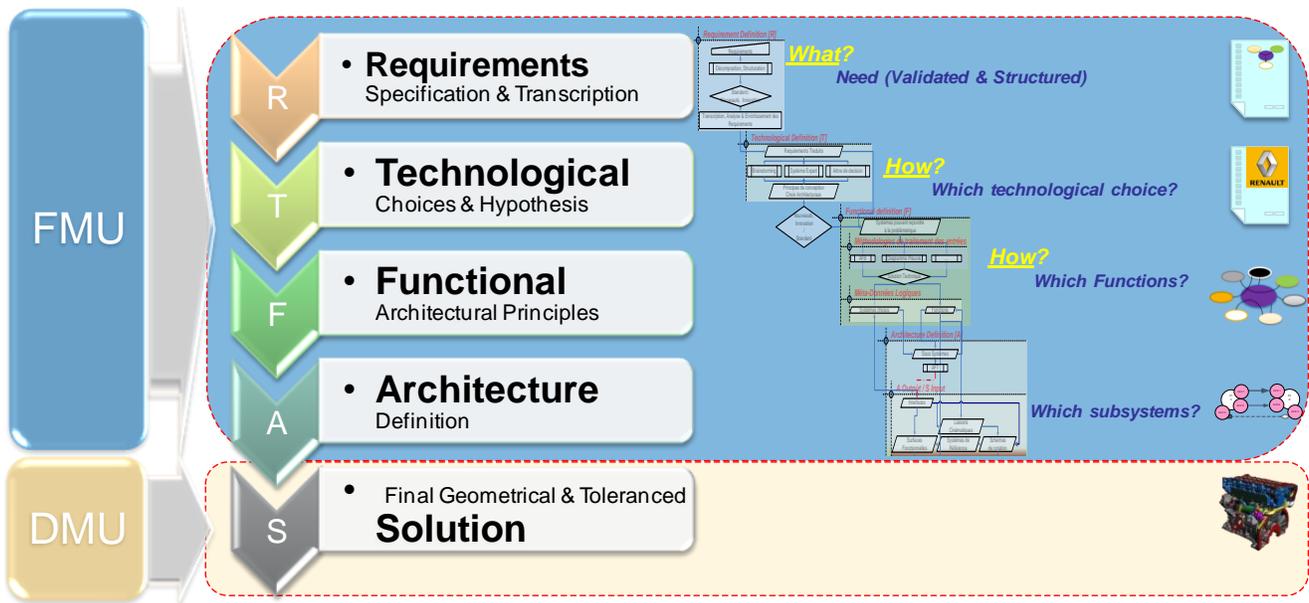


Fig. 49 : Découpage en cinq processus distincts

L'appellation sous forme anglophone RTFAS a été gardée depuis l'acceptation du dernier article pour le CIRP-CAT'09 (Socoliuc et al., 2009) et correspondant à :

- R (Requirements) : Étape traduisant et standardisant les Prestations clients, du marché et de l'entreprise afin qu'elles puissent être facilement reprises et traduites en solutions techniques par la suite.
- T (Technological) : Étape permettant une décomposition et traduction des Prestations selon le découpage produit¹, spécifiant les innovations (ou le carry-over) et figeant les hypothèses technologiques à développer par la suite.
- F (Functional) : Étape définissant les fonctions et sous-fonctions permettant de répondre aux Prestations à travers une analyse fonctionnelle complète.
- A (Architecture) : Étape correspondant à la définition technique des systèmes jusqu'aux surfaces fonctionnelles, intégrant une étape de représentation sous forme de graphes synchronisés à un squelette fonctionnel géométrique dans l'environnement CAO.
- S (Solution) : Étape de définition et validation détaillée dans l'environnement CAO.

¹ Chez Renault il y a un découpage du véhicule en 2 parties : l'Ingénierie Véhicule (ayant à son tour un découpage en 24 sous-parties) et l'Ingénierie Mécanique (découpé en Moteur (9 sous parties) et Boîte (6 sous parties))

Détail de chaque étape composant le processus

1. R (Requirements) : Recenser et structurer les Prestations

La première étape a en charge le recensement des Prestations “ attendues ” associées au nouveau produit et dont les cibles sont le client, l’entreprise tout comme l’environnement dans lequel le produit devra s’insérer. Ainsi le marketing recense au travers d’enquêtes et autres méthodes statistiques les types de population (âge, sexe, pays, catégorie sociale...), l’utilisation qu’ils feront du produit, leurs attentes et pour chaque critère définira son impact sur la réussite, la rentabilité globale du projet ou au contraire le risque d’échec qu’il représente.

Dans le domaine automobile, quand bien même le véhicule proposé par l’entreprise serait une réussite technologique, il n’est pas dit qu’il rencontre une clientèle intéressée, qui verrait dans ce produit une réponse à ses attentes. Proposer un véhicule 4x4 de “ grosse cylindrée ” dans la conjoncture actuelle pourrait aller, non seulement à contrecourant de la tendance des petits véhicules adaptés à un usage urbain, mais ses ventes seraient aussi freinées par les législations qui se durcissent, le marché qui semble saturé et une concurrence qui est déjà en place depuis de nombreuses années.

Faut-il alors continuer à innover et prendre des risques ou se contenter d’être un “ suiveur ”? Cela aussi est un point qui est pris en compte lors du démarrage d’un projet en fonction de la politique de l’entreprise, des solutions et du savoir capitalisés qui sont mis dans la balance face aux besoins des clients.

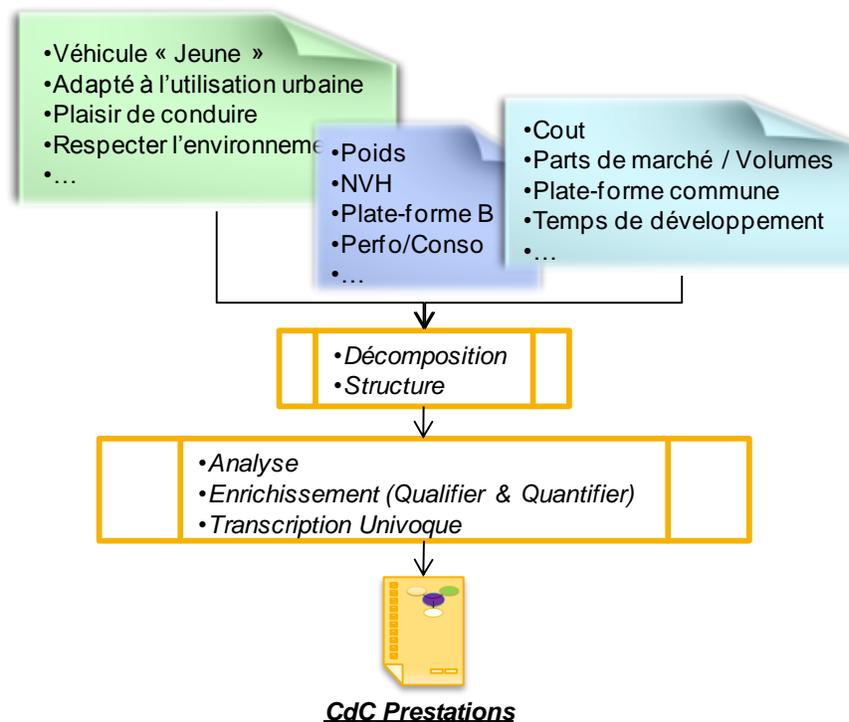


Fig. 50 : Processus de traitement des Prestations

Au travers de ces remarques, j’ai tenté de faire ressortir le caractère subjectif de certaines exigences à partir desquelles le projet est initialisé et qui pour être prises en compte doivent être

retravaillées, analysées et traduites non seulement dans un langage propre à l'industriel. Le second point concerne, quant à lui, l'idée de compromis entre ce que l'entreprise peut déjà proposer et ce qui est demandé par le client.

L'analyse du besoin qui s'en suit, fonctionne comme un filtre et doit permettre de valider ce qui est potentiellement faisable et ce qui ne l'est pas, en essayant de pondérer l'ensemble des prestations afin d'obtenir le meilleur compromis. L'ensemble de ces informations sera retranscrit dans un CdC Prestations dans un langage univoque ne laissant pas de place à l'interprétation dans les étapes qui vont suivre.

2. *T (Technological) : Traduction des Prestations en "paramètres de conception"*

La seconde étape a pour but de définir les scénarios de développement en définissant les innovations à inclure dans le projet et en raffinant les alternatives possibles. Au final elle doit permettre de faire ressortir les choix d'architecture centrale, des choix technologiques figés et les hypothèses qui seront utilisées par la suite.

A ce niveau, soit l'entreprise possède un découpage produit (comme c'est le cas de Renault) qu'elle souhaite réutiliser, soit le découpage produit doit être mis en place. Pour ce faire, comme je l'ai précisé en début de chapitre :

- Soit on choisit d'avoir une organisation descendante, directement liée aux Exigences de Haut Niveau.
- Soit on procède à une « Pré-Analyse Fonctionnelle », afin :
 - D'obtenir des Fonctions de granularité plus petite,
 - De pouvoir continuer l'étude en utilisant les groupements fonctionnels.

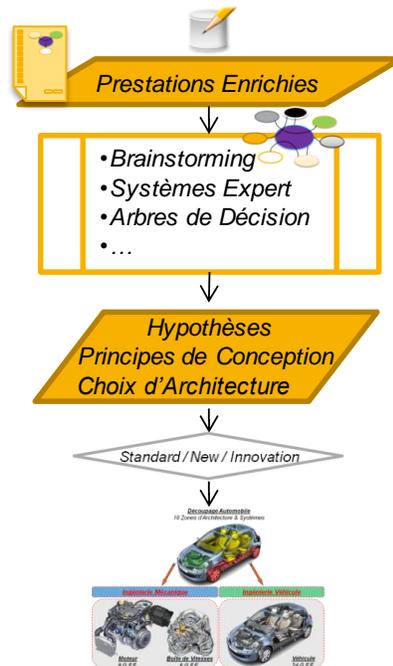


Fig. 51 : Découpage Produit

Dans cette partie, on pourrait certes me reprocher de baser le processus proposé sur des exemples industriels qui globalement relèvent de la conception dite “routinière” et que cela peut faciliter la proposition d’un découpage ou de la structuration des prestations ainsi que leur déclinaison.

Cependant comme je l’ai aussi introduit dans la première partie, au travers d’un exemple pris chez Siemens, ce processus n’interdit pas l’innovation de rupture, qui dans la majorité des cas, s’effectue sur des sous-ensembles plutôt que sur un projet entier.

De plus, dans la majorité des cas où la notion de maquette fonctionnelle pourrait être utilisée (et amener un vrai gain), le processus visant à regrouper par “zones” fonctionnelles un ensemble de systèmes à développer, est souvent effectué tôt dans le processus de conception (ne serait-ce que pour bien définir les équipes projets).

Chez Renault on procède à un découpage en zones d’architectures & systèmes, et l’étude qui s’en suit se fait zone par zone. Ainsi pour chaque zone, nous retrouvons regroupés un certain nombre de G.F.E. (Groupes Fonctions Élémentaires¹) auxquels il faut rajouter les Fonctions Client². Si je ne précise aucun nombre, c’est pour la simple raison que celui-ci peut évoluer en fonction du projet véhicule, mais par contre ce nombre est fixe tout au long de la vie du produit.

Dès lors, les équipes ont à définir les scénarios industriels (en respectant le périmètre qui leur est imposé) et devront préciser si l’on doit fait appel à du Carry-Over, si le système sera développé en interne ou bien s’il devra être acheté.

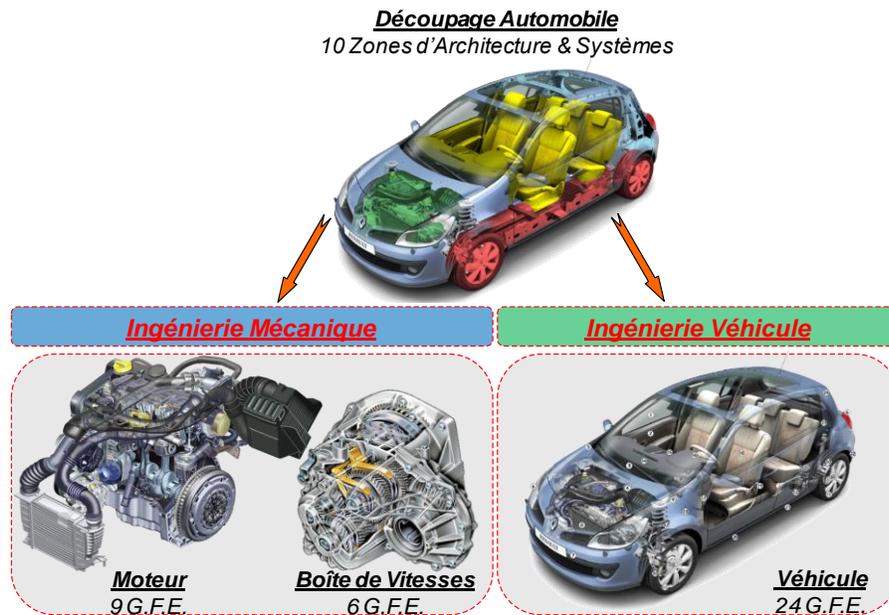


Fig. 52 : Exemple de décomposition d’un projet véhicule en Groupes Fonctions Élémentaires

Cependant, pour chaque nouvel véhicule, ce découpage doit être mis à jour ou tout du moins il faut vérifier qu’il correspond bien au projet qui est lancé (ex : dans le cas d’un véhicule électrique, tout ce qui concerne le circuit de carburant n’a plus lieu d’être et doit être remplacé par un « réseau

¹ Exemples de G.F.E. : Planche de bord, Direction, Transmission, Boite de vitesse, Haut moteur...

² Exemples de Fonctions Client : Acoustique, Ergonomie, Corrosion, Performances...

électrique »). L'étape qui suit doit permettre la déclinaison et la transcription :

- de l'ensemble des prestations précédemment créées (notées R_X dans la Fig. 53),
- niveau par niveau (dans le cas de Renault il s'agirait par exemple d'une prestation notée R_{XM} si elle a un impact sur la partie Moteur),
- au niveau des G.F.E. que R_{XM} impacterait (ou auxquels R_{XM} serait liée).

Toutefois, il ne faut pas oublier que dans l'étape précédente pouvaient cohabiter des données subjectives et d'autres qui étaient quantifiables et visant directement un/des G.F.E..

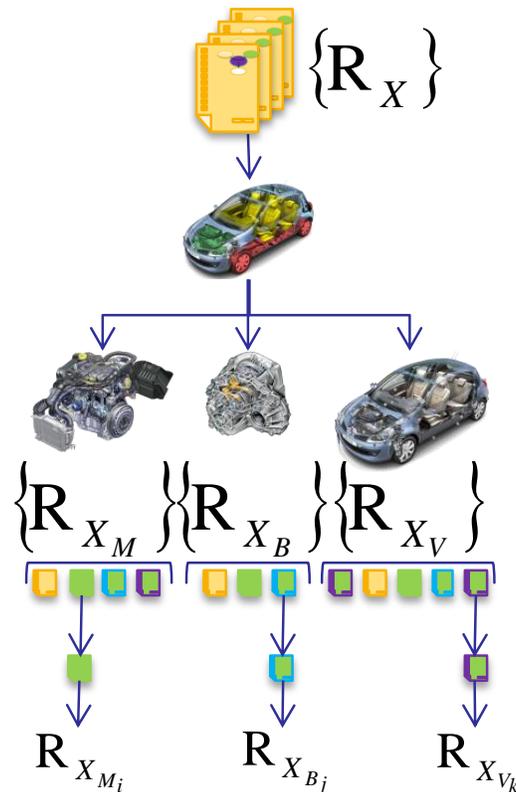


Fig. 53 : Déclinaison descendante des prestations

Le processus proposé, afin de s'affranchir de toute information subjective lors de la conception, se rapproche de ce que l'on rencontre dans la littérature sous l'appellation d'ingénierie Kansei (Mitsuo, 2008), et décline chaque prestation attendue selon les zones et les systèmes impactés pour au final les traduire en variables de conception associées aux G.F.E..

L'Ingénierie Kansei (japonais:感性工学 Kansei kougaku, l'ingénierie des sens), inventée dans les années 1970 par le Professeur Mitsuo Nagamachi (Doyen de l'Université internationale d'Hiroshima), est une méthode ayant pour but la traduction des sentiments et des impressions en paramètres produit. L'Ingénierie Kansei peut "mesurer" et montrer la relation qu'il peut exister entre les sentiments et certaines propriétés des produits et permettrait de concevoir ainsi de manière à faire ressortir ces mêmes sentiments une fois le produit commercialisé.

Toujours dans le domaine du Kansei et du déploiement des prestations “affectives”, les études effectuées par Childs (Childs et al., 2006) présentent non seulement les itérations entre les différentes étapes d’analyse du besoin, de conception et validation mais ce qui a particulièrement attiré mon attention c’est un des résultats de leur sondage concernant le découpage du processus de conception. Il en ressort que ce qui varie d’une entreprise à une autre c’est non pas le contenu mais le regroupement des différentes étapes et la durée qui leur est allouée.

Pour synthétiser la démarche proposée, il faut voir ce processus comme étant dans un premier temps uniquement descendant (ou suivant une arborescence dont les nœuds correspondent à un niveau de définition ou de décomposition du projet associé). Nous partons ainsi d’un ensemble de prestations, recueillis selon les méthodes propres de l’entreprise, et nous déclinons chaque élément appartenant à cet ensemble selon les domaines impactés (ou qui peuvent l’être). De la même manière que l’on peut structurer une maquette numérique au sein d’un PDM¹, il faut mettre en place une structuration des informations relatives aux prestations et aux exigences fonctionnelles.

3. *F (Functional) : Définition des fonctions produit*

Cette étape quant à elle vise à définir, pour tout élément constituant le découpage précédemment introduit, le système et les interactions qu’il a avec l’environnement dans lequel il se trouve. Cela permet de structurer et avoir une traçabilité de l’information avant de passer à la recherche de solutions techniques dans l’étape de définition de l’architecture.

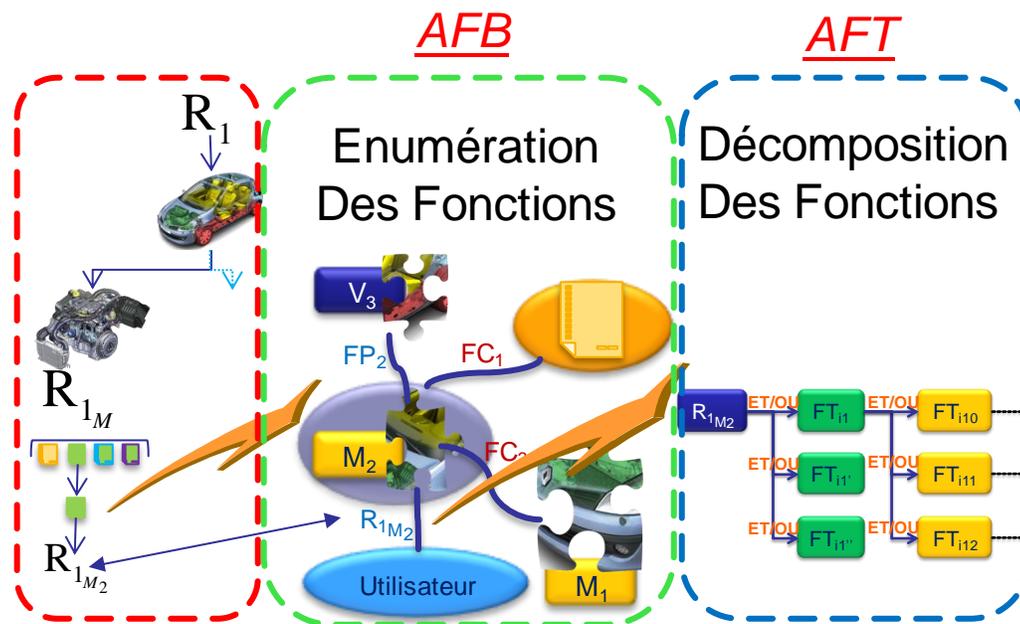


Fig. 54 : Précisions sur l’analyse et la décomposition des fonctions principales

¹Acronyme anglais (Product Data Management) faisant référence à l’ensemble des outils informatiques composant le système de gestion de données techniques (SGDT), et qui ont pour objectifs de stocker, gérer et contrôler toutes les informations et processus concernant la définition d’un produit. Le PDM ne représente donc qu’un des maillons du PLM (Product Lifecycle Management): celui du processus de développement du produit, le PLM recouvrant l’intégralité du cycle de vie d’un produit et non seulement la conception produit.

Comme je l'ai précisé dans la première partie de ce chapitre, les outils et méthodologies d'analyse fonctionnelle existent et, dans notre cas, nous servent à créer la transition entre deux états de maturité d'un système étudié. D'un côté nous avons les concepts qui ont été retenus, et de l'autre côté nous avons une mise en lien des systèmes (ou alternatives) répondant aux exigences formulées au début de l'étude.

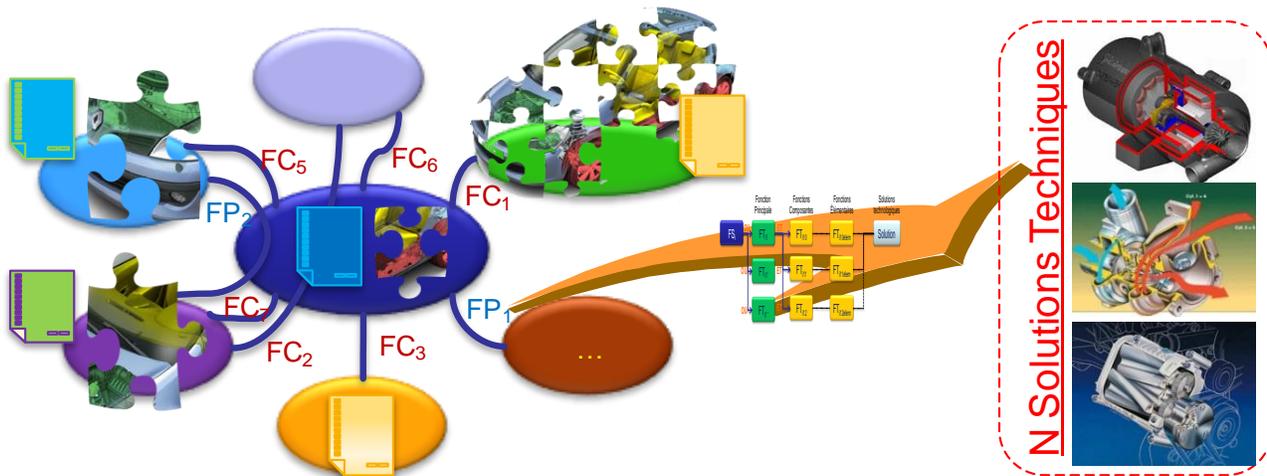


Fig. 55 : Introduction des alternatives techniques à comparer dans la suite du processus

Ainsi, durant cette étape nous faisons non seulement évoluer la notion de concept vers celles d'alternatives techniques qui devront être validées (ou non) dans l'étape qui suit, mais surtout nous effectuons une mise en lien transversale entre les groupements fonctionnels. En effet, afin de répondre aux concepts précédemment spécifiés, la première étape de cette analyse consiste à spécifier les fonctions liant un ou plusieurs groupements fonctionnels, au travers de celui étudié ce qui au final nous amène à spécifier quelles sont les entités qui sont fonctionnellement liées.

La seconde étape, reprend les fonctions principales une à une et propose plusieurs alternatives techniques (si possible) qui permettent d'y répondre, décomposition s'arrêtant lorsque l'on se rapproche des périmètres composants individuels.

Ce type de décomposition permet ainsi de continuer à lier, de manière descendante, les différentes prestations (que l'on a déjà traduit et adapté aux domaines d'applications) aux alternatives possibles, soit à un niveau de détail encore inférieur.

4. A (Architecture) : Définition de l'architecture détaillée du produit

Comme nous l'avons précisé, cette étape a pour objectif de définir de façon détaillée les différentes alternatives proposées afin, au bout du processus, d'arriver à choisir celle qui remplit au mieux les fonctions qui lui sont rattachées.

Le processus, décrit ci-dessous, met surtout l'accent sur le volet pré-validation du tolérancement, mais la démarche peut tout aussi bien s'enrichir pour permettre les autres validations physiques auxquelles le système sera soumis. Comme nous l'avons déjà précisé dans la première partie de ce mémoire, nous avons essayé d'intégrer et transposer certaines étapes à la validation des schémas de cotation en avance de phase, afin de raccourcir le cycle de conception et aussi de prendre, au plus tôt, en compte le tolérancement.

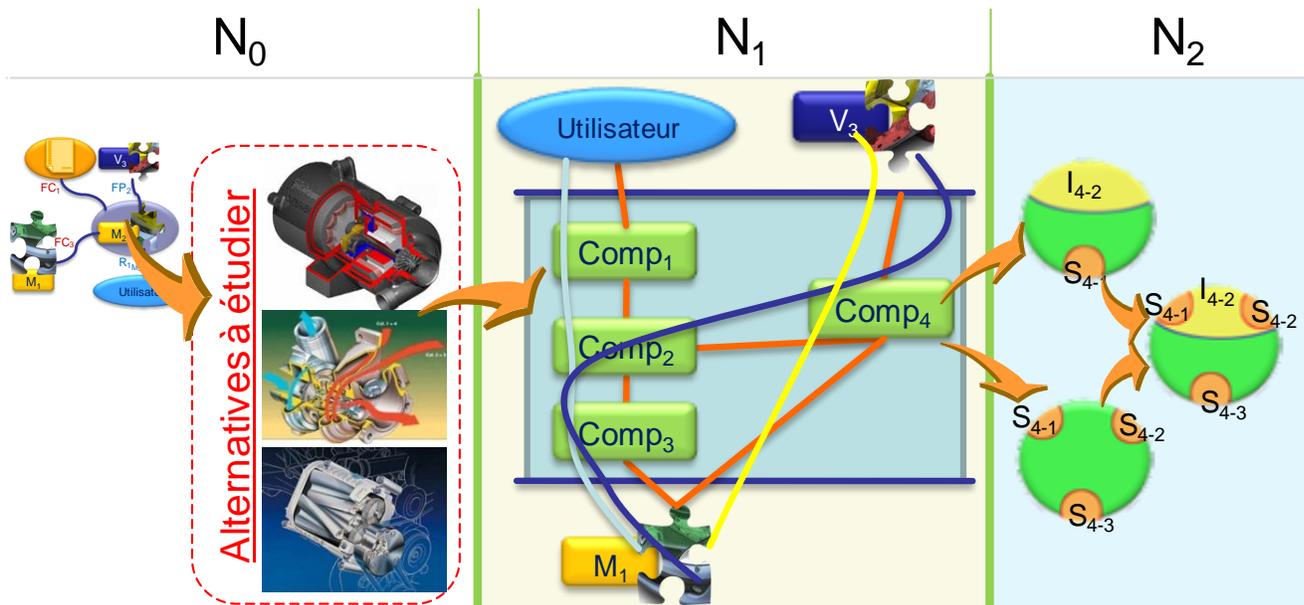


Fig. 56 : Evolution du niveau de définition au fur et à mesure de l'analyse du système mécanique

Lors de l'étape précédente, plusieurs alternatives pouvaient être proposées afin d'être étudiées et détaillées. Une à une, celles-ci sont découpées en 3 niveaux de définition :

- N_0 : Système / Assemblage
- N_1 : Sous Ensemble Élémentaire / Pièce
- N_2-1 : Élément Fonctionnel / Typage par EGRM
- N_2-2 : Interface à laquelle correspond l'élément fonctionnel

Il va de soi qu'un assemblage peut contenir à son tour un ou plusieurs assemblages qui sont composés de plusieurs pièces. A leur tour ces pièces peuvent être composées d'une ou plusieurs entités fonctionnelles qui peuvent être regroupées au sein de la notion d'interface.

On appellera Interface (associée à deux systèmes A & B) l'ensemble des entités géométriques réelles ou virtuelles composant la frontière commune $A-B$. Cette interface globale découle de la composition des interfaces associées à chacun des systèmes notées respectivement $I-A$ & $I-B$ et désignant de part et d'autre les entités géométriques propres à A et à B . Cette définition permet de spécifier les entités qui permettent de remplir les conditions fonctionnelles existant à ce niveau entre les deux systèmes.

En se recentrant sur le processus de spécification de l'architecture des différentes alternatives précédemment introduites, la première étape permet de déclarer les sous-ensembles élémentaires qui les composent ainsi que les interactions qu'il peut exister entre eux. Cette étape peut alors faire penser à ce que l'on a l'habitude de voir lorsque l'on représente un système par un bloc-diagramme en précisant les différents flux.

Dans le cas des assemblages de sous-ensembles mécaniques, tout lien entre deux pièces se traduira à un niveau de définition inférieur par la présence d'une interface caractérisant ce lien. Le processus de création du niveau N_2 de détail peut être vu sous deux angles :

- Soit nous commençons par spécifier le fait qu’il existe un lien entre deux sous-ensembles et donc nous commençons par créer l’entité Interface que nous enrichirons par la suite.
- Soit nous spécifions un à un les liens existant entre les sous-ensembles, en déclarant les surfaces fonctionnelles concernées et que nous regrouperons par la suite au sein des interfaces associées.

Globalement au bout du processus cela revient au même, mais en pratique c’est la seconde proposition qui semble la plus usitée et cela même si comme nous pourrons le voir cela pose plus de problèmes lors de la traduction en solution d’aide à la conception.

En ce qui concerne le tolérancement, il est effectué une fois qu’au niveau des interfaces toutes les entités ont été bien identifiées et spécifiées au sein du squelette fonctionnel. Interface par interface, on identifie les solutions pouvant y correspondre en sélectionnant des schémas standardisés de cotation puis on les importe au niveau du squelette fonctionnel dans un premier temps. Une fois les surfaces fonctionnelles spécifiées, il est possible de passer à la seconde étape qui concerne la synchronisation du squelette fonctionnel avec sa représentation géométrique 3D (squelette fonctionnel géométrique).

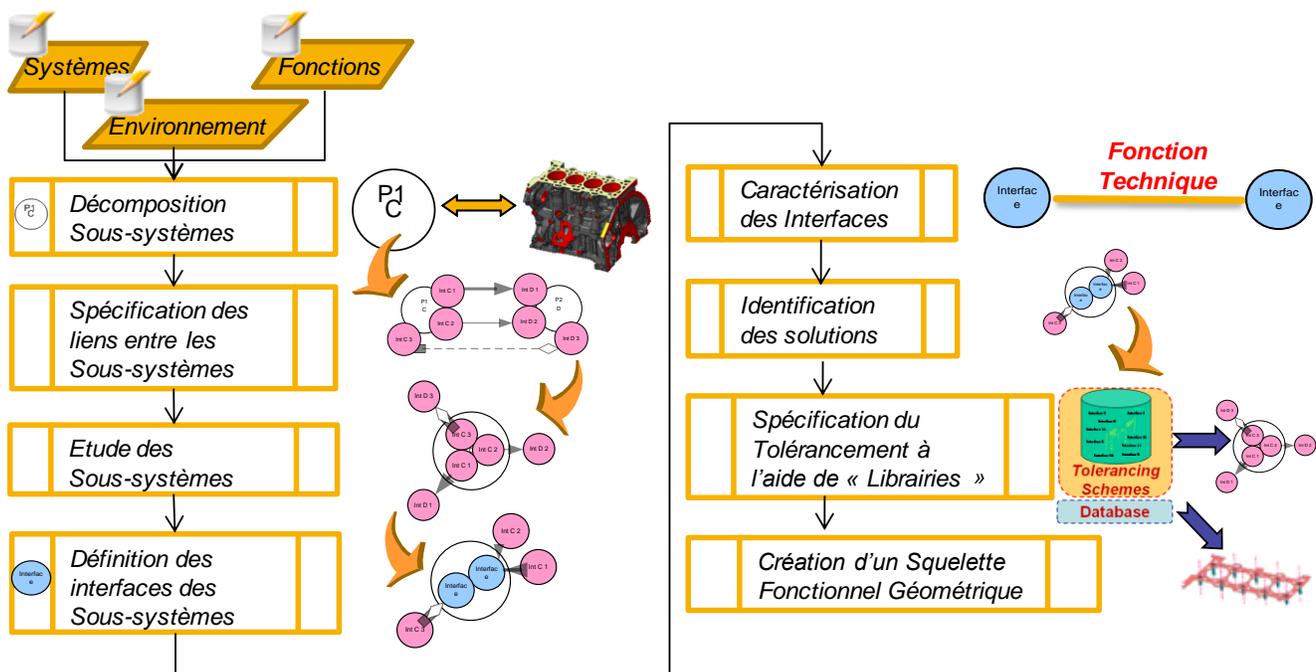


Fig. 57 : Exemple de processus global permettant d’arriver à l’étape de spécification du tolérancement

Définition du modèle de représentation par graphes (squelette fonctionnel)

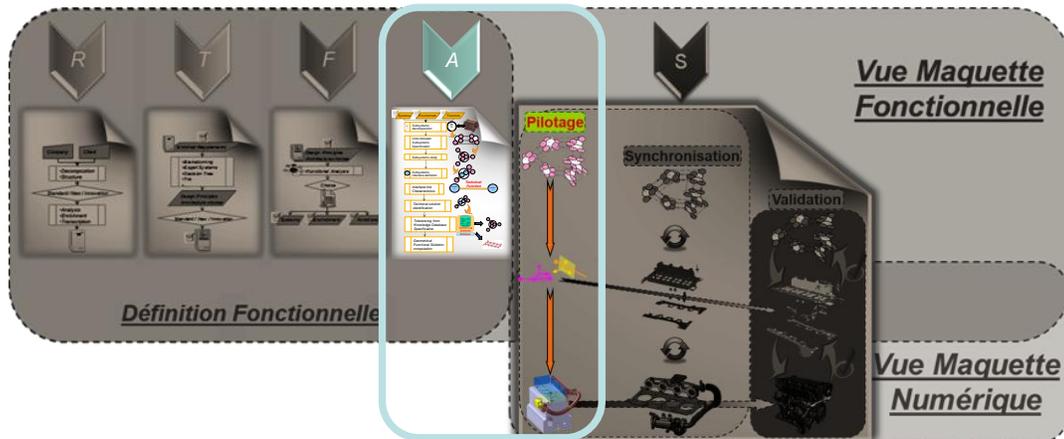


Fig. 58 : Place de la définition et de la création du squelette fonctionnel dans le cycle de conception

Le processus de décomposition fonctionnelle, précédemment présenté, permet de traduire les prestations et de définir le squelette fonctionnel des solutions permettant d’y répondre. Toutefois, ce « modèle » doit être bien défini et standardisé puisqu’il servira de support non seulement au tolérancement (au niveau de la maquette fonctionnelle) mais aussi de référence pour le pilotage de la MN dans un premier temps.

En reprenant le processus de définition de l’Architecture, depuis le niveau de N1, je vais détailler l’ensemble des entités créées composant le squelette fonctionnel.

