

N° d'ordre : 2984

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par

Jérôme DUFAURE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : MECANIQUE

**INTEGRATION ET TRACABILITE DU TRANSFERT DE SPECIFICATIONS
GEOMETRIQUES DANS LE CYCLE DE CONCEPTION D'UN PRODUIT.**

Soutenue le 8 juin 2005

Après avis de :

MM. P. BOURDET *Professeur des Universités, ENS de Cachan*
D. BRISSAUD *Professeur des Universités, INPG de Grenoble* **Rapporteurs**

Devant la commission d'examen formée de :

MM. D. DESJARDINS *Professeur des Universités, Bordeaux1* **Président**
P. BOURDET *Professeur des Universités, ENS de Cachan* **Rapporteur**
D. BRISSAUD *Professeur des Universités, INPG de Grenoble* **Rapporteur**
A. GERARD *Professeur des Universités, Bordeaux1* **Examineur**
D. TEISSANDIER *Maître de Conférences, Bordeaux1* **Examineur**
G. DEBARBOUILLE *Ingénieur R&D, OpenCASCADE SA* **Examineur**

Membres invités :

MM. H. FALGARONE *Ingénieur R&D, EADS CCR* **Membre invité**
P. GIRARD *Maître de Conférences, Bordeaux1* **Membre invité**

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe Mécanismes Dynamique du Laboratoire de Mécanique Physique de l'Université Bordeaux 1 dans le cadre d'une convention CIFRE avec la société OpenCASCADE SA.

Je tiens à remercier Monsieur Didier Desjardins, Professeur de l'Université Bordeaux 1, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Messieurs Pierre Bourdet, Professeur de l'ENS de Cachan, et Daniel Brissaud, Professeur de l'INPG de Grenoble, pour avoir examiné mon travail avec une grande efficacité et pour la pertinence de leurs questions.

Je remercie très vivement les personnes qui ont encadré ce travail de thèse. Tout d'abord Monsieur Alain Gérard (directeur de thèse), Professeur de l'Université Bordeaux 1, et Monsieur Gilles Débarbouillé, Ingénieur R&D OpenCASCADE SA, pour avoir permis à ce travail d'aboutir dans de bonnes conditions. Je remercie également Messieurs Denis Teissandier et Alex Ballu, Maîtres de conférences de l'Université Bordeaux 1, pour l'aide scientifique qu'ils m'ont apportée durant cette période. Je tiens à remercier toutes les personnes ayant participé au bon déroulement du projet IPPOP et plus particulièrement à Monsieur Philippe Girard, chef de file du projet.

Un remerciement particulier à Monsieur Yves Couétard, jeune retraité, pour m'avoir aiguillé sur la voie de la Technologie lors de mon arrivée à l'Université.

Pour finir, je remercie chaleureusement les personnes qui ont supporté mes bonnes et mauvaises humeurs surtout en période de rédaction et de soutenance: Raynald, Cécile, Guillaume, Sylvain et Clément, souvent en première ligne et qui pourtant n'ont jamais perdu patience. Merci à tous les cinq pour le temps que vous m'avez accordé et pour les sujets de discussion divers et variés qui ont été abordés. Merci aussi à Matthieu et Thomas, qui pour des raisons professionnelles ont été obligés de prendre de l'altitude. Je n'oublie pas non plus Marie et Guillaume qui ont migré vers le nord, attirés par les lumières de la tour Eiffel.

Ces remerciements s'adresse aussi aux membres de l'équipe MD du laboratoire (Denis, Alex, Olivier, Michel, Julien, Mariano, Jean-Pierre et Jean-Yves) ainsi qu'à Béa, Céline et Cathy.

*Croire tout découvert est une erreur profonde;
c'est prendre l'horizon pour les bornes du monde.*

A. Lemierre

Table des matières :

INTRODUCTION GENERALE	11
CHAPITRE I	15
<i>PROPOSITION D'UN MODELE PRODUIT</i>	
I.1 Entités de base	20
I.1.1 Composant.....	21
I.1.2 Interface.....	21
I.1.3 Fonction.....	22
I.1.4 Attributs des entités de base	22
I.2 Liens entre les entités.....	23
I.2.1 Lien Composant-Interface.....	23
I.2.2 Lien Fonction-Composant.....	24
I.2.3 Lien Interface-Fonction.....	24
I.3 Opération sur les entités.....	24
I.3.1 Décomposition	24
I.3.1.1 Décomposition en « ET ».....	25
I.3.1.2 Décomposition en « OU ».....	27
I.3.2 Agrégation.....	28
I.4 Applications aux modèles utilisés en conception	29
I.4.1 Diagramme pieuvre.....	29
I.4.2 FAST (Function Analysis System Technic).....	31
I.4.3 Modélisation cinématique	34
I.5 Conclusion	37

CHAPITRE II..... 39

***FORMALISATION DE L'EXPERTISE TOLERANCEMENT
GEOMETRIQUE***

II.1	Formalisation du transfert de conditions	45
II.2	Descriptions des informations manipulées par le transfert de conditions géométriques	48
II.2.1	Besoins	48
II.2.1.1	Présentation des modèles de tolérancement	48
II.2.1.1.1	Modèle variationnel	48
II.2.1.1.2	Modèle par zone enveloppe	51
II.2.1.1.3	Modèle structurel	51
II.2.2	Résultats	53
II.2.3	Données	53
II.2.4	Moyens	55
II.2.5	Contrôles	56
II.2.6	Déclencheurs	57
II.3	Conclusion	57

CHAPITRE III 59

***INTEGRATION DES INFORMATIONS LIEES A L'EXPERTISE
TOLERANCEMENT GEOMETRIQUE DANS LE MODELE PRODUIT***

III.1	Correspondance entre les informations de l'expertise « tolérancement géométrique » et les entités du modèle produit.....	63
III.1.1	Correspondance sémantique.....	64
III.1.2	Correspondance graphique.....	65
III.2	Attributs des entités de bases spécifiques au tolérancement.....	65
III.2.1	Attributs d'un composant	65
III.2.2	Attributs d'une fonction	66
III.2.3	Attributs d'une interface.....	68
III.3	Description et intégration des composants standards	70
III.3.1	Description d'un composant standard	70
III.3.2	Intégration dans le modèle produit.....	72

III.4 Traçabilité des spécifications géométriques au cours du processus de conception..... 74
 III.5 Conclusion 75

CHAPITRE IV 77

***MISE EN OEUVRE DU MODELE PRODUIT DANS L'EXPERTISE
 TOLERANCEMENT GEOMETRIQUE***

IV.1 Traçabilité des spécification géométriques 82
 IV.1.1 Utilisation du modèle produit présenté 82
 IV.1.2 Méthodes actuelles en tolérancement géométrique..... 85
 IV.1.3 Traçabilité des spécifications géométriques par l'utilisation du modèle produit.... 86
 IV.2 Gestion des alternatives de conception 87
 IV.2.1 Description des alternatives de conception 87
 IV.2.2 Spécifications induites par l'intégration d'un composant standard 92
 IV.2.3 Aide au choix de solutions techniques 95
 IV.3 Conclusion 98

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES..... 99

BIBLIOGRAPHIE 105

Introduction Générale

Introduction générale.

Les travaux présentés dans ce document s'intègrent dans le cadre du projet IPPOP. Le projet IPPOP, projet de type exploratoire du RNTL (Réseau National des Technologies Logicielles), s'intitule : Intégration Produit-Processus-Organisation pour l'amélioration de la Performance en ingénierie. Le consortium IPPOP est formé à la fois de partenaires industriels et de partenaires académiques.

Ce projet s'inscrit dans une activité de conception de type ingénierie concurrente. Dans le but de réduire les délais de conception, de fabrication et de mise sur le marché, le consortium IPPOP propose de mettre en place une structure de données permettant, au cours de la conception d'un produit, de faciliter le lien entre Organisation, Processus et Produit. Ce lien favorise le dialogue entre les différentes expertises intervenant dans le cycle de conception d'un produit. Notre participation dans ce projet porte plus spécifiquement sur la définition d'un produit en cours de conception. Les expertises recensées dans le consortium IPPOP sur le produit sont : l'analyse mécanique, la forge, l'usinage, l'analyse fonctionnelle, l'optimisation des procédés, l'optimisation de composants et le tolérancement géométrique. Notre expertise concerne spécialement le tolérancement géométrique. Le but de ce travail est de permettre la prise en compte au plus tôt dans le processus de conception du tolérancement géométrique. Par tolérancement géométrique nous entendons « la maîtrise des défauts géométriques des pièces d'un mécanisme ». Communément le tolérancement géométrique est perçu comme un outil permettant de palier aux imperfections de moyens d'obtention de la géométrie des pièces. Nous pensons au contraire que le tolérancement géométrique permet de maîtriser les défauts géométriques dans une optique de respect des fonctions pour lesquelles un produit est conçu. Partant de ce postulat il est nécessaire au cours du processus de conception de favoriser la traçabilité des spécifications géométriques de la conception préliminaire à la conception détaillée. La question de la traçabilité de spécifications géométriques sera donc le thème central de ce document.

Dans le premier chapitre nous présenterons un modèle permettant de décrire le produit tout au long de sa conception. Le modèle produit que nous présentons est basé sur trois entités de base qui sont le composant, l'interface et la fonction. Ces trois entités de base permettent de représenter à la fois la description fonctionnelle et la description structurelle du produit. Pour lier les descriptions fonctionnelles et structurelles nous proposons les liens entre les entités de base en définissant une sémantique particulière pour chaque lien. Chaque entité du modèle peut être décomposée ou agrégée. Les entités, les liens et les opérations sur les entités permettent de décrire un produit en phase de conception à l'aide des outils actuels de conception que sont le diagramme pieuvre, le diagramme FAST et le modèle cinématique. Le modèle que nous proposons est une structure de données collaborative qui permet de mémoriser l'historique de conception du produit. Ce point est essentiel dans l'utilisation du modèle produit en tolérancement géométrique qui sera discuté au chapitre 3.

Dans le second chapitre nous présenterons l'expertise « tolérancement géométrique ». Cette expertise regroupe la modélisation des spécifications géométriques et les outils de transfert de spécifications géométriques. Notre but n'est pas de fournir ni un nouveau modèle de spécification ni un nouvel outil de transfert. Nous présenterons les modèles actuels de spécifications ainsi qu'une formalisation de l'activité transfert de spécifications. Dans le transfert de spécifications nous essayerons de définir quelles sont les informations indispensables en termes de données d'entrée et de sortie et de définition des activités connexes. Cette étape de formalisation de l'activité de transfert permettra de mettre en avant les informations que l'expert tolérancement géométrique doit être en mesure de trouver dans le modèle produit pour mettre en œuvre son expertise.

Nous consacrerons le troisième chapitre à la répartition des informations liées au tolérancement géométrique dans la structure de données. Nous discuterons de la correspondance entre les entités de base du modèle produit et les données nécessaires au tolérancement. La correspondance sémantique entre le modèle produit et un modèle de spécifications sera illustrée sous la forme d'une représentation graphique des entités des deux modèles. Nous introduirons la notion de composant standard. Cette notion correspond à un grand nombre de pièces constitutives d'un mécanisme mais n'est pourtant pas très bien intégrée dans les modèles actuels de description de produit. Dans un modeleur CAO (Conception Assistée par Ordinateur) la définition géométrique exhaustive d'un composant standard est complète mais par contre la description fonctionnelle est souvent ignorée. La notion de composant standard est utile à l'expertise tolérancement géométrique car l'intégration de composant standard implique le respect de conditions géométriques qui leur sont propres.

Le chapitre 4 est consacré à la mise en œuvre du modèle produit dans l'expertise « tolérancement géométrique » à partir de l'exemple académique choisi par le consortium IPPOP : un malaxeur. Nous montrons dans ce chapitre comment l'utilisation de la structure de données produit permet de mettre en œuvre la traçabilité des spécifications géométriques. A un stade donné du processus de conception nous sommes capables de connaître la provenance des spécifications géométriques. Les spécifications géométriques qui assurent une fonction sont détectables. De plus le modèle produit permet de décrire des alternatives de conception ce qui se traduit en tolérancement géométrique par des schémas de tolérancement différents correspondant à chaque alternative. Dans le but de mettre en œuvre l'expertise « tolérancement géométrique » au plus tôt dans le processus de conception, ces schémas de tolérancement alternatifs permettent d'aider le concepteur dans le choix d'une solution optimale. Dans le cadre de la description de schémas de tolérancement alternatifs, nous montrons aussi l'influence de l'intégration des composants standards sur le tolérancement d'un produit. Le schéma de tolérancement induit par l'intégration de composants standards peut aussi être un critère de choix d'une solution optimale de conception mis à la disposition du concepteur.

- Chapitre I -

Proposition d'un modèle produit

« Ce chapitre présente les trois entités de base du modèle produit : le composant, l'interface et la fonction. Ces entités de base ainsi que les liens et les opérations sur les entités permettent de donner une représentation structuro-fonctionnelle d'un produit. De plus la structure de données présentée permet de caractériser les modèles de conception actuels que sont le diagramme pieuvre, le diagramme FAST, le modèle cinématique. Dans un contexte de conception collaborative, multi-acteurs et multi-sites, le modèle produit permet la description des informations produit dans un seul modèle.

Ceci permet de faciliter le dialogue entre les concepteurs, et d'assurer la traçabilité des informations liées au produit durant le cycle de conception, ce qui est difficile avec les outils et modèles couramment utilisés qui proposent des descriptions hétérogènes d'un produit. »

Chapitre I

Proposition d'un modèle produit

I.1	Entités de base	20
I.1.1	Composant.....	21
I.1.2	Interface.....	21
I.1.3	Fonction.....	22
I.1.4	Attributs des entités de base	22
I.2	Liens entre les entités.....	23
I.2.1	Lien Composant-Interface.....	23
I.2.2	Lien Fonction-Composant.....	24
I.2.3	Lien Interface-Fonction.....	24
I.3	Opération sur les entités.....	24
I.3.1	Décomposition	24
I.3.1.1	Décomposition en « ET ».....	25
I.3.1.2	Décomposition en « OU ».....	27
I.3.2	Agrégation.....	28
I.4	Applications aux modèles utilisés en conception	29
I.4.1	Diagramme pieuvre	29
I.4.2	FAST (Function Analysis System Technic).....	31
I.4.3	Modélisation cinématique	34
I.5	Conclusion	37

Depuis une quinzaine d'années, chercheurs et industriels développent des méthodes et des outils permettant de faciliter la coopération entre les acteurs intervenant dans le processus de conception. Le but est de réduire les temps de conception et ainsi de réduire les coûts du produit final. Le problème souligné par [ARZUR et al, 2000] est de réussir à faire dialoguer les intervenants du processus de conception alors que leurs cultures sont très différentes et que le langage est spécifique à chaque métier. Pour résoudre ce problème, [GRABOWSKI et al, 1999] propose une théorie de conception permettant de donner un langage commun minimum aux intervenants du cycle de conception d'un produit. Cette théorie décrit le processus de conception en quatre grandes phases qui donnent lieu à quatre modèles :

- le modèle d'exigence qui liste les contraintes sur le produit. Ces informations sont fournies par le client ou les commerciaux. Ce modèle évolue tout au long de la conception.
- le modèle fonctionnel décrit comment le produit doit répondre aux contraintes du modèle d'exigence. Ce modèle donne une représentation fonctionnelle du produit à concevoir.
- le modèle géométrique pertinent permet de décrire la géométrie du produit à l'aide d'éléments géométriques de base (point, droite, surface etc.). Chaque élément géométrique de ce modèle est une solution aux fonctions exprimées dans le modèle fonctionnel. Ce modèle est une description du squelette du produit.
- le modèle solide du produit. A partir du squelette du produit, le concepteur ajoute une description volumique de la géométrie et assigne un matériau à cette géométrie.

Le langage commun de description du produit étant défini, il est indispensable de permettre aux acteurs de la conception de stocker et de récupérer les données relatives au produit. La solution proposée par [TICHKIEWITCH et al, 1995] est d'utiliser une base de données permettant aux intervenants ne travaillant pas sur le même site de dialoguer et de stocker les informations. De plus, l'utilisation d'une base de données permet de garder une trace de l'évolution de la description du produit et d'effectuer des requêtes en ne récupérant que les données relatives à un domaine d'expertise.

Dans ce chapitre nous présenterons les entités de bases permettant de décrire un produit : le composant, l'interface et la fonction. Nous introduirons la notion de liens permettant d'établir des relations entre les descriptions fonctionnelles et structurelles du produit. Enfin des opérations telles que la décomposition et l'agrégation permettant de détailler ou de synthétiser le modèle produit seront exposées. Un modèle produit pourra être illustré par un graphe orienté et ouvert. Un graphisme particulier pour les trois types d'entités de base, les différents liens et les différentes opérations a été élaboré.

Nous montrerons comment caractériser un diagramme de l'environnement, un FAST (Function Analysis System Technic) et un modèle cinématique avec ce graphisme. Parmi les nombreux modèles utilisés en conception, nous avons fait le choix de ne retenir que les trois cités précédemment car dans une démarche de tolérancement géométrique, ils permettent de mettre en valeur la propagation des conditions fonctionnelles dans la structure du produit.

I.1 Entités de base

Dans le cadre de l'utilisation d'une base de données commune à tous les acteurs du cycle de conception, il nous faut maintenant définir une structuration des informations. Pour cela nous avons développé, au sein du consortium IPPOP, un modèle produit basé sur trois entités de base assez génériques mais partagées de manière univoque au moins au sein de la communauté mécanicienne. Ce modèle produit fait suite aux travaux de [CONSTANT, 1996] et [EYNARD et al, 1997] concernant le lien entre la description structurelle et fonctionnelle du produit, [DEBARBOUILLE, 1998] propose une représentation du produit à l'aide d'entités des entités composant, lien et relation, et [NOEL et al, 2004] qui présente les entités de base composant, interface et fonction.

Les entités de base permettant de décrire un produit sont :

- le composant,
- l'interface,
- la fonction.

Pour mettre en relation ces trois entités de base du modèle nous proposons la description UML (Unified Modeling Language) suivante :

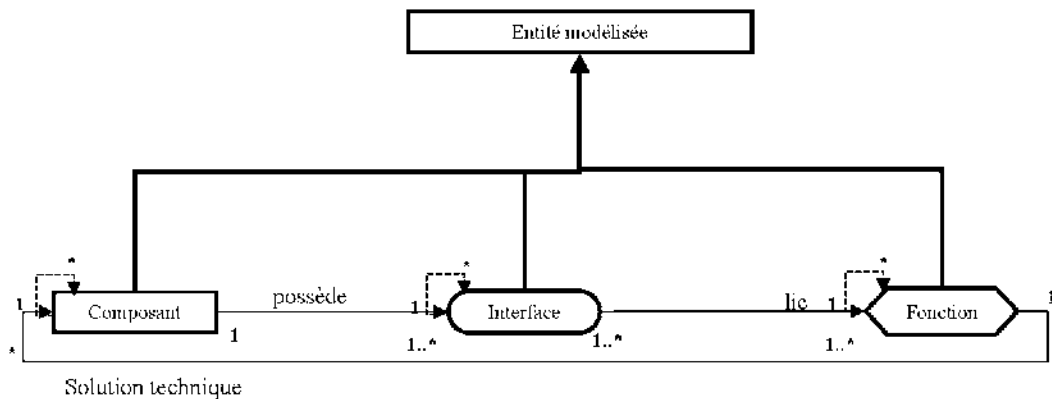


Figure I-1 : Représentation UML du modèle produit

Ce modèle produit permet de décrire le produit de la phase de conception préliminaire à la phase de conception détaillée. La structuration du modèle étant définie nous allons maintenant présenter la sémantique et la taxonomie attachée à chacune des entités.

I.1.1 Composant

Un composant permet de donner une représentation structurelle du produit. Un composant peut être le produit tout entier, un assemblage, un sous-assemblage, une pièce ou plus généralement toute partition du produit.

I.1.2 Interface

Une interface est le lien entre un composant et le milieu extérieur. Cette entité peut être un élément géométrique (surfaccique, linéique ou ponctuel) mais peut aussi représenter le maillage associé à un composant. Une interface peut être vue comme une « poignée » accrochée à un composant, permettant ainsi d'accéder au composant avec une vision spécifique.

I.1.3 Fonction

Une fonction définit un objectif à atteindre par le produit à concevoir. Elle est décrite par un verbe à l’infinitif et un complément ([NFX50-151, 1991]). De plus pour chaque fonction il convient de définir un **critère d’appréciation**.

Le critère est le paramètre retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée.

Dans les phases d’étude plus approfondie nous devons renseigner pour chaque critère les attributs suivants :

Le niveau : il permet de spécifier l’échelle pour un critère d’appréciation.

La flexibilité : elle permet de moduler un niveau sur un critère d’appréciation (d’impératif à négligeable noté **F0** à **F3**).

Les limites : elles caractérisent le niveau du critère d’appréciation au-delà et/ou en deçà duquel le besoin est déclaré non satisfait (**min** et/ou **max**).

Une fonction met en relation des composants via leurs interfaces ce qui permet par exemple de décrire à l’aide de cette entité une liaison cinématique ou un contact . Dans les phases de conception détaillée, une fonction peut être transférée sur les pièces du mécanisme et permet ainsi de décrire des spécifications géométriques par zone de tolérance, des spécifications par dimension et des spécifications d’état de surface. Ce point sera discuté plus en détail dans le chapitre 3.

I.1.4 Attributs des entités de base

La description de chaque entité (composant, interface et fonction) peut être affinée en ajoutant un qualificatif : alternative, commun et vue. Un composant « commun » est un composant dont la description est la même pour tous les intervenants du cycle de conception. Un composant « alternative » représente un choix. Il permet de décrire un composant optionnel ou bien un choix entre plusieurs composants. Par opposition au composant « commun », un composant « vue » est un composant dont la description est spécifique à une expertise intervenant dans la conception du produit.

Pour la suite, nous utiliserons les notations présentées dans la figure suivante (Figure I-2). La première lettre désignant le qualificatif (Alternative, Commun ou Vue) et la seconde lettre désignant le type d'entité (Composant, Interface ou Fonction). Avec la notation adoptée, un « composant commun » sera par exemple noté **CC**.

Entité Type	Composant	Interface	Fonction
Commun	Composant Commun (CC)	Interface commune (CI)	Fonction Commune (CF)
Alternative	Composant Alternatif (AC)	Interface Alternative (AI)	Fonction Alternative (AF)
Vue	Composant Vue (VC)	Interface Vue (VI)	Fonction Vue (VF)

Figure I-2: Description des qualificatifs

Ces qualificatifs permettent d'envisager la description de familles de produits (alternative) mais aussi de différencier les données partagées par l'ensemble des acteurs (commun) de celles spécifiques à un métier (vue).

I.2 Liens entre les entités

Comme le mentionne [SUMMERS et al, 2001] la description fonctionnelle du produit est principalement utilisée dans la phase de conception préliminaire tandis que la représentation structurelle intervient dans la phase de conception détaillée avec l'emploi des outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Cependant pour garantir la satisfaction des exigences fonctionnelles par un modèle CAO, il faut absolument pouvoir relier la description fonctionnelle à la description structurelle.

Nous allons maintenant définir les liens permettant de lier la structure du produit à sa description fonctionnelle.

I.2.1 Lien Composant-Interface

Ce lien ne peut être réalisé uniquement qu'entre un composant et une ou plusieurs interfaces. La sémantique de ce lien correspond à :

« Un composant possède une ou plusieurs interfaces. »

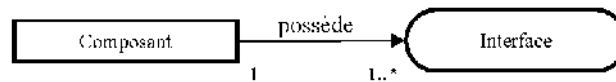


Figure I-3: Schéma du lien Composant-Interface

I.2.2 Lien Fonction-Composant

Ce lien permet de décrire un ou plusieurs composants comme étant solution technique pour une fonction. Un composant lié à une fonction signifie :

« **Un composant est une solution technique d'une fonction.** »

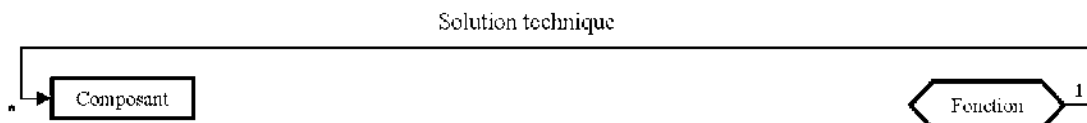


Figure I-4: Schéma du lien Composant-Fonction

I.2.3 Lien Interface-Fonction

La cardinalité de ce lien est (1..*) au niveau des interfaces et (1..*) au niveau des fonctions. Ceci permet décrire qu'« **une ou plusieurs fonctions lient une ou plusieurs interfaces** ».

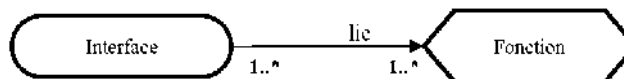


Figure I-5: Schéma du lien Interface-Fonction

Les liens Interface-Fonction et Fonction-Composant permettent de relier la description fonctionnelle et la description structurelle. Le lien Composant-Interface permet d'affiner la description structurelle en permettant de définir quelle interface appartient à quel composant et quelle partie d'un composant est impliquée dans une fonction.

I.3 Opération sur les entités

Les opérations définies par le diagramme UML (Figure I-1), sont des opérations de décomposition et d'agrégation sur chacune des entités (composant, interface et fonction).

I.3.1 Décomposition

Un composant ne peut se décomposer qu'en composant, une fonction en fonctions et une interface en interfaces.

Une entité peut être décomposée en plusieurs entités du même type (Figure I-6). Ce mécanisme permet de raffiner la description du produit. Un mécanisme peut être décomposé jusqu'à obtenir, par exemple, toutes les pièces qui le constituent.

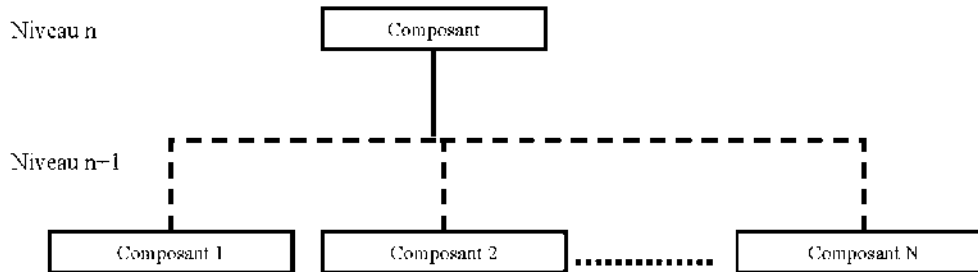


Figure I-6: Mécanisme de décomposition

Cette opération de décomposition ne contient pas en elle la sémantique permettant de savoir si la décomposition correspond à une décomposition en « **ET** » (l'ensemble des fils peut se substituer au père) ou à une décomposition en « **OU** » (chacun des fils peut se substituer au père). Pour connaître le type de la décomposition nous devons nous référer au type de l'entité décomposée alternative, commun ou vue.

I.3.1.1 Décomposition en « **ET** »

Pour décrire une décomposition en « **ET** », il faut que l'entité que l'on souhaite décomposer, l'entité père, soit de type « **commun** » ou « **vue** ». Nous présentons deux exemples d'utilisation de cette opération : une décomposition de type « structurel » et une décomposition « multi-vues ». Dans le cadre d'une décomposition « structurelle » un composant (un plateau arbré) se décompose en deux-sous composants : un arbre et un plateau (voir Figure I-7). La décomposition « multi-vues » permet d'ajouter à un objet des données propres à une expertise intervenant dans le processus de conception. Une décomposition « multi-vues » caractérise l'interface de l'arbre par ces deux portées de roulements dans une expertise « tolérancement géométrique », et par son maillage dans une expertise calcul (Figure I-8).