Comme hypothèses de départ, nous allons considérer que :

- l’on étudie une seule des alternatives présentes au niveau N0,
- durant une seule phase de vie (le même processus devant être refait pour les N autres alternatives et pour toutes les phases de vie du produit).

Dans ce qui suit j’ai essayé de représenter le modèle global en UML (à l’aide de diagrammes de classes) et en y rajoutant des explications afin qu’il soit compréhensible par une personne n’ayant jamais utilisé ce langage de modélisation auparavant.

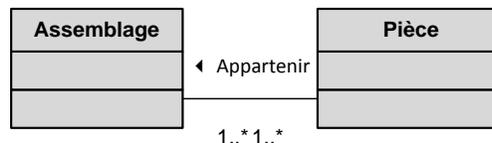


Fig. 59 : Exemple de lien existant entre l’entité Assemblage et l’entité Pièce

Par exemple, la relation présente dans la figure ci-dessus devra s’interpréter par : « Une Pièce peut appartenir à 1 ou plusieurs Assemblages ».

Pour y parvenir, il suffit de :

- lire dans le sens de la flèche que l’on retrouve placé à côté du verbe présent sur le lien caractérisant la relation entre les deux entités.

- commencer en disant « 1 Pièce » + Verbe placé sur le lien + Lire le (les) chiffre(s) ¹ placés en dessous du lien + « Assemblage »
- reformuler l'ensemble en français (puisque dans le cas présent on obtiendrait : « 1 Pièce appartenir 1..*² Assemblage »).

Dans le cas où l'on lit dans le sens inverse, il faut adapter le verbe lié à la relation afin de ne pas changer le sens premier de celle ci. Pour notre exemple cela correspondrait à « 1 Assemblage peut être composé d'aucune ou plusieurs Pièces ».

1. Déclaration des Entités Modélisées

Comme nous avons pu le voir, une des premières entités qu'il faut définir c'est celle représentant le système étudié, et les sous-systèmes qui le composent. Etant donné que l'on va retrouver par la suite surtout la notion d'assemblage de pièces mécaniques (à la place d'un système mécanique), j'ai préféré commencer la modélisation en prenant en compte le fait que l'on gérait des classes « pièces » et « assemblages ».

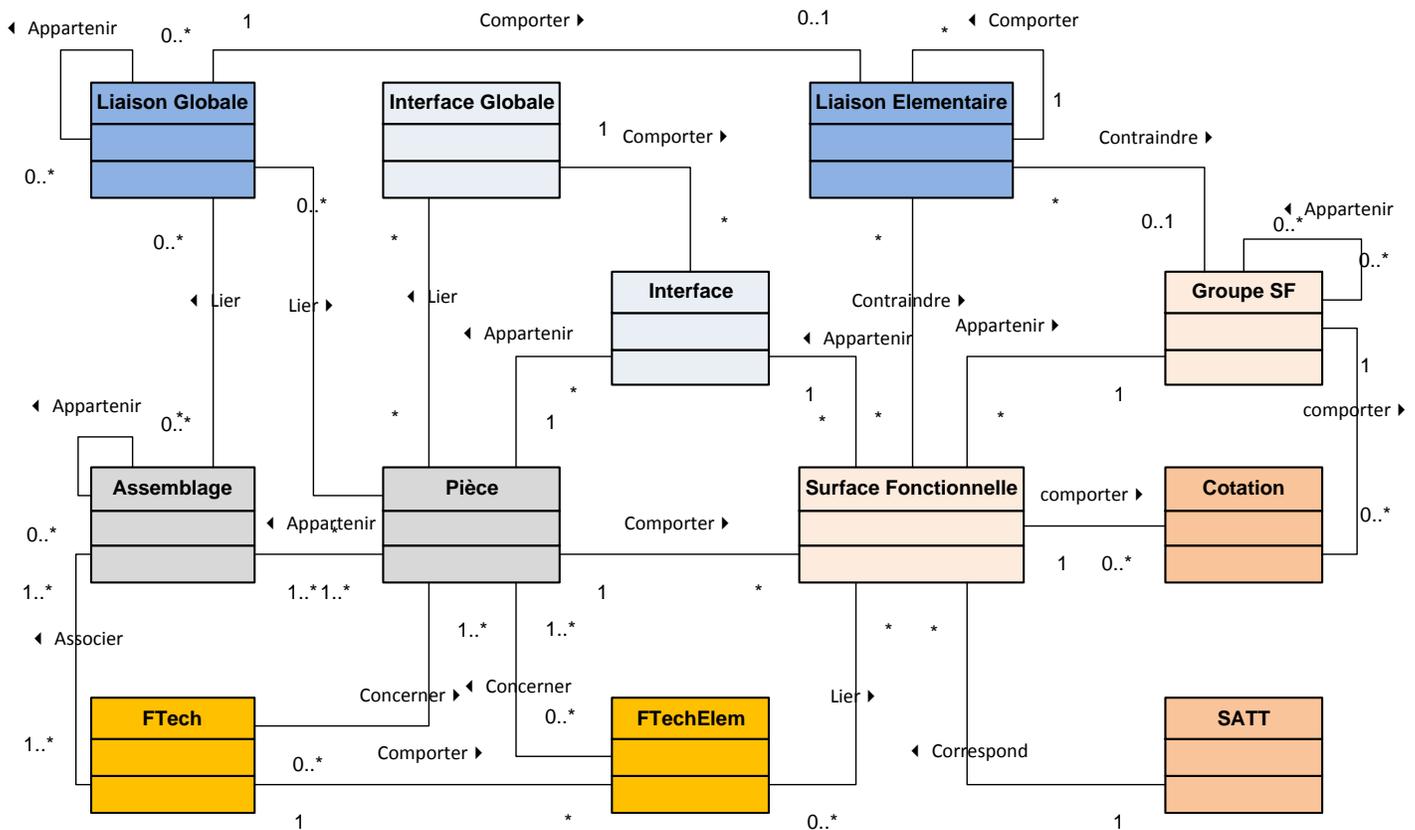


Fig. 60 : Vue Globale du Modèle

¹ On appelle ces chiffres : cardinalités

² Le * en UML au niveau des cardinalités correspond au terme « plusieurs » donc la cardinalité 1..* équivaut à 1 ou PLUSIEURS tout comme 0..* correspondrait à AUCUN ou PLUSIEURS.

En plus des notions d'interface et surface fonctionnelle (déjà introduites) nous allons aussi retrouver les notions de :

- Groupes de Surfaces Fonctionnelles,
- Interfaces Globales.

2. *Détail de la modélisation*

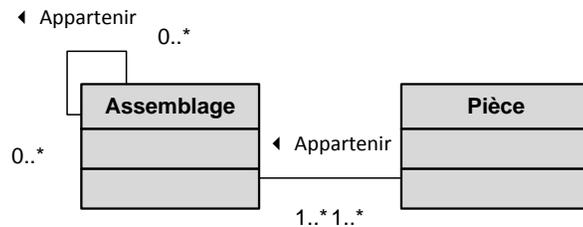


Fig. 61 : Modélisation du lien Assemblage-Pièce

En plus du fait qu'un Assemblage est défini comme étant composé d'une ou plusieurs pièces, et qu'une pièce peut être considérée comme pouvant appartenir à un ou plusieurs assemblages, je rajouterai aussi le fait qu'un assemblage peut aussi contenir des assemblages et non pas seulement des pièces unitaires.

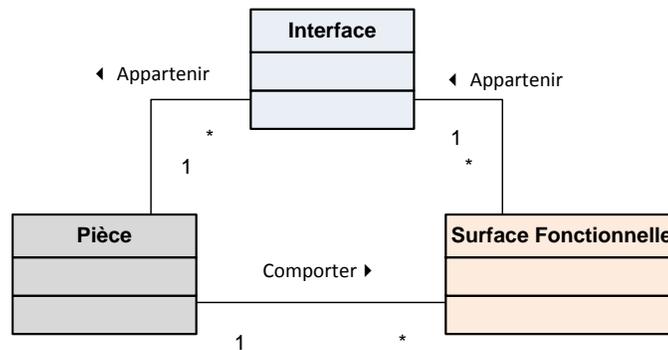


Fig. 62 : Modélisation du lien Pièce-Interface

En ce qui concerne les interfaces il faut distinguer celles qui sont directement liées aux pièces (plus précisément chaque interface appartient à une pièce) et les « interfaces globales » qui regroupent les interfaces relatives à deux pièces par exemples.

En allant un peu plus dans le détail, l'on retrouve les « surfaces fonctionnelles » qui, comme je l'ai précisé dans la Fig. 62 sont uniquement liées à une seule pièce (qui elle peut en comporter, par contre, plusieurs).

Elles peuvent être regroupées au sein d'un « groupe de surfaces fonctionnelles » qui, à son tour peut en contenir plusieurs.

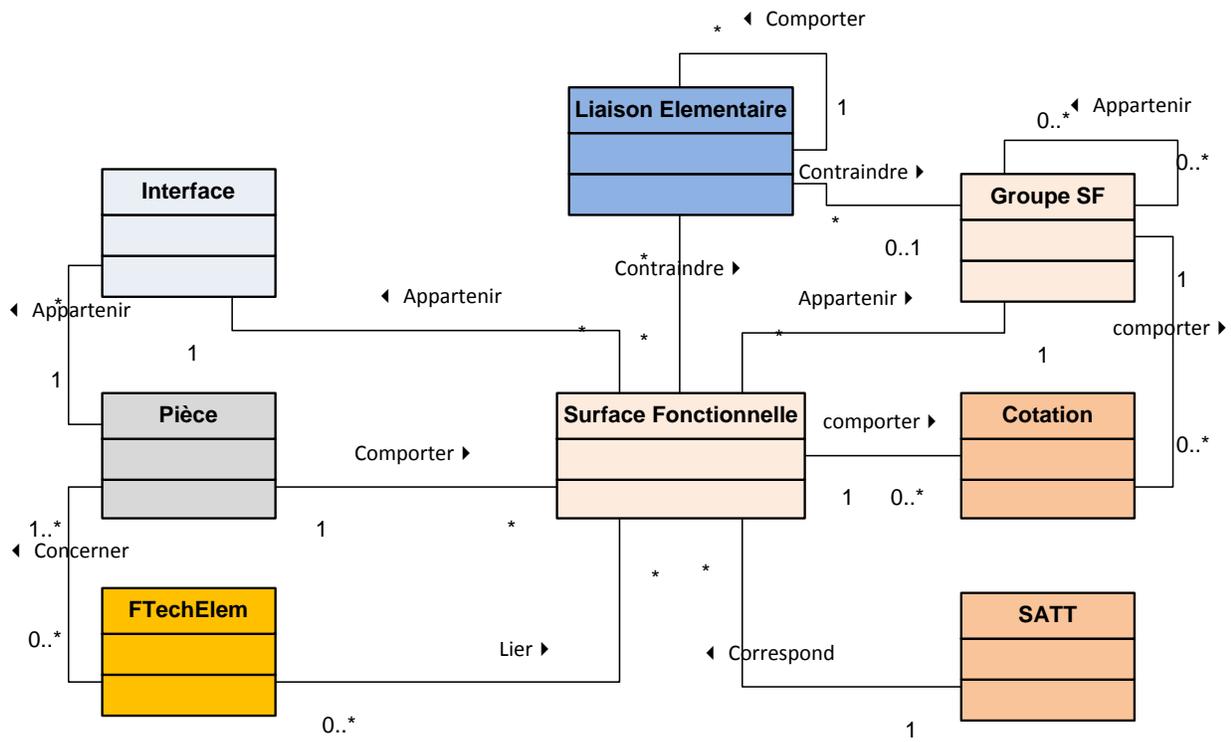


Fig. 63 : Modélisation des liens Pièce-Surfaces Fonctionnelles

Notons que la surface fonctionnelle n'appartient qu'à une seule interface et que, par exemple dans le cas où un plan d'appui servirait à plusieurs liaisons, l'on distinguera les « zones restreintes » individuelles qui sont relatives aux différentes interfaces auxquelles le même plan géométrique peut contribuer.

Remarque

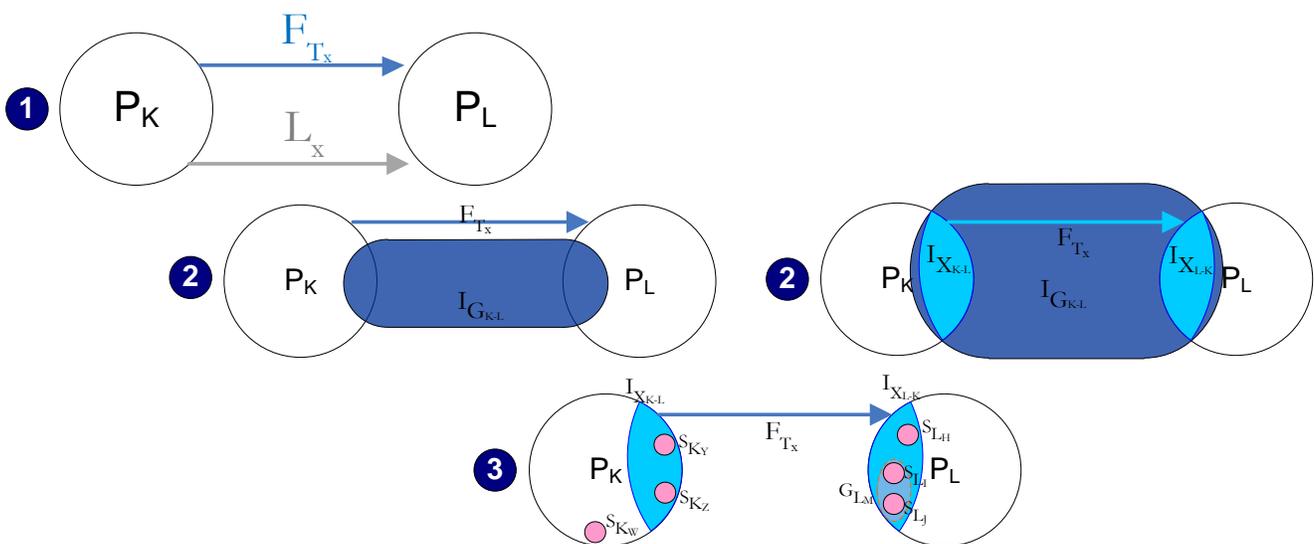


Fig. 64 : Hiérarchisation des entités principales dans le processus de création

3. *Détail des Entités Modélisées*

Dans les tableaux suivants, j’ai présenté les informations rattachées aux entités créées et auxquelles je ferai appel lors du pilotage de la Maquette Numérique par la Maquette Fonctionnelle. Il va de soi que, dans le cadre d’un outil informatique visant à couvrir des domaines bien plus larges, les attributs sont bien plus nombreux.

a. *Notion d’Interface Globale*

Pour avoir une meilleure compréhension de ces choix, je vais rapidement détailler l’exemple de l’entité “ interface globale ” entre P_K et P_L et notée I_{GK-L} .

Entité	Attributs						Compléments	
	Obligatoires		Associés				Détails textuels	Chiffrés
I_{GK-L}	P_K	P_L	I_{K-L}	I_{L-K}	SATT	SATT calculé		

Tableau. 6 : Attributs associés aux interfaces globales

Ainsi on trouve ce que j’ai appelé par abus de langage¹:

- “ Attributs Obligatoires ” : attributs sans lesquels l’entité décrite n’existe pas.

Dans le cas d’une interface, il semble logique qu’elle ne puisse pas exister sans les pièces PK et PL. En effet, l’interface va servir de « conteneur » pour toutes les entités appartenant à PK et qui sont liées par des exigences à d’autres entités appartenant cette fois à PL.

Remarque

- “ Attributs Associés ” : attributs qui sont rajoutés s’ils existent, mais qui en cas de disparition n’affectent pas l’existence de l’entité à laquelle ils sont rattachés.

Lors de la création de ces entités “ interface globale ”, une autre information qui peut être précisée à ce niveau ce sont les interfaces élémentaires au niveau des pièces I_{K-L} et I_{L-K} dans le cas où elles existent (comme dans le cas de pièces provenant de carry-over et qu’il faut inclure dans la modélisation et non reconcevoir).

De la même manière, la notion de SATT global souhaité peut être incluse et cela pour pouvoir être directement utilisée par la suite lors de la phase de pilotage (et synchronisation) de la Maquette Numérique. A ce niveau peut aussi figurer le “ SATT calculé ” (à partir de celui des interfaces élémentaires) dans le cas où elles ont un degré de définition suffisant.

Une fois que les différentes surfaces fonctionnelles (rattachées aux interfaces élémentaires) sont déclarées, la notion de “ SATT calculé ” pourra apparaître par composition des SATT associés à chaque surface fonctionnelle ou groupement de surfaces.

Remarque

Il va de soi que ce qui n’est pas et ne sera pas détaillé dans ce mémoire, ce sont les différentes « Règles de Gestion » qui permettent d’avoir une cohérence fonctionnelle entre les attributs.²

¹ En effet, un attribut est **spécifié** au niveau de l’entité et non pas **déduit** des liens qu’il peut avoir avec les autres entités. De plus au sens strict UML la distinction que j’ai faite entre « obligatoire » et « associés » n’existe pas.

² Dans le cycle de développement d’une solution informatique, cette étape arrive lors de la spécification fonctionnelle détaillée et est dissociée de la phase « conceptuelle ».

- “ Compléments ” : attributs visant à apporter plus d’informations sur l’entité décrite afin que les différentes personnes qui lisent la même représentation puissent l’interpréter de la même manière.

Le fait de séparer les informations complémentaires vise surtout à pouvoir avoir accès à une information textuelle, tout en pouvant en extraire une information quantitative si besoin est.

Remarque

b. Notion d’Interface

De la même manière, on définit l’objet interface I_{K-L} qui est associé à l’entité P_K pour la définition. Toutefois je place l’information relative à P_L dans les attributs associés, toujours en ne perdant pas de vue le cas des pièces finies et qui peuvent être réutilisées dans un nouveau contexte et dans lequel l’interface existera sous une forme générique I_{K-X} en attendant que la pièce X soit définie.

Entité	Attributs			Compléments	
	Obligatoires	Associés		Détails textuels	Chiffrés
I_{K-L}	P_K	SATT	P_L	SATT calculé	

Tableau. 7 : Attributs associés aux interfaces au niveau des pièces

Une chose qu’il faut aussi garder à l’esprit, c’est le fait qu’à partir d’un certain niveau de définition des interfaces au niveau des pièces, il peut arriver que des surfaces fonctionnelles soient communes à plusieurs interfaces et que pour des questions de lisibilité il serait judicieux de regrouper certaines interfaces. Nous le noterons G_{JK} et il aura pour attributs son support P_K et l’ensemble des interfaces qu’il regroupe $\{I_{K-i}\}$.

De même, ce regroupement nous le retrouverons par la suite lors de la création des schémas de cotation par rapport à des références qui sont donc communes au niveau des pièces.

Entité	Attributs			Compléments	
	Obligatoires	Associés		Détails texte	Chiffrés
G_{JK}	P_K	$\{I_{K-i}\}$		SATT calculé	

Tableau. 8 : Attributs associés aux interfaces au niveau des pièces

c. Notion de surface fonctionnelle

Au même titre que l’interface, on peut définir au niveau de la pièce la notion de surface fonctionnelle S_{KY} . Celle-ci est directement rattachée à la pièce P_K , et peut être associée à un groupe de surfaces G_{KZ} ou à une interface I_{XK-L} au sein de laquelle elle servira de support aux fonctions élémentaires, liant les deux pièces associées à cette interface.

En terme “ d’attribut associé ” il faudrait aussi renseigner le type de surface (type d’EGRM (Clement et al., 1994)) que nous utiliserons par la suite lors de l’étape de tolérancement et notamment de la validation de celui-ci (mise en place d’algorithmes de calcul & optimisation).

Entité	Attributs			Compléments	
	Obligatoires	Associés		Détails texte	Chiffrés
S_{KY}	P_K	G_{KZ} / $I_{X_{K-L}}$	Type		

Tableau. 9 : Attributs associés aux surfaces fonctionnelles

Comme précisé ci-dessus, on peut aussi être amené à avoir des groupements de surfaces rattachés à une pièce P_K , mais pouvant être intégrés à une interface $I_{X_{K-L}}$. Tout comme je l’ai précisé pour la notion d’interface, il sera possible de recalculer le SATT global à partir des entités qui composent le groupe.

Entité	Attributs			Compléments	
	Obligatoires	Associés		Détails texte	Chiffrés
G_{SKZ}	P_K	$I_{X_{K-L}}$	SATT calculé		

Tableau. 10 : Attributs associés aux groupements de surfaces fonctionnelles

Ce sont ces entités que l’on peut trouver dans la représentation fonctionnelle d’un système. Les différentes exigences qui les relient, visent à détailler les liaisons et les exigences fonctionnelles géométriques (ou non), existant afin de remplir les “Fonctions” dont découle la solution technologique qui est en cours d’étude.

d. Notion de liaison

Un des problèmes que j’ai pu aussi rencontrer concernait la définition des liaisons et notamment leur décomposition. Dans le modèle proposé nous décomposons celles-ci en plusieurs niveaux afin de toujours avoir une modélisation cohérente.

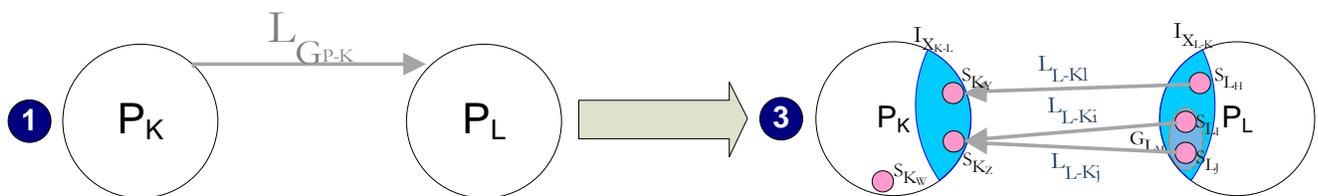


Fig. 65 : Décomposition d’une liaison Globale en Liaisons élémentaires

Ainsi ce que j’ai appelé “liaison globale” $L_{G^{K-L}}$ définit le lien qu’il existe entre les pièces P_K et P_L et se décompose en liaisons élémentaires qui quant à elles définissent les liens qu’il existe au niveau des surfaces fonctionnelles, appartenant aux pièces P_K et P_L .

Entité	Attributs					Compléments	
	Obligatoires	Associés			Détails textuels	Chiffrés	
$L_{G^{K-L}}$	P_K	P_L	$I_{G^{K-L}}$	$\{L_{L-K}\}$	Type	SATT calculé	

Tableau. 11 : Attributs associés aux liaisons globales

De plus, ce que j’ai aussi fait ressortir au niveau de la modélisation, c’est le fait qu’une liaison élémentaire pouvait être aussi le fruit de la composition de plusieurs liaisons élémentaires afin de pouvoir répondre au cas des liaisons faisant intervenir des groupes de surfaces par exemple.

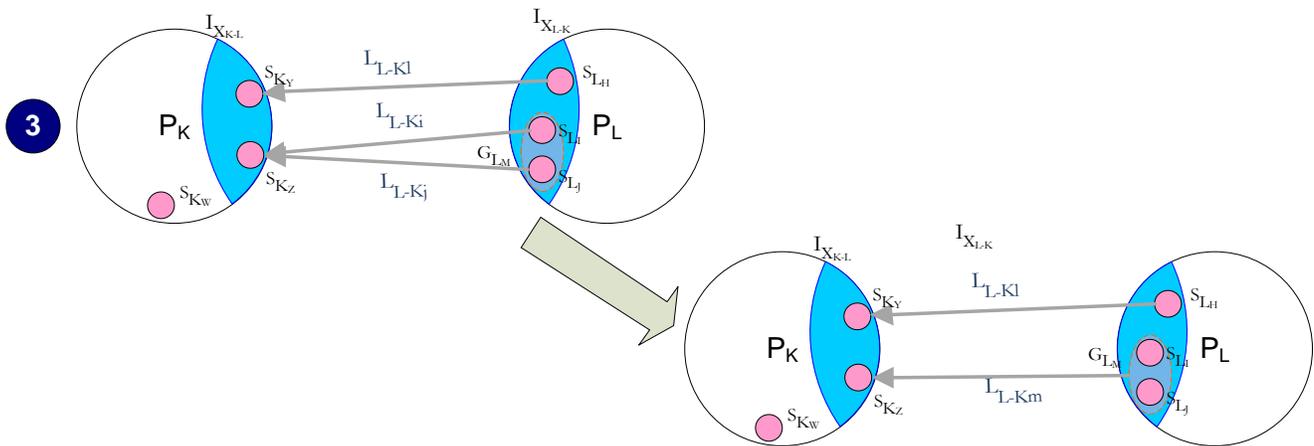


Fig. 66 : Cas des liaisons élémentaires faisant intervenir des groupes de surfaces

Une liaison élémentaire L_{K-Li} , est le lien qu’il peut donc exister entre une surface S_{Ki} (ou un groupe de surfaces $\{S_{Ki}\}$) appartenant à P_K , et une surface S_{Lj} (ou un groupe de surfaces $\{S_{Lj}\}$) appartenant à P_L . Elle est d’un type donné et il est possible de lui associer un SATT.

Entité	Attributs		Compléments	
	Obligatoires	Associés	Détails texte	Chiffrés
L_{K-Li}	$\{S_{Ki}\}$	Type		

Tableau. 12 : Attributs associés liaisons élémentaires

e. Notion de fonction

Comme je l’ai introduit précédemment, au fur et à mesure que l’on avance dans le processus de conception, les fonctions que les différents systèmes doivent remplir sont décomposées et cela jusqu’aux fonctions de plus petite granularité : les « fonctions techniques élémentaires » (FTE).

Entité	Attributs		Compléments	
	Obligatoires	Associés	Détails texte	Chiffrés
F_{TX}	P_K	$\{I_{X_{K-L}}\}$	Précisions	Valeurs à atteindre

Tableau. 13 : Tableau utilisé pour récapituler les informations des différentes entités créées

Dans le cas d’une fonction technique il semble logique qu’elle ne puisse pas exister sans les sous-ensembles P_K et P_L qu’elle est censé lier. Les interfaces que cette fonction peut relier, peuvent ou non être rattachées, le cas dans lequel cette information peut se révéler fort utile étant lors du recensement de toutes les fonctions rattachées à une interface bien précise. Toutefois, il n’y a pas de lien fort entre ces deux entités (c’est à dire l’existence de l’un dépendant de l’existence de la seconde).

En ce qui concerne les FTE, j’ai adopté la même décomposition que pour les liaisons

élémentaires en définissant une FTE comme liant un ensemble de surfaces fonctionnelles, étant d'un type bien défini et pouvant être caractérisée de manière chiffrée (par exemple une CAE définissant un jeu minimum).

Entité	Attributs			Compléments		
	Obligatoires		Associés	Détails texte		Chiffrés
F_{Tex}	$\{S_{Kj}\}$	$\{S_{Lj}\}$	$\{I_{XK-L}\}$	Type	Complément	Valeurs à atteindre

Tableau. 14 : Attributs associés aux fonctions techniques élémentaires

f. Notion de cotation

Si l'on se penche sur les schémas de cotation, la problématique est plus complexe (et pas forcément plus compliquée) à poser de par le fait qu'il y a des normes à respecter et qu'en somme, elles correspondent à un ensemble de règles qu'il faut intégrer dans notre modèle si l'on souhaite que les schémas de cotation soient cohérents et valides.

Dans notre cas, nous retenons juste qu'un schéma de cotation est lié à une surface ou un ensemble de surfaces fonctionnelles, ayant un type et des compléments chiffrés ou non. Nous ferons aussi référence aux travaux menés par B. Anselmetti (Anselmetti, 2005) et qui peuvent fournir un complément certain à la notion de MF.

En ne se basant que sur les entités incluses dans la MF il sera difficile d'arriver à des schémas de cotation finaux valides et cohérents.

Le passage par la définition géométrique minimum est à mon avis obligatoire, la cotation de la MF devant être au final synchronisée à celle de la MN.

Remarque

Entité	Attributs		Compléments		
	Obligatoires		Détails texte		Chiffrés
C_x	$\{S_{Kj}\}$ Tolérances	$\{S_{Kj}\}$ Références	Type	Complément	Valeurs

Tableau. 15 : Attributs associés à la notion de cotation

En Résumé

Après avoir abordé le processus de déploiement et d'analyse des prestations, j'ai abordé dans cette partie, la définition du squelette fonctionnel d'un système, auquel on fera référence lors du pilotage de la MN par la MF.

J'ai ainsi essayé de définir de manière précise, chaque entité composant le squelette fonctionnel (de manière conceptuelle) et cela afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté lorsque l'on y fera référence.

Toutefois comme on a pu s'en apercevoir, je n'ai pas encore abordé la spécification du tolérancement au niveau du squelette fonctionnel et cela est simplement dû au fait que je l'introduirai en même temps que la notion de squelette fonctionnel géométrique.

Pilotage fonctionnel

1. Problématique

Tout d’abord je vais revenir sur une représentation que j’avais déjà introduite précédemment et cela afin de revisualiser ce vers quoi notre approche tend : une bijection entre la modélisation fonctionnelle et la représentation numérique du produit final.

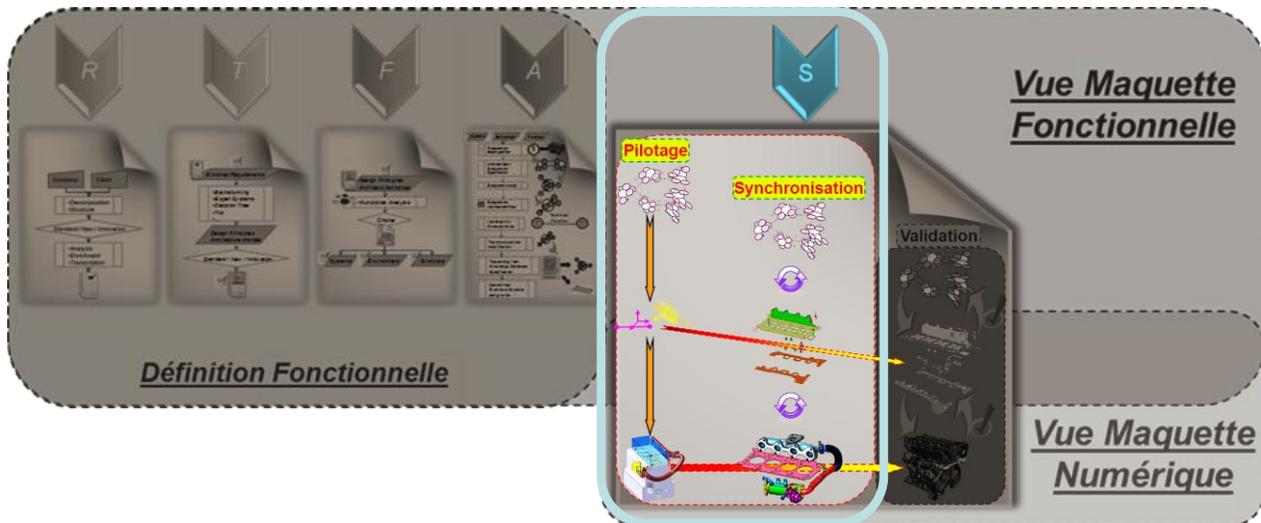


Fig. 67 : Réconciliation des domaines « Fonctionnel » & « Numérique »

Comme je l’avais déjà précisé, à l’heure actuelle les modélisations fonctionnelles et numériques ne communiquent pas (ou très peu). A première vue, au bout du processus de conception, la MN devrait contenir toutes les informations spécifiées au niveau de la MF et pousserait à penser que le parallélisme est aisé.

En supposant que l’on passe par une modélisation similaire au squelette fonctionnel, deux problèmes majeurs apparaissent :

- l’asynchronisme entre les deux représentations (Fonctionnelle et Numérique)
- la différence de nature qu’il existe entre celles-ci, point très difficile à gérer (non pas conceptuellement mais techniquement).

Comme on pourra le voir avec l’étude qui a été menée dans l’environnement CATIA V6, même dans le cas où la maquette fonctionnelle est créée dans le même environnement informatique que la maquette numérique, il n’est pas évident de créer des équivalences entre des modélisations de nature différentes.

Remarque

2. Besoin d’une passerelle entre les modélisations

Afin de répondre à nos deux problématiques majeures (modélisation fonctionnelle & simulation en avance de phase), il a fallu réfléchir à des « passerelles » afin de pouvoir synchroniser un minimum d’informations entre les deux domaines.

Techniquement parlant, une des solutions qui a été envisagée concernait un format de fichiers qui serait exporté (en XML¹ par exemple) et qui traduirait de manière standardisée la structure du squelette fonctionnel ainsi que toutes les informations qui y seraient rattachées. Celui-ci peut par la suite être réintégré dans un modèleur CAO afin de retranscrire sous forme géométrique ces informations.

Une modélisation 3D est vouée à évoluer et le modèleur CAO qui produit cette représentation « recalcule » parfois les éléments géométriques que l'on voudrait pointer. Dès lors, il devient assez compliqué de travailler avec des liens entre des entités qui ne sont pas de même nature et qui par exemple se font référence par l'intermédiaire de leur « nom », « identifiant » ...

Remarque

Toutefois, bien que cette solution puisse tout aussi bien s'appliquer à une modélisation comme GAIA ou TDC, je n'avais fait que déplacer le problème, et ce à quoi il fallait désormais répondre serait :

Comment serait-il possible de synchroniser une représentation 3D en constante évolution, avec ce genre d'imports ?

L'idée fut alors de rattacher le squelette fonctionnel à son équivalent géométrique 3D composé uniquement d'EGRM. Cela rajoute certes une représentation intermédiaire, mais cela rajoute aussi des avantages non négligeables comme :

- ce qui nous sert de passerelle (la représentation simplifiée à l'aide d'EGRM) est gérée dans le même environnement que la MN.
- le niveau de détail est presque le même entre le squelette fonctionnel et la représentation à l'aide d'EGRM.
- il est plus aisé de synchroniser une MN complète à une représentation de même nature (et/ou inversement) et cela même si elle est plus épurée.
- le fait d'avoir une représentation « light » de la MN globale, peut s'avérer suffisante en avance de phase pour les différentes simulations.

3. Définition de la MN simplifiée

Dans cette partie ce que je vais spécifier ce sont les informations qui vont être retranscrites au sein de la « Maquette Numérique simplifiée ». Cette notion nous la retrouvons au sein des articles publiés (Socoliuc et al., 2007), (Socoliuc et al., 2008), (Socoliuc et al., 2009) mais surtout utilisée afin d'alléger les représentations au sein du modèleur CAO lors des simulations de tolérancement.

Dans le cadre de la synchronisation de la MF et de la MN nous avons restreint cette représentation aux seules informations communes et les avons regroupées au sein de ce que l'on a appelé : « Squelette Fonctionnel Géométrique » pour faire le parallèle avec le « Squelette Fonctionnel »

Par la suite, il s'est avéré que l'on pouvait aussi s'en servir dans le sens MF vers MN, et cela

¹ XML (eXtensible Markup Language, ou en français « Langage à balises étendu ») est un langage permettant de structurer, poser le vocabulaire et la syntaxe des données qu'il va contenir, au travers d'un balisage « extensible ». En séparant le contenu de la présentation de celui-ci, il est possible d'afficher les mêmes informations dans des applications différentes sans pour autant nécessiter de créer autant de versions du document.

afin de compléter le modèle numérique (et non plus seulement dans le sens où on le simplifie). Dans ce cas de figure, ce qu'il faut mettre en place c'est le processus inverse, à savoir, compléter une MN qui en avance de phase, est pas ou peu définie, contrairement à la MF.