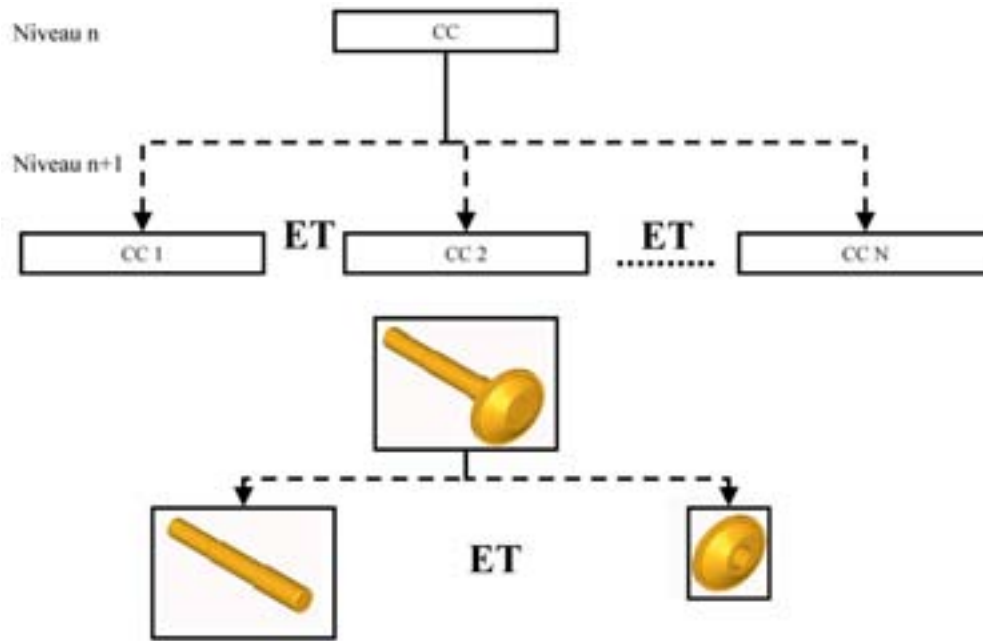


Figure I-7: Décomposition structurelle d'un composant

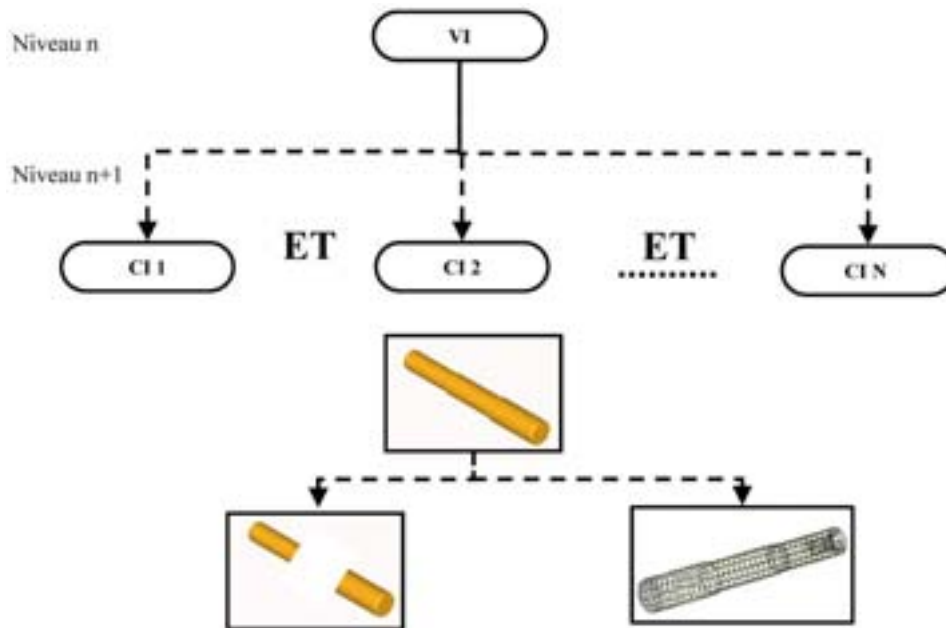


Figure I-8: Décomposition multi-vues d'une interface

Dans la suite de ce document, nous traiterons uniquement la vue « tolérancement géométrique ». Afin de ne pas surcharger inutilement les illustrations produit, qui sur des exemples simples deviennent rapidement complexes à lire, nous utiliserons une représentation mono-expertise (Figure I-9).

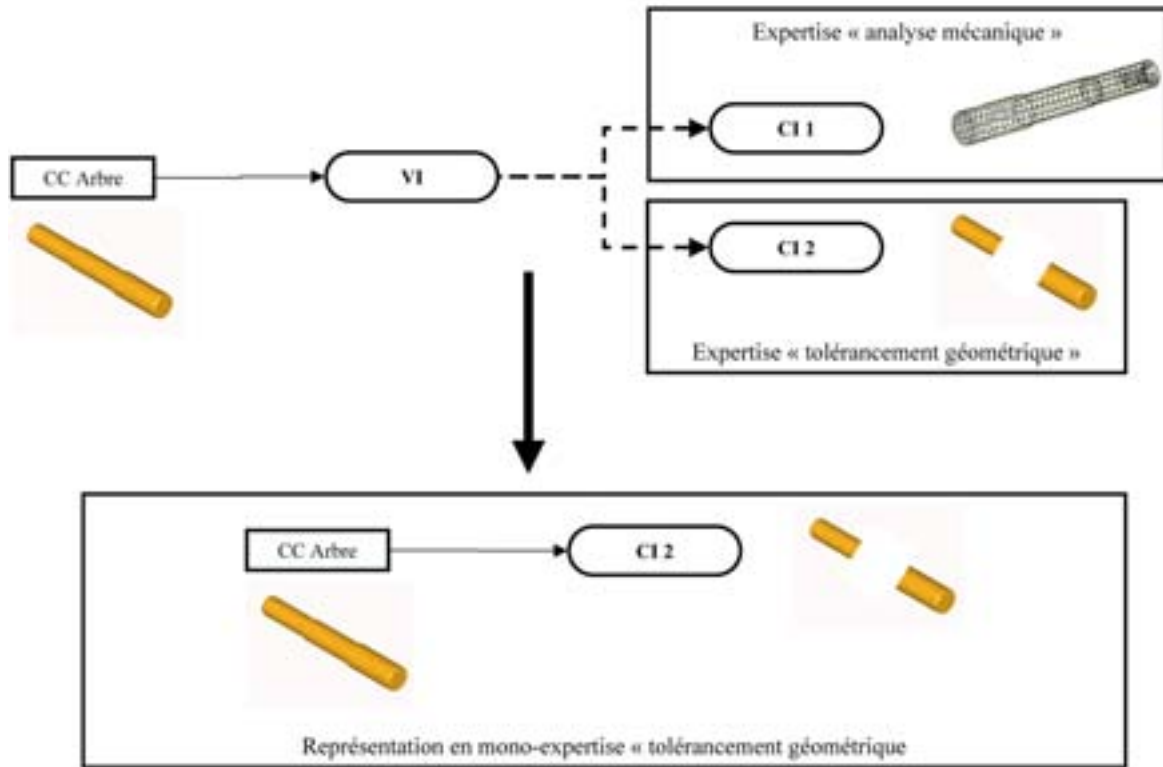


Figure I-9 : Représentation des entités de type vue en conception mono-expertise

I.3.1.2 Décomposition en « OU »

L'entité à décomposer doit être de type « alternative ». Une décomposition dont le père est un objet de type « alternative » permet de décrire soit une solution alternative soit une famille de solutions. Dans ce cas, les fils issus de la décomposition sont de type « **commun** » (Figure I-10).

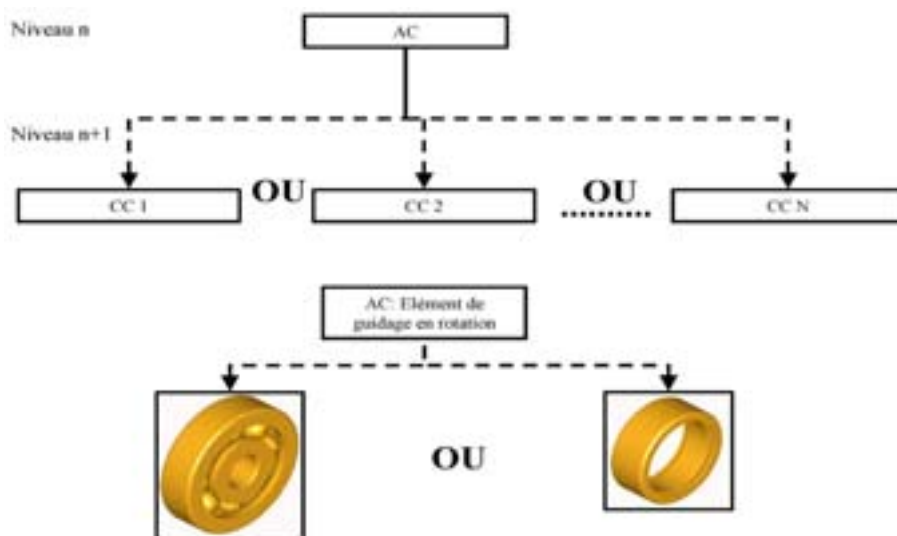


Figure I-10: Décomposition alternative

Une décomposition d'une entité alternative permet de décrire une famille de solutions. Dans le cas d'un roulement à billes, ce type de décomposition permet de décrire dans un même modèle les deux solutions qui sont l'utilisation d'un roulement à billes à contact radial et l'utilisation d'une douille à aiguilles.

I.3.2 Agrégation

L'opération d'agrégation est le mécanisme inverse de la décomposition. Plusieurs fonctions peuvent être agrégées pour donner une fonction globale (Figure I-11) regroupant les propriétés des fonctions agrégées. Par exemple une fonction représentant une liaison linéaire annulaire en parallèle avec une fonction représentant une liaison rotule peuvent s'agréger pour former une liaison pivot équivalente.

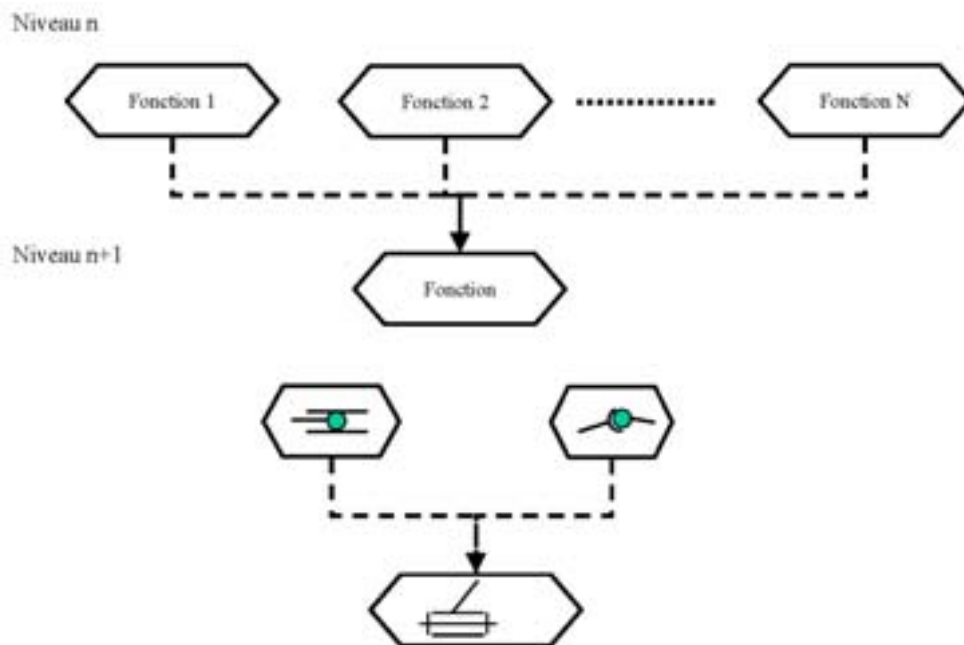


Figure I-11: Mécanisme d'agrégation

Grâce aux entités, aux liens et aux opérations présentées nous sommes capables de représenter un produit par une description structurale faisant intervenir des composants et des interfaces et par une description fonctionnelle en utilisant des fonctions.

I.4 Applications aux modèles utilisés en conception

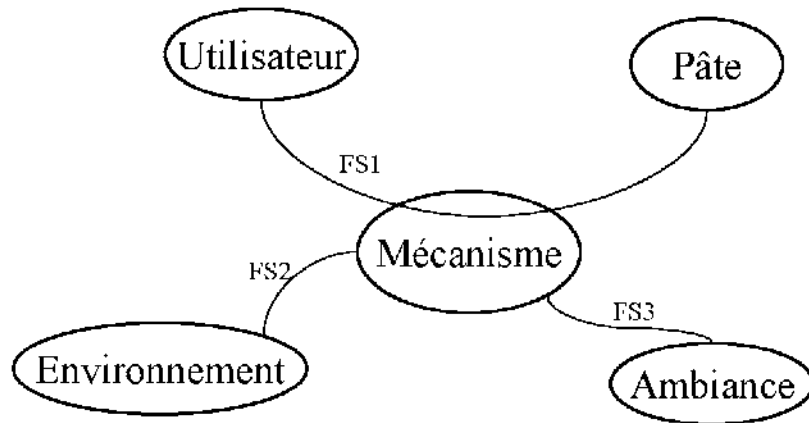
Nous allons montrer dans ce paragraphe comment nous décrivons des modèles couramment utilisés en conception à l'aide du modèle produit proposé. Parmi les modèles de conception nous choisissons le diagramme pieuvre, le diagramme FAST et la modélisation cinématique. On entend par modélisation cinématique, une décomposition du produit en sous-ensembles connectés entre eux par des liaisons cinématiques au sens de la théorie des mécanismes. Ce choix est guidé par l'activité « tolérancement géométrique ». En effet le diagramme pieuvre, le FAST et le modèle cinématique nous permettent de caractériser la propagation des spécifications géométriques. Pour mettre en œuvre le modèle produit sur un exemple de conception, nous présentons les différentes étapes liées à la conception d'un malaxeur dont la fonction principale est de pétrir de la pâte (Figure I-12). Ce malaxeur est l'exemple académique choisi par le consortium IPPOP.



Figure I-12 : Modèle CAO du malaxeur

I.4.1 Diagramme pieuvre

En phase de conception préliminaire, les concepteurs utilisent couramment une représentation du mécanisme à concevoir sous la forme d'un diagramme pieuvre. Cette représentation a pour but de décrire les fonctions de service (FS) du mécanisme. Pour l'exemple du malaxeur le diagramme pieuvre est décrit en Figure I-13.



FS1: Le mécanisme doit permettre à l'utilisateur de pétrir la pâte

FS2: Le mécanisme doit s'adapter à l'environnement

FS3: Le mécanisme doit résister à l'ambiance

Figure I-13 : Diagramme pieuvre du mécanisme à concevoir

Le diagramme pieuvre permet de mettre en évidence les fonctions que doit remplir le mécanisme (FS1) ainsi que les contraintes liées à l'intégration du mécanisme dans le milieu environnant (FS2 et FS3). A l'aide du modèle produit nous décrivons le mécanisme à concevoir de la manière suivante :

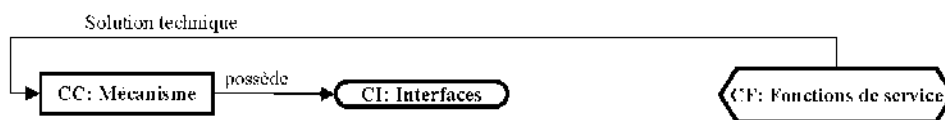


Figure I-14 : Description du mécanisme à concevoir

La signification du diagramme ci-dessus est conforme à ce que nous souhaitons exprimer à savoir que le mécanisme (CC : Mécanisme) est une solution technique des fonctions de service (CF : Fonctions de service). De manière plus générale tout produit à concevoir pourra se décrire sous cette forme.

Nous pouvons détailler les fonctions de service (CF : Fonctions de service) pour faire apparaître les fonctions FS1, FS2 et FS3 et ainsi décrire le diagramme pieuvre : (Figure I-15)

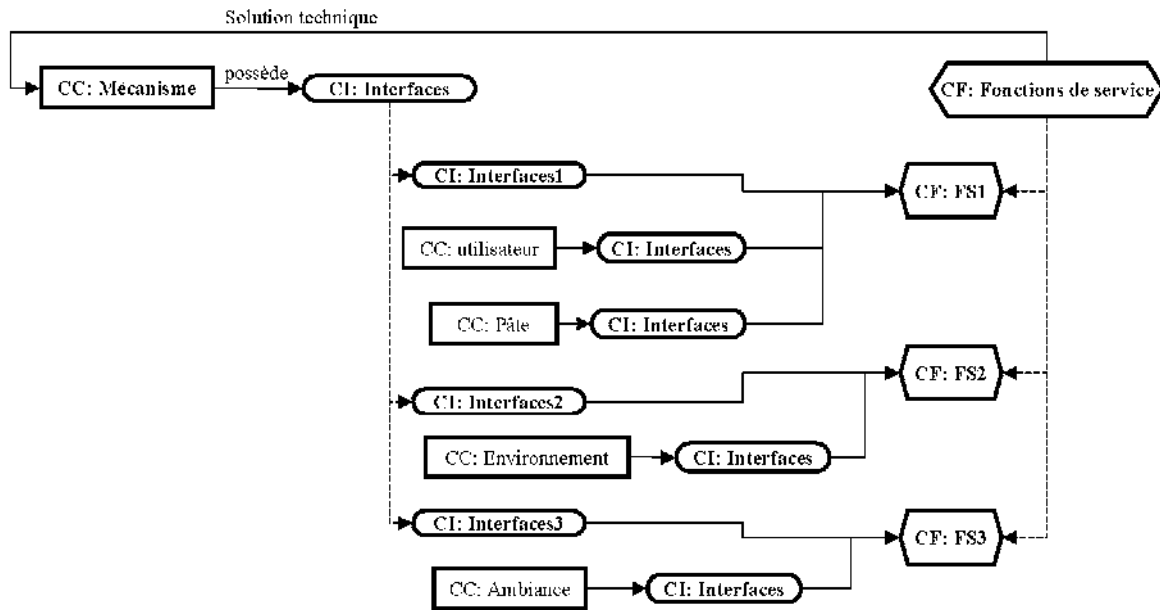


Figure I-15 : Description d'un diagramme pieuvre

Pour cela nous ajoutons les éléments extérieurs au mécanisme sous la forme de composants qui possèdent des interfaces. Finalement il ne reste plus qu'à relier les interfaces de chacun des composants par l'intermédiaire des fonctions FS1, FS2 et FS3 conformément au diagramme pieuvre.

I.4.2 FAST (Function Analysis System Technic)

Les fonctions de services du mécanismes étant maintenant décrites dans le modèle produit (Figure I-15) nous choisissons de les détailler. Nous ne détaillerons que la fonction FS1 dans la suite de l'exemple. Habituellement les concepteurs utilisent une représentation sous la forme d'un diagramme FAST (Function Analysis System Technic). Deux types de diagrammes FAST sont couramment utilisés en conception : le diagramme FAST d'ordonnancement et le diagramme FAST de créativité. Le diagramme d'ordonnancement permet d'affiner la description fonctionnelle d'un produit alors que le diagramme de créativité permet en plus de décrire les solutions techniques des fonctions. Dans la suite de l'exemple nous utiliserons un diagramme FAST de type « créativité ». Deux étapes sont représentées dans le cadre de l'exemple du malaxeur. La première étape permet de faire apparaître deux composants constitutifs du mécanisme. Ces deux composants sont des solutions techniques répondant aux deux sous-fonctions de FS1 (pétrir la pâte).



Figure I-16 : Décomposition de la fonction FS1

Ces deux composants sont décrits à l'aide du modèle que nous présentons par deux composants (le bol et le mélangeur : voir Figure I-17). Ces deux composants étant des solutions techniques des fonctions « Contenir la pâte » et « Mélanger les ingrédients » ils sont donc reliés respectivement aux deux fonctions correspondantes dans le modèle produit.

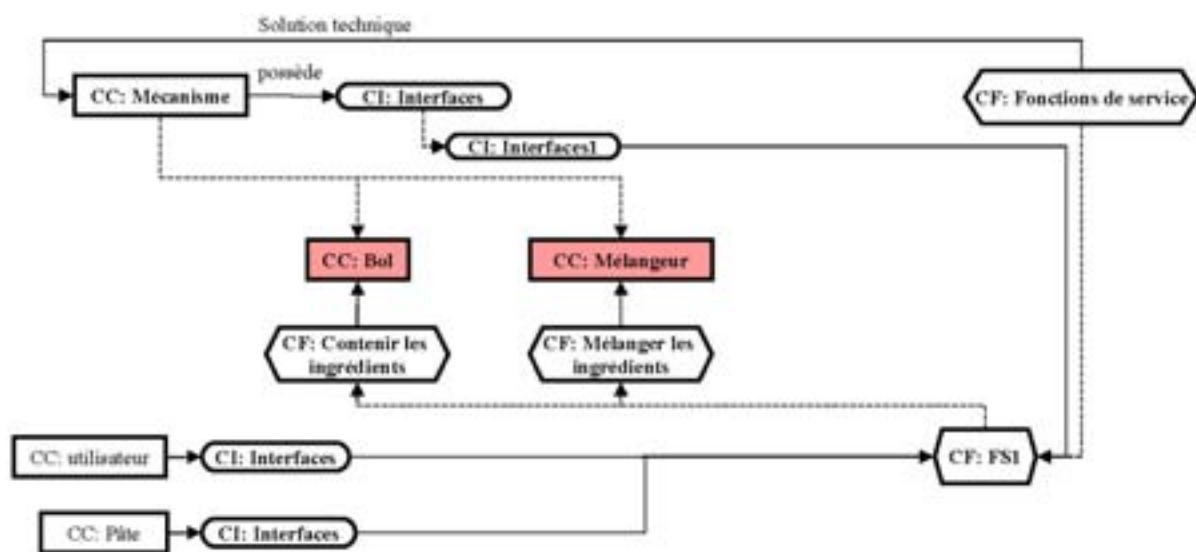


Figure I-17 : Décomposition de FS1 dans le modèle produit

La décomposition de la fonction FS1 apparaît sous la forme de deux sous-fonctions qui sont « Contenir les ingrédients » et « Mélanger les ingrédients ». La décomposition structurelle est quant à elle décrite par les deux composants « Mélangeur » et « Bol ». Ces deux composants sont également liés aux deux sous-fonctions de FS1 car chaque composant est une solution technique d'une sous-fonction.

En affinant la description de la fonction « Mélanger les ingrédients » à l'aide du diagramme FAST ci-dessous nous décrivons une nouvelle décomposition du mécanisme. En effet nous voyons apparaître une décomposition structurelle du composant « Malaxeur » en quatre composants : un train épicycloïdal, un variateur de vitesse, un moteur et un fouet.



Figure I-18 : Décomposition de la fonction « Mélanger les ingrédients »

Cette nouvelle décomposition fonctionnelle et structurelle du mécanisme est intégrée dans le modèle produit. Pour cela nous décomposons la fonction « Mélanger les ingrédients » en quatre sous fonctions ainsi que le composant « Mélangeur » qui lui est décomposé en quatre sous composants (Figure I-19).

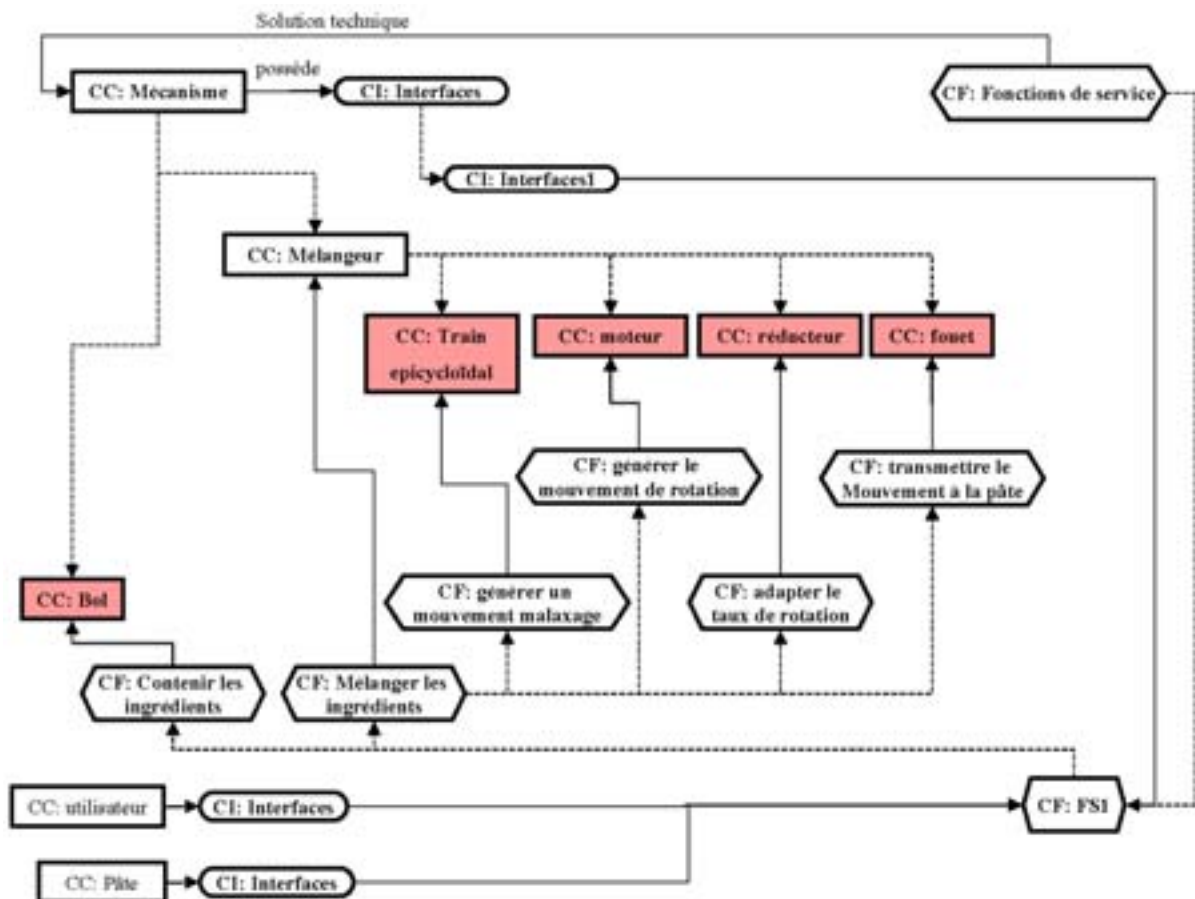


Figure I-19 : Décomposition de la fonction « Mélanger les ingrédients » dans le modèle

Ce paragraphe a permis de mettre en évidence la possibilité de décrire un diagramme FAST à l'intérieur du modèle produit. De plus la description obtenue est liée à la description du diagramme de l'environnement obtenu au paragraphe précédent.

I.4.3 Modélisation cinématique

Pour assurer la cohérence entre la description fonctionnelle et structurelle du mécanisme, le concepteur décrit les relations cinématiques entre les composants. Dans un premier temps, nous décrivons les conditions d'assemblage entre les divers composants sous la forme de fonctions génériques que nous nommons « Assurer le montage ».

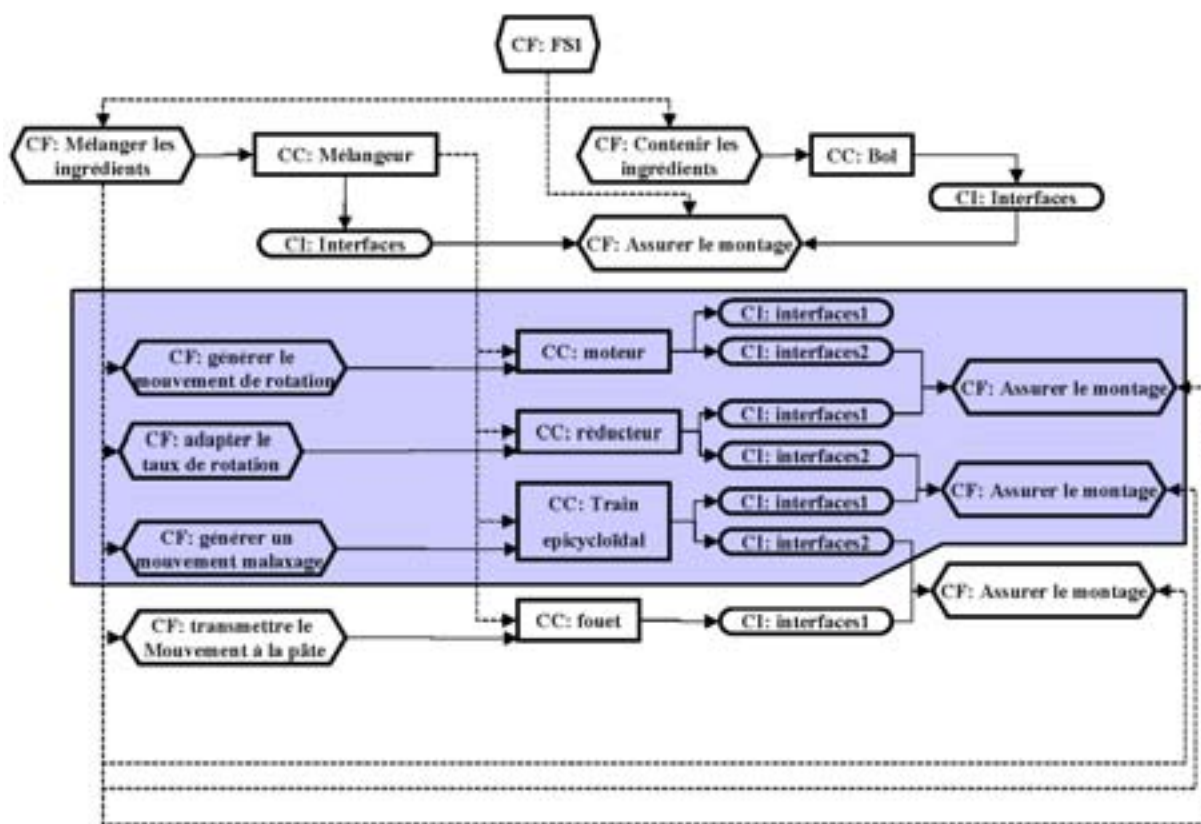


Figure I-20 : Descriptions des conditions de montage des composants

Ces conditions de montage décrivent de manière générique l'assemblage d'un composant sur un autre. Les fonctions « Assurer le montage » (Figure I-20) permettent de décrire que le fouet est monté sur le train épicycloïdal qui lui-même est en liaison avec le réducteur de vitesse.

La réalisation du réducteur est faite par une solution technique : une transmission par courroie. Pour décrire ce choix de conception nous extrayons du graphe précédent (Figure I-20) la partie correspondant au composant train épicycloïdal. Les composants correspondant aux poulies sont intégrés dans le modèle ainsi que les conditions de montages permettant de décrire l'encastrement entre respectivement une poulie et l'arbre du moteur et la seconde poulie et l'arbre d'entrée du train épicycloïdal (Figure I-21).