La représentation suivante reprend les différents concepts que nous manipulons au niveau de la MF mais avec un code couleur différent :

- Bleu : concepts présents dans la MF ainsi qu'au niveau de la MN nativement.
- Rouge : concepts présents dans la MF mais pouvant être intégrés au sein de la MN au travers de développements spécifiques.
- Jaune : concepts présents dans la MF et seulement intégrés dans CATIA V6 (coté MN).

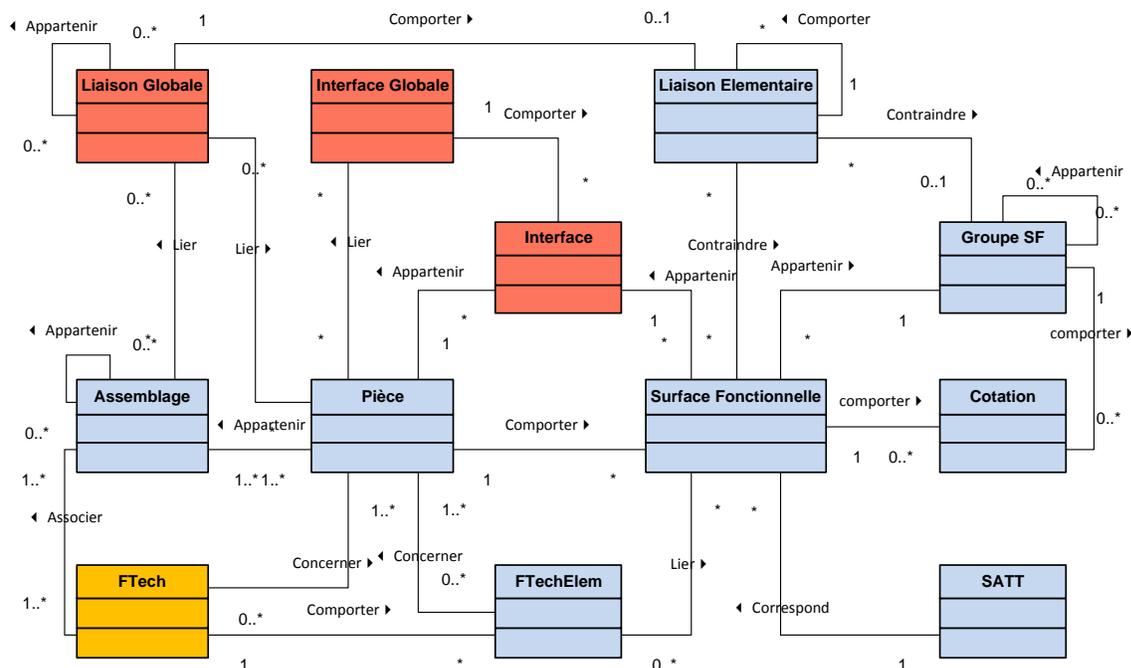


Fig. 68 : Catégorisation des différents concepts, selon qu'ils sont ou non intégrés dans la MN

Nativement au sein du modèleur CAO que l'on avait à notre disposition (CATIA V5) les notions suivantes pouvaient être définies à partir des informations comprises dans la MF sans problème :

- Assemblage / Pièce
- Surface fonctionnelle (avec son type, SATT associé ...) / cotation
- Fonctions techniques élémentaires / Liaisons élémentaires

La notion d'interface a déjà été abordée par Toulorge (Toulorge, 2004) et avait donné lieu à un prototype au sein de CATIA V5 pour la cotation des pièces au travers les interfaces.

Dans notre cas, nous avons utilisé cette notion pour la simulation du tolérancement (Chap. 4) au sein de ce même modèleur CAO (Socolinc et al., 2008).

Remarque

Il va de soi que spécifier une structure descendante au sein de la MN (Assemblage / Pièce / Surface fonctionnelle) n'est pas ce qui nous a posé le plus de problèmes et exporter ces concepts définis au sein de la MF vers l'environnement MN était faisable (mais chronophage) sans même faire appel à un développement spécifique¹.

En ne faisant appel qu'à des scripts écrits en VBS, il m'a été possible de créer & manipuler les entités ci-dessus, partie abordée plus tard lors de la définition des interfaces.

Remarque

Ce qui à contrario a demandé plus de réflexion, c'est le processus en soi que nous pouvons apercevoir Fig. 69 et qui comporte quatre sous processus :

1. Export des entités puis import au sein de l'environnement numérique
2. Création de la MN que nous avons caractérisée de « simplifiée ».
3. Vérification de la cohérence (ainsi que pour l'étape 4).

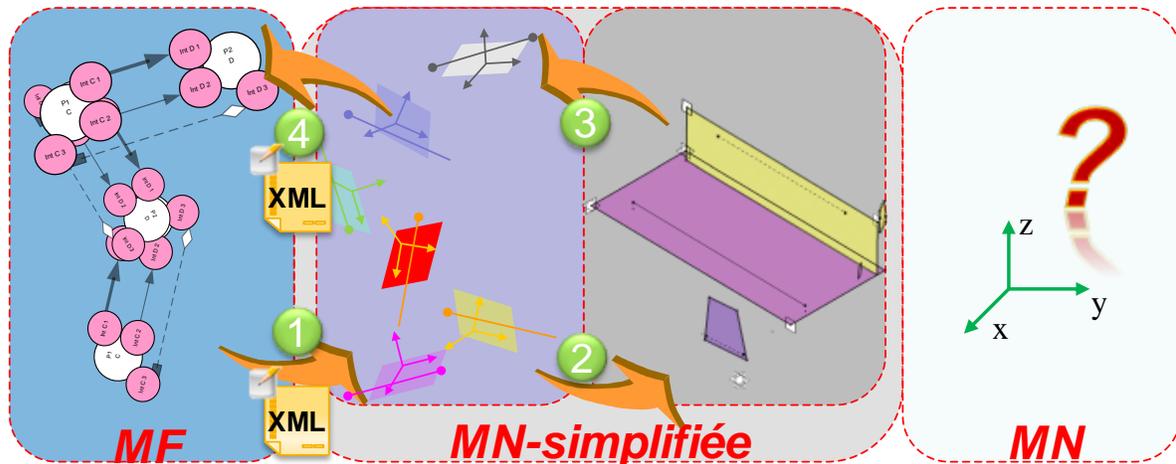


Fig. 69 : Passage de la MF vers la MN simplifiée

g. Export / Import : Initialisation de la MN Simplifiée

Comme j'ai essayé de le faire ressortir dans la figure 69, la mise en place de la MN simplifiée passe tout d'abord par l'utilisation d'un « pivot » entre le monde fonctionnel et celui numérique. La structure du pivot, se doit de respecter celle de la MF ou tout du moins de la retranscrire, la solution la plus aisée à mettre en place étant un pivot XML (voir Fig. 70).

Quand bien même, la description de ce pivot ne semble pas difficile, la contrainte provient surtout de l'automatisation de cette étape. En effet, soit l'environnement dans lequel la MF est modélisée permet un tel export, soit il faut créer des scripts (non couvert lors de la thèse) afin de retranscrire les informations fonctionnelles et c'est ce qui peut poser problème.

Dans le cas où une personne souhaite créer un script d'export, je conseille fortement dans un premier temps de créer la structure du pivot XML à l'aide d'un logiciel dédié tel que « Liquia XML Studio » par exemple, afin de bien stabiliser la forme finale du pivot souhaité.

Remarque

¹ Par développement spécifique je fais référence à un développement faisant appel aux bibliothèques CAA (payantes) et qui donc ne sont pas accessibles à tout utilisateur de l'environnement CATIA V5, contrairement à la programmation en Visual Basic.

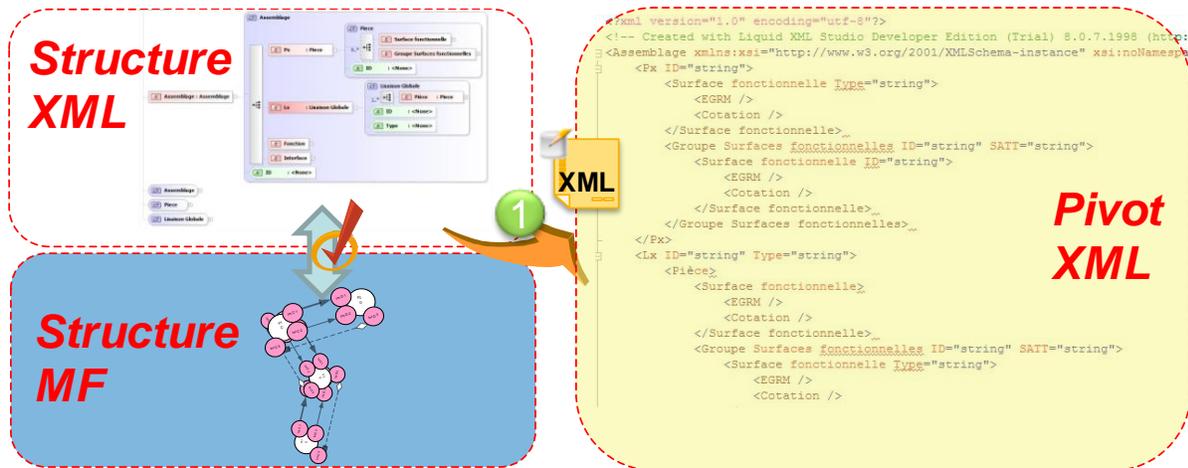


Fig. 70 : Equivalence souhaitée entre les différentes structures manipulées

Dans le cadre de la thèse j'ai pu utiliser le logiciel GALA pour modéliser le squelette fonctionnel mais je n'ai pas eu accès à la structure des fichiers XML qu'il produisait.

Toutefois le processus reste le même à la différence près que, selon la structure du pivot que l'on obtient lors de l'export, l'étape de création (des différentes entités dans la MN) change, dans le sens où il faut comprendre ce à quoi correspondent les différents nœuds du fichier XML, pour pouvoir créer les bonnes entités au sein de la MN.

Remarque

Une fois le pivot entre les domaines renseigné, il faut mettre en place une « routine¹ » d'import et de création des différentes entités dans l'environnement numérique.

h. Création du Squelette Géométrique

Toutefois, et cela à juste titre, comme on peut le faire remarquer, il manque des informations non négligeables que l'on ne retrouve nullement au sein de la MF : les dimensions et/ou toute information permettant de positionner les différentes entités les unes par rapport aux autres.

Cependant dans un premier temps, ces informations ne nous sont pas utiles puisqu'il est facilement possible de modifier le squelette fonctionnel géométrique au sein du modèleur CAO. Il est donc aisé d'obtenir une représentation qui commence à mettre en place le squelette géométrique du système étudié. Pour ce faire nous repartons du découpage précédemment introduit, à savoir sur 3 niveaux de définition pour la partie purement géométrique :

- N0 : Système / Assemblage (représentés par une entité CatProduct dans notre cas)
- N1 : Sous Ensemble Élémentaire / Pièce (représentés par une entité CatPart)
- N2-1 : Élément Fonctionnel (représentés par des EGRM 3D)
- N2-2 : Interface à laquelle correspond l'élément fonctionnel (entité Inter-pièce)

¹ Couramment on utilise le terme de "parseur" pour désigner un outil d'analyse syntaxique ayant pour but l'analyse et la récupération d'informations contenues dans un document « balisé ». La structure révélée par l'analyse donne précisément la façon dont les règles de syntaxe sont combinées dans le document.

En ce qui concerne les FTE et les liaisons élémentaires, nous avons utilisé les fonctions « contraintes » proposées par le modeleur et mis en relation les entités précédemment créées, dans l'environnement numérique.

La notion d'interface n'existant donc pas par défaut, nous avons commencé par poser le problème, en nous intéressant à la création d'un équivalent à partir des concepts présents dans la MN afin de décrire celui d'Interface. Le résultat de ce travail fut la définition de la notion d'interpièce, utilisée pour la description de l'assemblage (Socoliuc et al., 2007) mais qui peut aussi être utilisée pour la simulation du tolérancement.



Fig. 71 : Structure du Squelette Fonctionnel Géométrique

Comme vous pouvez le voir la notion d'Inter-pièce est l'équivalent de ce que j'ai appelé Interface Globale au niveau de la MF. Il va de soi (et cela on pourra le voir) qu'en disposant d'outils informatiques adéquats, tout comme du financement nécessaire, il est possible de définir directement la notion d'interface au même niveau que les pièces dans un assemblage.

Etant donné que la notion d'Inter-pièce, je l'avais introduite et détaillée durant la thèse avant d'avoir figé tous les concepts présents dans la MF, j'ai laissé les deux appellations dans ce mémoire par souci d'homogénéité avec les articles publiés (même si l'on pourrait restreindre à une seule).

Remarque

L'étape qui s'en suit concerne la « mise en forme » des éléments importés au sein du modeleur CAO. En effet, comme je l'ai précisé, sans informations sur le positionnement des différents EGRM les uns par rapport aux autres (au sein de la MF), il est impossible de bien les placer (lors de l'import) au sein de la MN. C'est pourquoi, une fois les EGRM créés, il faut donner forme au squelette fonctionnel géométrique¹.

En créant le SFG uniquement à l'aide d'EGRM, nous obtenons une représentation du système étudié au travers un squelette filaire, tout comme Mathieu (Mathieu & Belingard, 2005), à la différence près que dans notre cas les vérifications se feront au niveau des interfaces (d'un point de vue fonctionnel) qui sont représentées par les inter-pièces.

¹ Afin d'alléger l'écriture, je vais utiliser SFG afin de désigner le « Squelette Fonctionnel Géométrique ».

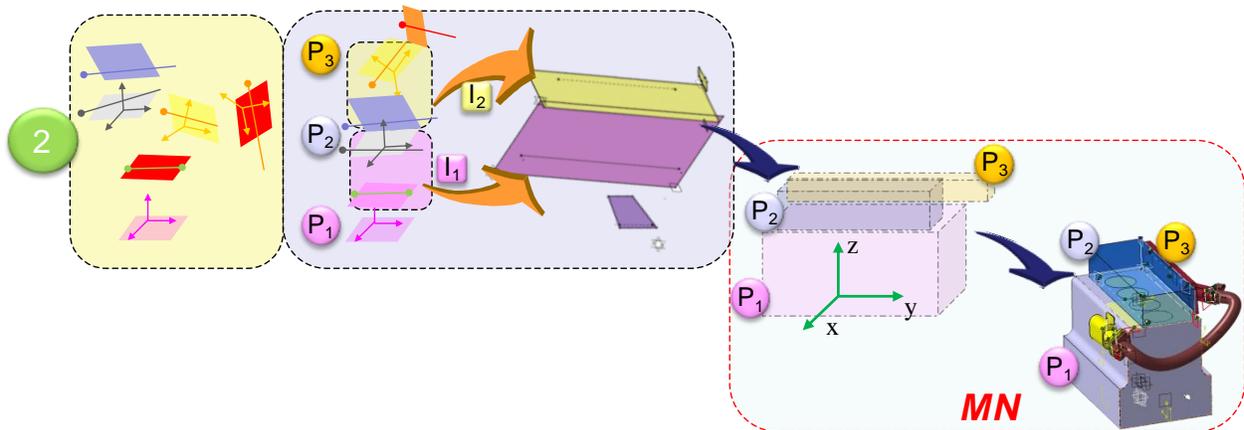


Fig. 72: Réorganisation du SFG et évolution de la MN.

Géométriquement parlant, l'inter-pièce est une entité de « réconciliation » entre les différentes pièces qui sont liées soit par une liaison globale soit par une fonction technique à respecter. Conceptuellement parlant, on peut le présenter aussi comme une pièce virtuelle ayant comme composants internes, les éléments fonctionnels des pièces qui sont en vis-à-vis (Fig. 73). En ce qui concerne le tolérancement, l'inter-pièce permet d'effectuer des vérifications de la cohérence des schémas de cotation, et ainsi de les créer selon la typologie de l'interface.

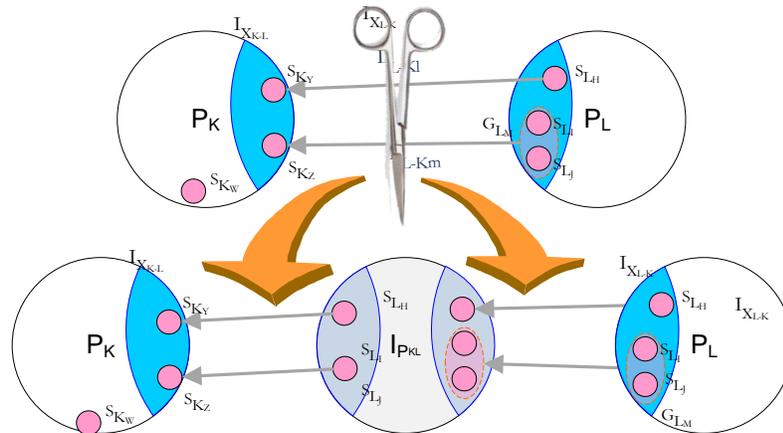


Fig. 73 : Définition du concept d'inter-pièce au niveau fonctionnel.

La notion d'inter-pièce n'existe que dans le domaine numérique. Dans la Fig. 73 je n'ai fait que représenter de manière schématique les éléments fonctionnels qu'elle regroupe dans la MN.

Remarque

Comme je l'ai présenté dans la Fig. 69 puis dans la Fig. 72, l'enchaînement logique consiste à faire évoluer la représentation en se basant sur le SFG, le résultat devant se rapprocher de la solution finale. Toutefois, en parallèle, il faut vérifier que les informations sont cohérentes et synchronisées avec leur équivalent au sein de la MF, et c'est ce que nous avons encapsulé dans l'étape de « pilotage ».

4. Pilotage et synchronisation en avance de phase

Ce que j'ai introduit précédemment, correspond d'une part à la création de la MF et d'autre part à ce que nous pouvons assimiler à l'initialisation d'un projet au sein de l'environnement numérique (et que l'on a appelé pilotage de la MN par la MF (Fig. 32)). Cela étant, notre objectif est de maintenir le lien qu'il existe entre le MF et la MN tout au long du processus de conception, et donc de répercuter toute modification effectuée dans une des vues vers l'autre (Fig. 31 et Fig. 74) correspondant à une synchronisation continue entre les deux vues.

Toutefois ce que nous faisons aussi remarquer, c'est le fait que la MF arrive plus rapidement à un stade quasi-final, alors que la MN continue d'évoluer sans que les éléments fonctionnels puissent être impactés. Ainsi au fur et à mesure que l'on effectue des simulations et que l'on valide ou modifie des éléments fonctionnels (CAE par exemple), il faut procéder à un pilotage de l'environnement fonctionnel par l'environnement numérique qui a servi aux simulations (Chap. 4).

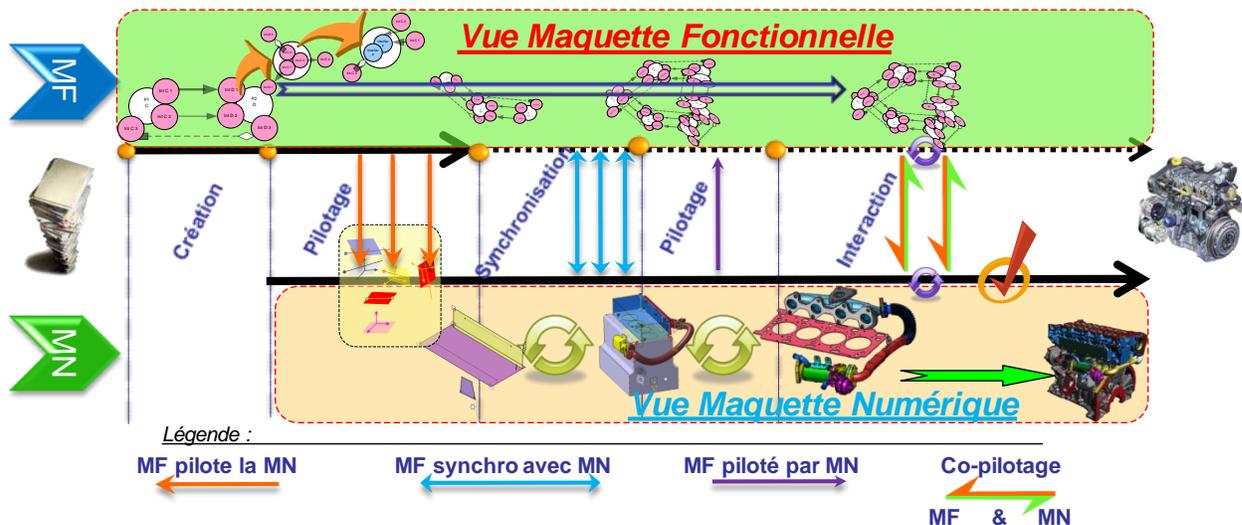


Fig. 74 : Différentes étapes de « pilotage » rencontrées tout au long du cycle de conception.

5. Application dans le cadre de CATIA V6 / Processus RFLP

Durant la dernière année de mon doctorat, j'ai pu confronter cette vision (qui peut sembler, aux premiers abords très schématique et/ou purement théorique) et essayer de proposer une adaptation pouvant s'intégrer au processus RFLP proposé par Dassault Systèmes, proposition devant être testée et intégrée, par un stagiaire Dassault Systèmes, dans l'environnement CV6.

Toutefois, avant d'arriver à la moindre intégration, il a fallu dans un premier temps analyser et comprendre les points de blocage (ou les « trous fonctionnels ») présents dans l'approche RFLP et qui le rendent peu adapté à la description fonctionnelle détaillée des systèmes mécaniques¹, contrairement à l'approche mise en place au sein de GAIA.

¹ Cela peut aussi être aperçu dans les présentations qui avaient été faites lors du DEVCON (Paris 2008), et où il est impossible de descendre en dessous du niveau de définition relatif à une pièce mécanique.

a. Problématiques abordées

Comme je l'ai présenté dans le chapitre précédent, (ainsi que dans les Fig. 42 et Fig. 43) je me suis retrouvé confronté (en tout cas lors de l'étude) à un processus de conception très segmenté et dépendant surtout de solutions informatiques répondant chacune à une problématique bien précise :

- MatrixOne répondant à la problématique de gestion des exigences de haut niveau,
- Modelica devant effectuer des simulations au niveau logique,
- et CATIA V6 (CV6) ayant en charge la définition géométrique.

Afin de couvrir l'ensemble du processus de conception, on se rend bien compte qu'il manquait que la définition fonctionnelle (détaillée), et c'est ce à quoi les études effectuées à ce moment devaient servir. Notre contribution, devait quand à elle permettre d'avoir le point de vue d'un industriel sur une problématique bien précise, mais aussi d'échanger sur une problématique qui n'était qu'au stade de la recherche (mais en ne perdant pas de vue le développement qui devait s'en suivre).

Concrètement le but qu'il fallait atteindre, concernait l'intégration des informations que l'on pouvait retrouver au sein d'un TAFT, et pour ce faire j'ai dû aborder les points suivants :

- Quelle sont les concepts qui existent déjà et quels sont ceux qu'il faut créer ?
- Quels sont les impacts et quels sont les domaines qu'il faut couvrir ?
- Quelle était la place du tolérancement ? Quid de la faisabilité ?
- Comment gérer le lien entre le « Logical » et le « Physical » (proposition de scénarios) ?
- Comment intégrer la notion de simulation et de la vérification de la cohérence des schémas de cotation en avance de phase ?

b. Question relative au « niveau de profondeur » pouvant être atteint

La première étape fut donc équivalente à une analyse de l'existant et qui a abouti à l'appréciation du niveau de profondeur que l'on pouvait atteindre en terme de définition fonctionnelle, et qui était éloigné de celui que l'on pouvait atteindre au travers du modelleur CV6.

Ainsi le processus RFLP (et donc implicitement la solution telle qu'elle était présentée) ne permettait pas d'avoir une granularité suffisante faisant apparaître les surfaces fonctionnelles, mais s'arrêtait au lien fonctionnel qu'il pouvait exister entre des pièces ou des sous-ensembles¹. Cela constitue certes une première étape dans le processus cible, mais en l'état cela ne permettait pas de répondre à des besoins industriels (par exemple : avoir l'équivalent du TAFT dans un environnement numérique, pouvoir décrire fonctionnellement un système du début jusqu'à la fin du processus de conception, avoir une traçabilité des solutions retenues en fonction des analyses fonctionnelles etc. ...).

La seconde étape, consista à analyser et comprendre le type d'information, que chaque partie du processus RFLP (Fig. 75) devait contenir. De la même manière, cette étape devait aussi notamment statuer, sur le moment à partir duquel le tolérancement devait commencer à être

¹ Plus globalement les liens pouvaient uniquement relier des entités de même niveau hiérarchique.

introduit, ainsi que sur les différentes simulations (et/ou vérifications) que l'on pouvait lancer sans même arriver à une définition purement géométrique.

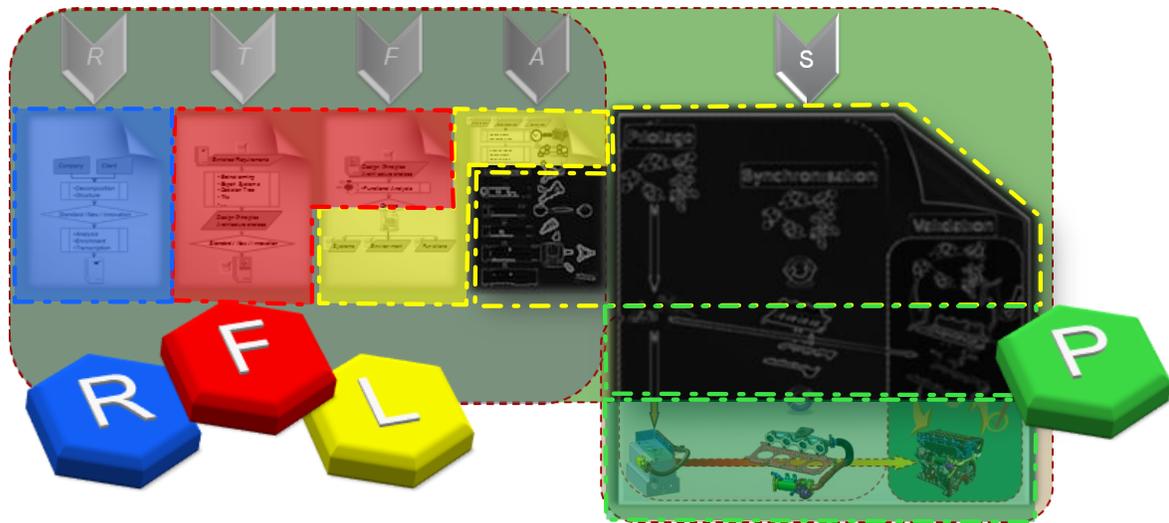


Fig. 75 : Couverture du cycle de conception par le processus RFLP.

c. Impacts et incohérences

Comme je l'ai fait ressortir dans la Fig. 75, il y a un manque « ressenti » et auquel il fallait trouver des pistes si ce n'est des solutions, mais assez rapidement le problème de la redondance d'informations s'est posé. D'un point de vue théorique cela n'est pas bloquant, mais du point de vue technique cela représentait un frein. Associé à cette problématique d'unicité de l'information, on a aussi été confrontés au fait que toute définition devait appartenir à un domaine (R, F, L ou P) et le choix du domaine variait d'une personne à l'autre.

A ces contraintes, il a aussi fallu intégrer le fait que le tolérancement n'apparaissait que dans le « Physical » dans la vue Dassault Systèmes alors que, comme je l'ai présenté dans notre approche ou comme on peut le trouver dans l'approche GASAP (Ballu et al., 2006), le tolérancement appliqué à une « Maquette Fonctionnelle » peut arriver avant la définition géométrique, donc dans ce que Dassault Systèmes appelle « Logical ».

En ce qui concerne la simulation, avec les données dont on pouvait disposer, il était impossible d'effectuer celles relatives au tolérancement avant d'avoir défini le système de manière géométrique (dans le « Physical »).

Le choix s'est alors porté dans un premier temps sur un travail d'enrichissement de la vue « Logical » afin de pouvoir disposer des concepts nécessaires et suffisants, sur lesquels reposerait ce que nous avons dans notre approche appelé « Squelette Fonctionnel ». La seconde partie a, quand à elle, porté sur l'interface qu'il existerait entre les mondes « Logical » & « Physical ».

d. Proposition d'enrichissement de la vue « Logical »

Ainsi, pour répondre aux problématiques présentées ci-dessus, j'ai commencé par dérouler un scénario d'intégration des concepts proposés et de les faire adopter par lots. En reprenant la volonté (de DS) d'arriver à intégrer un maximum de concepts relatifs au TAFT, j'ai fait table rase

sur les solutions techniques dont ils disposaient¹ et ai essayé de montrer que ce que je proposais était faisable avec les moyens techniques qu'ils avaient déjà en leur position :

- Les entités pièces,
- Les entités « Connexions » qui permettent de relier des entités de même niveau hiérarchique (telles que des pièces par exemple).

De manière schématique et simplifiée (Fig. 76), j'ai proposé de commencer par étendre la notion de connexion et de créer la notion d'interface, proposition qui est un premier pas pour arriver vers un modèle semblable à celui que l'on a présenté précédemment (Fig. 64).

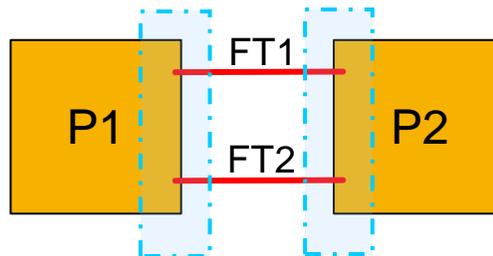


Fig. 76 : Première proposition d'enrichissement de la vue « Logical »

L'extension (d'une « connexion ») correspondait à prendre en compte pour une entité de type FT, des attributs relatifs non seulement aux pièces qu'elles liaient, mais aussi les surfaces fonctionnelles mises en relation et qui appartenaient à ces mêmes pièces. Toutefois la création des FT n'était pas encore conditionnée par la déclaration des Surfaces Fonctionnelles.

Remarque

Concernant les interfaces elles étaient conditionnées par l'existence de connexions entre les pièces.

Afin justement de répondre aux attentes même de DS, la seconde proposition concernait la création d'un « Squelette Fonctionnel Géométrique » dans la vue « Logical » et permettant de :

- Créer et synchroniser plus facilement le « Physical » avec le « Logical »,
- Créer la notion d'interface fonctionnelle & géométrique
- Faire porter moins d'informations sur les FT
- Ne pas repousser les simulations dans le P

Finalement étant donné que cela pouvait rebuter d'avoir une vision géométrique (ou « Physique » en reprenant la terminologie utilisée ci-dessus) au sein d'une modélisation dite « Logique », j'ai décidé de repenser la proposition et de la présenter sous forme de niveaux de définition² (Fig. 77), chacun ayant un périmètre bien défini et n'empiétant pas sur celui des autres.

¹ Pour un éditeur de solutions informatiques, il va de soi que l'on ne doit pas réinventer ce qui a déjà été mis en place et par conséquent il arrive que l'on commence à poser le problème en termes de solution et non pas (ou moins) de manière conceptuelle.

² . Dans la suite nous retrouverons les niveaux L0, L1 et L2 en référence à ce que j'avais appelé une vue « Multi-Layer » au sein de la vue « Logical ».

Hypothèses :

- Les FT lient les "pièces" physiques, ont comme attributs les SF, et pointent vers les Eléments Géométriques de Référence Minimums (EGRM) associés,
- Les EGRM, liant deux pièces, constituent un ensemble appelé "Interface" et sont quand à eux positionnés dans ce que l'on a appelé squelette fonctionnel.

Solutions techniques adoptées dans le « Physical » :

- La liaison cinématique entre les pièces porte les "connexions"
- Toute "Connexion" doit comporter une FT et possède en attributs les SF (vides ou non) appartenant aux pièces en lien.

Remarque

Dans la Fig. 77, j'ai représenté ce que devrait intégrer la définition « logique » d'une interface¹, et cela aux trois niveaux proposés.

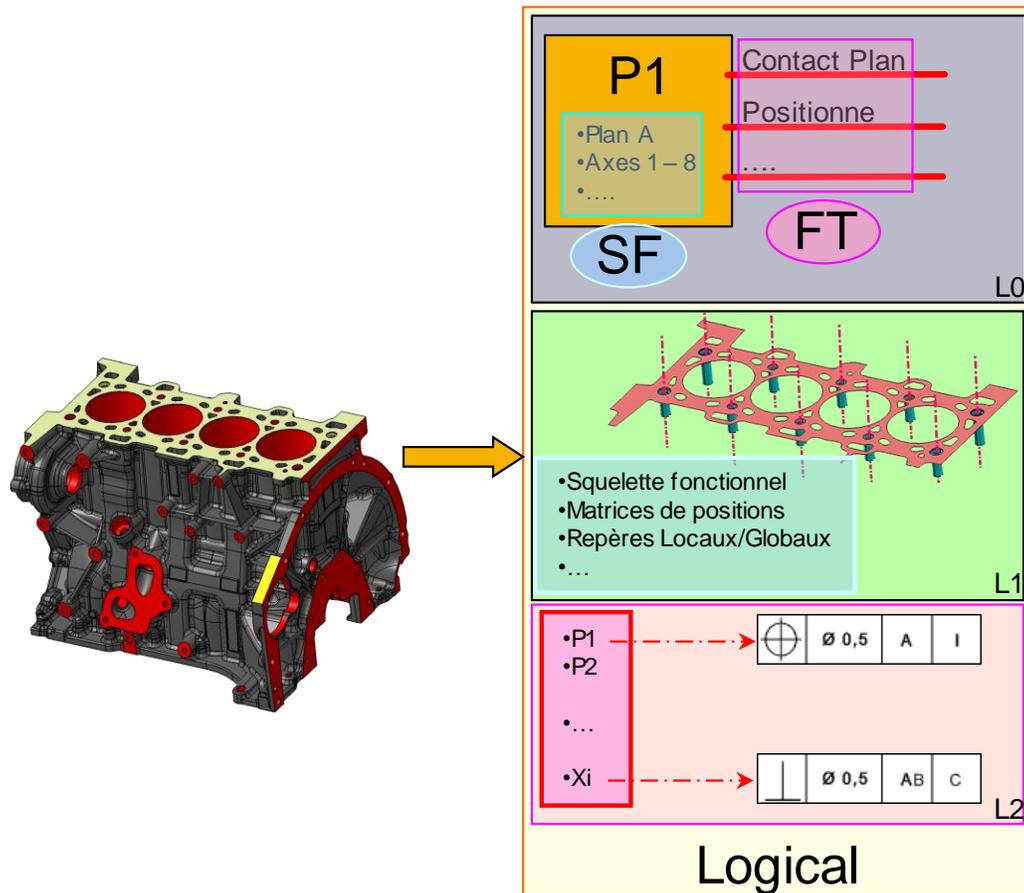


Fig. 77 : Proposition d'une vue « Logical » Multi-Niveaux

¹ Comme nous pourrons le voir par la suite, une partie de nos travaux a aussi porté sur le tolérancement par interface et donc en contexte. C'est en partie, aussi pour cela que nous retrouvons ici aussi une définition par interface et non pas par pièce.