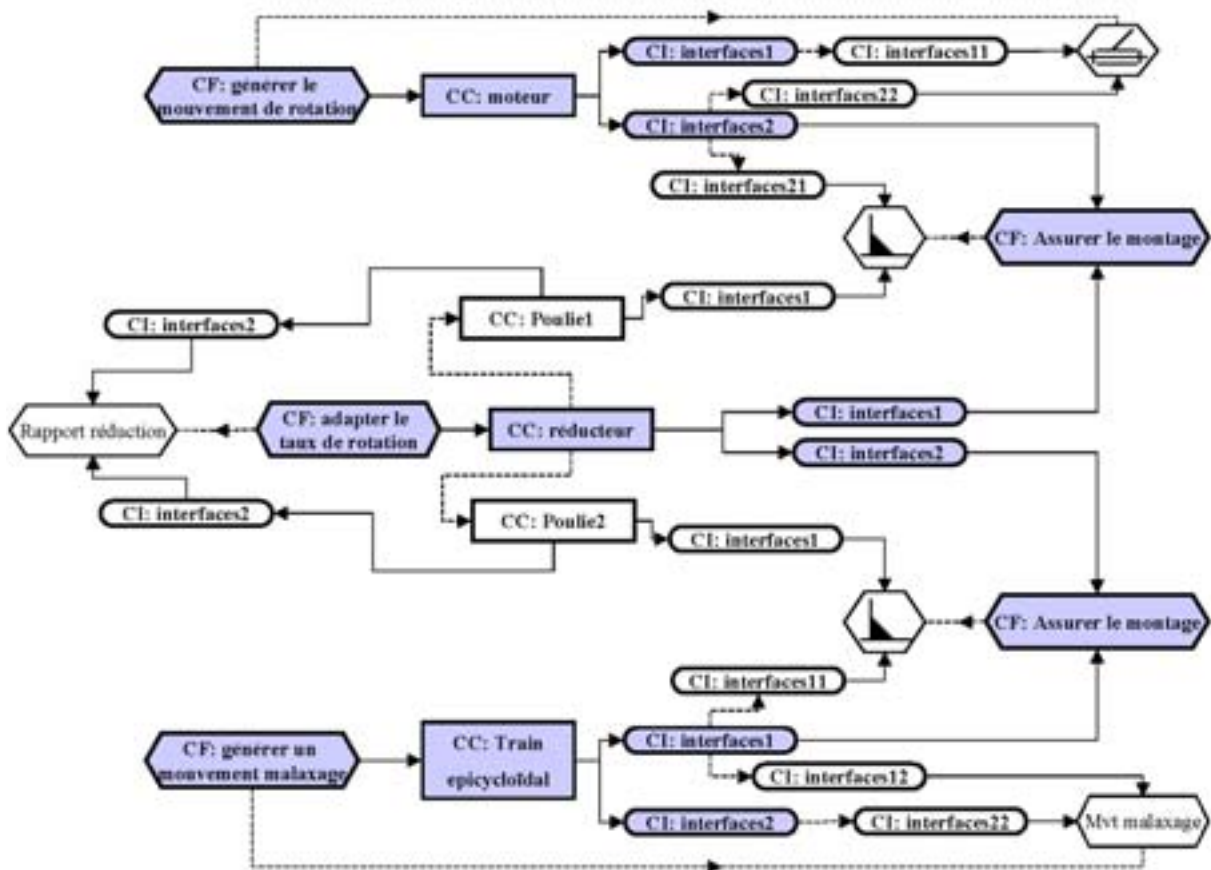


Figure I-21 : Description des conditions de montage liées à l'intégration des poulies

La cinématique de l'ensemble moteur, poulies-courroie et train épicycloïdal étant formalisée nous pouvons l'intégrer au graphe complet représentant le produit entier (Figure I-22). La cohérence cinématique du mécanisme n'est pas garantie car la description du montage de l'ensemble moteur, réducteur, train épicycloïdal par rapport au bol n'est pas complète. Pour garantir la cohérence cinématique globale du malaxeur nous choisissons de monter les différents composants du mécanisme sur un nouveau composant qui est le bâti du malaxeur. La description du composant bâti ainsi que les conditions de montage des divers composants sur le bâti sont représentées sur le graphe complet du mécanisme (Figure I-23).

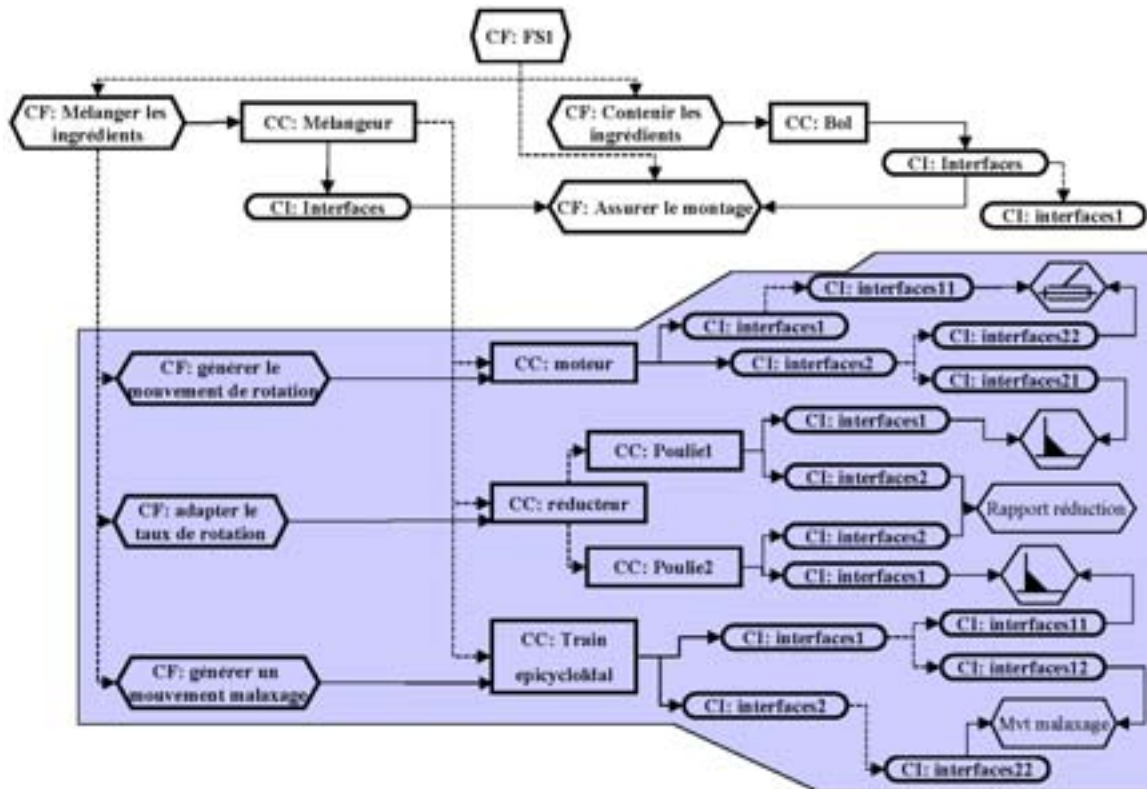


Figure I-22 : Description de la cinématique de l'ensemble moteur, réducteur et train épicycloïdal

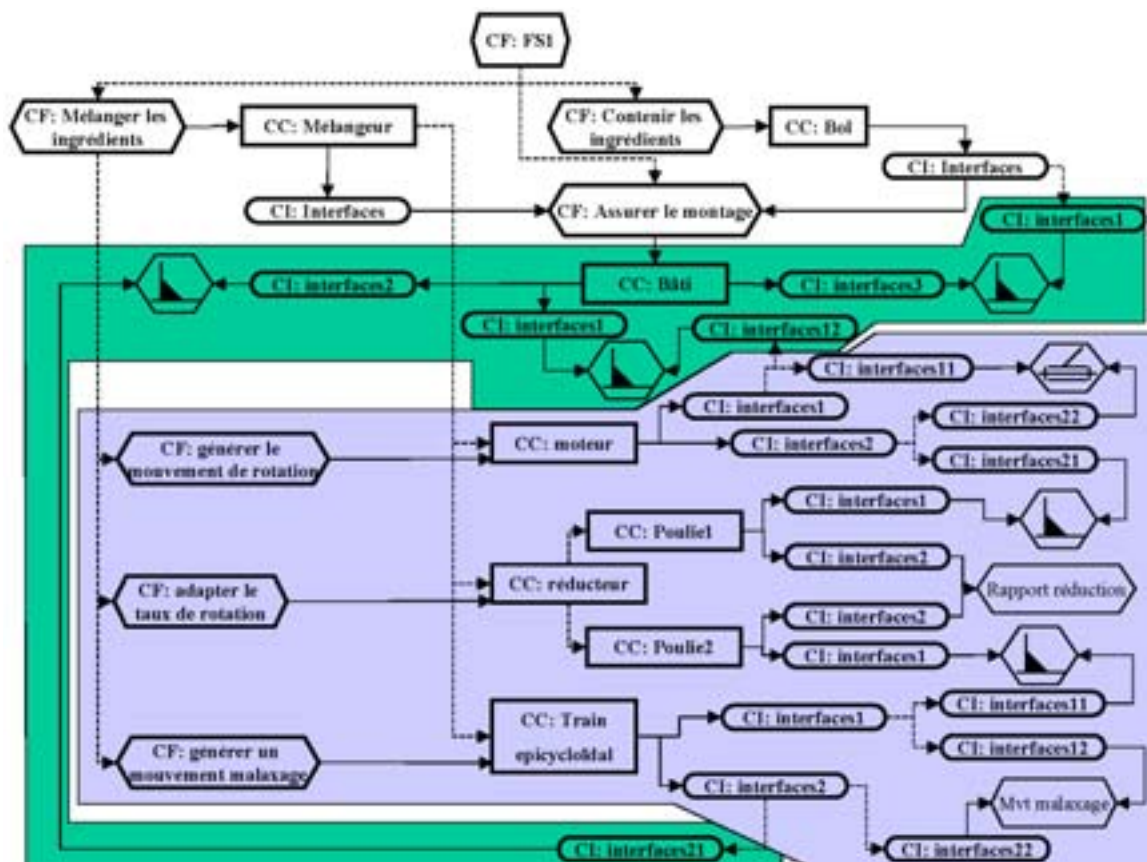


Figure I-23 : Description du montage du moteur et du train épicycloïdal sur le bâti

A ce stade de la description du modèle cinématique, nous pouvons extraire une représentation du produit sous la forme d'un schéma cinématique (Figure I-25). Ce modèle cinématique n'est pas exhaustif car le mouvement de malaxage n'est pas entièrement détaillé cependant cette représentation permet aux acteurs du cycle de conception de dialoguer avec un formalisme connu. Ce schéma pseudo cinématique peut être extrait du modèle produit.

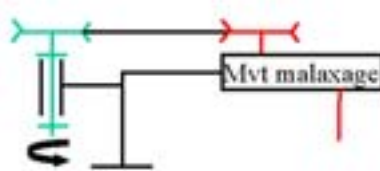


Figure I-24 : Représentation de la cinématique du malaxeur

I.5 Conclusion

Le modèle que nous proposons pour décrire un produit permet de représenter le mécanisme à concevoir tout au long de son cycle de conception. Nous pouvons utiliser cette description aussi bien en phase de conception préliminaire, en utilisant principalement les objets fonction, qu'en phase de conception détaillée en représentant la structure du produit à l'aide des composants et des interfaces. De plus, ces deux descriptions (fonctionnelle et structurelle) sont liées ce qui permet de passer de l'une à l'autre sans difficultés. La contrainte de départ qui était de permettre de décrire aussi bien les fonctions que la structure d'un mécanisme est satisfaite. Un avantage supplémentaire en faveur du modèle de données présenté est qu'il permet au sein d'un même modèle de représenter un diagramme pieuvre, un diagramme FAST et un modèle cinématique. La traçabilité des informations est ainsi assurée au cours du processus de conception. Les états successifs du processus de conception sont liés les uns aux autres et s'enchaînent de manière continue, ce qui est souvent très difficile en utilisant des modèles pour décrire le produit tel que le diagramme pieuvre, le FAST, le modèle cinématique, etc. De plus les données produit sont centralisées dans un même modèle et sont donc accessibles par tous les acteurs intervenant dans le cycle de conception. Le produit est décrit par un ensemble de trois arbres, l'arbre de composants, l'arbre des interfaces et l'arbre des fonctions (Figure I-25). Ces trois arbres sont liés par l'intermédiaire des liens entre les entités de base du modèle et forment finalement ce que nous appelons un graphe produit.

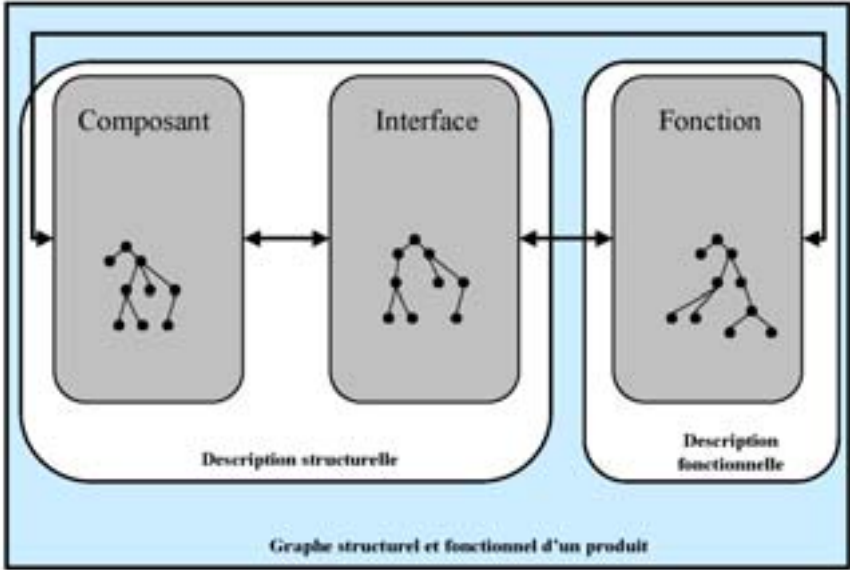


Figure I-25: Représentation schématique d'un produit

- Chapitre II -

Formalisation de l'expertise tolérancement géométrique

« Ce chapitre sera consacré à la formalisation de l'expertise tolérancement géométrique. Cette expertise repose sur la modélisation des spécifications et sur le transfert des spécifications. Dans ce chapitre nous ne présentons ni de nouveau modèle de spécifications ni de nouvel outil de transfert. Nous proposons une formalisation de l'activité transfert de conditions géométriques en définissant les informations nécessaires à cette activité ainsi que les contraintes qui vont influencer sur les résultats obtenus. Nous montrons aussi que l'utilisation d'un graphe de surfaces n'est pas toujours suffisante pour assurer la traçabilité des spécifications géométriques au cours du processus de conception. »

Chapitre II

Formalisation de l'expertise tolérancement géométrique

II.1	Formalisation du transfert de conditions	45
II.2	Descriptions des informations manipulées par le transfert de conditions géométriques	48
II.2.1	Besoins	48
II.2.1.1	Présentation des modèles de tolérancement	48
II.2.1.1.1	Modèle variationnel.....	48
II.2.1.1.2	Modèle par zone enveloppe.....	51
II.2.1.1.3	Modèle structurel.....	51
II.2.2	Résultats	53
II.2.3	Données.....	53
II.2.4	Moyens.....	55
II.2.5	Contrôles	56
II.2.6	Déclencheurs	57
II.3	Conclusion	57

Dans le chapitre précédent, un modèle produit a été présenté. Il se caractérise par des entités de base (composant, interface et fonction), des liens entre ces entités et des opérations sur ces entités. Ce modèle a pour vocation de servir de support pour des expertises telles que l'analyse mécanique, la forge, l'usinage, l'analyse fonctionnelle, le choix des procédés et l'optimisation de composants mécaniques.