Ainsi, au sein de cette représentation, nous retrouvons le :

- Niveau L0, correspondant à une vue descriptive des entités que l'on retrouve au niveau des interfaces, et incorporant entre autres :
 - Les informations portées par les connexions
 - Les attributs pointant les SF associées
- Niveau L1, correspondant à une vue "Squelette Fonctionnel" qui nous sert de lien avec la définition géométrique que l'on retrouve dans le « Physical ».
 - Dans le cas où les attributs des SF sont renseignés, on les place dans l'espace (matrices de position, liens entre repères ...)
 - Dans le cas contraire cette vue renseigne les informations manquantes lors de la création des entités manquantes dans le « Physical »
- Niveau L2, correspondant à une vue Tolérancement / Taft et qui servirait à la :
 - Création des schémas de cotation dans la vue « Logical »,
 - Hiérarchisation des Références / Surfaces tolérancées suivant le TAFT,
 - Synchronisation entre les SF pointées et le TAFT,
 - Vérification de la cohérence des schémas de cotation au niveau des interfaces.

e. Scénarios

Bien entendu, afin de ne pas rester complètement dans le théorique ou le semi-théorique (puisque je me suis basé sur ce qui existait déjà au sein de l'environnement CV6), j'ai aussi proposé des scénarios visant à tester les propositions précédentes et dans lesquels la vue :

1. « Logical » serait complète et à partir de laquelle on créerait la vue « Physical »,
2. « Physical » serait complète et à partir de laquelle on créerait la vue « Logical »
3. « Physical » ainsi que la vue « Logical » seraient asynchrones.

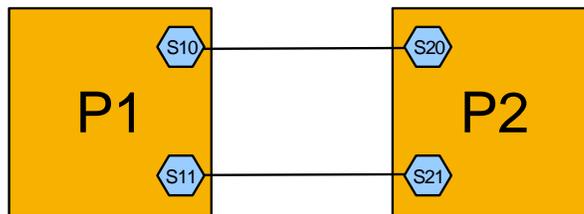


Fig. 78 : Terminologie choisie pour la schématisation des liens et surfaces

Concernant la description des liaisons, le plus simple pour les décrire et les retranscrire lors de l'implémentation au sein de CV6, a été de tout regrouper au sein d'une seule et même $L_{[1-2]} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} S_{10} & | & S_{20} \\ S_{11} & | & S_{21} \end{matrix} \right\}$. Les éléments présents dans le TAFT Renault sont traduits par des « éléments de connexion » liant les surfaces. En ce qui concerne la liaison, elle a été retranscrite comme ci-dessus et peut être régénérée dans le « Physical » à partir des connexions qui seraient listées dans la vue « Logical ».

Le dernier scénario, quand à lui, concerne le cas où l'on devrait par exemple, incorporer une définition purement géométrique provenant d'un fournisseur, dans un environnement comportant à la fois des définitions numériques et fonctionnelles.



<ol style="list-style-type: none"> 1. Lister toutes les entités de type pièce: $\{P_i\}_P$. 2. Créer : $(\{P_i\}_P \cap \{P_i\}_L) \cap \{P_i\}_L$ 3. Lister toutes les connexions $\{C_{ik}\}$ 4. $\forall P_{i_P}$ lister $\{S_{i_P}\}$ présentes au niveau de $\{C_{ik}\}$. 5. Créer : $(\{S_{i_P}\}_P \cap \{S_{i_P}\}_L) \cap \{S_{i_P}\}_L$ 6. Créer les connexions $\{C_{ik}\}$ n'ayant pas d'équivalent $\{L_{i-j}\}$ ou $\{FT_{ijk}\}$ dans le «P». 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lister toutes les entités de type pièce: $\{P_i\}_L$. 2. Créer : $(\{P_i\}_P \cap \{P_i\}_L) \cap \{P_i\}_P$ 3. Lister les $\{L_{i-j}\}$ et les $\{FT_{ijk}\}$. 4. $\forall P_{i_L}$ lister $\{S_{i_L}\}$ présentes au niveau des FT_{ijk} . 5. Créer : $(\{S_{i_P}\}_P \cap \{S_{i_P}\}_L) \cap \{S_{i_P}\}_L$ 6. Créer les $\{L_{i-j}\}$ ou $\{FT_{ijk}\}$ relatives aux $\{C_{ik}\}$ n'ayant pas d'équivalent dans le «L». <p style="text-align: right;">L0</p>
<ol style="list-style-type: none"> 7. Récupérer les positions des surfaces fonctionnelles / R_{oi} 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mettre à jour « en lien » le squelette géométrique à partir de $\{P_i\}_P$ et $\{C_{ik}\}$. <p style="text-align: right;">L1</p>
<ol style="list-style-type: none"> 8. $\forall S_i \in \text{interface} \in P_i$: lister tous les schémas de cotation $\{SC_{ik}\}_P$. 9. Créer : $(\{SC_{ik}\}_P \cap \{SC_{ik}\}_L) \cap \{SC_{ik}\}_L$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. $\forall S_i \in \text{interface} \in P_i$: lister tous les schémas de cotation $\{SC_{ik}\}_L$. 2. Créer : $(\{SC_{ik}\}_L \cap \{SC_{ik}\}_P) \cap \{SC_{ik}\}_P$ <p style="text-align: right;">L2</p>

Fig. 81 : Scénario de gestion des modélisations asynchrones

Dans le scénario ci-dessus (Fig. 81), j'ai volontairement omis les étapes de vérification de la cohérence des entités qui sont créés ainsi que de leur non duplication. En effet, cela est un point proposé, mais peu abordé dans le travail qui avait été effectué, et cela, de par le coté chronophage de modélisation des scénarios, qui devaient prendre en compte tous les cas de figure.

La proposition qui à l'époque avait été faite, reposait sur l'étude des DDL au sein des liaisons, dans le cas où l'on se retrouvait avec les définitions dans les deux vues « L » et « P ». Le choix de création / suppression, revenait au final, à l'utilisateur qui devait trancher afin de se retrouver avec des modélisations cohérentes¹.

De la même manière, concernant les schémas de cotation, la première étape consistait à vérifier l'unicité des « Surfaces de Référence » qui étaient utilisées, et donc à procéder à leur synchronisation, puisqu'on se basait sur celles-ci pour définir les schémas de cotation de la pièce en question. Dans le cas où des schémas étaient présents dans les deux vues, le choix revenait à l'utilisateur quand au choix qui devait être fait.

¹ Dans tout ce qui est présenté dans ce mémoire, je suis parti du postulat que la machine ou la solution logicielle n'étant là que pour mettre en avant les incohérences et non pour prendre les décisions. Si au final, erreur il y a, c'est uniquement à cause de l'utilisateur.

f. Faisabilité & Problèmes rencontrés

Concernant la faisabilité, n'ayant pas pu suivre le stagiaire jusqu'au bout de son stage, je ne peux pas avoir un avis complet. Toutefois lorsque l'on a travaillé sur la faisabilité de cette proposition les points suivants ont été soulevés :

- Impossibilité de lier ou de faire pointer les Surfaces Fonctionnelles (en tant qu'entité logique d'une Pièce dans la vue « Logical ») vers des EGRM dans la vue « Physical » (entant que composant d'une CatPart)¹.
- Le lien Pièce-Pièce entre les deux vues, par contre, étant valide.

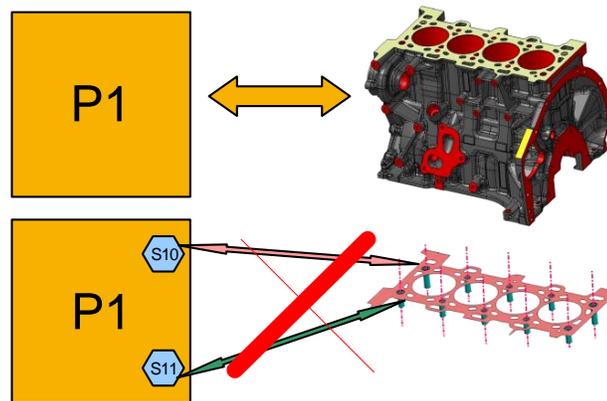


Fig. 82 : Impossibilité de lier une entité Logique à une Surface appartenant à une CatPart

- Problème pour lier des entités n'étant pas de même niveau hiérarchique (c'était aussi le cas pour GAIA)

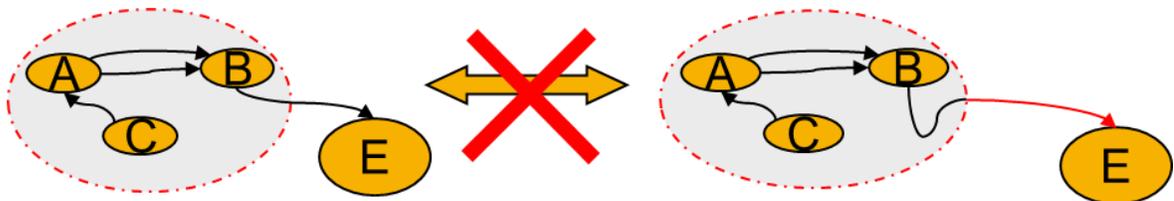


Fig. 83 : Problème de liens entre pièces

Mis à part ces points purement techniques, avant d'aller plus loin le projet devait mettre en place :

- Des « Fonctions Principales » (Fig. 35) ou de « Contraintes » au sein de la vue « Functional »
- Des FTE au sein de la vue « Logical » en commençant par les implémenter, qu'elles soient de type « contact » ou « pas de contact ».

¹ Par contre ce qu'il faut souligner c'est qu'il n'a pas été testé le cas où les EGRM seraient comprises non pas dans une CatPart mais dans un conteneur de type CatProduct.

Jusqu'à maintenant, ce qui avait été mis en place concernait les FTE "Contact" et permettait de faire ressortir (de manière simplifiée) le fait que la FTE :

- relie un composant X et un composant Y.
 - par une solution technique Z.
 - ayant des attributs techniques sur Z de type W.

Bilan – Maquette Fonctionnelle

Ce que l'on peut retenir de ce chapitre, c'est dans un premier temps, le fait que l'innovation réside ici dans l'usage de ce que l'on fait de la technologie et des méthodologies. Concernant les notions de Maquette Fonctionnelle et Maquette Numérique, comme je l'ai présenté dans la première partie de ce document, nous en retrouvons les traces à l'intérieur de publications assez anciennes (Pahl et al., Réédition 2007), mais qui faute d'outils informatiques, n'ont pas encore été mis en lien afin d'avoir une vision uniforme et une continuité numérique du début jusqu'à l'obtention de la maquette numérique finale.

En effet, que ce soit au niveau des industriels ou tout aussi bien au niveau des éditeurs de solutions informatiques, la priorité a été mise sur l'obtention d'une MN et donc aussi sur la fiabilisation des processus de conception associés. A l'heure actuelle, l'introduction d'une maquette fonctionnelle, passe ainsi obligatoirement par une adaptation de celle-ci à la maquette numérique qui n'évoluera pas dans des grandes proportions pour s'y adapter ; alors que dans un processus uniquement conceptuel c'est le numérique qui devrait reposer sur le fonctionnel.

Dans un second temps, il faut souligner la volonté de certains industriels (EADS par exemple) d'introduire ce genre de modélisations dans le cycle de développement standard d'un produit. A court et moyen terme, les solutions qu'ils ont choisi (basées sur la solution GAIA) peuvent convenir afin de remplacer et d'unifier les modélisations fonctionnelles. Toutefois à plus long terme, une solution ne prenant pas en compte l'évolution et la synchronisation de la maquette numérique associée, risque d'être abandonnée au profit de solutions « tout intégrées ». Malheureusement, celles ci risquent, quand à elles, de ne pas répondre complètement au besoin de l'utilisateur et surtout d'enfermer ce dernier au sein d'un seul environnement, à l'ère où les industriels se doivent d'être inter-opérationnels par rapport aux solutions CAO (notamment par rapport aux échanges avec les fournisseurs).

Finalement, il en ressort, d'après le domaine de recherche que j'ai pu aborder, qu'il reste énormément de recherche à mener, notamment pour stabiliser le modèle de Maquette Fonctionnelle. Celui que j'ai proposé n'est qu'une ébauche de ce qu'un travail de recherche beaucoup plus approfondi peut amener, mais il demandera forcément beaucoup plus de temps.

Un nouveau processus de spécification et validation

4

SOMMAIRE

La place de la cotation fonctionnelle dans le cycle de conception

- Introduction - Constats
- Proposition - Innovation

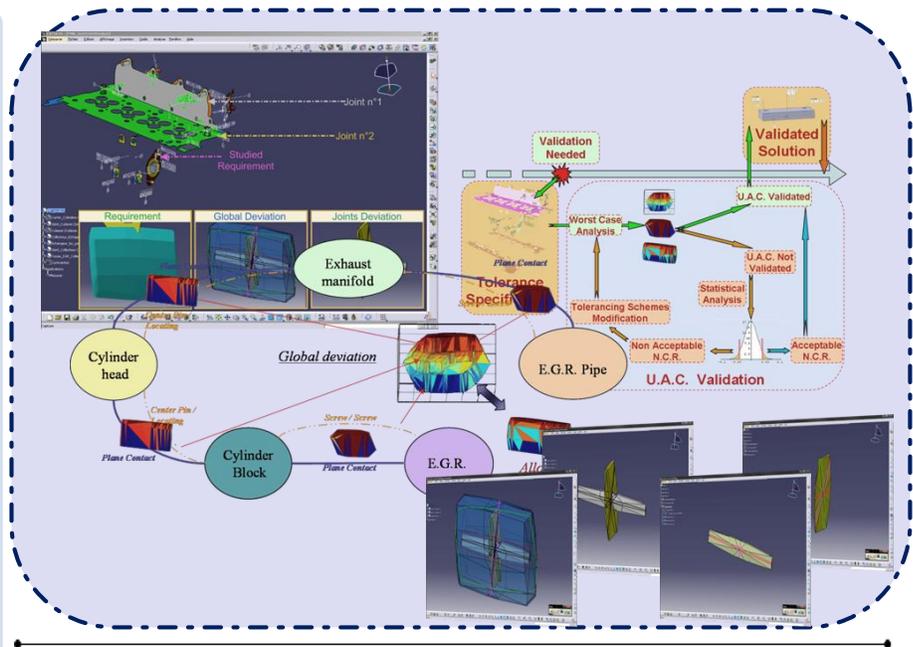
La place de la simulation des schémas de cotation

- Gestion des supports numériques pour la simulation
- Processus de validation proposé
- Proposition d'un processus d'optimisation « hybride »

Processus d'optimisation

MOTS-CLES

- ▶ Intégration
- ▶ Processus
- ▶ Spécification de tolérances
- ▶ Pire des Cas
- ▶ Avance de phase
- ▶ Maquette Numérique Simplifiée
- ▶ Squelette fonctionnel



Après avoir introduit le pilotage qu'il peut exister entre la vue fonctionnelle et la vue numérique, au travers de ce chapitre je vais tenter de présenter le processus de validation des schémas de cotation que l'on a adopté.

Dans un premier temps, je définirai la manière dont on spécifie les tolérances et l'intégration de cette partie en avance de phase en lien avec les deux représentations (MF et MN). Ensuite, je préciserai de quelle manière le support servant aux simulations, est créé et géré.

Enfin, je détaillerai le processus suivi lors des analyses au pire des cas et finirai en introduisant l'approche statistique pouvant être rajoutée entant que complément à l'analyse utilisant les « domaines écarts ».

La place de la cotation fonctionnelle dans le cycle de conception

Dans le chapitre précédent, j'ai introduit et détaillé ce que l'on entendait par « Maquette Fonctionnelle » ainsi que le fait qu'il serait possible d'intégrer le tolérancement très tôt dans le processus de conception en utilisant cette notion. Toutefois, comme on a pu le remarquer, je n'ai pas détaillé, ni la spécification par interfaces (au moyen des bibliothèques de cotation), ni l'analyse des schémas de cotation, car je voulais séparer le support (la MF & la MN) du processus de création et validation du tolérancement.

Dans ce chapitre je vais tenter d'éclaircir et détailler non seulement la manière et les méthodes utilisées, mais je vais aussi préciser les raisons qui nous ont poussés à faire ces choix.

Introduction - Constats

Afin de tirer au maximum profit des possibilités offertes par la maquette numérique, nous nous sommes penchés sur les gains qui pourraient être obtenus en modifiant le cycle de conception. Il serait réducteur de cloisonner les gains qu'il est possible d'atteindre en se restreignant à la simple réduction des coûts de production, pouvant être obtenus en optimisant les tolérances.

Ainsi, ce qui m'a amené à la proposition du cycle de conception que j'ai schématisé dans la Fig. 84 qui fait apparaître le tolérancement en avance de phase, est la conséquence des constats suivants :

- les processus de spécification et de validation du tolérancement sont mis en place trop tardivement dans le processus de conception (Fig. 30), constat partagé par les chercheurs et les industriels (Buisse, 2007),
- les choix d'architecture pris les plus en amont ont le plus d'impact sur la solution finale,
- plus on avance dans le cycle de conception, plus il est difficile et coûteux de corriger le tir,
- à chaque étape il est nécessaire de vérifier la cohérence avec les exigences spécifiées, et il faut aussi garantir la traçabilité,
- il faudrait donc pré-valider les solutions, ou tout du moins, certains choix de conception en amont afin de converger au plus vite vers la solution optimale et ne pas perdre de temps sur des solutions parallèles.

La raison majeure étant le fait que l'on attend souvent d'avoir une définition géométrique détaillée, avant d'enclencher le processus de spécification des schémas de cotation relatifs au système étudié. Malheureusement, cela repousse d'autant leur validation et surtout restreint les choix et solutions pouvant être adoptés pour répondre à l'ensemble des exigences qui ont été spécifiées très en amont dans le cycle de conception.

Proposition - Innovation

Pour répondre à ces différents points, j'ai essayé de remettre à plat le processus de conception et de penser à la mise en place de nouvelles méthodologies permettant d'intégrer le tolérancement non seulement dès l'avance de phase, mais permettant aussi de le faire évoluer et de valider les conditions fonctionnelles, en parallèle, au même titre que la MN à laquelle il est associé.

1. Intégration en Avance de Phase

Afin de pouvoir considérer que l'intégration en avance de phase était possible, il fallait pouvoir disposer :

- d'un support simplement fonctionnel, pour pouvoir effectuer les validations qualitatives (notamment les vérifications relatives à la cohérence des schémas de cotation), et cela, que l'on dispose ou non d'une géométrie « détaillée » et/ou « figée »,
- d'un support géométrique nécessaire à la validation quantitative des schémas de cotation.

Le résultat auquel je suis arrivé, et qui est schématisé au sein de la Fig. 84, tente de montrer que la spécification peut être faite au niveau de la MF et validée au niveau de la MN Simplifiée, et cela bien avant l'obtention d'une MN détaillée et finalisée (Socoliuc et al., 2009).

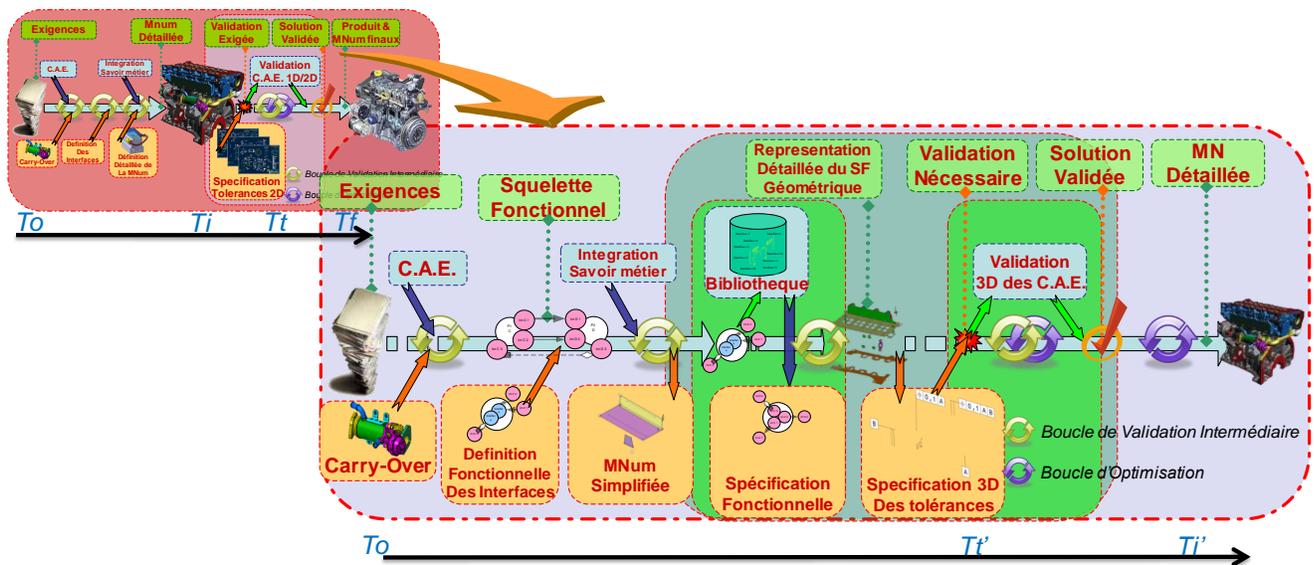


Fig. 84 : Evolution de la place accordée à la cotation dans le cycle de conception

Cette proposition permettrait non seulement de raccourcir le temps de développement, mais aussi et surtout de mettre en place une continuité numérique au travers de l'utilisation en parallèle, du Squelette Fonctionnel (inclus dans la MF) et de la MN Simplifiée (synchronisée au Squelette Fonctionnel Géométrique) (Fig. 74) que j'ai présentées dans le chapitre 3.

En effet, la MF répond au manque de lien entre le domaine Fonctionnel et celui Numérique mais permet aussi et surtout de :

- faire débiter le tolérancement dès la création des surfaces fonctionnelles,
- faire cohabiter les « Exigences » avec les solutions géométriques devant y répondre,
- pouvoir avoir une traçabilité des choix effectués et des solutions qui en ont découlé (depuis le fonctionnel jusqu'à la MN détaillée), d'avoir une vision globale des exigences qui ont été validées et/ou qui posent problème,
- quantifier la maturité de la MN,
- disposer d'une représentation moins lourde pour les simulations.

2. Capitalisation – Réutilisation

Un autre point sur lequel il a fallu se pencher concerne la réutilisation du savoir capitalisé. En effet, dans un environnement tel que celui de Renault (ou tout autre grand industriel), peu ou pas de projets partent d'une feuille blanche. Ainsi, tout est mis en œuvre pour que toute solution soit pensée afin de pouvoir être réutilisable dans un autre contexte, soit telle quelle ou avec le minimum de modifications.

Les exemples les plus parlants, sont ceux qui font intervenir du « Carry-Over » d'ensembles ou de pièces mécaniques, ayant été conçus à la base pour un véhicule bien précis, mais qui pour des raisons d'économie et de standardisation vont aussi être utilisés lors d'autres projets. Le savoir capitalisé se doit d'être réutilisé comme une pièce « Lego » correspond à une solution pré-validée (et/ou rendue suffisamment robuste par le nombre d'années) et pouvant être incorporée directement dans un nouvel environnement. Le résultat d'un tel assemblage se devant d'être validé et optimisé plus rapidement et facilement. Toutefois la réutilisation du savoir se traduit aussi à des échelles beaucoup plus petites et notamment, au niveau de la spécification des tolérances.

En ce qui concerne le tolérancement des interfaces, les problèmes rencontrés proviennent notamment du fait qu'un système peut être conçu par plusieurs équipes (et notamment intégrant des équipementiers) qui malheureusement partagent trop peu d'éléments. Cela se traduit par des incohérences lors de l'assemblage (c'est à dire trop tard) par le fait qu'il n'y ait pas forcément de références numériques communes entre les pièces qui doivent s'assembler, et également par des schémas de cotation en vis-à-vis au niveau de l'interface qui ne sont pas cohérents.

3. Tolérancement par « Interfaces »

L'avantage de travailler au niveau de l'interface consiste dans un premier temps à pouvoir échanger et travailler autour d'un seul et même modèle dès le début de l'étude. En allant plus loin dans cette réflexion, l'entité interface (au sens modélisation 3D, incorporant le schéma de cotation à respecter) peut très bien être une partie du cahier des charges qui est envoyé à un fournisseur.

Parmi les travaux qui ont déjà été menés autour de la spécification des interfaces, au sein de Renault, Toulorge (Toulorge et al., 2001) (Toulorge et al., 2002) avait étudié les méthodologies d'assistance fonctionnelle à la cotation géométrique, travaux ayant servi par la suite de base pour :

- la mise en place de bibliothèques incorporant le savoir-faire relatif au tolérancement (Toulorge et al., 2003) et donc indirectement, mettant en place une standardisation des schémas génériques de cotation capitalisés,
- montrer la faisabilité d'intégration des CAE dans l'environnement numérique au travers d'un prototype (Toulorge et al., 2004).

Malheureusement, nous n'avons pas pu récupérer le prototype ayant été développé en partenariat avec Dassault Systèmes (Toulorge et al., 2004) (sources introuvables) et avons dû redéfinir les notions d'interfaces lors de la phase de développement du prototype visant à montrer la faisabilité de l'analyse & validation des schémas de cotation.

Remarque

De notre côté, les études que nous avons effectuées se basaient sur ces concepts et c'est pour cela qu'il a fallu aussi regarder leur faisabilité (au niveau de l'utilisation) en avance de phase sur des MN « non finalisés ».

Avant de pouvoir passer à l'étape de validation du tolérancement, la première étape consista à redéfinir les schémas de cotation qui ont déjà été capitalisés, puisque le support dans lequel les informations étaient incluses (plans 2D, documents Word...) ne permettait pas leur réutilisation dans un nouveau contexte, et n'étaient donc pas liés à la MN. Pour ce faire il a fallu créer des modèles génériques « intelligents » qui peuvent être instanciés dans l'environnement numérique CV5.

Comme on peut l'apercevoir sur la Fig. 85, que l'on se place d'un point de vue fonctionnel ou numérique, le processus de spécification reste le même, à savoir :

1. identification de l'interface qui va être tolérancée (choix du SATT associé),
2. recherche de l'existence d'un schéma de cotation qui pourrait correspondre,
3. instanciation du schéma générique au niveau des surfaces fonctionnelles composant l'interface.

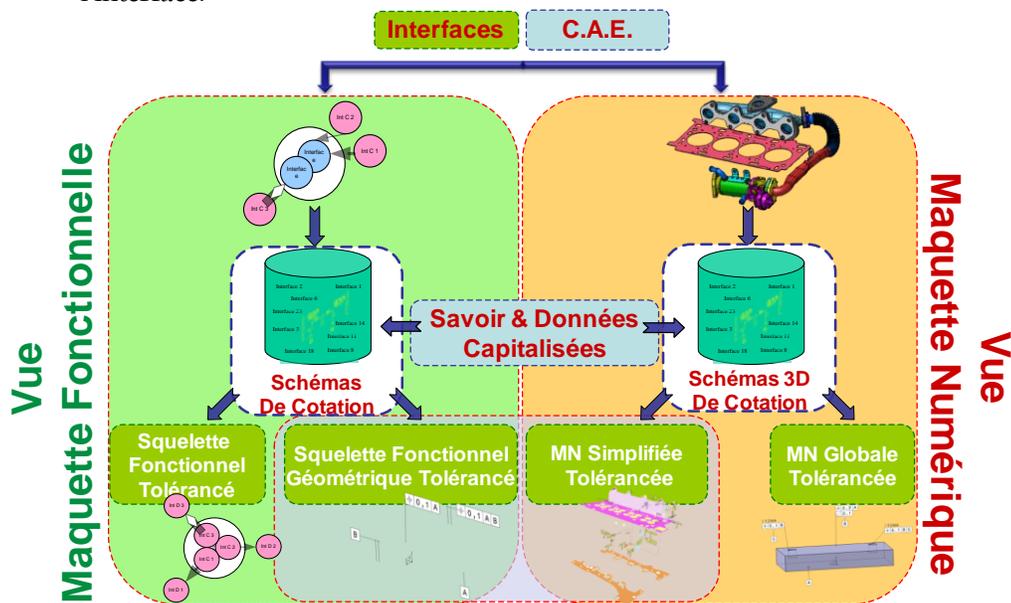


Fig. 85 : Etape de spécification des schémas de cotation

Les avantages liés au fait de travailler avec des bases de données de connaissance, et ici plus précisément avec des bibliothèques de cotations 3D, sont multiples :

- le savoir-faire capitalisé représente une masse très importante d'informations,
- les schémas de cotation 3D respectent les normes et ont été validés par des experts métier,
- les « plans » finaux se retrouvent « standardisés »,
- la capitalisation est plus aisée, sous forme de plans 3D et est en lien avec la MN,
- la génération de familles technologiques instanciables est aisée,
- les gains en qualité, coût et temps (spécification tout comme validation) ne sont pas négligeables.

Toutefois, ce qui est mis en place, tant au niveau fonctionnel que numérique, c'est une cotation par « interfaces », impliquant donc que les « schémas type » qui peuvent être instanciés :

- dépendent du type d'interface, donc du SATT équivalent, et il peut exister plusieurs schémas de cotation pour la même interface (l'optimale dépendant du cas d'utilisation),
- sont limités en nombre et il se peut donc que la bibliothèque ne comporte pas de schéma de cotation correspondant au type d'interface sélectionné, cas dans lequel une nouvelle étude se doit d'être effectuée, validée et capitalisée (pour répondre aux prochaines études),
- et doivent prendre en compte toutes les parties en vis-à-vis composant l'interface afin d'assurer la cohérence des schémas de cotation.

Dans le cas où l'on ne spécifie qu'une partie d'une interface, la vérification de la cohérence se fait au niveau du squelette fonctionnel durant la phase de validation.

Remarque

La place de la simulation des schémas de cotation

Comme je l'ai déjà précisé, le point de départ des études, menées durant la thèse, fut la volonté d'intégrer l'analyse des schémas de cotation dans l'environnement numérique et cela de manière à ce qu'elle soit « facile » d'accès, mais aussi en interprétation des résultats. L'approche « User Friendly » nous a ainsi poussés à voir l'approche purement « recherche », au travers de l'œil de ceux à qui elle s'adresse. Ainsi, en face de chaque concept qu'il fallait mettre en place, il a aussi fallu réfléchir à sa possible réalisation et utilisation.

Pour y arriver, il a fallu travailler :

- d'une part sur la gestion du support servant aux simulations, en mettant en place la Maquette Fonctionnelle ainsi que la Maquette Numérique Simplifiée,
- d'autre part sur les méthodes d'analyse, en incorporant les résultats, présentés sous forme de polytopes au sein de la MN.

Gestion des supports numériques pour la simulation

Tout d'abord je vais reprendre le processus proposé, et préciser le contexte dans lequel nous plaçons. En ce qui concerne la vue dans laquelle je vais présenter les simulations, il va de soi, qu'outre les vérifications de cohérence des schémas de cotation au niveau des interfaces, toutes les autres simulations et validations vont se dérouler dans l'environnement numérique.

Les seules autres hypothèses concernant les représentations dans les deux vues supposent que la MN a été créée à partir d'une MF ou tout du moins qu'au moment où l'on souhaite commencer les pré-validations des schémas de cotation, les deux vues sont synchronisées d'un point de vue fonctionnel. Il va de soi que ces pré-validations n'impliquent pas d'avoir une MN détaillée et/ou dont la géométrie est considérée comme finale donc « gelée »¹.

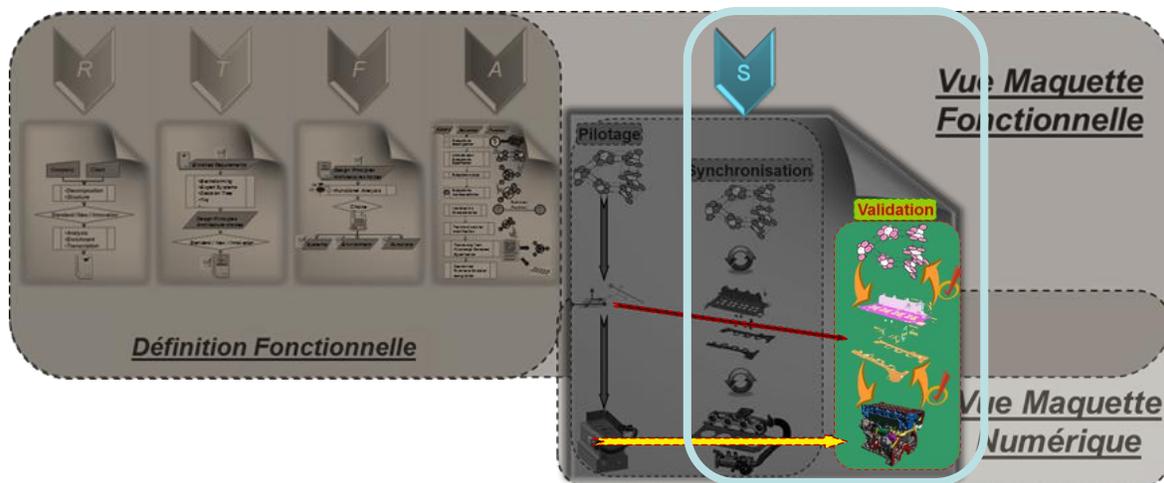


Fig. 86 : Place dans le cycle de conception

¹ Par « gel » d'une géométrie, on sous-entend qu'après avoir passé les différents jalons de validation, il est impossible de revenir sur la définition de la maquette numérique afin de la modifier.

Une des contraintes qui m’a été imposée durant les différentes études menées, concernait l’intégrité de la « MN source » qu’il fallait pouvoir garantir. Ainsi, dans le cadre des différentes analyses, il a aussi fallu prendre en compte le fait que le support sur lequel on se basait ne pouvait et surtout ne devait pas être modifié.

Pour y répondre, dans un premier temps j’avais adopté une approche qui visait à créer une « extraction » à partir de la MN source, choix qui a aussi porté ses fruits, de par le fait qu’en n’important pas la MN dans sa globalité, on n’allourdissait pas inutilement la session et donc, par la même occasion, il a été possible de raccourcir la durée des calculs d’analyse de tolérances. Dans un second temps, et comme on a pu le voir au travers du processus de définition fonctionnelle, on peut effectuer les simulations sur la MNS.

Par la suite j’ai découvert que cette approche était semblable à l’approche intégrée au SLM (Simulation Lifecycle Management) (Lionel Fine, EADS, 2008) mis en place au sein d’EADS, et visant à produire pour chaque type de simulation une maquette allégée convenant au type de calcul effectué. Toujours dans le domaine de l’industrie aéronautique, une application plutôt particulière a retenu mon attention (Chevaldonné et al., 2005) car elle fait intervenir un processus de « simplification dynamique »¹, permettant de simplifier la maquette pendant que l’application l’utilisant est lancée.

Toutefois, pour les autres types de simulation dans le domaine de l’aéronautique, faisant donc intervenir des maquettes numériques très lourdes, on comprend qu’ils aient dû mettre en place des processus (« statiques »² cette fois) de simplifications, notamment en ce qui concerne les calculs par éléments finis (Catalano et al., 2009) (Ferrandes et al., 2009). Cependant, le même processus permet aussi d’obtenir des gains en terme de temps de calcul y compris sur les systèmes plus petits, comme dans le cas de l’industrie automobile.

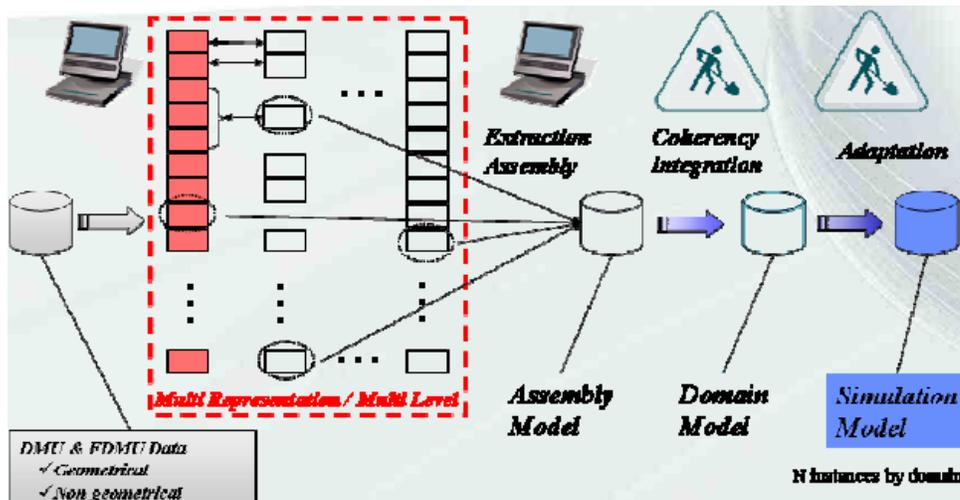


Fig. 87 : Processus relatif à la création d’une modélisation vouée à la simulation (Lionel Fine, EADS, 2008)

¹ Ce type de simplification était présenté pour des simulations « particulières », à savoir le rendu visuel d’un « cockpit virtuel ».

² Par « statique », les auteurs font ressortir le fait que la simplification ne se fait pas à la volée mais en dehors et avant d’avoir lancé l’application qui va utiliser cette modélisation.

1. Définition de la Maquette Numérique Simplifiée

Dans notre cas, il a fallu dans un premier temps définir quelles étaient les simplifications que l'on pouvait s'autoriser au niveau de la MN, sans enlever des éléments fonctionnels qui seraient nécessaires lors du calcul. Les différentes simplifications nous ont amenés à définir ce que j'ai présenté sous l'appellation « Maquette Numérique Simplifiée » dans le chapitre précédent et qui correspond à une description du système par ses interfaces (incluant aussi les schémas de cotation).

La MNS, je l'ai obtenue par une extraction des surfaces composant les interfaces auxquelles j'ai réappliqué les schémas de cotation. Il va de soi que ce processus qui a été dans un premier temps manuel, peut être automatisé et exécuté périodiquement afin d'avoir une MNS à jour tout au long du cycle de conception tel que je l'ai représenté dans la Fig. 88 (l'utilisateur n'effectue que les actions présentes sur sa ligne, le reste étant effectué par l'outil dans l'environnement de la MN).

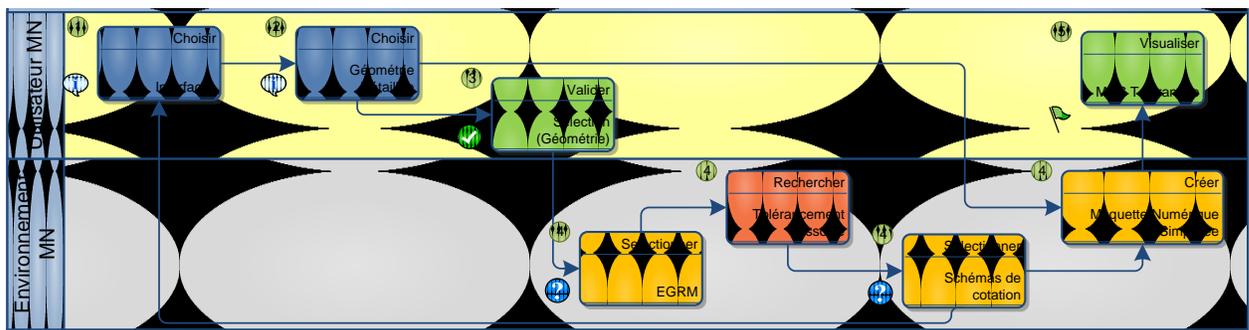


Fig. 88 : Scénario de création de la MNS à partir de la MN

Bien entendu, dans notre cas je n'ai nullement la prétention d'avoir atteint la robustesse des processus de simplification mis en place chez EADS, mais pour l'utilisation présentée ci-dessus, le prototype d'analyse de tolérances développé en partenariat avec Dassault Systèmes (détaillé par la suite), suffit pour montrer la faisabilité de telles routines¹ dans l'environnement CV5.

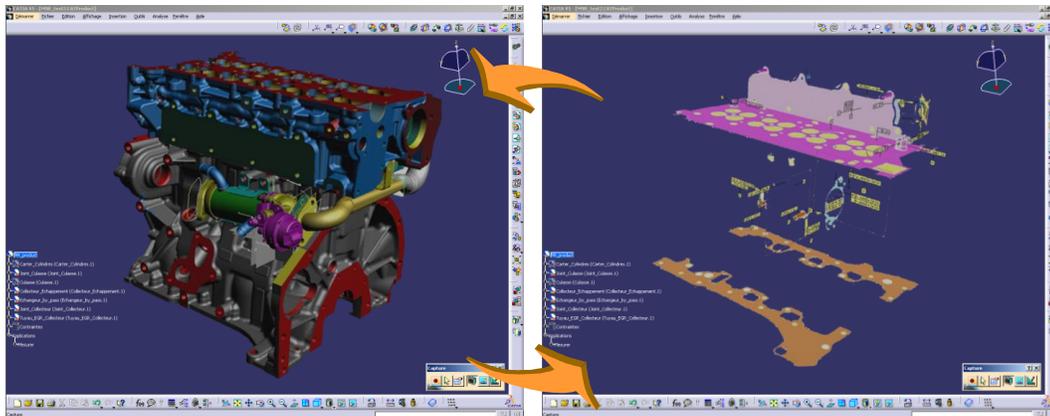


Fig. 89 : Equivalence entre les modélisations ²

¹L'outil tel qu'il a été développé, reprend les six premières étapes du scénario présenté dans la Fig. 88, afin de pouvoir récupérer les informations relatives aux entités composant les interfaces (type de surface, tolérances...). Il est tout à fait possible d'enrichir et encapsuler cette routine, en rajoutant la dernière étape devant dupliquer les interfaces dans une nouvelle modélisation (la MNS).

² On parle d'équivalence en termes de support minimum nécessaire aux simulations.

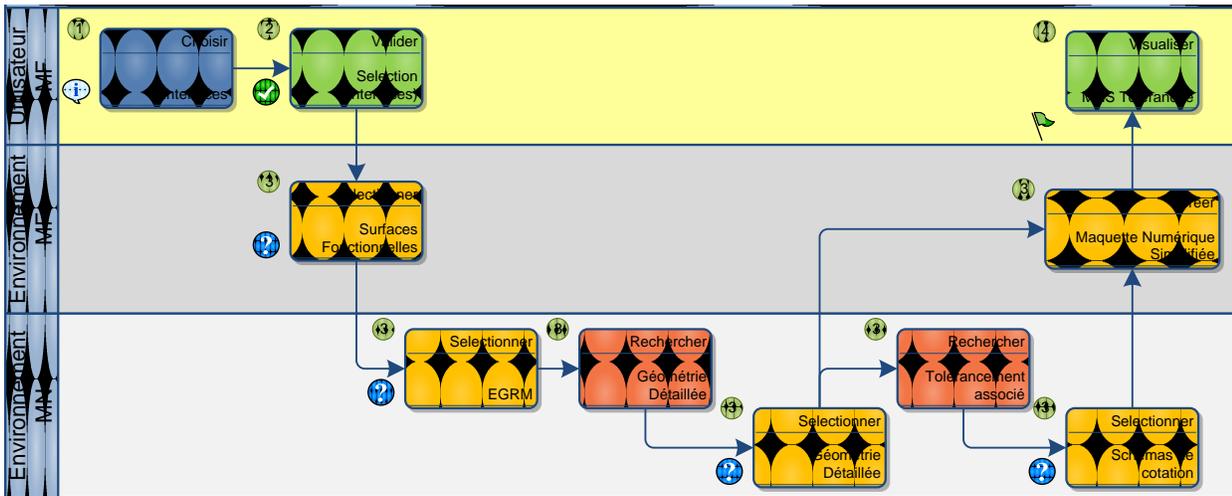


Fig. 90 : Scénario de création de la MNS à partir de la MF

Comme on peut le remarquer, pour présenter la MNS j'ai effectué le processus inverse par rapport à ce que j'ai proposé dans le chapitre précédent. Cela est simplement dû au fait que l'idée d'utilisation de la MNS a été développée avant d'avoir mis en place tout le processus de MF. Toutefois, pour avoir une meilleure compréhension du concept utilisé, j'ai préféré le présenter chronologiquement (et non pas en suivant le processus de création de la MN tout au long du processus de conception Fig. 90).

Toutefois cela ne remet pas en cause ce que j'ai présenté dans le chapitre précédent, de par le fait que la MNS n'est que l'équivalent du Squelette Fonctionnel Géométrique (donc aussi du Squelette Fonctionnel Fig. 91) auquel des informations supplémentaires (dimensions & détails des surfaces) ont été rajoutées aux EGRM composant le SFG afin de mieux définir les interfaces. Comme nous l'avons déjà précisé, (dans le cas où le processus de synchronisation a été appliqué Fig. 74) le passage d'une vue à une autre permet d'avoir accès aux mêmes informations.

Remarque

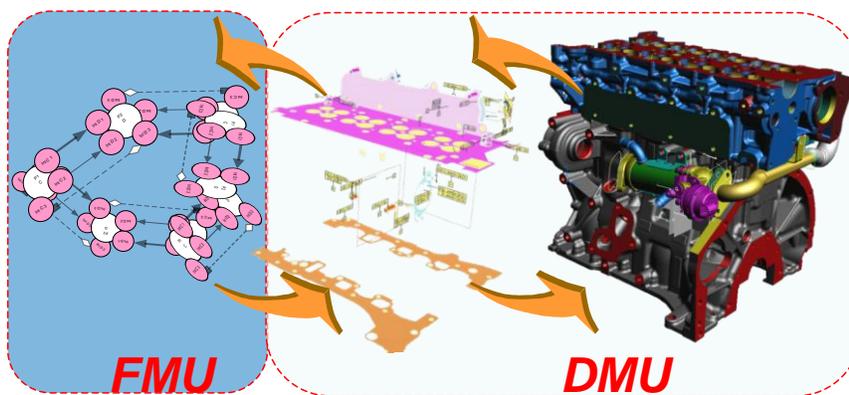


Fig. 91 : Equivalence entre les modélisations d'un point de vue fonctionnel

En effet, pour l'étape d'analyse du tolérancement, le coté volumique des pièces ne nous apporte presque rien, tout comme les éléments géométriques qui ne sont pas fonctionnels. Toutefois le côté volumique des pièces, peut être utilisé dans le cas où l'on essaierait de simuler un assemblage de pièces mécaniques présentant des défauts géométriques au niveau des surfaces fonctionnelles composant les interfaces Fig. 92.

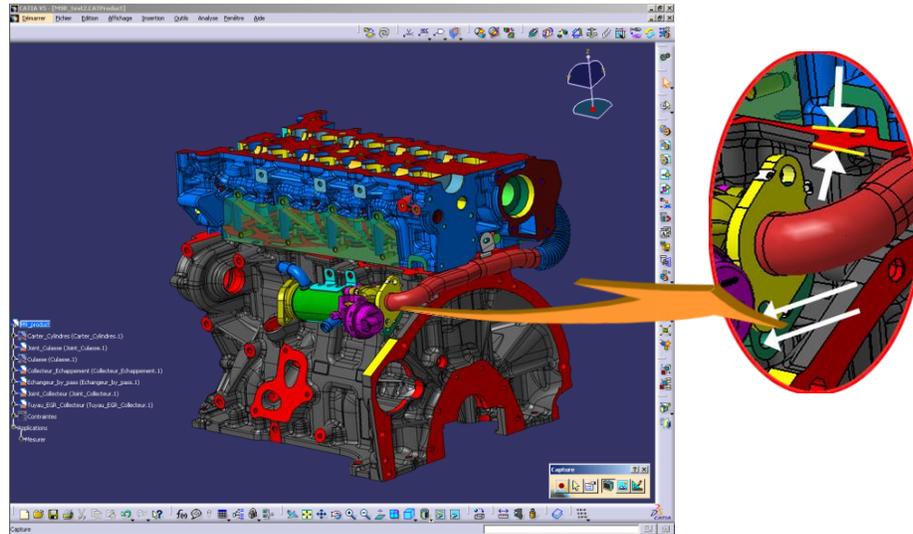


Fig. 92 : Simulation d'un assemblage faisant intervenir des défauts géométriques au niveau des interfaces

2. Définition du concept d'inter-pièce pour la simulation d'assemblages 3D

Ainsi, toujours dans l'optique d'obtenir des résultats visuels au sein d'un environnement standard, je me suis posé la question des assemblages 3D pouvant montrer l'impact des défauts géométriques, non pas seulement sur une condition fonctionnelle mais de manière générale sur la propagation des écarts et positions des pièces dans l'espace.

Parmi les travaux de recherche que j'ai pu consulter (et qui m'ont permis d'avancer dans ma réflexion), j'ai trouvé entre-autres :

- Des méthodes de simulation associées à des modèles plans (2D) (Ostrovsky-Berman & Joskowicz, 2006),
- Des analyses d'assemblages 3D, prenant en compte les défauts de forme (Samper et al., 2009) mais qui sont toujours relatifs à l'étude d'une seule condition fonctionnelle,
- Des outils qui représentent les écarts mais non intégrés dans l'environnement CAO (Cao et al., 2006),
- Des processus de re-création de pièces mécaniques dans l'environnement de conception, à partir de représentations par éléments finis, (Aifaoui et al., 2008)
- [...]

Associés aux références introduites dans le chapitre 2¹, cela nous permet de constater qu'on pourrait disposer d'une partie des outils théoriques afin de proposer des processus puis des solutions d'intégration de simulations permettant de visualiser et quantifier l'interpénétration des différentes pièces, calcul uniquement réalisable en présence de pièces « volumiques » et par conséquent ne pouvant pas uniquement reposer sur l'utilisation des surfaces fonctionnelles composant la MNS.

De plus, une des contraintes que j'ai introduite précédemment impliquait que la MN ne pouvait pas être modifiée et c'est aussi une des raisons pour lesquelles, afin de permettre de simuler les défauts géométriques, le concept d'inter-pièce avait été introduit afin de :

- Créer un assemblage entièrement paramétrique « indépendant »,
- Transcrire les informations relatives au tolérancement et de créer les zones tolérancées.

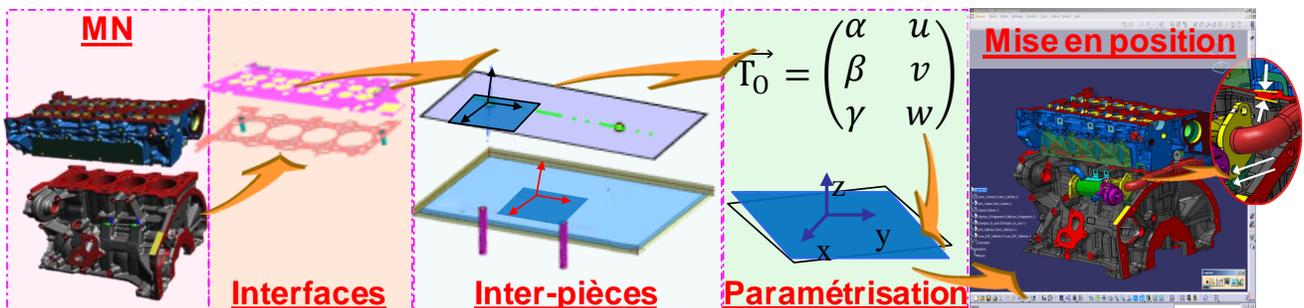


Fig. 93 : Création d'un assemblage en utilisant les inter-pièces

Le processus qui a été mis en place créait une pièce virtuelle, reprenant les surfaces fonctionnelles présentes de part et d'autre de l'interface et qui constituaient les liaisons en jeu dans l'assemblage étudié. Pour toute interface, nous avons pris en compte, uniquement les tolérances de localisation (et d'orientation pour les surfaces planes), la traduction de l'union « Géométrie & Schémas de cotation » nous donnant les zones tolérancées au sein des interfaces. Pour finir, la traduction en objet numérique paramétrique se faisait au travers de l'instanciation d'un modèle « intelligent »².

La seconde étape quand à elle, est purement calculatoire et revient à trouver les espaces de faisabilité pour chaque inter-pièce ce qui revient à dérouler le processus suivant :

1. Discrétiser les surfaces fonctionnelles,
2. Trouver les N-uplets $\{\alpha, \beta, \gamma, u, v, w\}$ définissant les amplitudes maximales autorisées au sein de chaque « liaison »³, (Socoliuc, 2006) (Germain, 2007)
3. Dérouler un script dans l'environnement CV5, associant aux entités tolérancées un

¹ Liste des axes de recherche autour de l'analyse des tolérances.

² Appellation propre à la au modelleur CAO CATIA V5.

³ Ce processus sera détaillé un peu plus loin lorsque j'introduirai le prototype d'analyse de tolérances au pire des cas et qui incorporait un tel calcul.

torseur déplacement $\begin{pmatrix} u_{i_max} & \alpha_{i_max} \\ v_{i_max} & \beta_{i_max} \\ w_{i_max} & \gamma_{i_max} \end{pmatrix}$ par l'intermédiaire des contraintes de position, présentes au sein de chaque inter-pièce paramétrique.

Ce que j'ai essayé de faire ressortir au travers de cette expérimentation, ce sont les points suivants :

1. Les schémas de cotation ont un impact qui va au delà des conditions fonctionnelles qui sont clairement identifiées (et sont donc surveillées tout au long du cycle de conception puis validées),
2. Effectuer des analyses uniquement en 1 point et parfois selon une seule direction est insuffisant (nous avons lors d'un assemblage de corps solides 3D, donc des propagations de mouvements qui vont l'être aussi à leur tour),
3. L'étude (analyse de tolérances) relative au respect des C.A.E. au niveau d'une surface fonctionnelle n'est vraiment pertinente qu'après avoir vérifié qu'au sein de la chaîne cinématique étudiée, il n'existe pas d'autres conditions géométriques à vérifier et qui peuvent avoir un impact sur celle en cours d'étude.

Pour illustrer et mettre en pratique ces remarques, il a été convenu d'effectuer les simulations sur la boucle cinématique faisant intervenir le bloc-cylindres (1), la culasse (2), le collecteur d'échappement (3), le tuyau de la vanne EGR¹ (4) et la vanne EGR (5) (Fig. 94).

A la problématique d'assemblabilité du tuyau à l'EGR (sans avoir recours à une mise en contrainte), et qui sera étudiée au travers d'une analyse des schémas de cotation présents au niveau des interfaces, j'ai aussi regardé les « mouvements » du tuyau afin de vérifier la non interpénétration notamment avec la culasse, de par le grand bras de levier présent.

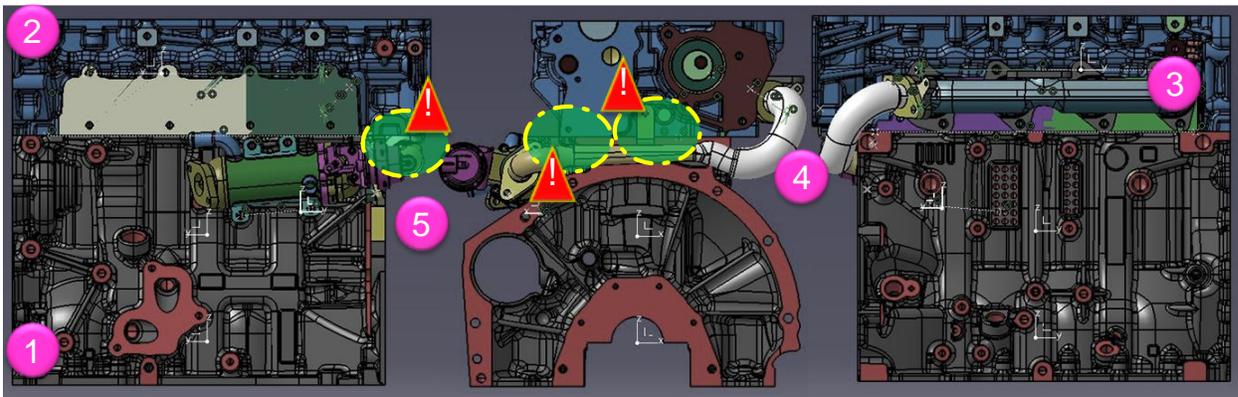


Fig. 94 : Cas d'étude & points de vérification

¹ La vanne EGR (Exhaust Gas Recirculation) désigne le dispositif de « Recirculation des Gaz d'Echappement » permettant de réintroduire une partie des gaz d'échappement dans le collecteur d'admission.

Processus de validation proposé

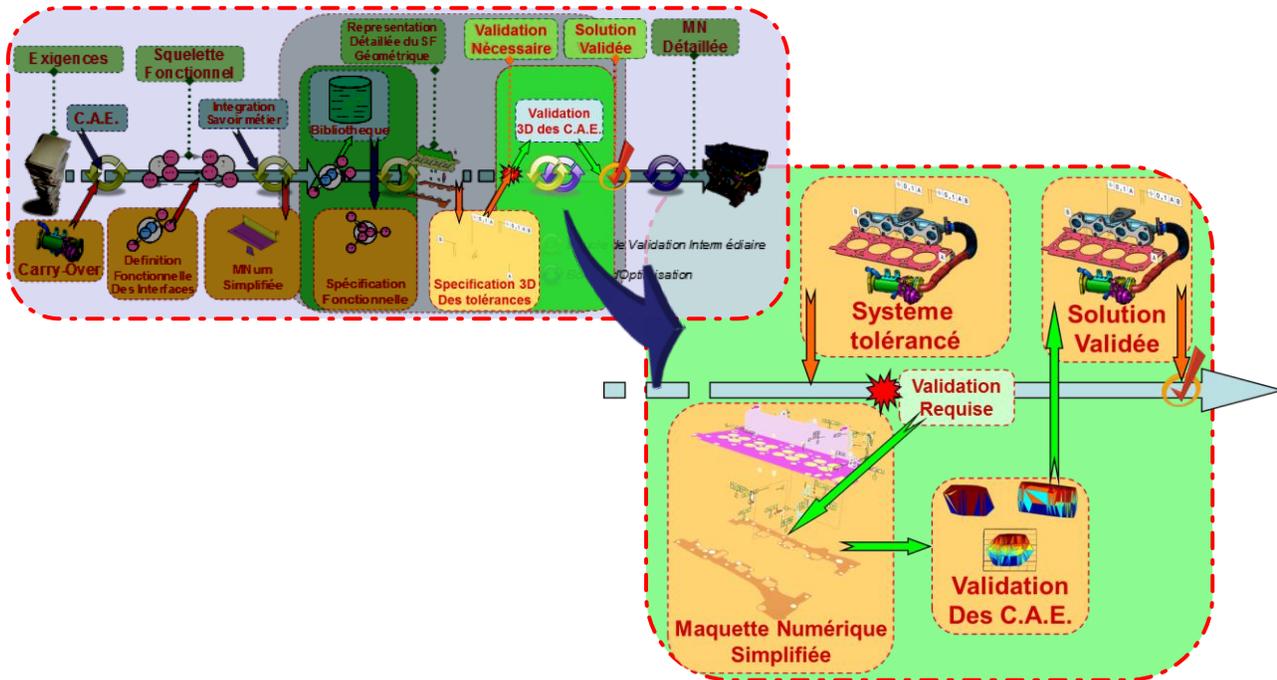


Fig. 95 : Processus de validation des schémas de tolérancement proposé

Le processus proposé s’inscrit dans la continuité de ce qui a été proposé jusqu’ici, et reprend donc les concepts précédemment introduits. Pour rappel, le processus de validation peut être lancé dès que les vues (fonctionnelle & numérique) de la maquette sont synchronisées (Fig. 86). Ce dernier (Fig. 95) reprend la MN à l’instant t , crée (ou met à jour si elle existe déjà) la MNS et enfin lance l’étape calculatoire (utilisant des domaines) visant à pré-valider les C.A.E. souhaitées.

1. Hypothèses & contexte numérique à respecter

a. Contraintes à intégrer dans les modèles « de calcul »

Afin de pouvoir effectuer les simulations, il a fallu surtout borner le domaine auquel celles-ci pouvaient s’appliquer. Ainsi, toute pièce sera considérée comme indéformable et les défauts de forme sont négligés. Comme on pourra le voir, nous n’effectuons que des calculs mono-boucles et les schémas de cotation sont orientés au sein de celle-ci.

Concernant les calculs qui sont effectués, de par le fait que l’on considère que la spécification des tolérances est effectuée en se basant sur des standards propres à l’entreprise, nous avons commencé par traiter les plus couramment utilisés, ce qui nous a conduits à standardiser les calculs. Ainsi, nous avons créé des « procédures » typées selon les SATT présents au niveau des interfaces, ne permettant donc pas de prendre en compte tous les schémas de cotation.

De plus, les modèles utilisés, et que j’ai introduits au chapitre 2, se basent d’une part sur les travaux de relatifs à la description à l’aide des SATT et EGRM (Clement et al., févr. 1996) (Gagnet, 1994), ainsi que sur ceux relatifs au calcul « au pire des cas », des espaces de faisabilité (Turner), les T-maps, espaces jeu & écart (Giordano et al., 2003) (Petit, 2004) (Davidson & Shah, 2004).

Je préciserai aussi, que je n'ai pas utilisé de solveur mathématique intégré, et donc, j'ai dû retranscrire pour les types de liaisons étudiées, les inéquations utilisées pour les modèles précédents en les simplifiant au maximum.

b. Contraintes associées au modeler géométrique

En ce qui concerne l'environnement de calcul, je me suis imposé de rester au maximum dans celui qui serait utilisé par une équipe ayant en charge la conception d'un système mécanique standard. Les conséquences peuvent paraître aux premiers abords minimales, de par le fait qu'on peut considérer que ces équipes projets ont à disposition tous les outils dont on pourrait disposer dans le monde de la recherche.

Toutefois, le processus visant à :

- créer une représentation géométrique dans un environnement,
- exporter certaines informations vers un outil de calcul (tel que Matlab ou Mathematica),
- lancer puis interpréter ces calculs
- et enfin de les réincorporer au sein de la Maquette numérique,

est loin d'être le plus facile à mettre en œuvre.

A contrario :

- la manipulation des éléments géométriques nominaux ainsi que la spécification de la boucle cinématique à étudier (au sein de CATIA),
- le choix des conditions fonctionnelles à partir de la MF (ou de la MN)
- et la présentation des résultats 3D qu'il peut interpréter simplement et visuellement (polytopes) au sein de la MN et à l'endroit même où l'utilisateur s'attend à pouvoir les comparer à la condition fonctionnelle qu'il souhaite vérifier,

correspond ce à quoi j'ai essayé de répondre, d'une part, au travers de ce processus d'analyse de tolérances, et d'autre part, au travers du prototype développé en partenariat avec Dassault Systèmes.

En ce qui concerne, la cohérence des schémas de cotation, il n'y a pas eu d'efforts supplémentaires de mise en œuvre, en plus des vérifications au niveau des interfaces et de la spécification à partir des bibliothèques de cotation 3D. Nous nous reposons sur la « robustesse » de la solution incorporée à CATIA : le module FTA.

c. Contraintes liées au choix d'analyse 3D au pire des cas

Une des questions, à laquelle il a fallu répondre dans un premier temps, concernait le choix pour l'analyse au pire des cas¹, alors que l'on sait que la validation qui en découle engendre un coût lié notamment à la sur-qualité. Germain (Germain, 2007) l'a très bien illustré dans ses travaux de recherche en le comparant à une approche 3D mais statistique.

De notre côté nous avons, dans premier temps, dû prendre en compte le fait qu'à

¹ On utilisera par la suite l'acronyme PdC pour désigner le « Pire Des Cas ».

« l'Ingénierie Mécanique Renault » les analyses se faisaient au pire des cas afin de limiter le nombre de rebuts et problèmes sur la chaîne de montage. Ensuite un des avantages non négligeable, qu'amène l'analyse au pire des cas, par rapport à une approche statistique, c'est le fait qu'en avance de phase on ne connaît pas très bien les directions problématiques d'analyse. Or la représentation au travers de polytopes 3D permet justement de « débroussailler » l'espace d'analyse et de ne pas rater des directions (ou plans) qui ne seraient pas évidents et que l'empirisme pourrait aisément prédire.

A la fin de la thèse, j'ai aussi entamé une réflexion sur l'intégration d'une couche statistique par dessus les résultats obtenus au PdC, pour pallier au fait que lorsque le nombre de pièces présentes dans une boucle cinématique augmente, la probabilité de cumuler tous les défauts au PdC de toutes les pièces est extrêmement faible. Cette étape est nécessaire afin d'optimiser le coût de production tout en gérant le risque de non-conformité associé aux différents choix qui sont faits en terme de réduction des intervalles des tolérances par exemple.

2. Spécification et implémentation d'un prototype d'analyse de tolérances

a. Processus suivi pour l'analyse au pire des cas

Comme je l'ai schématisé dans la Fig. 96 le processus mis en place se déroule en six étapes, dont certaines sont effectuées de manière automatique (couleur orange), une autre partie demandant l'intervention de l'utilisateur (en vert) et des fonctionnalités non intégrées (en bleu).

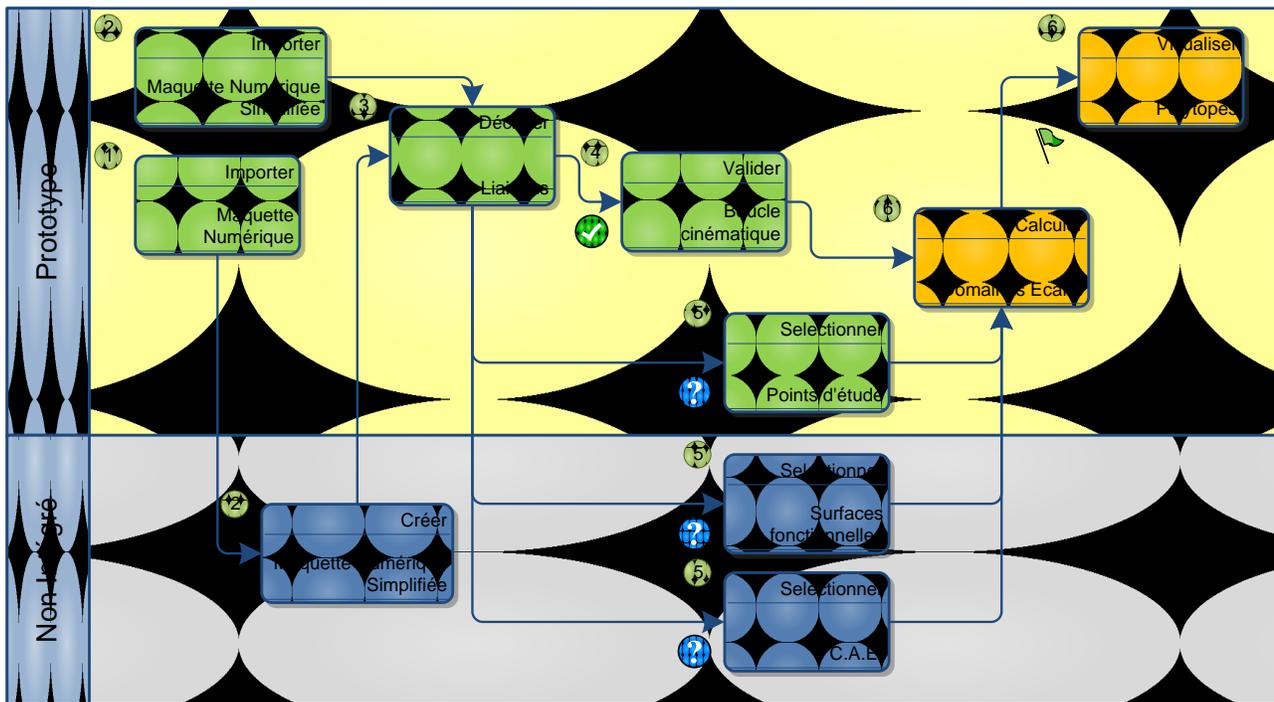


Fig. 96 : Processus suivi et Intégration des fonctionnalités dans le prototype

Nous remarquons donc, que les données d'entrées nécessaires à l'étape de calcul sont extraites à partir de la MNS. Toutefois, la création de celle-ci (Fig. 88 & Fig. 90) n'a pas été intégrée dans le prototype et j'ai choisi (pour des raisons de temps de développement) de l'importer et de l'utiliser comme support pour l'analyse qui s'ensuit.

b. Déclaration des « liaisons » composant la boucle cinématique étudiée

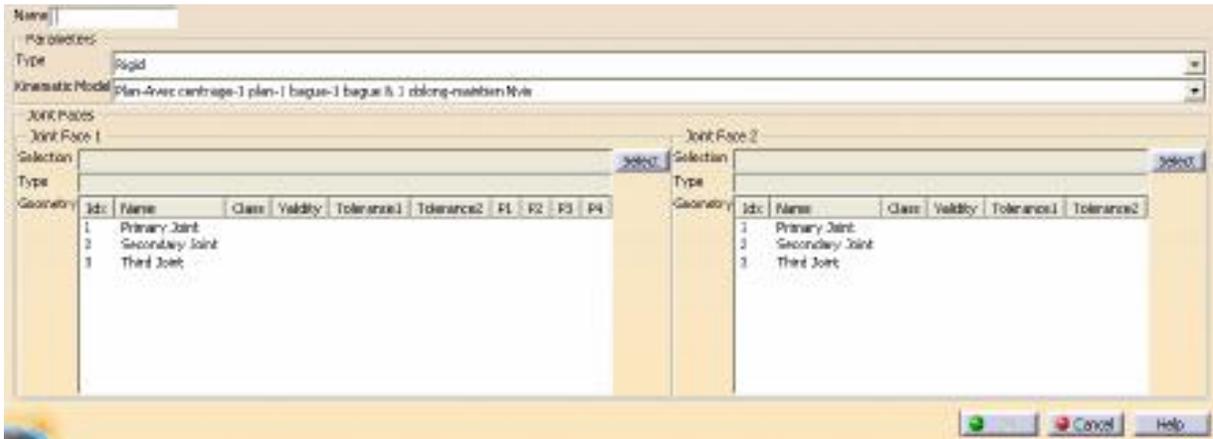


Fig. 97 : Interface pour la sélection déclaration des liaisons

En ce qui concerne le processus de déclaration de la boucle étudiée, j'ai repris un listing de liaisons standard, répertoriées chez Renault, et les types de liaisons, qui ont été intégrées dans le prototype d'analyse de tolérances, sont présentés en gris dans le tableau 16.

type de liaison	caractérisation nature	critère technique	surf primaire	surf secondaire maintien pos	surf tertiaire maintien pos	maintien pos
astremen	plan	"secable"	deux vis			
		sans centrage	1 plan	1 vis		
			N plan coplanaires	N vis		
			
		centrage par oblong	1 plan	N vis	1 oblong	
			1 plan	3 oblongs		
		avec centrage	plan	2 bagues	N vis	
			plan	2 pions	N vis	
			
	axiaux	arret radial	axe	plan //	1 vis / oblong	
			

Tableau. 16 :Caractérisation des liaisons standardisées (extraction de la liste globale)

Pour déclarer les liaisons, il est nécessaire dans un premier temps de sélectionner le type de liaison globale, puis de décrire la manière dont la liaison peut être décomposée (liaison primaire, liaison secondaire & tertiaire). Pour y arriver, il a été demandé d'intégrer au sein d'une « bibliothèque de liaisons » les typologies ainsi que les SATT associés (nécessaires pour la vérification de la cohérence entre les entités sélectionnés et ceux attendus).