L'expertise « tolérancement géométrique » vient compléter les expertises énoncées ci-dessus au sein du projet IPPOP. L'objectif est de créer un espace de travail collaboratif dans un contexte d'ingénierie concurrente : il s'agit d'un point clé du projet IPPOP.

Dans ce second chapitre, nous allons décrire l'expertise « tolérancement géométrique » dans laquelle nous distinguons : l'activité transfert de conditions géométriques et la description des conditions géométriques elles-mêmes. Une condition géométrique définit les limites admissibles des défauts géométriques des éléments d'un produit. Cette définition est souvent très dépendante de la modélisation des défauts eux-mêmes.

Parmi les conditions géométriques, on pourra distinguer les spécifications géométriques, au sens de l'ISO, comme étant les limites admissibles des défauts géométriques d'une même pièce, les spécifications de contact, comme étant les limites admissibles des défauts géométriques des éléments de deux pièces distinctes potentiellement en contact, et les spécifications produit, qui sont les limites admissibles des défauts géométriques entre des éléments du produit.

Dans la suite de ce document nous utiliserons aussi bien le mot « condition » ou « spécification » pour désigner les limites admissibles des défauts géométriques des éléments du produit.

Ces travaux n'ont pas pour but de définir un nouvel outil de transfert ni de définir de nouveaux modèles de conditions géométriques. Nous proposons de décrire les différentes phases de l'expertise tolérancement géométrique de la manière suivante : [DUFURE et al, 2003] (Figure II-1):

- transfert des conditions fonctionnelles du produit en conditions géométriques

- transfert des conditions géométriques sur le produit en conditions sur les éléments géométriques. Cette étape est récursive jusqu'à obtenir des conditions géométriques entre des éléments appartenant à une même pièce.
- traduction des conditions géométriques exprimées au niveau des pièces constitutives du mécanisme en spécifications normalisées selon l'ISO.

Dans le cadre de ce travail nous limiterons le périmètre de l'expertise « tolérancement géométrique » à la description des conditions géométriques au niveau du produit et au transfert de ces conditions sur les pièces du mécanisme (Figure II-1). Le transfert des conditions fonctionnelles issues du cahier des charges en conditions géométriques ne sera pas développé dans ce travail.

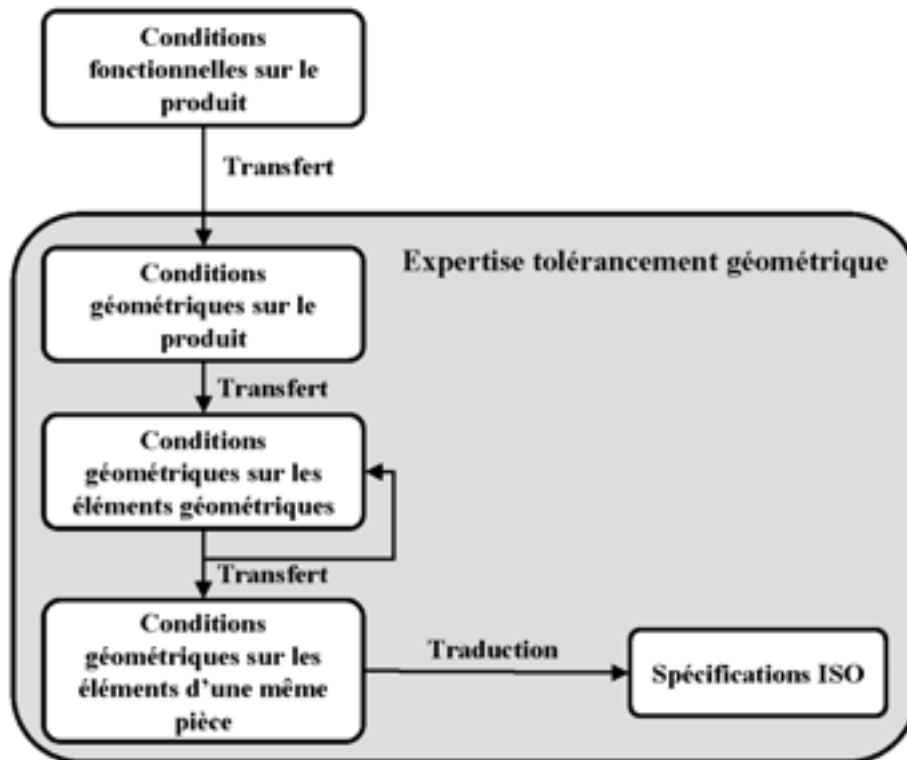


Figure II-1: Description du transfert de spécifications géométriques

L'intérêt premier d'utiliser les spécifications géométriques normalisées est de faciliter le dialogue entre les différents acteurs du processus de conception. De nombreux travaux sur les modèles de spécifications géométriques ont été réalisés sous l'égide de l'ISO TC213. Depuis une dizaine d'années, ces travaux ont permis d'asseoir le caractère univoque des spécifications ainsi que leur robustesse. Bien que les spécifications géométriques actuelles ne s'appliquent que sur des éléments géométriques d'une même pièce, leur sémantique permet cependant de les appliquer aussi sur un mécanisme, c'est pourquoi nous allons utiliser la sémantique et le graphisme des spécifications géométriques ISO sur des mécanismes. De plus nous proposons ici de généraliser leur utilisation à tout le processus de conception d'un produit. Ceci est nécessaire dans un contexte de conception collaborative, car comme le souligne [BRADLEY et al, 1998], 70% du coût d'un produit est engagé dès la phase de conception préliminaire et il est donc important de permettre aux acteurs du cycle de conception de dialoguer au plus tôt.

Une des lacunes des outils actuels de transfert de spécifications géométriques est qu'ils ne peuvent être employés qu'en phase de conception détaillée car ils sont basés sur la description géométrique du produit fournie par un modéleur CAO. Ces modeleurs ne supportant pas une description incomplète de la géométrie du produit, ils ne fournissent des accès sur le produit qu'à un faible niveau tant pour la géométrie que la topologie ([SUMMERS et al, 2001]). C'est pourquoi les outils de transfert commerciaux actuels n'interagissent guère avec le processus de conception. De plus les modeleurs actuels sont incapables de gérer les alternatives de conception.

II.1 Formalisation du transfert de conditions

Les travaux de [SALOMONS et al, 1996] et [DUFURE et al, 2003] proposent de représenter l'activité « transfert de conditions géométriques » à l'aide d'un diagramme IDEF0. Cette représentation permet de décrire de manière synthétique les entrées et les sorties de l'activité ainsi que les moyens et les outils permettant de réaliser l'activité. Elle permet de prendre en compte les autres activités qui viennent contraindre l'activité « transfert de conditions géométriques ».

Dans un processus de conception concourant il est souhaitable de prendre en compte les contraintes liées à chaque expertise intervenant dans la conception du produit.

Dans le cadre du projet IPPOP nous avons choisi de représenter chaque expertise comme suit :

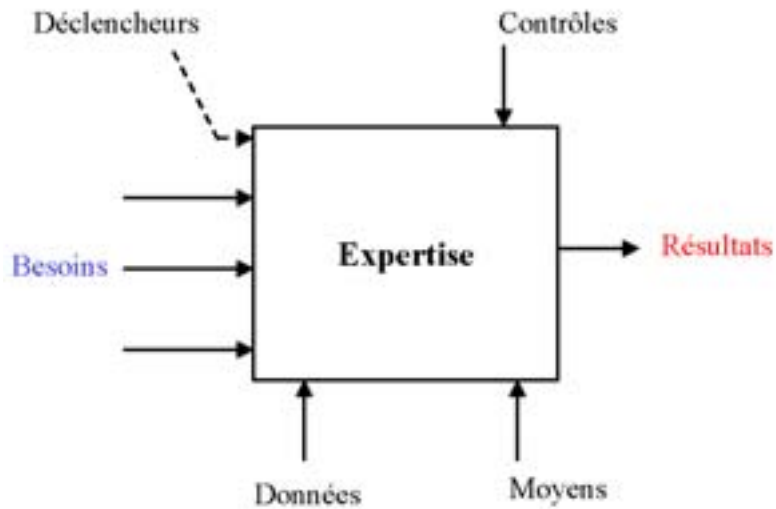


Figure II-2: Représentation d'une expertise

- **Besoins** : Informations véhiculaires ou universelles (partagées par plus de deux experts) nécessaires au déroulement de l'expertise. C'est l'ensemble des informations qui sont transformées par l'expertise et qui permettent de définir les résultats de l'expertise.
- **Résultats** : Informations véhiculaires ou universelles (partagées par plus de deux experts) produites par l'expertise.
- **Données** : Informations et connaissances vernaculaires (propre à l'expertise). Ces informations sont des données permettant d'effectuer l'activité mais propre à une expertise car sinon elles seraient spécifiées dans les besoins.
- **Moyens** : Ensemble des ressources matérielles, humaines, logicielles, savoir et savoir-faire nécessaires au bon déroulement de l'expertise.
- **Contrôles** : Ensemble des informations qui définissent le cadre de l'expertise. Par cadre il faut comprendre : l'environnement, le contexte, les contraintes du déroulement de l'expertise.
- **Déclencheurs** : Informations ou événements qui rendent active l'expertise.

Dans l'expertise « tolérancement géométrique » nous proposons la représentation de l'activité « transfert de conditions géométriques » basée sur la description commune des expertises du projet IPPOP (Figure II-3).

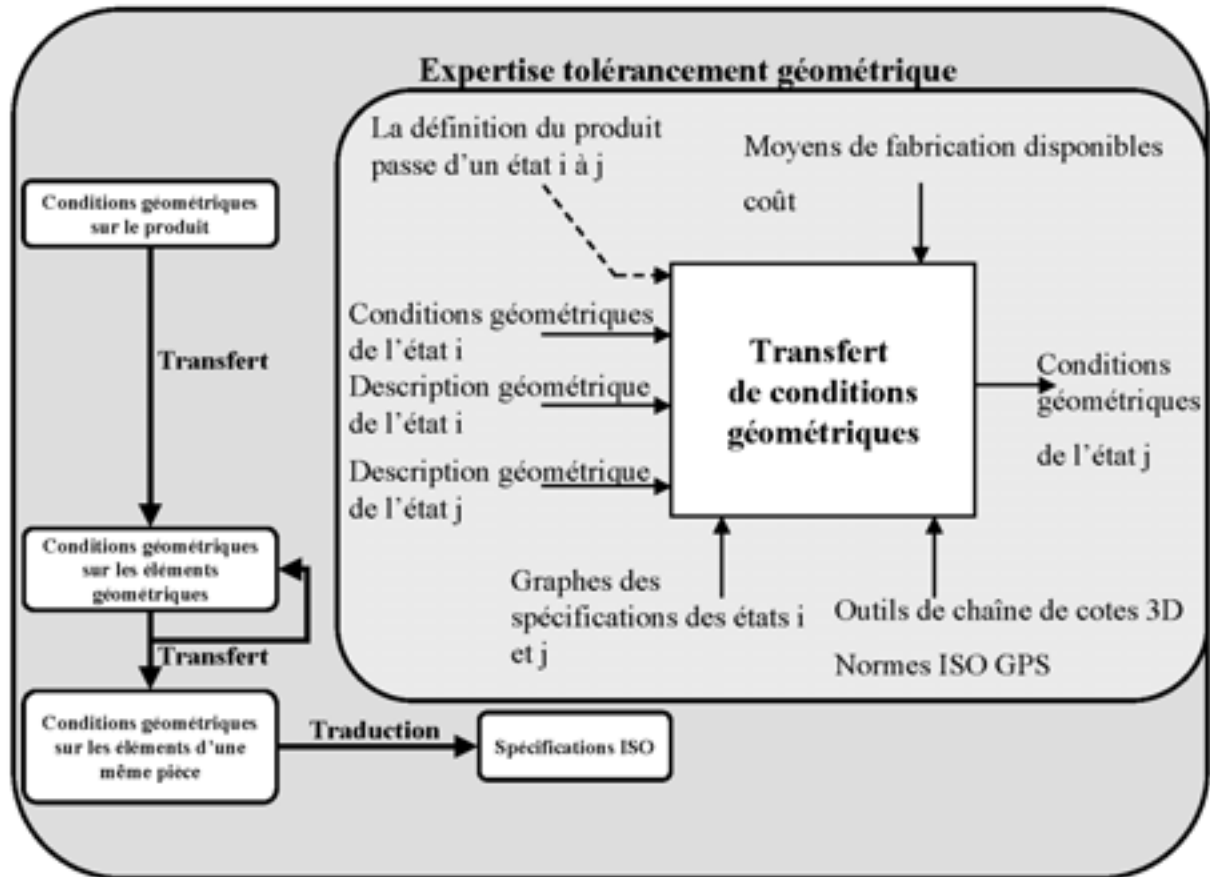


Figure II-3: Actigramme de l'activité de tolérancement géométrique

Le transfert de conditions consiste, à partir des descriptions géométriques de deux états i et j du processus de conception ainsi que des conditions de l'état i , à définir les conditions de l'état j . Pour effectuer ce transfert, l'activité « transfert de conditions géométriques » s'appuie sur des moyens et des données qui peuvent être propres à l'expertise ou partagées avec d'autres acteurs du cycle de conception. Nous allons maintenant décrire plus en détail les informations manipulées par l'activité « transfert de conditions géométriques ».

II.2 Descriptions des informations manipulées par le transfert de conditions géométriques

II.2.1 Besoins

Les besoins de l'activité « transfert de conditions géométriques » (les entrées) sont les spécifications de l'état **i** et les descriptions géométriques du produit dans les états de conception **i** et **j**. Comme décrit par [MATHIEU et al, 2003], une spécification est une « **condition** » sur une « **caractéristique** ».