Une fois la typologie de la liaison spécifiée, il faut sélectionner les surfaces fonctionnelles associées afin d'en récupérer les schémas de cotation associés, ainsi que les informations géométriques et dimensionnelles nécessaires pour pouvoir lancer le calcul d'analyse.

Toutefois, avant de valider la création d'une liaison, deux vérifications sont effectuées Fig. 98:

- la première concernant la cohérence entre le type voulu et celui qui a été sélectionné,
- la seconde vérifiant que la cotation correspond bien à ce qui est demandé pour le calcul.

En ce qui concerne la seconde vérification, la raison pour laquelle je l'ai mise en rouge et à cheval sur ce qui a été implémenté et ce qui ne l'a pas été (Fig. 98), c'est à cause du fait que ce qu'on a mis en place, ne permettait de sélectionner les valeurs des tolérances « attendues ».

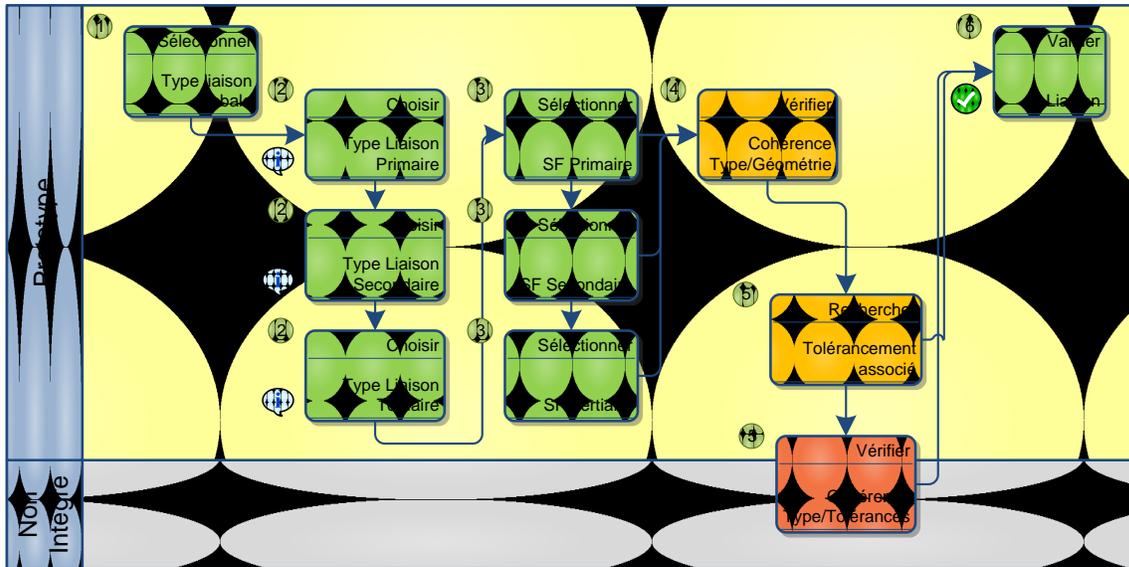


Fig. 98 : Processus associé à la déclaration d'une liaison

Cela ne permet donc pas de vérifier la cohérence de la cotation existante. Une approche complémentaire consisterait soit de repartir des bibliothèques de tolérances et de comparer avec ce qui a été sélectionné, soit de suivre un processus semblable à celui présenté dans la méthode CLIC (Anselmetti, 2005) et de vérifier que le schéma présent correspond bien à un des cas de figure.

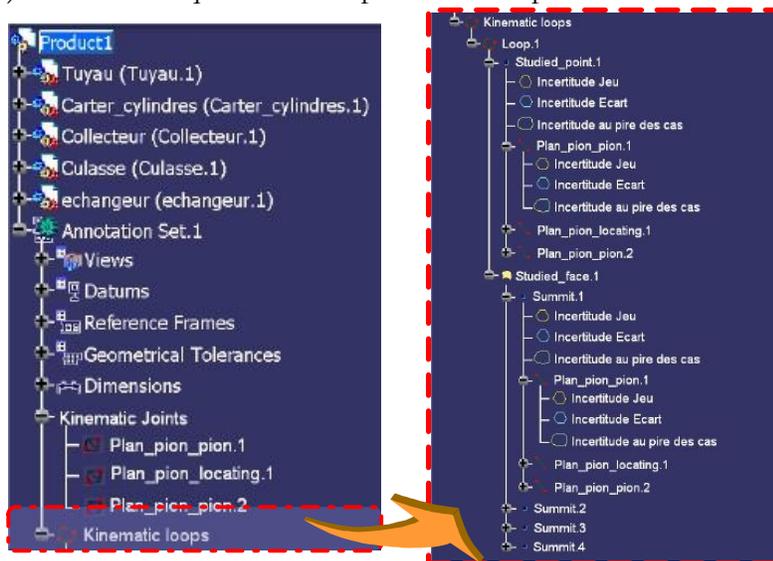


Fig. 99 : Intégration dans l'environnement CATIA V5 des liaisons et des chaînes étudiées

Quoi qu'il en soit, ces vérifications permettent de faire valider la création des liaisons les unes à la suite des autres et de les faire apparaître dans l'environnement CATIA (Fig. 99). Comme précisé dans la Fig. 96, le processus de déclaration des liaisons est disjoint de celui qui vise à préciser la chaîne cinématique qui sera étudiée.

Le choix de séparer les liaisons des chaînes étudiées, est dû au fait que l'on souhaite pouvoir réutiliser la déclaration des « liaisons » pour plusieurs analyses, sans avoir à les ressaisir.

c. Analyse du tolérancement

Comme précisé dans la Fig. 96, l'étape qui suit la déclaration des liaisons concerne la déclaration du « but » de l'analyse, à savoir :

- Calculer en un ou plusieurs points les écarts induits par les tolérances répertoriées au niveau des différentes liaisons,
- Calculer les torseurs écarts au niveau d'une surface fonctionnelle (non implémenté),
- Traduire une C.A.E. en polytope et la comparer aux résultats calculés (non implémenté).

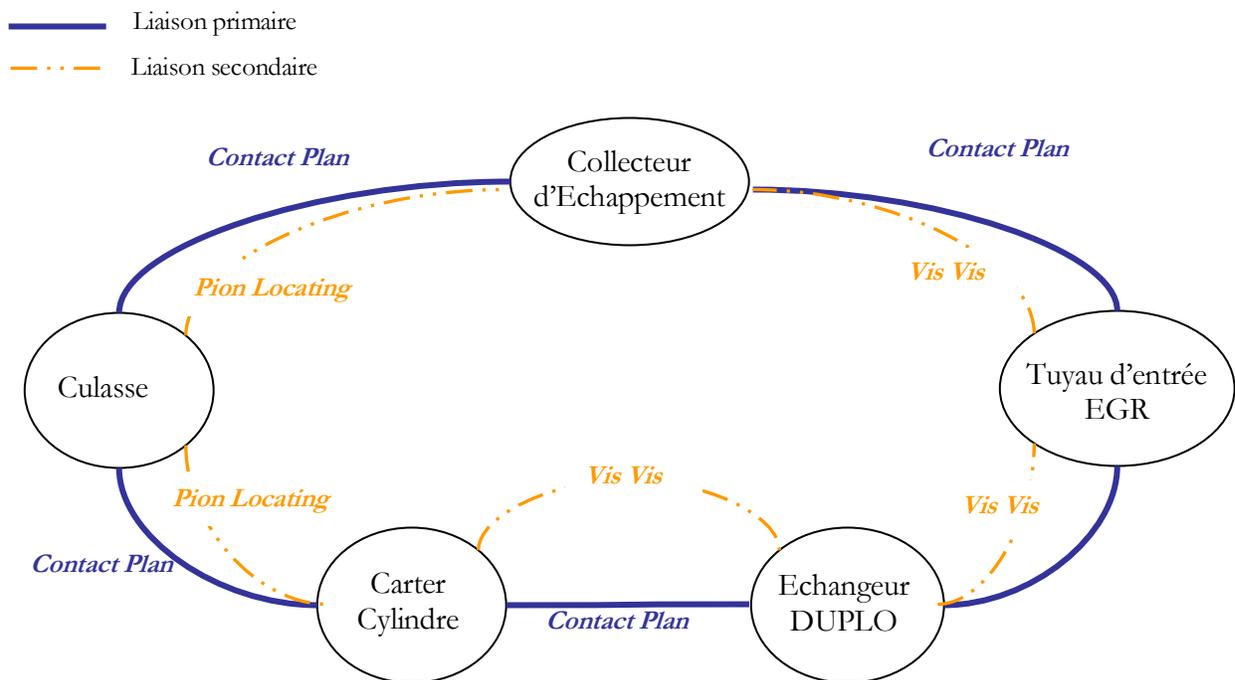


Fig. 100 : Boucle étudiée

Pour le cas étudié, nous avons pris en compte que deux types de liaisons composées :

- Contact Plan, Pion , Pion (en prenant aussi le jeu en compte),
- Contact Plan, Pion , Locating (en prenant aussi le jeu en compte).

et, afin de palier au manque de solveur mathématique, nous avons paramétré les liaisons (Fig. 101) (Socoliuc, 2006) afin de pouvoir plus facilement calculer les polytopes. De plus, comme nous pouvons le voir dans la Fig. 100 on peut considérer que les liaisons sont « en série » donc le

polytope traduisant l'écart global, équivaut à la somme de Minkowski appliquée aux polytopes relatifs à chaque liaison.

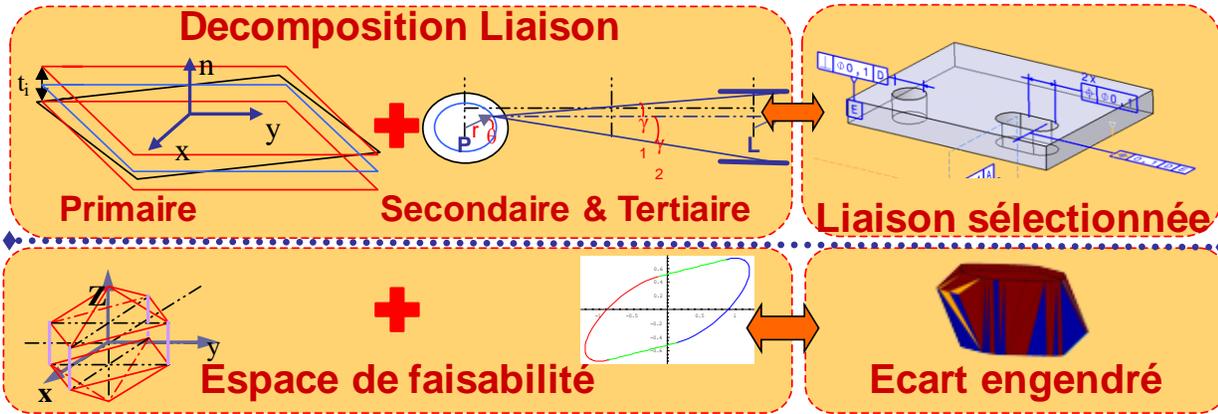


Fig. 101 : Exemple de décomposition et paramétrage de liaison

En ce qui concerne le contact plan (Fig. 23) nous avons pris en compte la tolérance de localisation t_l ainsi que la tolérance d'orientation t_o (dans le cas où elle serait spécifiée) et pour les liaisons secondaires et tertiaires les tolérances de localisation et d'orientation.

Le torseur¹ associé à la liaison primaire (de type plan/plan) étant de type $T_p = \begin{Bmatrix} \alpha_{S/R} & 0 \\ \beta_{S/R} & 0 \\ 0 & w_O \end{Bmatrix}$,

afin de pouvoir calculer l'écart associé, il faut disposer de l'espace de faisabilité défini par l'ensemble des triplets $\{\alpha_{Max} \quad \beta_{Max} \quad w_{Max}\}$ en tout point $M \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \end{pmatrix}$ de la surface plane.

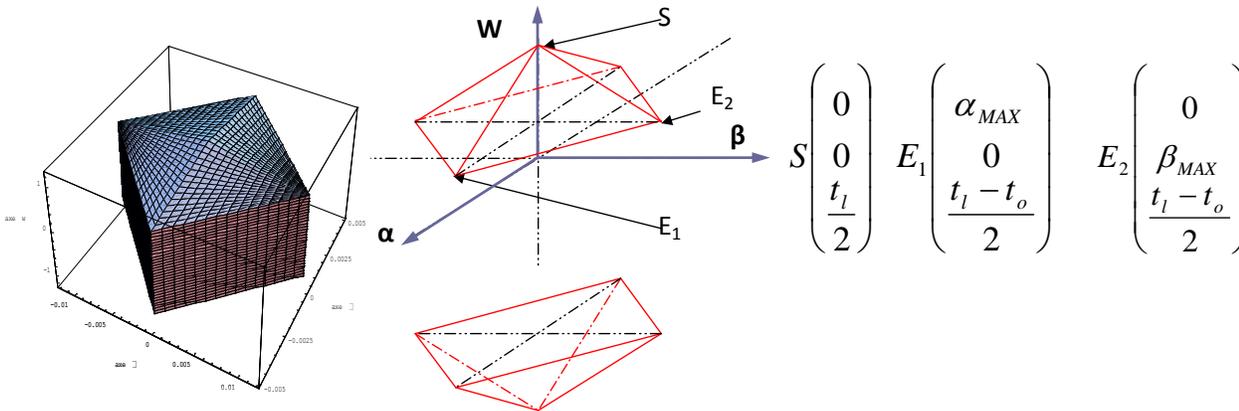


Fig. 102 : Discrétisation du polytope contenant l'espace de faisabilité pour tout point M

Pour ce faire la première étape consiste à discrétiser la surface tolérancée, puis en chacun des points, calculer les valeurs de α_{Max} , β_{Max} et w_{Max} . Pour les définir, j'ai repris les calculs définis au

¹ Comme précisé dans le chapitre 2, nous basons nos calculs sur l'utilisation des torseurs des petits déplacements.

chapitre 2. Ainsi dans notre cas, ce qui nous intéresse c'est le déplacement d'un point M selon la normale Z au plan étudié : $\overrightarrow{\delta M_i} \cdot \vec{z} = (\overrightarrow{\delta O} + \overrightarrow{M_i O} \wedge \vec{\Omega}) \cdot \vec{z}$.

En prenant en compte la tolérance t_o en orientation et t_l en localisation, pour un contour quelconque, la définition de l'espace de faisabilité se résumerait à créer un polytope résultant de l'union de tous des espaces de faisabilité élémentaires associés à chaque point M, ce qui reviendrait alors à résoudre un système d'inéquations assez élevé (le nombre dépendant de la finesse de la discrétisation choisie).

Pour rappel, en tout point et pour respecter la tolérance d'orientation il faut que les coordonnées des points $M \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \end{pmatrix}$ vérifient
$$\begin{cases} -\frac{t_o}{2} \leq x_i \beta + y_i \alpha \leq \frac{t_o}{2} \\ -\frac{t_o}{2} \leq x_i \beta - y_i \alpha \leq \frac{t_o}{2} \end{cases}$$

Toutefois comme je l'ai précisé, nous n'avons pas de solveur et j'ai du proposer une autre méthode pour trouver tous les triplets $\{\alpha_{Max} \beta_{Max} w_{Max}\}$. La première remarque concerne le fait que si la discrétisation ne donne pas un contour convexe, il est inutile de calculer les triplets associés aux points intérieurs. Cela est dû au simple fait que l'espace des solutions, créé à partir des inéquations traduisant les valeurs maximales associées au point M_i , englobe les valeurs max associées aux autres points, qui eux sont sur le contour convexe.

Pour en donner une représentation graphique qui soit plus claire, dans la Fig. 103, j'ai représenté de manière schématique le processus calculant l'espace de faisabilité pour un tirage aléatoire de N points (dans le même plan).

Ainsi, pour une valeur de $|w| < t_l - t_o/2$, durant l'étape 2 j'ai superposé tous les domaines $\{\alpha \beta\}$ associés aux points précédemment créés pour n'en prendre que l'intersection (étape 3).

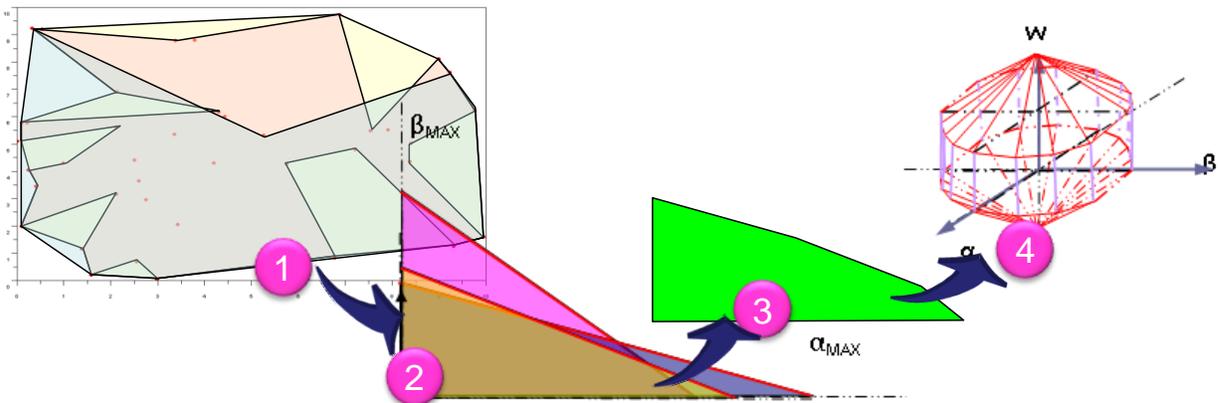


Fig. 103 : Processus de création de l'espace de faisabilité¹

Cela nous permet donc de pouvoir disposer de tous les triplets $\{\alpha_{Max} \beta_{Max} w_{Max}\}$ associés à toute liaison primaire de type plan-plan, et comme je l'ai montré Fig. 101 (et comme on peut aussi le voir dans l'annexe 1) j'ai appliqué un processus similaire au niveau de la liaison secondaire-tertiaire.

¹ Pour avoir tous les détails, se référer à l'annexe 1.

d. Calcul des écarts engendrés

Une fois la liste complète des triplets $\{\alpha_{Max} \ \beta_{Max} \ w_{Max}\}$ créée il est possible de passer à l'étape qui vise à calculer l'impact, que ces mouvements peuvent avoir sur un élément géométrique appartenant à la boucle cinématique étudiée. Comme je l'ai précisé dans la Fig. 96, nous nous sommes uniquement intéressés au cas des déplacements engendrés en un ou plusieurs points (calcul lancé plusieurs fois). Par conséquent le polytope présenté à l'utilisateur ne correspond qu'aux écarts géométriques de l'entité sélectionnée par rapport à sa position nominale.

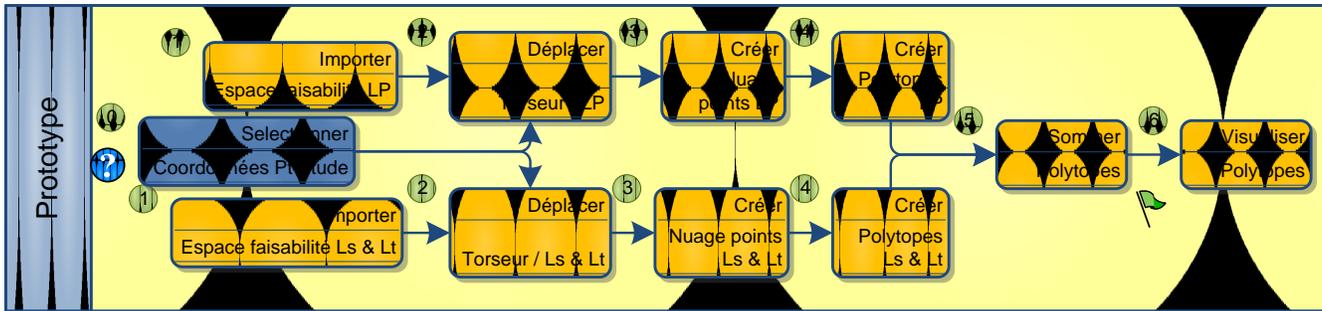


Fig. 104 : Processus suivi lors de la création des polytopes

Pour créer les enveloppes convexes, on a suivi le processus présenté dans la Fig. 104, et étant donné que nous nous sommes restreints à des domaines de dimension 3, j'ai pu simplifier un des algorithmes disponible dans la littérature (et qui est aussi utilisé dans Matlab) : Q-Hull¹.

En ce qui concerne la somme des polytopes, que l'on met en œuvre pour obtenir la déviation globale résultant du cumul de tous les écarts relatifs à toutes les liaisons, n'est pas problématique en soi. Cependant, si durant les calculs on n'élimine pas les configurations qui ne sont pas les pires (cad à l'intérieur de la déviation maximum), on rallonge considérablement le temps de calcul.

Le processus de création des enveloppes convexes a été codé comme ci-dessous :

Soit E le « nuage de points » à traiter et Ec « l'ensemble des facettes » obtenues à la fin du calcul et définissant l'enveloppe convexe.

- a. Initialisation de Ec à l'ensemble vide.
- b. Sélectionner 4 points $\in E$ et construire les 4 faces du tétraèdre résultant, les mettre dans Ec ,
- c. $\forall face \in Ec$, orienter la face vers l'extérieur du tétraèdre,
 - o $\forall point M \in E$,
 - Liste de face $O =$ liste des faces du polyèdre visibles par M ,
 - \forall couple de points (A,B) de O (points visibles)
 - Si tous les points des plans de O (points visibles de M) sont à sous la face (M,A,B) , ajouter la face (M,A,B) dans Ec ,
 - o Retourner Ec (ensemble des faces de l'enveloppe convexe de E).

¹ Pour des raisons purement juridiques, il a été impossible de reprendre le code Qhull, tout comme celui proposé par Fukuda (Fukuda, 2004)(cdd++). Toutefois la documentation est très complète et on peut trouver de nouvelles publications qui proposent des algorithmes améliorés et qu'il est possible d'implémenter soi-même (M-K., 2009).

e. Utilisation des résultats

Outre le côté 3D qui est beaucoup plus parlant qu'une liste de valeurs brutes décrivant les résultats d'une analyse de tolérances, ce que j'ai surtout essayé de faire ressortir et utiliser, c'est la partie extraction et manipulation des résultats au sein de la MN.

S'agissant d'éléments 3D, il est possible pour un utilisateur quelconque d'accéder aux enveloppes convexes et de les analyser de la même manière qu'il manipulerait une pièce ou toute autre entité géométrique. Il peut donc effectuer des mesures, des coupes, des superpositions ... et le tout sans avoir à manipuler la moindre formule mathématique.

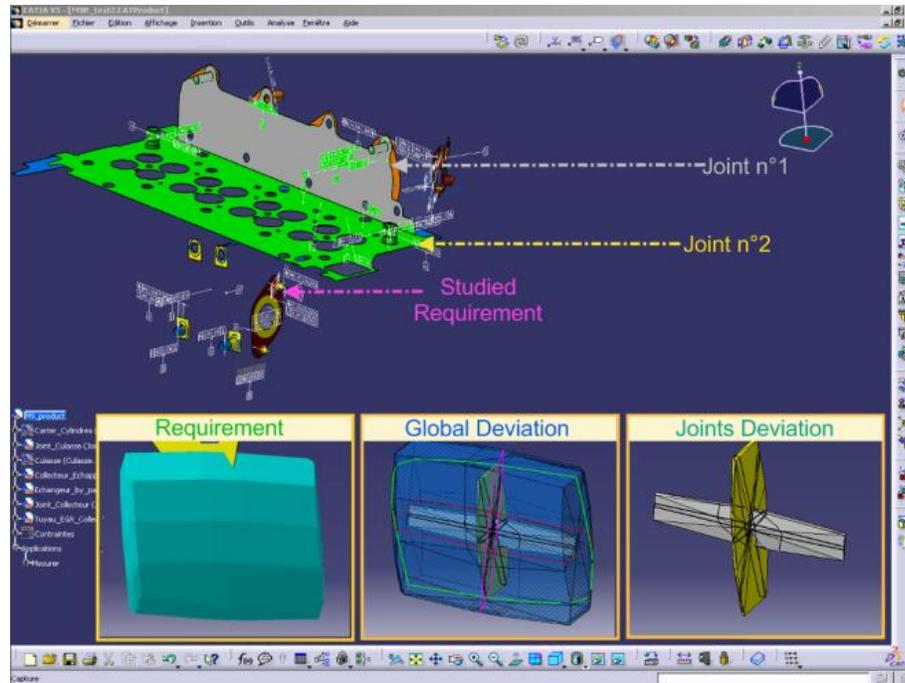


Fig. 105 : Intégration des résultats dans l'environnement CAO

Ce qui a déjà été intégré c'est la possibilité pour un utilisateur de pouvoir quantifier les écarts selon des directions qu'il est libre de choisir. Ainsi, dans l'exemple présenté dans la Fig. 105, ce que j'ai essayé de faire ressortir, c'est le fait que les écarts peuvent ne pas apparaître comme les plus pénalisants à l'endroit où l'on pense.

Dans ce cas de figure, le pire des cas global est peu parlant, alors qu'en prenant les résultats associés aux liaisons les uns après les autres, on comprend aisément que le fait d'avoir les plans des liaisons primaires perpendiculaires, agrandit la déviation globale. Si l'on avait aussi rajouté le défaut lié à la liaison entre le collecteur d'échappement et le tuyau EGR, on aurait aussi fait intervenir le bras de levier important, ainsi que le fait, que le contact plan se fait dans un plan incliné par rapport au plan où se situe le point d'étude (toute rotation est amplifiée).

L'utilisateur, lorsqu'il se retrouve dans un cas comme celui-ci, peut :

- visualiser les écarts individuels (écart associé à une liaison)
- sélectionner une direction d'analyse, qui en retour va afficher un tableau récapitulatif des contributions de chaque liaison selon cette direction d'analyse (Fig. 106).

Studied point or sumit: Studied_point.1

Direction of studied influence : Inerttue pire des cas/vertex

Display : Worst Case Swerve Plays

Joints	Part1	Part2	Swerve (Part1)	Play	Worst Case	Best Case (available plays)
Plan_pion_pion.1	carter	culasse	0.3 mm	0.2 mm	0.5 mm	0.1 mm
Plan_pion_locating.1	culasse	collect...	0.1 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.0 mm (0.2 mm)
Plan_pion_pion.2	collect...	tuyau	0.1 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.0 mm
Total			0.5 mm	0.6 mm	1.1 mm	0.0 mm

mm %

Fig. 106 : Visualisation de la participation de chaque liaison à l'écart global engendré

Comme on peut le voir dans la Fig. 106, nous avons séparé les déviations dues aux jeux (dans notre cas au niveau des liaisons secondaires & tertiaires), des déviations résultant des défauts géométriques. Cependant, dans l'approche que nous avons mise en place, nous avons considéré que les jeux étaient aussi défavorables à l'assemblabilité du système étudié. L'idée était de pouvoir quantifier l'écart qu'il pouvait exister, entre la condition fonctionnelle à remplir et les déviations dues aux écarts géométriques, et cela afin de voir si des simples préconisations de directions de montage, pouvaient permettre d'arriver à un produit assemblable, en ne jouant que sur les jeux présents et dont on pouvait disposer.

Pour arriver à cette étape quantitative, il faut choisir une direction, et le choix pour lequel j'avais opté, imposait à l'utilisateur de choisir un des sommets du polytope Δ_{Global} associé à la déviation globale, ce qui avait pour conséquence de lui faire choisir indirectement un « vecteur déviation » δM_G .

Soient A et B les deux polytopes associés respectivement aux liaisons, entre le carter cylindre et la culasse d'une part, et entre la culasse et le collecteur d'échappement d'autre part. Etant donné que les calculs sont effectués au pire des cas, et qu'on manipule des enveloppes convexes, il y a unicité des « antécédents de δM_G » : respectivement $\delta M_{\Delta A}$ et $\delta M_{\Delta B}$.

La contribution de chaque liaison, calculée selon une direction \vec{u} , correspondrait donc à $\delta M_{\Delta A} \cdot \vec{u}$ pour la liaison associée au polytope A, et à $\delta M_{\Delta B} \cdot \vec{u}$ pour celle associée au polytope B.

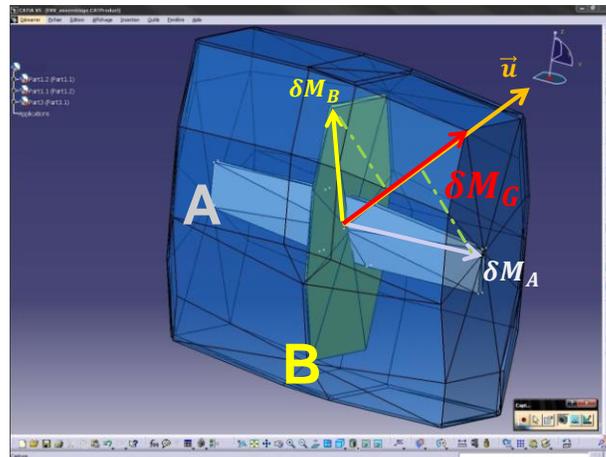


Fig. 107 : Intégration du concept d'inter-pièce.

3. Bilan

Concernant la validation du tolérancement, on ne peut qu'être satisfaits des résultats obtenus, et cela même s'ils ne peuvent pas être présentés comme étant une solution utilisable en l'état, dans un environnement industriel. Toutefois, la faisabilité des concepts et surtout la mise en pratique des processus proposés (Chapitre 2 & 3), montrent qu'il est possible :

- de les intégrer sans que cela perturbe l'environnement et le cycle de développement d'un ensemble mécanique,
- d'offrir une approche « User friendly » reposant quand à elle sur des concepts très théoriques assez complexes (utilisables dans un environnement de recherche mais plus difficilement chez un industriel),
- d'offrir des résultats simples à comprendre et à exploiter
- [...]

En ayant un œil assez critique, je soulignerai le fait que dans cette approche, je n'ai réussi à mettre en place qu'une méthode mono-boucle et qu'assez peu de liaisons et schémas de tolérancement type ont été traités. De plus, afin de pouvoir avoir une vision d'ensemble de tout le processus, faute de temps, le prototype d'analyse comportait encore certains bugs qui n'ont pas été corrigés et des fonctionnalités qui n'ont pas été implémentées (en bleu & violet dans la Fig. 108) ou ne le sont que partiellement, ou pouvant être effectuées manuellement (en rouge dans la Fig. 108).

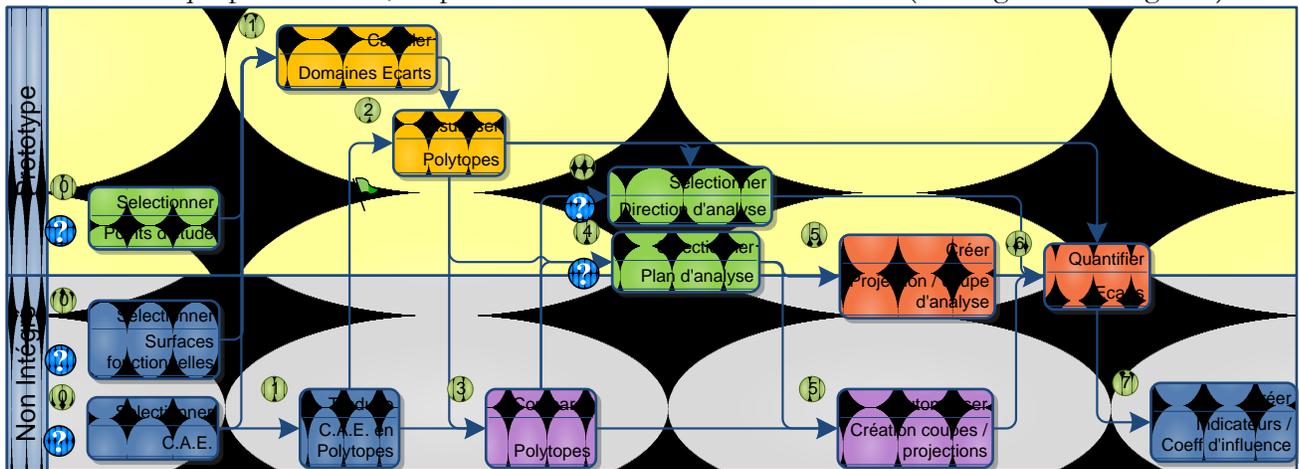


Fig. 108 : Bilan des fonctionnalités d'analyse du tolérancement

Cependant, le but de cette étude était de montrer la faisabilité et d'arriver assez rapidement aux limites imposées par le pire des cas. Cela n'était, et n'est toujours pas un secret pour personne, dès que l'on cherche à optimiser la production, il faut obligatoirement à un moment donné intégrer une vision statistique, et c'est pour cela que j'ai entamé une réflexion relative à une analyse « hybride » du tolérancement :

- Au pire des cas et en 3D, afin de trouver les problèmes qui peuvent être rencontrés et cela de manière exhaustive,
- Statistique (2D, 3D) en intégrant les distributions à l'intérieur des bornes définies par l'analyse au PdC.