Une caractéristique correspond soit à :

- Une caractéristique de position, une distance entre deux éléments géométriques,
- Une caractéristique d'orientation, un angle entre deux éléments géométriques,
- Une caractéristique intrinsèque d'un élément géométrique. Une caractéristique intrinsèque peut être le rayon d'un cylindre ou bien le diamètre d'une sphère

Cette description permet de décrire à la fois les conditions au niveau du produit (caractéristique entre des éléments appartenant à des pièces différentes), des spécifications de contact (caractéristique entre des éléments appartenant à des pièces différentes et nominalement en contact) et des spécifications ISO (caractéristique entre des éléments appartenant à la même pièce). Une condition peut émaner directement du cahier des charges fonctionnel ou peut être une spécification géométrique normalisée. Pour décrire les spécifications géométriques il existe trois grandes familles de modèles . Ces modèles sont des modèles variationnels, des modèles par zones enveloppes ou des modèles structurels.

II.2.1.1 Présentation des modèles de tolérancement

II.2.1.1.1 *Modèle variationnel*

Dans cette approche, la géométrie de la pièce réelle est décrite par variation de la géométrie nominale. En effet à chaque surface ou élément géométrique de la pièce réelle est associé un élément géométrique idéal.

Ces variations peuvent être décrites de différentes façons :

- Par des vecteurs [GOSSARD et al, 1988], [WU et al, 1988], [ROY et al, 1999],
- Par des torseurs de petits déplacements [GAUNET et al, 1994], [BALLOT, 1995], [THIEBAUT et al, 1999], [BOURDET et al, 1995], [LINARES, 1996], [TEISSANDIER et al, 1999]
- Par des matrices [TURNER, 1990], , [SODHI et al, 1994], [CHASE et al, 1997],
- Par un tenseur métrique [SERRE et al, 2001].
- Par un calibre virtuel à mobilité interne [DANTAN, 2000] ou sans mobilité [PAIREL et al, 2005]
- Par un ensemble de contraintes (polytopes, domaines ou T-Maps) [FLEMING, 1987], [GIORDANO, 1997], [TEISSANDIER et al, 1999], [TEISSANDIER et al, 2002] et [JIAN et al, 2005].

Ces variations peuvent être de deux types :

- Les variations internes à une pièce (**écarts géométriques** $\{d_{1/2}\}$) qui caractérisent les positions des éléments de substitution (éléments de substitution **1** et **2**) au sein d'une même pièce,

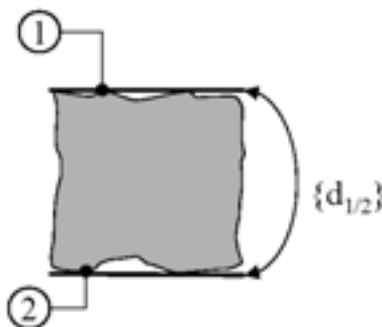


Figure II-4 : Représentation des écarts géométriques

- Les variations entre des pièces différentes (**jeux** $\{d_{2/3}\}$) qui caractérisent les positions de couples d'éléments de substitution **2** et **3** (chaque élément appartenant à une pièce différente) nominalement en contact.

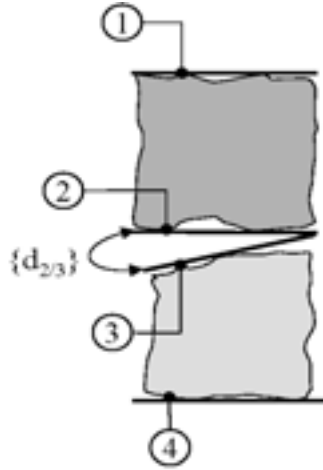


Figure II-5 : Représentation des jeux

Quel que soit le type et l'outil mathématique de représentation de ces variations, l'approche variationnelle permet de décrire les variations d'un élément par rapport à un autre en utilisant la relation de Chasles sur les indices. Par exemple les déplacements $\{d_{1/4}\}$ de l'élément **1** par rapport à l'élément **4** sont obtenus comme suit :

$$\{d_{1/4}\} = \{d_{1/2}\} + \{d_{2/3}\} + \{d_{3/4}\} \quad (\text{II.1})$$

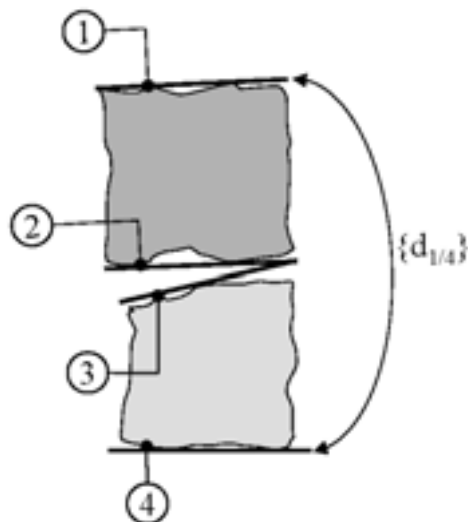


Figure II-6 : Composition des déplacements

II.2.1.1.2 Modèle par zone enveloppe

La géométrie réelle est appréhendée par une zone enveloppe définie par décalage (offset) des surfaces nominales. Cette approche a été présentée par [REQUICHA, 1983] et permet de définir une spécification géométrique par un groupe de contraintes sur les surfaces non idéales de la pièce réelle. Ces contraintes sont l'appartenance des surfaces réelles de la pièce à des zones de tolérance. Ces zones de tolérance sont obtenues par décalage (offset) des surfaces nominales de la pièce. Cette modélisation permet une définition univoque des zones de tolérance. Une pièce est alors décomposée en un réseau de zones de tolérances et de référentiels qui sont connectés par des contraintes [FLEMING, 1988].

Dans le cas d'une pièce isolée cette approche est satisfaisante mais dans le cas d'un mécanisme quelles sont les contraintes qui doivent être mises entre deux offsets de deux surfaces appartenant à deux pièces distinctes ? Une réponse est apportée par [DANTAN, 2000] qui simule, dans le cadre d'un mécanisme, les pièces environnantes par des calibres à mobilités internes.

II.2.1.1.3 Modèle structurel

Les propriétés géométriques entre les éléments sont appréhendées par des regroupements. Le modèle SATT (Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement) permet de décrire les déplacements relatifs entre des surfaces à contraindre afin que la description de la pièce soit univoque [CLEMENT et al, 1995].

Tout déplacement laissant un élément géométrique globalement invariant est associé à un sous-groupe de déplacements. ont ainsi dénombré sept sous groupes de déplacements et sept classes de surface [HERVE, 1976] :

- quelconque,
- prismatique,
- de révolution,
- hélicoïdale,
- cylindrique,

- plane,
- sphérique.

Le concept de SATT est défini comme étant une paire de surfaces (SATT) appartenant à un même solide et associées pour des raisons fonctionnelles. Cette paire de SATT donne une SATT créée en identifiant les déplacements laissant l'union des deux surfaces invariant. [RIVIERE, 1993] dénombre 28 cas d'association correspondant à 44 cas de reclassements.

Pour une pièce, en ajoutant successivement toutes les surfaces fonctionnelles, nous obtenons un arbre de SATT. La racine de cette arborescence est la SATT de la pièce. En parcourant cet arbre nous obtenons alors, de manière systématique, la cotation nécessaire est suffisante de la pièce. Cependant dans cette approche l'arborescence obtenue ne tient pas compte de la description fonctionnelle, seules les spécifications géométriques sont décrites [CLEMENT et al, 1995], [GAUNET, 1994].

Des travaux ont été menés pour prendre en compte l'aspect fonctionnel du produit dans les modèles structurels. Nous pouvons citer les travaux suivants :

- [CONSTANT, 1996] décrit la structure d'un mécanisme en utilisant l'arborescence SATT en y ajoutant la description des flux fonctionnels entre ces éléments.
- [BALLU et al, 1999] s'appuient sur une description du produit à l'aide d'un graphe de surfaces. Leur méthode permet de propager les contraintes liées aux conditions fonctionnelles vers les spécifications géométriques au niveau des pièces.

Les descriptions structurelles d'un mécanisme dans une activité « tolérancement géométrique » permettent de faire une analyse qualitative des spécifications géométriques mais ne permettent pas une approche quantitative. Pour ce second point une approche variationnelle est souvent nécessaire en complément de l'approche structurelle.

Concernant notre travail, nous présenterons dans le chapitre 3 une approche structurelle. La méthode que nous présenterons n'implique pas l'utilisation d'un modèle de spécifications particulier : modèle variationnel, modèle par zone enveloppe ou modèle structurel.

II.2.2 Résultats

Les sorties de l'activité de transfert sont les spécifications géométriques de l'état **j**. Les spécifications géométriques doivent garantir le respect des spécifications d'entrée. Une spécification géométrique sur des éléments d'une même pièce doit, dans la mesure du possible, être normalisée en accord avec ISO GPS.

Chaque activité du cycle de conception d'un produit fait appel à des outils informatiques. Nous pouvons citer les outils de CAO, les outils de FAO et les outils de simulations numériques par contre dans le domaine du tolérancement géométrique peu d'outils ont été développés pour permettre d'échanger des spécifications géométriques sous la forme de données utilisables par un outil informatique. Cependant depuis quelques années des chercheurs ont travaillé sur cette problématique et proposent des descriptions des spécifications géométriques normalisées dans un format neutre. Nous pouvons à l'heure actuelle citer la norme STEP utilisant le langage EXPRESS mais lors du transfert des données entre les différents outils informatiques, certaines données sont perdues du fait de la différence entre les différents protocoles d'application de cette norme.

Une réponse à ce problème est apportée par les travaux de [ZHAO et al, 2003] et [MAWUSSI et al, 2004] qui proposent de décrire les spécifications géométriques à l'aide d'un format neutre d'échange de données. Leurs modèles utilisent le langage XML qui a comme avantage d'être compréhensible aussi bien par une machine que par un humain. Il paraît donc souhaitable d'utiliser ce type de langage pour permettre à la fois l'utilisation de ces données dans le cadre d'une expertise utilisant des outils informatiques mais aussi permet la réalisation de l'expertise même si le traitement se fait manuellement.

II.2.3 Données

Dans l'expertise tolérancement géométrique le produit est couramment décrit par un graphe de surfaces. Nous retenons pour cette étude le type de graphe présenté dans [BALLU et al, 1999] et [TEISSANDIER, 1995]. Un graphe de surfaces est un graphe non orienté à une composante connexe dans lequel un sommet représente un élément géométrique (ponctuel, linéique ou surfacique) et une arête représente soit une liaison cinématique soit un défaut. Cette description du produit est une description propre à l'expertise tolérancement, la représentation du produit sous la forme d'un graphe de surfaces ne sera pas une donnée échangée avec les autres acteurs du cycle de conception du produit.

A chaque état de la conception l'expert tolérancement géométrique doit être en mesure de pouvoir récupérer les données (géométriques et fonctionnelles) lui permettant de construire les graphes de surfaces correspondants.

La représentation que nous avons adoptée pour décrire un graphe de surfaces est la suivante :

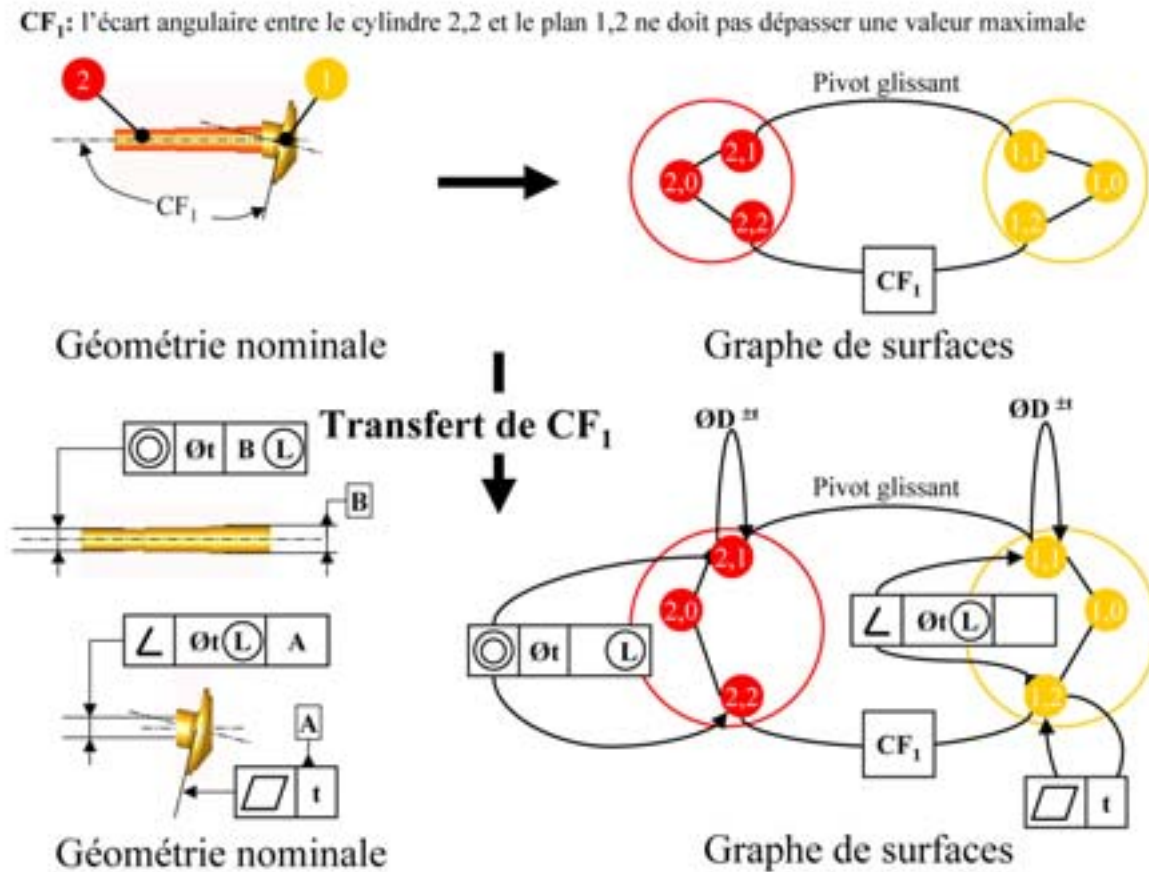


Figure II-7: Description d'un mécanisme à l'aide d'un graphe

En Accord avec le graphisme et la sémantique d'un graphe de surfaces, la géométrie nominale de la pièce X est décrite par le sommet X,O , les éléments géométriques de la même pièce sont notés X,i . Le cercle qui englobe les sommets X,i et X,O définit les limites de la pièce X . Les arêtes qui relient deux sommets appartenant à deux pièces distinctes (notés X,i et Y,j) représentent une spécification de contact. Toute condition fonctionnelle sera illustrée par un rectangle connecté à un ou plusieurs sommets par des arêtes. Un arc reliant un sommet X,i à lui-même représente soit une spécification par dimension ([ISO 406, 1987], [ISO 8015, 1985]) sur des caractéristiques intrinsèques, soit une spécification de forme soit un état de surface.