Proposition d'un processus d'optimisation « hybride »

1. La robustesse du pire des cas « à un coût réduit »

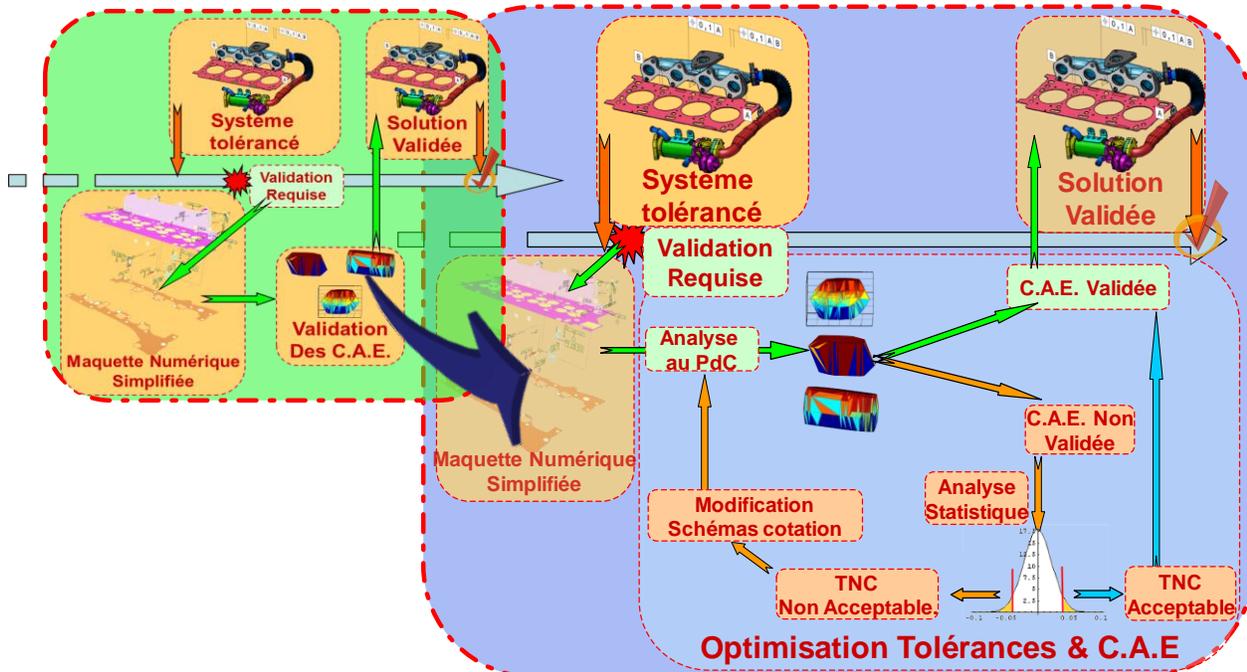


Fig. 109 : Processus d'optimisation des tolérances intégrant une approche statistique

Comme on peut le voir dans la Fig. 109, le pire des cas n'est pas abandonné pour les mêmes raisons que l'on a évoquées dans la partie précédente et nous sert de base aux optimisations qui sont censées être effectuées en cas de C.A.E. non validée.

Ainsi, une fois que l'on a fait ressortir les directions et/ou plans d'analyse & optimisation, en utilisant l'analyse au PdC, il faut obtenir une vision de la répartition des défauts à l'intérieur des bornes fixées par le pire des cas, afin de statuer sur l'acceptation des tolérances, en fonction de leur impact sur le non respect d'une C.A.E, par exemple.

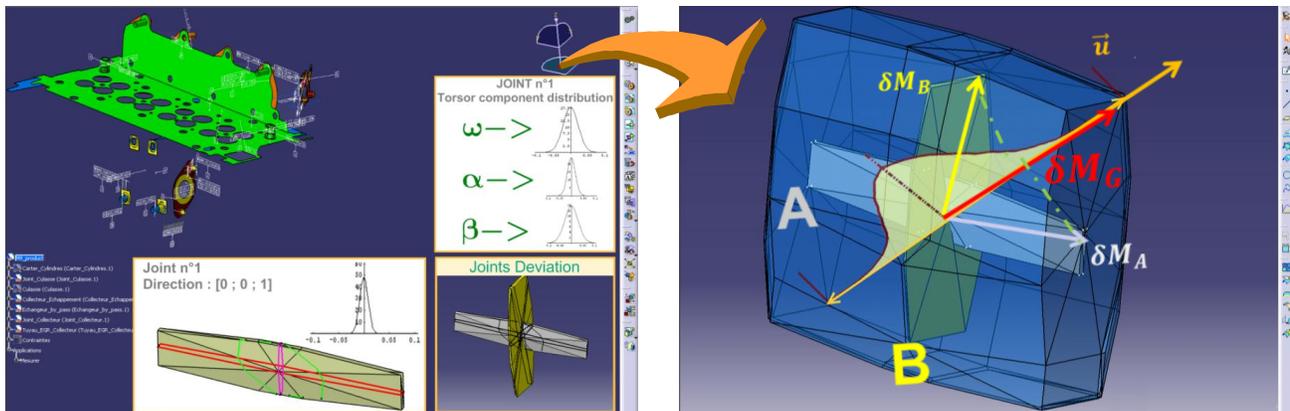


Fig. 110 : Intégration d'une couche statistique en plus des écarts au pire des cas

2. Méthodologie d'optimisation

A l'heure actuelle, il existe déjà des outils commerciaux intégrant le coté statistique (Cetol-6 σ , ANATOLE, DCS, Mecamaster...) qui, pour de diverses raisons ne conviennent pas, ou tout du moins pour le moment n'ont pas complètement réussi à convaincre au sein de Renault. De plus il faut savoir qu'il existe déjà un outil développé en interne et qui est utilisé pour la validation des chaînes de cotes (Roxo Da Coste et al., 2003) mais il effectue des calculs 1D (voire 2D projetés).

C'est pour cette raison que l'on avait commencé à réfléchir aux processus d'analyse, pouvant être rajoutés à ceux utilisés lors des analyses au PdC, afin de pouvoir amener des informations complémentaires, permettant notamment de quantifier :

- le pourcentage de cas qui ne permettent pas de respecter les conditions fonctionnelles,
- la marge qu'il existe entre le tolérancement au pire des cas et une simulation à $N\sigma$.

Pour y parvenir, ce qui avait été envisagé, c'était de repartir des composantes des torseurs des petits déplacements $T = \begin{pmatrix} \alpha_{S/R} & u_0 \\ \beta_{S/R} & v_0 \\ \gamma_{S/R} & w_0 \end{pmatrix}$, de leur associer des distributions, d'effectuer des tirages de Monte-Carlo et enfin d'en déduire les répartitions selon les directions d'étude (Fig. 110).

Sachant que, plus le nombre de variables aléatoires augmente, plus la distribution finale tend vers une gaussienne (théorème central limite), nous nous étions déjà dans un premier temps proposé d'utiliser :

- soit des lois normales en plaçant les $\pm 3\sigma$ au niveau des bornes de l'intervalle [min, max] associé à chaque variable,
- soit des lois uniformes (par défaut).

Bien entendu cela n'a pas vraiment d'utilité si l'on ne connaît pas les vraies dispersions que l'on peut retrouver par la suite en production, mais cela permet d'avoir une vue plus critique envers les bornes fixées par le PdC. Il aurait été possible bien sûr de pouvoir spécifier de vraies lois qu'il faudrait suivre lors des simulations, afin de se rapprocher au mieux de la réalité tout en tentant de réduire les coûts.

Pour pouvoir passer à l'étape d'optimisation des différentes variables (tolérances), il faut dans un premier temps calculer les coefficients d'influence, et ainsi prioriser certains paramètres par rapport à d'autres qui n'auront pas d'impact notable sur la fonction objectif étudiée.

Ainsi, en reprenant le cas d'étude, il en serait ressorti que la localisation, au niveau de la liaison entre le tuyau EGR et le collecteur d'échappement, aurait un impact beaucoup plus grand que la localisation associée à la surface plane du carter cylindres (liaison avec la culasse), sur les coaxialités présentes au niveau de l'interface Tuyau EGR – EGR.

Une fois les différents paramètres triés, nous pouvons recadrer les tolérances afin d'obtenir le TNC souhaité. N'ayant pas pu aller plus loin dans cette approche, je soulignerai les récents travaux menés par P.A. Adragna et S. Samper (Adragna et al., 2010) abordant en 3D le tolérancement statistique, mais en mettant à disposition l'inertie, un « outil » pouvant se révéler plus « parlant » et pas compliqué à prendre en main, dans un milieu industriel.

Bilan et voies d'amélioration

1. *Bilan*

Ce projet avait pour objectif « l'Introduction et l'Analyse des schémas de cotation en Avance de Phase » afin de palier aux problèmes dus au positionnement du tolérancement durant les dernières étapes dans le cycle de conception. Toutefois, ce changement doit s'inscrire dans un processus global complexe et qui, à l'heure actuelle, ne permet pas une intégration simple du tolérancement durant les premières phases de conception.

A cela, il a fallu également intégrer des contraintes de continuité numérique, de facilité d'appropriation des différentes propositions par les utilisateurs dans un milieu industriel « standard », de faisabilité, d'intégration et réutilisation du savoir capitalisé ainsi que de qualité des résultats obtenus.

Comme je l'ai détaillé précédemment, avant d'arriver à l'étape d'intégration du tolérancement, il a fallu tout d'abord :

- Repenser le processus global de conception, de la spécification des prestations jusqu'à l'obtention d'une MN y répondant,
- Redéfinir le support (MF) pouvant intégrer le tolérancement en avance de phase,
- Assurer la continuité numérique de l'information ainsi que les liens qu'il devrait exister entre les différentes modélisations,
- Détailler le processus de spécification des tolérances qui intégrerait et/ou s'adapterait à toutes ces contraintes,
- Détailler la simulation et la validation du tolérancement, ainsi que la gestion des différentes informations tout au long du processus de conception.

Partant du constat, qu'en avance de phase et notamment en ce qui concerne l'approche fonctionnelle, la continuité numérique n'est pas respectée, notre approche, au travers de la proposition du processus RTFAS, a surtout essayé de repenser le processus de conception et cela en s'inspirant des exemples fonctionnant dans d'autres domaines (ici l'informatique).

Le processus fonctionnel proposé, prend non seulement en compte la traçabilité d'une exigence jusqu'à la solution qui y répondrait, mais intègre aussi les liens devant exister entre le monde fonctionnel et le monde numérique, ce qui, comme je l'ai présenté dans le chapitre 2, manque actuellement et ne peut pas encore être mis en place à l'aide des solutions informatiques commerciales existantes (voir couverture fonctionnelle Fig. 111).

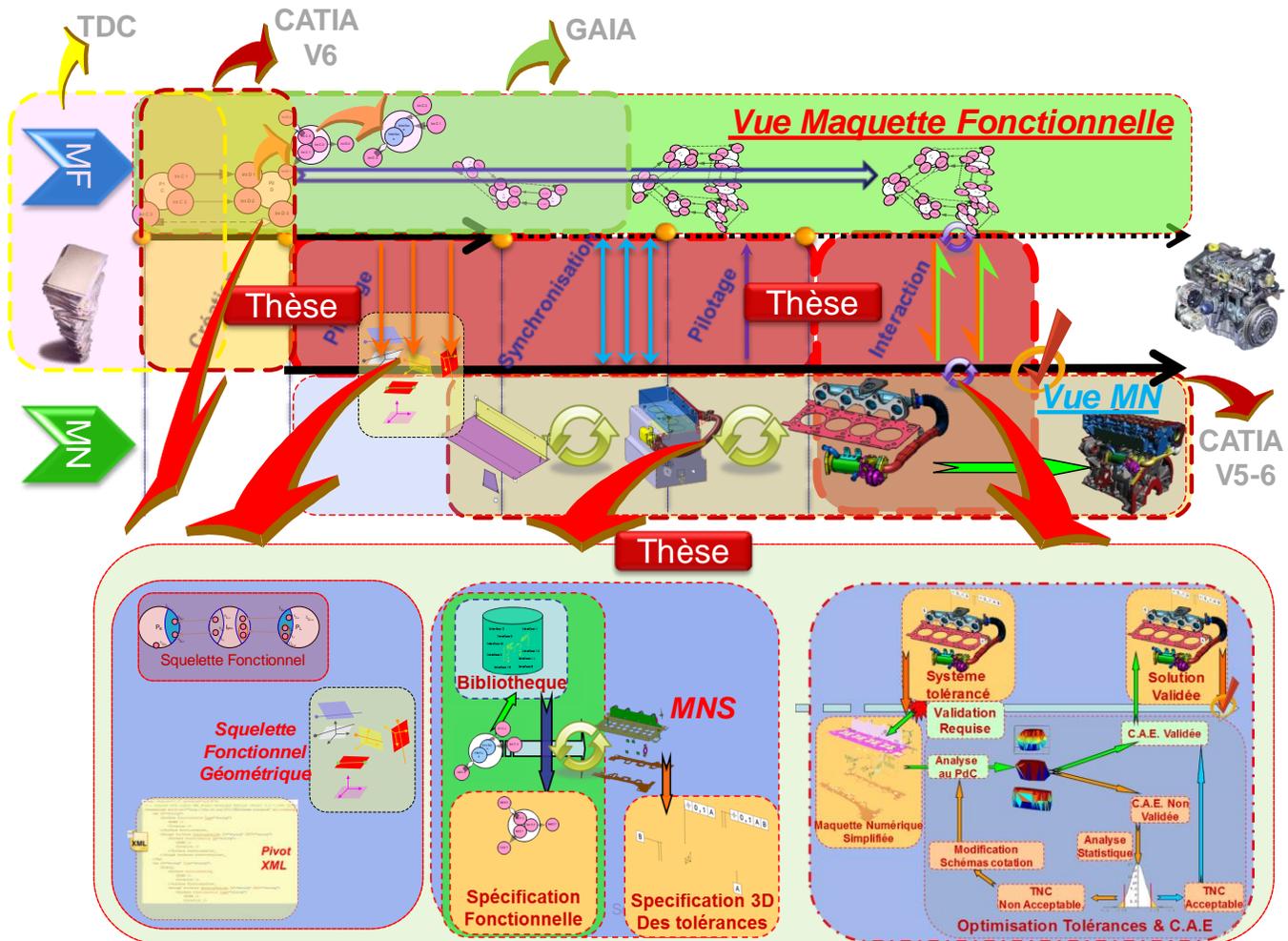


Fig. 111 : Bilan & couverture fonctionnelle

Ainsi, le processus fonctionnel présenté dans notre approche, a été décomposé en plusieurs sous-processus répondant surtout à une contrainte forte : la continuité numérique tout au long du « Cycle de conception dans un milieu industriel ». Pour ce faire, la notion de MF et des différents ponts existant avec la MN, ont été exposés. Ceux-ci visent à introduire le processus devant être mis en place, afin de pouvoir effectuer des analyses de tolérances, en avance de phase et sur des modèles géométriques peu détaillés.

La notion de MF introduite au chapitre 3 peut être assimilée à une représentation par graphes, mais l'apport de nos travaux consiste surtout à remettre à plat la modélisation et à définir les ponts devant être mis en place, pour réussir à piloter et synchroniser les « vues fonctionnelles et numériques », processus eux aussi introduits et détaillés dans le cadre de nos travaux.

Concernant la spécification des schémas de cotation, un des apports des travaux de recherche concerne l'introduction de processus fonctionnels, permettant d'intégrer le tolérancement (habituellement effectué en fin de conception) durant les premières étapes de celui-ci. A cela, il faut rajouter les liens qui ont été proposés et qui permettent de spécifier les tolérances au niveau fonctionnel et de les synchroniser au niveau de l'environnement numérique (au travers des schémas de cotation 3D), environnement dans lequel les analyses quantitatives au pire des cas sont effectuées.

Ces simulations comportent deux volets : le support et les calculs effectués. L'apport de nos travaux a surtout été axé sur la possibilité d'effectuer des simulations même en ne disposant que de modélisations très épurées. C'est à ce niveau que les ponts entre le domaine fonctionnel et le domaine numérique interviennent, puisqu'ils permettent de disposer d'une représentation équivalente à la MF dans un environnement 3D et qui plus est, tolérancée.

Une fois le support défini, le processus de validation des schémas de cotation (pour une boucle cinématique) qui a été mis en place, se base sur les travaux portant sur les « domaines » (Giordano et al., 2003) et les sommes de Minkowski. Cela a surtout permis de montrer qu'il est possible d'intégrer ces approches au sein d'un modéleur 3D, tout en conservant les liens fonctionnels et d'effectuer des simulations tout au long du cycle de conception, dès lors que l'on dispose d'une modélisation fonctionnelle (et donc du squelette fonctionnel).

2. Une cible

En essayant de me mettre à la place d'un « concepteur », j'ai imaginé une « cible », en terme de processus et de solutions, voire plusieurs, partageant les mêmes informations et étant donc inter-opérantes, aussi bien d'un point de vue conceptuel que technique. Celle-ci reprend donc tout ce qui a été présenté dans ce mémoire. Il va de soi qu'il persiste des trous fonctionnels qui à l'heure actuelle pourraient être comblés (partiellement ou entièrement) par certaines solutions commerciales.

Dans la Fig. 111, j'ai essayé de regrouper et faire apparaître les domaines couverts, d'une part par les propositions et les processus détaillés dans les chapitres 3 & 4, et d'autre part ceux qui, théoriquement sont gérés par ces applications commerciales. Avec un peu plus de recul, il m'est difficile de me prononcer quand à l'apparition d'un processus numériquement lié, qui intègre tous les concepts énoncés, et qui puisse être adopté par un industriel.

En voulant travailler en avance de phase et dans les deux environnements (fonctionnel et numérique), le processus présenté dans le chapitre 3 m'a amené à redéfinir les processus et les supports qui devaient être utilisés, ainsi que les ponts devant exister entre les deux « vues » d'un même système. En étant beaucoup plus pragmatique, la mise en place de tous ces concepts dépend notamment du choix du modéleur CAO, de son « ouverture » et de sa capacité de collaboration avec d'autres solutions informatisées.

3. Voies d'amélioration

Comme je viens de le préciser, il n'existe pas de solution qui puisse répondre à la problématique globale. Toutefois, comme on peut le voir dans la Fig. 111, le fil rouge que j'ai suivi tout au long du doctorat, permet de mettre en place un cadre cohérent pour la prise en compte du tolérancement en avance de phase.

Dans une optique à plus long terme, l'idéal aurait été de pouvoir rendre robuste le processus de pilotage fonctionnel en repartant de ce qui a déjà été présenté, et d'intégrer au sein

de la MF des informations de type « dimension », ce qui permettrait de rendre la synchronisation plus facile. Dans un récent article (Song & Chung, 2009) Song utilise les fichiers XML afin de recomposer des assemblages de pièces dans un environnement numérique, et la structure qu'il utilise peut aussi être incorporée dans notre approche, afin de créer le squelette fonctionnel géométrique, puis de le synchroniser.

En ce qui concerne le tolérancement par interfaces, la suite à donner, est de mettre en place une bibliothèque reprenant tous les types de liaisons déjà recensées. Cela permettrait, à la fois de poursuivre les travaux entamés par H. Toulorge (Toulorge, 2004) et de fournir une base de données, que l'approche que j'ai présenté utiliserait et la rendrait plus robuste par la même occasion.

Enfin, concernant l'analyse du tolérancement, je continue à penser que l'on doit passer par une analyse au pire des cas en utilisant les enveloppes convexes. Toutefois, au même titre que la bibliothèque de liaisons, il faut aussi mettre en place les algorithmes de calcul associés. Pour ce qui est de l'analyse statistique, elle est obligatoire dès que l'on veut optimiser la production, comme on peut le voir. Cette partie n'ayant pas été approfondie, il serait nécessaire d'intégrer une possible simulation à partir des torseurs des petits déplacements afin de compléter l'analyse et donc de permettre théoriquement à un concepteur de choisir les modifications à effectuer.

Dans un domaine connexe, ce qu'on commence à voir apparaître, ce sont les travaux de recherche qui visent à montrer l'impact des défauts de forme sur l'assemblabilité d'un système (Adragna et al., 2010), et donc à remettre en cause les hypothèses somme toutes assez fortes que j'ai utilisé. La question que je me suis posé, concernait l'impact réel de ces défauts dans un environnement en constante évolution, que ce soit, au niveau de la température (Mandil et al., 2009) (donc impliquant des phénomènes de dilatation par exemple), ou des charges appliquées au niveau des pièces.

Travaux cités

1. AFNOR, 1984. *NF X 50-150 : Guide pour l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel.*
2. AFNOR, 1991. *NF X 50-151 : Analyse de la valeur.*
3. AFNOR, 1995. *FD X 50-101 : L'Analyse fonctionnelle, Outil interdisciplinaire de compétitivité.*
4. AFNOR, 1996. *NF X 50-100 : Analyse Fonctionnelle - Caractéristiques fondamentales.*
5. Aifaoui, N. et al., 2008. Automatic generation of CAD model based on FEM results. In *International conference on integrated virtual design and manufacturing and virtual concept in mechanical engineering.* Beijing, 2008.
6. Anselmetti, B., 2005. *CLIC : Cotation fonctionnelle des pièces mécaniques- carnet fonctionnel.*
7. Anselmetti, B., 2005. Génération automatique de la cotation fonctionnelle par la méthode CLIC. *CPI.*
8. Balliet, J.M., 2003. *The 24 powder De Gribeauval Siege Gun.* Colmar - France.
9. Ballu, A., Falgarone, H., Chevasus, N. & Mathieu, L., 2006. A new design method based on functions and tolerance specifications for product modelling. *Annals of the CIRP.*
10. Ballu, A., Teissandier, D. & Mathieu, L., 2005. Cotation à l'aide des graphes le long du cycle de conception.
11. Bourdet, P. & Clément, A., 1988. A study of optimal-criteria identification based-on the small-displacement screw model. *Annal of CIRP.*
12. Bourdet, P. & Schneider, F., 2007. *Spécification Géométrique des Produits : Cotation et tolérancement ISO.* DUNOD.
13. Bureau international des poids et mesures, 7e édition 1998. *Le système international d'unités.* BIPM, ISBN 92-822-2154-7.
14. Buysse, D., 2007. Renault Design Way, state of the art and prospects. *Proceedings of 10th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*, 21 – 23 Mars.
15. Cao, Y., Liu, Y.S., Mao, J. & Yang, J., 2006. 3DTS: A 3D tolerancing system based on mathematical definition. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 7(11), pp.1810-18.
16. Catalano, C.E. et al., 2009. A product design ontology for enhancing shape processing in design workflows. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(5), pp.553-67.

17. Charpentier, F., Prenel, J.M. & Dumenil, J., 2007. Le TAFT un outil pour la capitalisation de l'analyse fonctionnelle technique. *Technologie, sciences et techniques industrielles*.
18. Chase, K.W., Gao, J. & Magleby, S.P., 1997. Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Mechanical Assemblies with Small Kinematic Adjustments. *Advanced Tolerancing Techniques*.
19. Chase, K.W. & Greenwood, W.H., 1988. Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis. *Manufacturing Review*.
20. Chase, K.W. & Parkinson, A.R., 1991. A Survey of Research in the Application of Tolerance Analysis to the Design of Mechanical Assemblies. *Research in Engineering Design*.
21. Chen, J., Goldberg, K., Overmars, M.H. & Halperin, D., 2002. Computing tolerance parameters for fixturing and feeding. In *Assembly Automation*. p. 22(2):163–172.
22. Chevaldonné, M. et al., 2005. View and Application Dependent Simplification of Digital Mock-Ups. In *WSCG*. Plzen, 2005. UNION Agency – Science Press.
23. Childs, T., Agouridas, V., Barnes, C. & Henson, B., 2006. Controlled appeal product design: a life cycle role for affective (Kansei) engineering. *Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*.
24. Clement, A., Riviere, A. & Serre, P., févr. 1996. The TTRS: a common declarative model for relative positioning tolerancing and assembly. *Revue de CFAO et d'informatique graphique*.
25. Clement, A., Rivière, A. & Temmerman, M., 1994. *Cotation tridimensionnelle des systèmes mécaniques: théorie & pratique*. Ivry-Sur-Seine Cedex.
26. Dabling, J.G., 2001. *Incorporating Geometric Feature Variation with Kinematic Tolerance Analysis Of 3D Assemblies*. Thèse de l'Université de Brigham Young : Chapitre 1&2.
27. Dalglish, G.F., Jared, G.E.M. & Swift, K.G., 2000. Design for assembly: influencing the design process. *Journal of Engineering Design*.
28. Dantan, J.Y., Ballu, A. & Mathieu, L., 2001. Sémantique des spécifications géométriques: Classification des éléments géométriques : Calibre à mobilités internes. *Mécanique & industries*.
29. Davidson, J.K. & Shah, J.J., 2004. Mathematical model to formalize tolerance specifications and enable full 3D tolerance analysis. *Service and Manufacturing Grantees and Research Conference/SMU - Dallas*.
30. Dolza, L. & Vérin, H., 2004. Figurer la mécanique : l'énigme des théâtres de machines de la Renaissance. *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, Avril.
31. Donald, I.(R.M., October 2008. Braking with tradition. *Eureka - Innovative Engineering Design & Application*.
32. Drieux, G., 2006. *De la maquette numérique produit vers ses applications aval : propositions de modèles et procédés associés*. Thèse de l'institut national Polytechnique de Grenoble.
33. Dufailly, J. & Poss, M., n.d. *Procar - L'Analyse Fonctionnelle Technique*. ENS - Renault.
34. Ferrandes, R., Marin, P.M., Léon, J.-C. & Gianni, F., 2009. A posteriori evaluation of simplification details for finite element model preparation. *Computers and Structures*, 87, p.73–80.

35. Frederick P. Brooks, J., 1975, 1995. *The Mythical Man-Month: Essays on Software Engineering*. Addison-Wesley.
36. Frederick P. Brooks, J., 1986. No Silver Bullet - Essence and Accident in Software Engineering. *Proceedings of the IFIP Tenth World Computing Conference*, pp.1069-76.
37. Fukuda, K., 2004. *Frequently Asked Questions in Polyhedral Computation*. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne and Zurich, Switzerland.
38. Fukuda, K., 2004. From the zonotope construction to the Minkowski addition of convex polytopes. *In Journal of Symbolic Computation*.
39. Fukuda, K. & Weibel, C., 2005. Computing All Faces of the Minkowski Sum of V-Polytopes. *Proceedings of the 17th Canadian Conference on Computational Geometry*.
40. Gao, J., Chase, K.W. & Magleby, S.W., 1994. General 3-D Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies with Small Kinematic Adjustments. *ADCATS, 94-2*.
41. Gaunet, D., 1994. *Modèle formel de tolérancement de position. Contributions à l'aide au tolérancement des mécanisme en CFAO*. Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.
42. Germain, F., 2007. *Tolérancement statistique tridimensionnel, intégration en CFAO*. Thèse de doctorat de l'Université de Savoie.
43. Giordano, M. & Duret, D., 1993. Clearance space and deviation space. Application to three dimensional chain of dimensions and positions. *3rd CIRP Seminar on Computer-Aided Tolerancing*.
44. Giordano, M. & Hernandez, P., 2006. Mechanical system representation by hypergraphs, application to geometrical tolerances in the design process.
45. Giordano, M., Kataya, B. & Pairel, E., 2003. Tolerance analysis and synthesis by means of clearance and deviation spaces. *Geometric Product Specification and Verification: Integration of Functionality*.
46. Joskowicz, L. & Ostrovsky-Berman, Y., 2004. Tolerance envelopes of planar mechanical parts. *9th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, 135-143, Genova*.
47. Joskowicz, L. & Ostrovsky-Berman, Y., 2005. Relative positioning of planar parts in toleranced assemblies. *Journal of Computer Aided Design and Applications*.
48. Lionel Fine, EADS, 2008. Lien CAO/CALCUL : problématique des assemblages aéronautiques. In *Journée Liaison CAO-Calcul*. Valenciennes - 22 Mai, 2008.
49. Longview Advisors, I., 2008. *Collaboration & Interoperability Market Report*.
50. Marguet, B., 2001. *Contribution à l'analyse des variations géométriques dans les ensembles structuraux en aéronautique: Démarche et Outils*. Thèse de l'Ecole Normale de Cachan.
51. Marguet, B. & Mathieu, L., 1998. Tolerancing Problems for Aircraft Industries. *Geometric Design Tolerancing : Theories, Standards and Applications*, pp.419-427.
52. Marguet, B. & Mathieu, L., 2003. Method for Geometric Variation Management from Key Characteristics to Spécification. *Geometric Product Specification and Verification: Integration of Functionality : 217-226*.

53. Mathieu, L. & Belingard, O., 2005. Modélisation par les surfaces fonctionnelles en CAO : une solution pour l'intégration du tolérancement dans la maquette numérique des produits. *CPI*.
54. Mathieu, L. & Villeneuve, F., 2007. *Tolérancement Géométrique des Produits*. Lavoisier.
55. Mitsuo, N., 2008. *Manufacturing from the viewpoint of Kansei Engineering / Ergonomics (Magistral Courses)*. Hiroshima International University.
56. Monticolo, D., Frey, E. & Gomes, S., 2008. An approach to acquire and reuse multi-domains knowledge at the time of mechanical design projects. In Design, R.i.I., ed. *The 7th International Conference on Integrated, Virtual and Interactive Engineering*. Beijing, 2008. Springer Verlag.
57. Ostrovsky-Berman, Y. & Joskowicz, L., 2006. Relative Position Computation for Assembly Planning With Planar Toleranced Parts. *The International Journal of Robotics Research*, 25(2), pp.147-70.
58. Pahl, G. et al., Réédition 2007. *Engineering Design: A Systematic Approach*. 3rd English edition, Springer.
59. Petit, J.-P., 2004. *Spécification géométrique des produits : méthode d'analyse de tolérances. Application en conception assistée par ordinateur*. Thèse de l'Université de Savoie.
60. Pillet, M., 2006. Le tolérancement Inertiel : Ou comment faire du tolérancement statistique en garantissant la fonction du produit. *Cad-magazine*.
61. Roxo Da Coste, D., Buysse, D. & Poss, M., 2003. Optimal Resolution of Uniaxial Dimensioning Problems. *Proceedings of the 8th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing*.
62. Salomons, O.W. et al., 1996. A computer aided tolerancing tool i : Tolerance specification. *Computers in Industry*.
63. Salomons, O.W. et al., 1996. A computer aided tolerancing tool ii : Tolerance analysis. *Computers in Industry*.
64. Samper, S., Adragna, P.A., Favreliere, H. & Pillet, M., 2009. Modeling of 2D and 3D Assemblies Taking Into Account Form Errors of Plane Surfaces. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 9(4).
65. Socoliuc, M., 2006. *valorisation des jeux au niveau des interfaces mécaniques appartenant a un assemblage 3d*. Master Recherche de l'Ecole Centrale Paris.
66. Socoliuc, M., Buysse, D. & Rivière, A., 2007. A new specification model for realistic assemblies. *Proceedings of 10th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*, 21 - 23 Mars.
67. Socoliuc, M., Buysse, D. & Rivière, A., 2009. Towards a specification of the Functional Mock-Up and its digital link with the Digital Mock-Up. *Proceedings of 11th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*.
68. Socoliuc, M., Riviere, A. & Buysse, D., 2007. Towards a new digital functional validation process. *CPI'2007*.
69. Socoliuc, M., Riviere, A. & Buysse, D., 2008. Towards a hybrid method of tolerance validation during the first design stages. *IDMME*.

70. The Standish Group, n.d. *Chaos Report*. [Online] Available at: <http://www.scs.carleton.ca/~beau/PM/Standish-Report.html> [Accessed 2000].
71. Toulorge, H., 2004. *Contribution à un processus numérique d'assistance fonctionnelle à la synthèse d'un schéma de spécifications géométriques*. Thèse de l'Ecole Centrale Paris.
72. Toulorge, H., Buysse, D., Clement, A. & Riviere, A., 2004. Towards a digital functional assistance module to joint specification. In *IDMME The 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*. 5-7 April, Bath (UK), 2004.
73. Toulorge, H., Rivière, A. & Bellacicco, A., 2001. Functional assistance for computer-aided tolerancing software. In *proceeding of the 7th CIRP seminar on computer aided tolerancing*. Cachan, 2001.
74. Toulorge, H., Rivière, A. & Bellacicco, A., 2002. Développement d'une méthode d'assistance fonctionnelle au tolérancement. In *proceeding of the 4th IDMME conference*. Clermont-Ferran, 2002.
75. Toulorge, H., Riviere, A., Bellacicco, A. & Sellakh, R., 2003. Towards a Digital Functional Assistance Process for Tolerancing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, March. pp.39-44.
76. Yannou, B., 1998. *Chapitre 3: Analyse de la Valeur*. Tollenaere M. Editor, Hermes, vol. ISBN 2-86601-694-7.

Annexes

Extraction CdC Prototype DS (calcul contour quelconque)

- ✓ **Thème :** *Point sur l'avancement discrétisation des surfaces planes – Prototype analyse tolérances.*
- ✓ **Objet :** *Retour sur le calcul des nuages de points & sur le contour à N points.*

Synthèse :

Jusqu'ici nous ne prenions que des approximations des surfaces constituant la liaison primaire (approximation rectangulaires / losangiques).

Pour essayer de s'approcher au mieux de la réalité, il a fallu étendre le nombre de points constituant le contour au delà de 4. Par conséquent il a fallu trouver un algorithme qui puisse calculer les espaces solutions, dans lesquels les variables positionnantes de la surface plane, pouvaient être choisies tout en gardant la surface à l'intérieur de sa zone tolérancée.

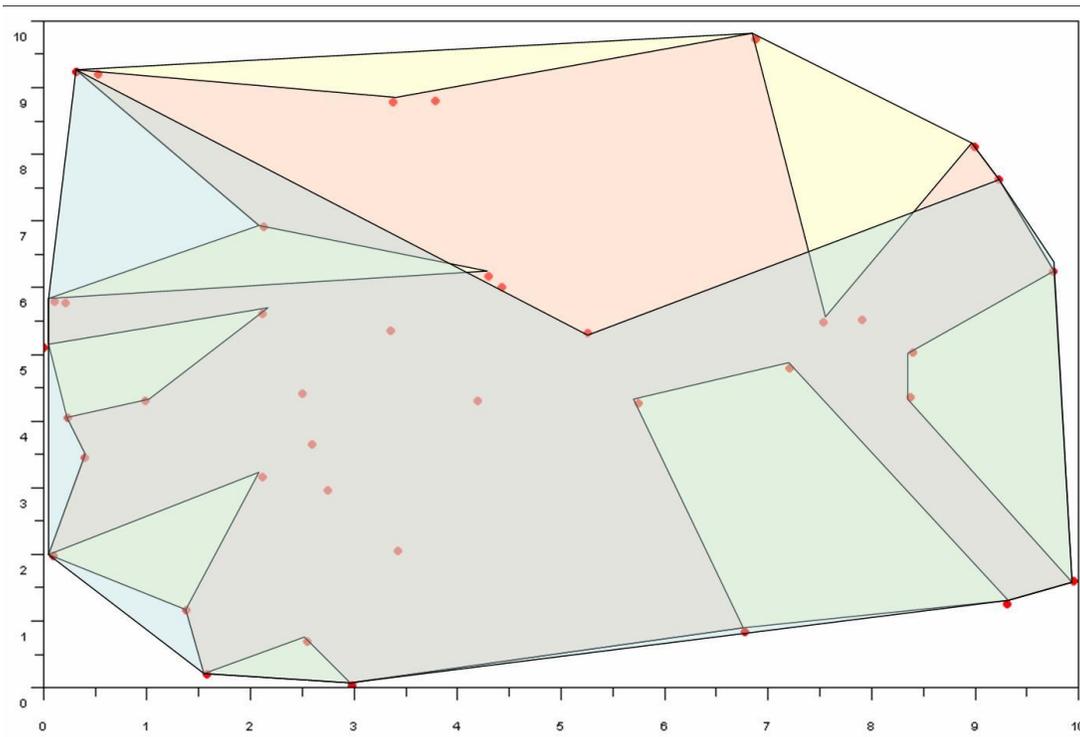
La seconde partie du compte rendu reprendra quand a elle les étapes de calcul qui vont nous permettre de représenter les nuages de points.

Calcul du défaut engendré par un contact plan

Jusqu'alors nous nous étions restreints à approximer les plans par des contours de type rectangulaire ou losangique. Ces simplifications nous permettaient d'avoir des calculs simplifiés et de pouvoir coder les écarts de façon plus rapide.

1. *Hypothèses*

Par défaut, la surface étudiée doit être quelconque et pour tester cette nouvelle méthode il a tout simplement fallu générer des points aléatoirement.



En ce qui concerne les tolérances qui sont associées à cette surface nous avons choisi de prendre en compte une localisation et une orientation.

Par conséquent la transformation qui peut être appliquée à la surface est la composition de deux rotations (suivant les deux axes définissant le plan sur lequel repose le contour) et une translation suivant la normale au plan.

$$M \xrightarrow{R_x \bullet R_y \bullet \overline{OM}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}_{R_0} \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}_{R_1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{R_0} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w \end{pmatrix}_{R_0}$$

Ci-dessus nous pouvons voir la transformation que l'on applique à tout point "solidaire du plan". De plus, si l'on continue la réflexion nous allons essayer de trouver les triplets de paramètres $\{\alpha, \beta, w\}$ qui vont permettre à tous les points du contour de rester à l'intérieur de la zone tolérancée. Pour ce faire, nous allons regarder le débattement suivant la normale en chaque point et donc calculer les valeurs maximales que chaque paramètre peut emprunter.

2. Calcul du déplacement en chaque point du contour

En utilisant les petits déplacements, nous pouvons réduire l'expression des écarts à :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + z \cdot \beta \\ y - z \cdot \alpha \\ z + w + y \cdot \alpha - x \cdot \beta \end{pmatrix}$$

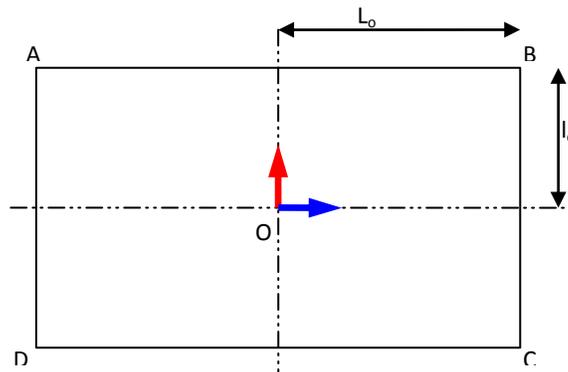
Comme nous l'avons spécifié plus haut nous avons choisi de prendre en compte aussi l'orientation en plus de la localisation de la surface. Cette hypothèse a comme conséquence que l'on va limiter le débattement suivant la normale non pas à :

$$|w \pm y \cdot \alpha \pm x \cdot \beta| \leq \frac{t_1}{2}$$

mais à :

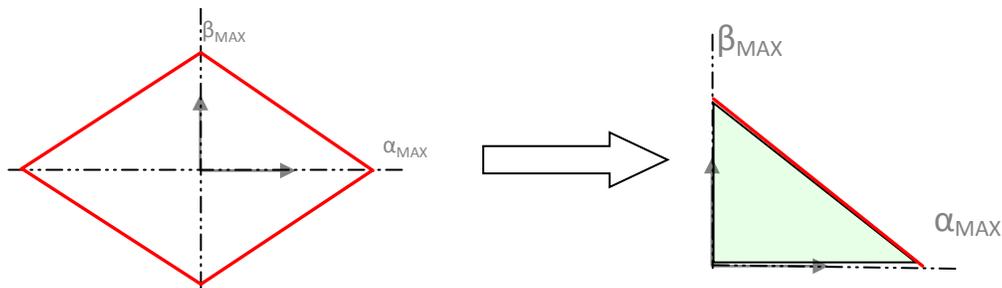
$$|y| \cdot \alpha + |x| \cdot \beta \leq \frac{t_1}{2} \quad \forall \{\alpha \ \beta\}_{\mathbf{R}^+}$$

Pour en arriver à ces conclusions nous ferons remarquer que le signe des coordonnées n'a aucune influence sur le résultat final et que l'étude du point A ou des quatre points du contour rectangulaire nous amène au même résultat.



Enfin, ce que nous présenterons plus loin se basera sur l'étude des domaines que les

variables $\{\alpha \ \beta\}$ peuvent balayer et pour simplifier la représentation nous ne nous intéresserons



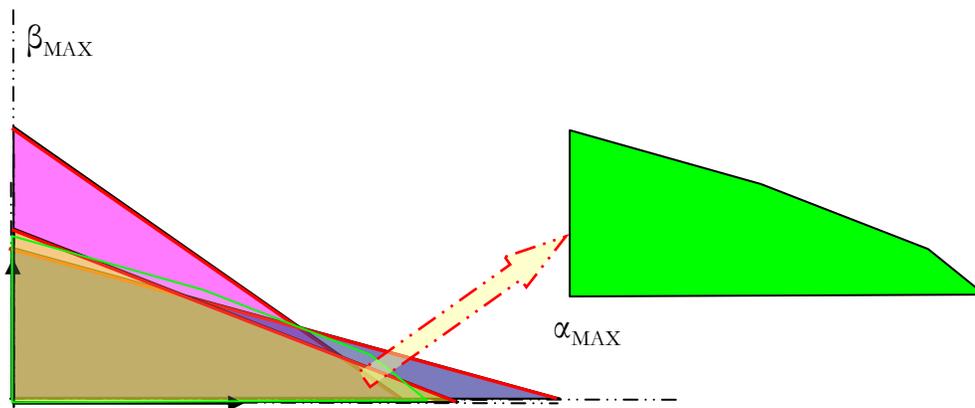
qu'à la partie où l'on a $\{\alpha \ \beta\}_{\mathbf{R}^+}$.

La partie que nous pouvons apercevoir en vert est l'espace dans lequel les variables $\{\alpha \ \beta\}$ peuvent se trouver tout en positionnant le plan à l'intérieur de sa zone tolérancée.

3. *Calcul pour N points appartenant au même contour*

a. Un cas théorique simple

En reprenant la représentation de l'espace solution des couples $\{\alpha \ \beta\}$ et en superposant les espaces correspondant à l'étude de plusieurs points, nous obtenons l'intersection des espaces solutions qui permettent de positionner le plan dans sa zone tolérancée.



Sur le graphique ci-dessus nous avons superposé les espaces solutions et nous pouvons graphiquement en déduire l'espace à l'intérieur duquel nous pouvons prendre les valeurs de $\{\alpha \ \beta\}$ afin de toujours positionner le plan dans sa zone tolérancée.

b. Un cas quelconque complexe

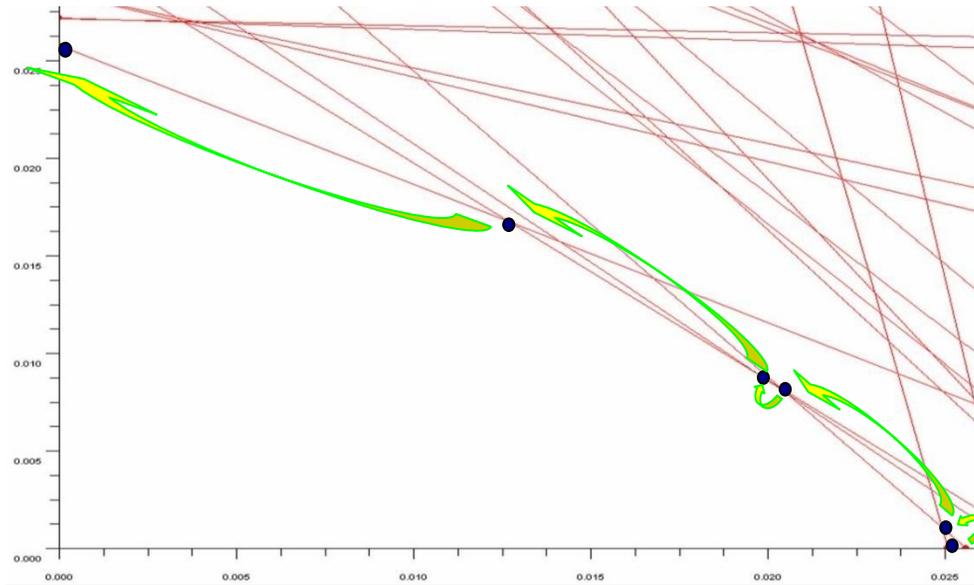
En reprenant l'ensemble de points que l'on a représenté dans la première partie, nous allons montrer comment l'algorithme va réussir à faire l'intersection de tous les espaces solution $\{\alpha \ \beta\}$.

La première chose que l'on calcule ce sont les valeurs maximales que peuvent prendre dans chaque cas les couples $\{\alpha \ \beta\}$. Cela nous permet de savoir quelles sont les domaines qui vont avoir une intersection, puisque si intersection il y a, les valeurs de α_{\max} et de β_{\max} ne

sont pas rangés dans le même ordre ($\begin{cases} \alpha_{\max 1} > \alpha_{\max 2} \\ \beta_{\max 1} < \beta_{\max 2} \end{cases}$ ou inversement).

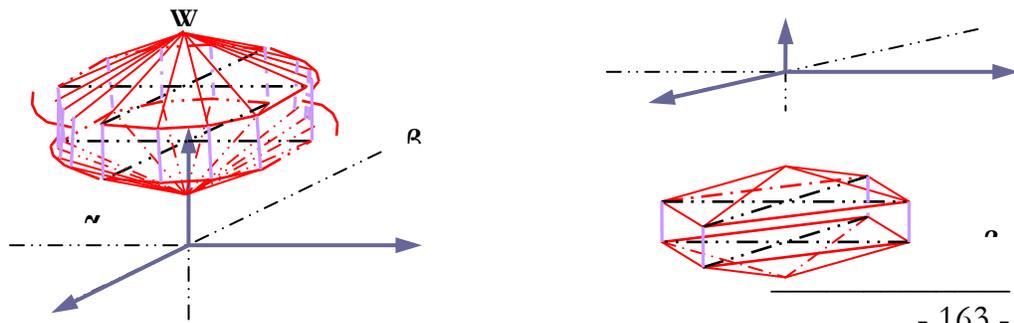
Cette notion d'intersection nous est utile pour déterminer quelles sont les "morceaux" de frontière qui composent la zone solution finale et c'est pour cela que nous créons une matrice composée uniquement de 0 ou 1 : 0 comme indice $Minter(i,j)$ si les domaines i et j n'ont aucune intersection, et 1 dans le cas contraire.

L'étape qui suit est la recherche des valeurs minimales parmi toutes les valeurs de α_{\max} et β_{\max} . En effet, celles-ci vont être les intersections des frontières avec les axes du repère, et c'est à partir de ces deux valeurs que l'on va effectuer la recherche des autres points qui se trouvent à l'intersection des bords de deux espaces solutions.



Une fois que l'on a déterminé les plus petites valeurs des paramètres α_{\max} et β_{\max} nous pouvons en déduire la frontière à laquelle ces deux valeurs appartiennent. À partir de ce moment :

- soit elles appartiennent à la même frontière (cas où nous avons un domaine qui est inclus dans tous les autres et qui se traduirait par l'approximation de l'ensemble des points du contour par un rectangle qui les engloberait)
- soit nous avons une intersection d'au moins deux espaces (cas dans lequel nous remontons petit à petit les intersections, à partir d'une des extrémités, pour aboutir à la seconde).



Pour obtenir l'espace 3D des triplets $\{\alpha, \beta, w\}$ il faut aussi compléter la section représentant le lien entre α_{\max} et β_{\max} , par les droites qui sont décrites par $|w \pm y \cdot \alpha \pm x \cdot \beta| = t_1/2$.

Finalement on aurait pu obtenir la représentation 3D en faisant des intersections des espaces 3D correspondant à chaque point du contour.

Calcul du défaut engendré par un contact plan

1. Retour sur les torseurs

Comme nous le savons nous pouvons écrire le torseur de petits déplacements en un

$$\text{point s'écrit : } \left\{ \mathbf{V}(S/R) \right\}_{A/R} = \left\{ \begin{array}{l} \overline{\Omega}(S/R) \\ \overline{V}(A \in S/R) \end{array} \right\}_{A/R} = \left\{ \begin{array}{ll} \alpha & u \\ \beta & v \\ \gamma & w \end{array} \right\}_{A/R}$$

Connaissant le torseur de la liaison dans son repère local, nous pouvons donc facilement calculer le torseur en un n'importe quel point fixe par rapport au repère local de la liaison. Ainsi le déplacement en un point M s'écrit:

$$\begin{pmatrix} x_{OM} \\ y_{OM} \\ z_{OM} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}_{\overline{V}(O \in S/R)} + \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \delta \end{pmatrix}_{\overline{\Omega}(S/R)} \wedge \begin{pmatrix} x_{OM} \\ y_{OM} \\ z_{OM} \end{pmatrix} = \left\{ \mathbf{V}(M \in S/R) \right\}_{M/R}$$

2. Traitement des liaisons

Etant donné que l'on est capable de spécifier les points étudiés : Mi et aussi que l'on peut trouver le repère de la liaison, nous sommes donc capables d'écrire dans un premier temps le

$$\text{vecteur } \overline{OM} = \begin{pmatrix} x_{OM} \\ y_{OM} \\ z_{OM} \end{pmatrix} \text{ ainsi que le torseur associé à la liaison en O : } \left\{ \begin{array}{ll} u_{O \in S/R} & \alpha_{S/R} \\ v_{O \in S/R} & \beta_{S/R} \\ w_{O \in S/R} & \delta_{S/R} \end{array} \right\}.$$

Ainsi l'on voit qu'il suffit de connaître le lien qui existe entre les différents paramètres du torseur pour pouvoir construire le nuage de points représentant le défaut pouvant être engendré au point étudié.

a. Contact plan

$$\text{En écrivant le torseur } \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \alpha_{S/R} \\ 0 & \beta_{S/R} \\ w_{O \in S/R} & 0 \end{array} \right\}, \text{ nous remarquons que ce type de liaison (en}$$

prenant en compte la localisation du plan tout comme son orientation) nous demandera que de

calculer des triplets de paramètres.

Comme on a pu le voir dans la première partie, il nous est possible d'établir suivant le

contour de la surface plane la liste des triplets à étudier.

$$\left\{ \begin{array}{ccc} 0 & 0 & t_{loc}/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_i & \beta_i & \pm (t_{loc} - t_{ori})/2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -t_{loc}/2 \end{array} \right\} \text{ et}$$

cela en suivant la méthodologie suivante :

Choix du nuage de points

```
NN=abs(NuagePointsN)
NuagePoints=NN;
t=0.5;AnglesP=[];InterP=[];
```

Calcul des angles max pour chaque point

```
Nb_points=size(NuagePoints,1);
for i=1:Nb_points,
    xi=NuagePoints(i,1); yi=NuagePoints(i,2);

    if (yi~=0) then AnglesP(i,1)=t/(2*yi);
    else AnglesP(i,1)=100000;
    end,

    if (xi~=0) then AnglesP(i,2)=t/(2*xi);
    else AnglesP(i,2)=100000;
    end,
end
```

Recherche des intersections

```
for i=1:Nb_points,
    for j=1:Nb_points,
        if (i~=j) then
            ai=AnglesP(i,1); bi=AnglesP(i,2);
            aj=AnglesP(j,1); bj=AnglesP(j,2);
            if (((ai<=aj)&(bi>=bj)) | ((ai>=aj)&(bi<=bj)))
                then InterP(i,j)=1;
            else InterP(i,j)=0;
            end,
        end,
    end,
end,
```

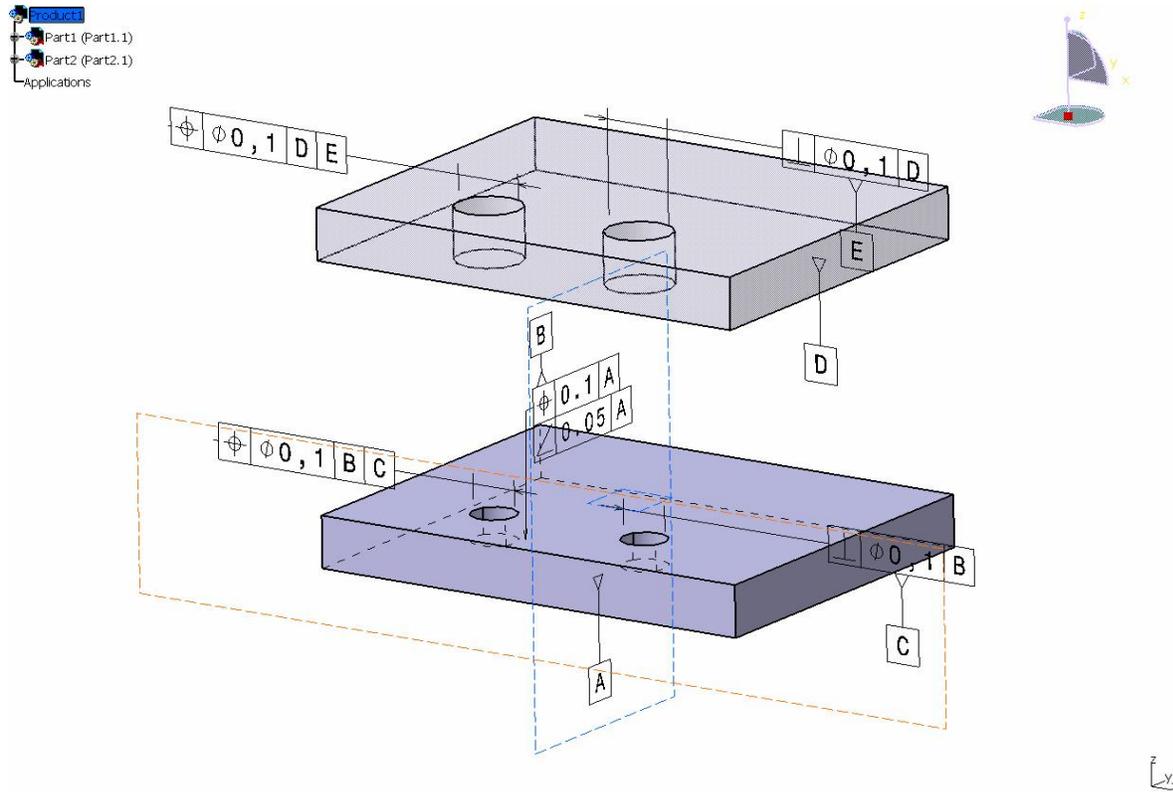
```
end,
//=====
am=mini(AnglesP(:,1)); bm=mini(AnglesP(:,2));
ia1=find(AnglesP(:,1)==am);
ib1=find(AnglesP(:,2)==bm);
ia=find(AnglesP(ia1,2)==maxi(AnglesP(ia1,2)));
ib=find(AnglesP(ib1,1)==maxi(AnglesP(ib1,1)));
EspAB=[am,0;0,bm]
```

Elimination des couples inutiles

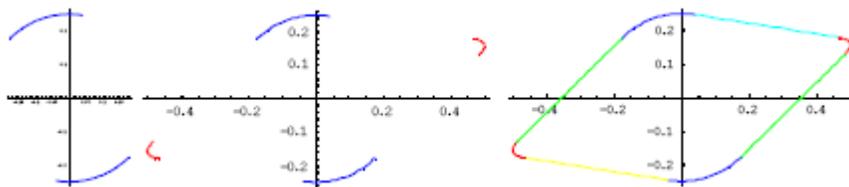
```
k=0; //Simple limite pour éviter la boucle infinie
while (ia~=ib) | (k>20),
    xb=NuagePoints(ib,1); yb=NuagePoints(ib,2);
    k, xi,yi,xb,yb, B=[];
    for i=1:Nb_points,
        xi=NuagePoints(i,1); yi=NuagePoints(i,2);
        if (InterP(ib,i)==1) then
            B(i,1)=t*(yi-yb)/(xb*yi-xi*yb);
            if B(i,1)>=bm then B(i,1)=0;
            end,
        end,
    end,
    bM=maxi(B(:,1))
    ib=find(B(:,1)==bM);
    EspAB=[EspAB;t/(2*yi)-bM*xi/yi,bM];
    k=k+1;
end
```

b. Groupe de 2 pions

Après donc avoir calculé le défaut dû au contact plan, nous allons nous intéresser aussi à la contribution des autres éléments constituant la liaison complète.



Comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessous, la cotation spécifie le premier trou/pion à l'aide d'une perpendicularité par rapport au plan d'appui et le second par une localisation prenant en référence le premier pion et le plan.



L'enveloppe de la déviation globale engendrée se compose de :

- 2 arcs de cercle
- 2 morceaux d'ellipse
- 4 segments qui viennent fermer l'enveloppe comme sur le graphique ci-dessus.

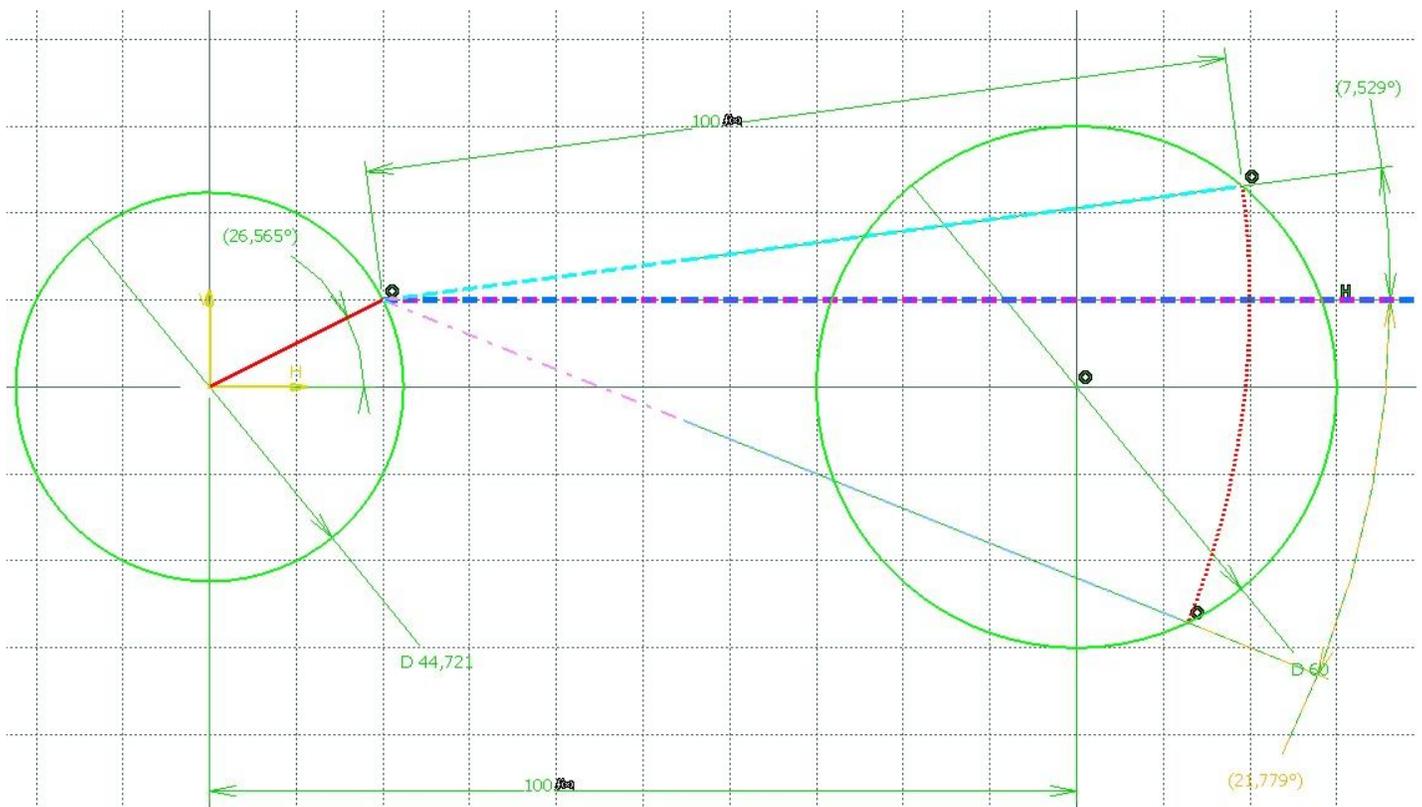
c. Equations des différents morceaux de l'enveloppe

Le paramétrage de cette liaison prend en compte :

- tp : la tolérance de perpendicularité (point A)
- tpj : le jeu au niveau de la liaison secondaire

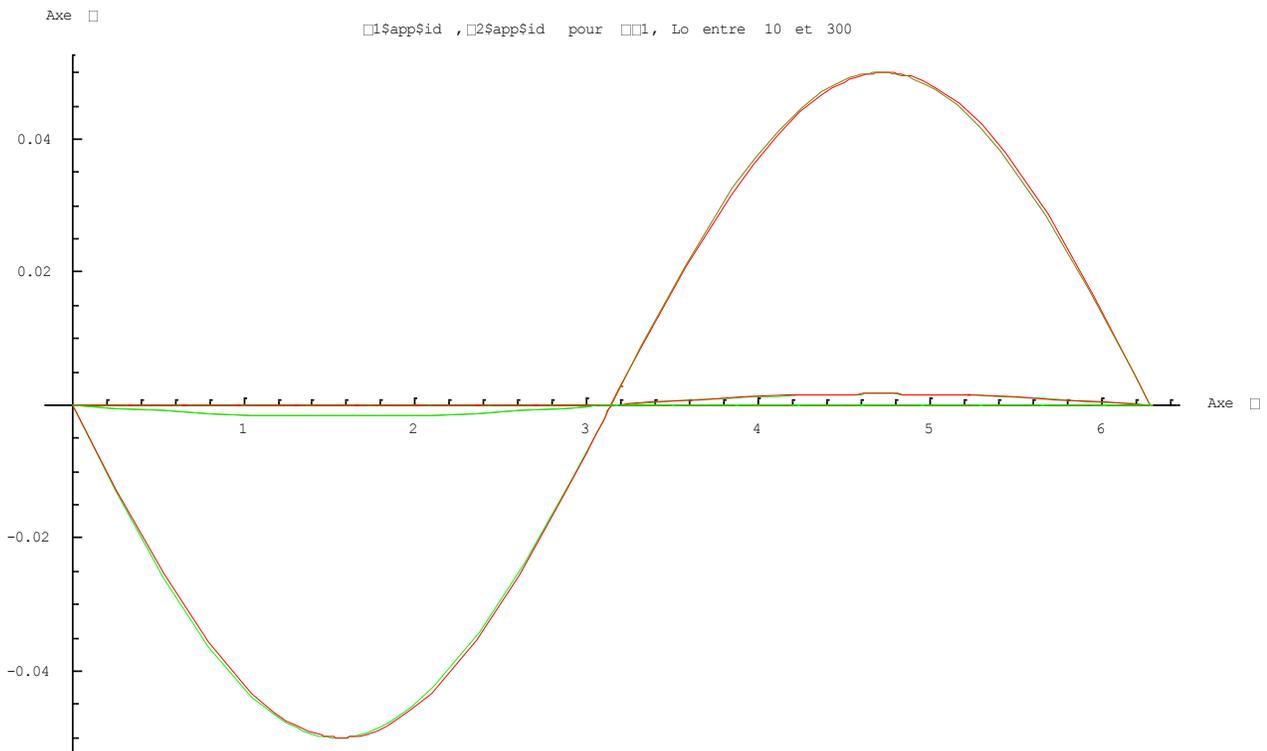
- t_l : la tolérance de localisation (point B)
- t_{lj} : le jeu au niveau de la liaison tertiaire
- L_0 : Distance entre les "pions"
- φ : direction de déplacement de l'axe dans le plan de la liaison
- θ : inclinaison de l'axe (A'B') par rapport à l'axe (AB)

Ci-dessous nous pouvons voir les zones tolérancées ainsi que le positionnement des « axes » des liaisons secondaire et tertiaire à l'intérieur des zones précédemment définies.



Afin de pouvoir trouver les valeurs de l'angle φ qui permettent de placer l'axe de la liaison tertiaire sur la zone tolérancée on doit résoudre l'équation $BQ=tt/2$, (après des DL à l'ordre 2 autour de 0, on obtient 2 solutions approchées).

Toutefois l'on ne peut pas considérer que t_p+t_{pj} soit nul de par le fait que ces variables sont positives ou nulles, et donc par conséquent t_p ne peut pas être égal à $-t_{pj}$.



En continuant avec les deux solutions ci-dessus nous pouvons les comparer avec celles trouvées par la méthode n'ayant point effectué un DL. Ce que l'on observe, c'est que dès que l'on dépasse les valeurs L_0 (qui sont trop petites pour éviter le chevauchement des zones tolérancées), nous avons un écart extrêmement petit (les courbes se superposent et l'écart est de maximum 2.5%).

Toutefois, malgré le fait qu'au final on obtienne les enveloppes des déplacements engendrés, une chose qui m'avait échappé jusqu'alors est ressorti : les rotations en φ ne dépendent pas des valeurs des tolérances t_l et t_j décrivant la liaison tertiaire.

Extraction du CdC Prototype DS (méthodes de calcul ConvexHull)

✓ Thème : Ébauche du Cahier des Charges

Partie du CdC manquante

La première partie du CdC détaillait tout le processus dans lequel le prototype devait s'intégrer, allant de l'extraction à partir du PLM de la maquette numérique jusqu'au choix des tolérances devant être appliquées au niveau de celle-ci. Cette partie n'apportant peu ou pas d'informations complémentaires à ce qui a déjà été décrit dans les chapitres précédents, ne sera pas intégré à ce mémoire.

Faisabilité dans le cadre du prototype

Le prototype qui a été développé par M. Tastevin a du prendre en compte qu'une partie de ce qui a été développé précédemment et donc ne prendra pas en compte les étapes de rapatriement de la maquette numérique en session, mais partira d'un exemple type déjà assemblé et qui peut comporter le tolérancement 3D des éléments qui constituent les liaisons présentes dans la boucle cinématique étudiée.

En ce qui concerne les calculs de calcul d'enveloppes convexes, plusieurs méthodes ont été prises en compte.

Macro étapes qui devront être abordées lors du développement

Comme spécifié plus haut nous allons directement partir avec une ***maquette numérique déjà présente en session et déjà cotée à l'aide de FTA***, ce qui nous réduit le développement de moitié.

En effet, une des premières étapes à définir, est celle se ***substituant*** à l'étape de ***définition des liaisons*** telle que présentée dans la première partie de ce document. Ce qu'il faut donc des le début faire c'est :

- ***Créer le support d'Inter-Pièce*** afin de pouvoir y déclarer le type de liaison et le schéma de tolérancement, valeurs comprises, qui serviront par la suite lors des calculs.
- Attacher les Inter-Pièces aux liaisons de la boucle cinématique étudiée.
- ***Renseigner les attributs*** des Inter-Pièces

Une fois cette étape effectuée, le processus de calcul au pire des cas reste le même et nous allons développer les ***algorithmes*** qui seront utilisés dans la partie qui suit.

Enfin, la partie concernant l'optimisation des valeurs dépendra de la vitesse à laquelle avance le développement du prototype.

Algorithmes d'élimination de points

Comme spécifié plus haut nous allons directement partir avec une **maquette numérique déjà présente en session et déjà cotée à l'aide de FTA**, ce qui nous réduit le développement de moitié. De même, en ce qui concerne le calcul des points, nous nous rapporterons au fichier en annexe¹ qui décrit les calculs à effectuer suivant les liaisons que l'on peut rencontrer.

Une fois les nuages de points calculés nous allons utiliser les théories des enveloppes convexes, et pouvoir ne garder des nuages de points que ceux qui correspondent aux déplacements maximums². Pour cela nous à disposition 4 méthodes d'élimination des points intérieurs à l'enveloppe:

- **Incremental**
 - Temps total de calcul: $O(n^2)$.
 - Principe: Comme son nom l'indique cette méthode regarde, un après l'autre, si le point est compris dans l'enveloppe définie précédemment.
- **Gift Wrap**
 - Principe: Cette méthode se base sur le fait que l'enveloppe est un ensemble de facettes qui voient tous les autres points du même côté (séparation de l'espace en 2 parties : l'ensemble des points constituant le nuage étudié et un ensemble vide). La constitution de l'enveloppe se fait donc par itération (sur l'ensemble de points) et test sur les facettes.
- **Divide and Conquer**
 - Temps total de calcul minimum: $O(n \log n)$.
 - Principe: L'idée générale de cette méthode est de séparer le nuage de points en p parties et d'en calculer séparément l'enveloppe convexe, puis de regrouper les nouvelles enveloppes à la fin en une enveloppe finale.
- **QuickHull**
 - Temps total de calcul maximum: $O(n^2)$
 - Mais en pratique cela ne dépasse pas $O(n \log n)$.
 - Principe: Cette méthode se base sur l'algorithme incrémental dans lequel nous associons à chaque facette le point, non testé, le plus éloigné suivant la normale. Si ce dernier existe alors il est à l'extérieur de l'enveloppe, ce qui implique que nous allons recréer l'enveloppe à l'aide de ce nouveau sommet.

Les travaux les plus avancés et qui donnent les meilleurs résultats sont ceux utilisant l'algorithme QuickHull et ont déjà été implémentés dans des logiciels de dessin (Blender 3D, aussi utilisé pour la création de jeux vidéos) tout comme dans des logiciels de calcul (Matlab, Octave et Mathematica).

¹ Mémoire de Master Recherche 2005 [Socoliuc Michel]

²Par la suite on parlera surtout de « Pire des cas »

L'algorithme simplifié pour un *ensemble* E de n *points* se résumant à une *enveloppe convexe* E_c est le suivant :

```

Initialisation de l'ensemble de facettes  $E_c$  et l'ensemble  $F$  à l'ensemble nul
Définir  $E_c$  comme un simplexe de points de  $E$ 
Pour chaque point  $\in E$ 
  Pour chaque facette  $f \in E_c$ 
    Si le point voit  $f$ 
      Ajouter  $f$  à l'ensemble  $F$ 
      Pour chaque arrete  $e = v_1 v_2 \in F$ 
        Ajouter une nouvelle facette (point,  $v_1$ ,  $v_2$ ) à  $E_c$ 
        Supprimer  $F$ 
      Fin Pour
    Fin Si
  Fin Pour
Fin Pour

```

Une fois cette étape franchie nous pourrons passer à l'étape d'optimisation qui elle fera intervenir l'intersection des volumes ainsi calculés avec des volumes cibles, des droites ou des plans d'étude.