Une spécification géométrique ([ISO 1101, 1983], [ISO 5459, 1981], [ISO 2692, 1988]) de forme en zone commune, d'orientation, de position ou de battement sera représentée par un rectangle connecté à plusieurs sommets par des arcs (Figure II-7).

II.2.4 Moyens

Les moyens sont les outils de transfert de spécifications. Depuis ces 20 dernières années, les travaux concernant les outils de transfert de spécifications géométriques souvent appelés outils de chaînes de cotes sont nombreux. Les nombreuses publications réalisées sous l'égide du séminaire CIRP « Computer Aided Tolerancing » en attestent.

Les outils permettant d'analyser un graphe de surfaces sont les suivants :

- le premier est le calcul du nombre cyclomatique qui nous renseigne sur le nombre de cycles indépendants. Le nombre cyclomatique est calculé comme décrit dans l'équation (II.2).

$$V = n_{arcs} - n_{sommets} + 1 \quad (II.2)$$

où n_{arcs} est le nombre d'arc et $n_{sommets}$ est le nombre de sommets du graphes.

- Le second concerne la recherche des chemins correspondant au nombre cyclomatique du graphe étudié.

Ce calcul des chemins correspondant au nombre cyclomatique peut être facilement utilisé dans l'expertise « tolérancement géométrique ». Il permet de trouver tous les cycles correspondant au nombre cyclomatique d'un graphe de surfaces. Cependant dans l'activité qui nous intéresse ici le choix des cycles que nous étudions n'est pas aléatoire car en effet certains cycles d'un graphe de surfaces sont reliés à des fonctionnalités du mécanisme et doivent donc être étudiés en priorité. La manière de pointer ces cycles influents au sein d'un graphe sera discutée au chapitre 3.

Un outil permettant de transférer les spécifications géométriques en utilisant les graphes de surfaces a été présenté par [BALLU et al, 1999]. Cet outil permet la détermination des spécifications géométrique de manière qualitative. C'est un outil qui permet à l'expert tolérancement géométrique d'effectuer un transfert qualitatif de spécification géométrique.

Pour calculer de manière formelle les valeurs optimales des spécifications géométriques plusieurs méthodes sont mises en œuvre. Dans ces approches même si le paramétrage des défauts géométriques est différent le calcul des chaînes de cotes 3D se traduit par le respect de l'équation (II.3).

$$\{D_{\text{écarts}}\} + \{D_{\text{jeux}}\} \supset \{D_{\text{fonctionnel}}\} \quad (\text{II.3})$$

Cela signifie que les déplacements liés aux écarts géométriques augmentés des déplacements liés aux jeux dans le mécanisme doivent être compatibles avec les déplacements liés aux spécifications fonctionnelles.

Diverses approches sont utilisées pour résoudre ce système d'équations ou d'inéquations. La première méthode consiste à résoudre un système d'équations linéaires ([CHASE et al, 1997], [BALLOT et al, 1997]) et la seconde quant à elle utilise les opérations sur les polytopes. Ces opérations sont la somme de Minkowski et les intersections entre des polytopes, des domaines ou des T-Maps [TEISSANDIER et al, 2002], [GIORDANO et al, 2005], [PETIT et al, 2003] et [JIAN et al, 2005].

D'autres approches sont utilisées pour mener à bien le transfert de spécifications en conception [ROBINSON, 1997], [PINO, 2000] utilisent les modèles par zone enveloppe et [DANTAN, 2000] utilise les calibres à mobilités internes. En transfert de spécifications de fabrication nous pouvons citer les travaux de [LEGOFF et al, 1999], [VILLENEUVE et al, 2005], [VIGNAT et al, 2005] et [DANTAN et al, 2005].

II.2.5 Contrôles

Les contrôles de l'expertise « transfert de conditions » sont les activités parallèles dans le processus de conception du produit qui vont influencer sur notre activité. Si au cours du transfert de conditions géométriques nous obtenons par exemple une dimension dont la classe de tolérance est trop petite, la réalisation du produit peut devenir impossible pour un parc de machines présent dans une entreprise, ou elle peut atteindre un coût prohibitif.

Il est donc préférable, dans un processus de conception multi-acteurs et à l'heure actuelle souvent multi-sites, de connaître les expertises avec lesquels le tolérancement géométrique va partager des données sur le produit. Il est souhaitable de privilégier au plus tôt dans le cycle de conception le dialogue entre les experts du tolérancement et ceux intervenant dans le choix des procédés de fabrication ou de contrôle des pièces composant le produit.

II.2.6 Déclencheurs

Dans le cadre du projet IPPOP où la dimension processus et organisation est omniprésente nous avons choisi de décrire quelles sont les activités qui vont entraîner le transfert de spécifications. Nous pouvons en citer deux qui sont les activités CAO et d'analyse fonctionnelle. Pour l'activité CAO ce qui va déclencher un transfert de conditions est soit le raffinement de la description structurelle du produit soit l'intégration de composants standards dans le mécanisme. L'activité d'analyse fonctionnelle influe aussi sur le déclenchement du transfert de conditions par exemple si une nouvelle fonction du produit est ajoutée.

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'expertise « tolérancement géométrique » à savoir quelles sont les informations manipulées : les spécifications géométriques et les outils transfert correspondant.

La structure de données la plus couramment utilisée en tolérancement géométrique est une représentation par graphe décrivant à la fois la structure et les conditions fonctionnelles sur le produit. Cependant nous tenons à souligner que l'utilisation d'un graphe de surfaces ne nous paraît pas suffisante car nous ne pouvons pas garder le lien entre les fonctions du produit et les spécifications géométriques tout au long de la conception d'un produit. Dans l'expertise tolérancement géométrique au cours du processus de conception du produit nous obtenons des graphes de surfaces qui reflètent l'état de spécification du produit à chaque instant. Cette représentation permet de garder l'historique de création du produit au niveau structurel mais pas au niveau fonctionnel. Il n'est pas facile à partir d'un graphe de surfaces de connaître la correspondance entre une sous-partie du graphe et la fonction qui est satisfaite.

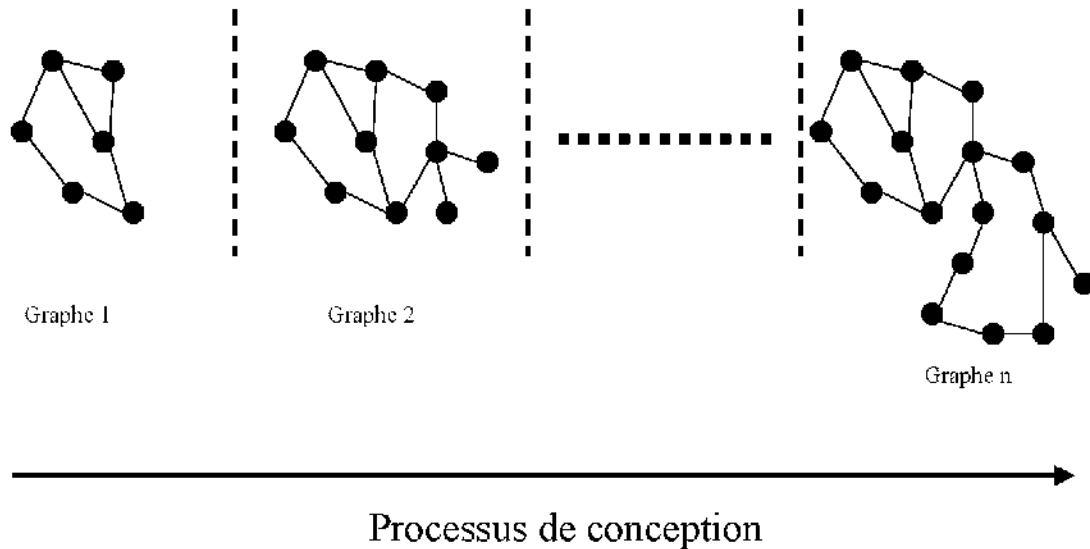


Figure II-8: N graphes de surfaces engendrés au cours du processus de conception

Ces graphes permettent de calculer à chaque étape du processus de conception des chaînes de cotes mais ils ne permettent pas à l'expertise tolérancement géométrique de faire partie intégrante du processus de conception. Un résultat de calcul peut difficilement remettre en cause un choix de conception ou de déceler au plus tôt qu'une fonction du produit ne sera pas remplie.

La conservation du lien entre fonctions et conditions géométriques, est indispensable pour assurer la traçabilité des spécifications au cours du processus de conception. La traçabilité du lien entre fonctions et spécifications géométriques est importante car on ne spécifie pas un produit pour palier aux imperfections des moyens de production mais parce que les conditions géométriques garantissent que le produit est apte à remplir la (ou les) fonction(s) pour laquelle (lesquelles) il est conçu.

Le modèle produit introduit au chapitre 1 permet de décrire une structure de données assurant la traçabilité des données au cours du processus de conception.

Nous proposons dans le chapitre suivant d'intégrer les informations manipulées par l'expertise « tolérancement géométrique » dans le modèle produit. Nous allons présenter comment nous pourrions ainsi garantir la traçabilité des spécifications géométriques.

- Chapitre III -

Intégration des informations liées à l'expertise tolérancement géométrique dans le modèle produit

« La structure de données présentée au chapitre 1 permet d'assurer la traçabilité des informations du produit au cours de la conception ainsi que le dialogue entre les acteurs. Dans l'optique d'assurer la traçabilité des conditions géométriques des fonctions du cahier des charges jusqu'aux spécifications géométriques, il apparaît donc que le modèle produit apporte une solution. Pour utiliser le modèle produit dans une expertise « tolérancement géométrique » il est donc nécessaire de définir la correspondance entre les informations de cette expertise et les entités de la structure de données.

De plus dans l'expertise transfert de conditions fonctionnelles de nombreuses contraintes sont liées à l'intégration de composants standards dans la description d'un produit. Cependant les outils de CAO actuels proposent une description géométrique exhaustive de ces composants mais peu proposent une description fonctionnelle. En utilisant les entités de base du modèle produit, nous proposons une description fonctionnelle et structurelle des composants standards. »

Chapitre III

Intégration des informations liées à l'expertise tolérancement géométrique dans le modèle produit

III.1	Correspondance entre les informations de l'expertise « tolérancement géométrique » et les entités du modèle produit.....	63
III.1.1	Correspondance sémantique.....	64
III.1.2	Correspondance graphique.....	65
III.2	Attributs des entités de bases spécifiques au tolérancement.....	65
III.2.1	Attributs d'un composant.....	65
III.2.2	Attributs d'une fonction.....	66
III.2.3	Attributs d'une interface.....	68
III.3	Description et intégration des composants standards.....	70
III.3.1	Description d'un composant standard.....	70
III.3.2	Intégration dans le modèle produit.....	72
III.4	Traçabilité des spécifications géométriques au cours du processus de conception.....	74
III.5	Conclusion.....	75

L'objet de ce chapitre est de décrire comment sont réparties les données indispensables à l'expertise « tolérancement géométrique » dans le modèle produit. Les entités de base du modèle produit ont été définies au chapitre 1 et les données manipulées en tolérancement géométrique ont été présentées dans le chapitre 2 : il nous faut définir les correspondances entre les deux modèles de données. La correspondance sémantique entre les deux modèles de données sera illustrée par des correspondances entre des graphes produit constitués de composants, d'interfaces et de fonctions avec des graphes de surfaces constitués d'éléments géométriques et de spécifications géométriques.

Une fois établie la correspondance entre les deux modèles, nous présenterons les attributs des entités de base liés à l'activité tolérancement géométrique.

La notion de composant standard sera introduite et discutée. Nous présenterons la description d'un composant standard à l'aide des entités de base du modèle produit et l'intégration de ce composant dans la description du produit. La notion de composant standard est importante car de nombreuses contraintes géométriques du produit sont issues de l'intégration de ces composants.

Nous concluons ce chapitre en présentant les avancées, liées à l'utilisation du modèle produit, sur la traçabilité des spécifications géométriques au cours du processus de conception du produit.

III.1 Correspondance entre les informations de l'expertise « tolérancement géométrique » et les entités du modèle produit

Comme nous l'avons présenté dans les chapitres précédents la définition du produit peut être illustrée par un graphe faisant intervenir les trois entités de base et la description des données propres à l'expertise tolérancement géométrique est basée sur un graphe de surfaces. Pour faciliter le dialogue entre les acteurs intervenant dans le processus de conception, la correspondance entre les données spécifiques à une expertise et les entités de base du modèle produit doit être menée à la fois au niveau de la sémantique et du graphisme de représentation des entités. Pour illustrer notre propos nous utiliserons l'exemple du mécanisme composé d'un plateau monté sur un arbre (Figure III-1).

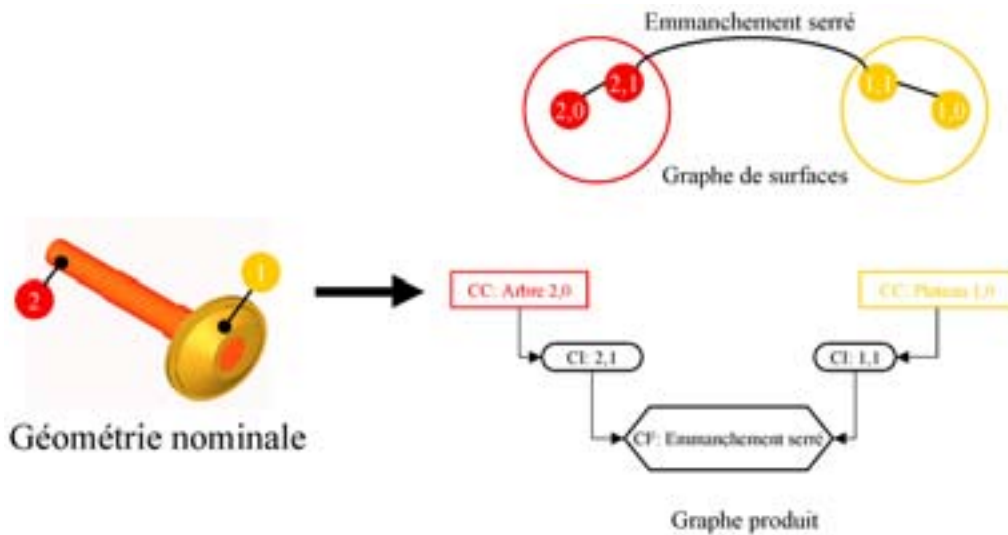


Figure III-1 : Graphe produit et graphe de surfaces d'un plateau arbré

III.1.1 Correspondance sémantique

En respectant les définitions des entités de base du modèle produit introduites au Chapitre I, un composant représente une partition du produit. Dans l'expertise tolérancement géométrique un composant permettra donc de décrire une pièce, un sous-assemblage ou un assemblage. La définition proposée d'une interface permet de décrire un élément géométrique dans la vue tolérancement géométrique.

Une fonction, qui relie une ou plusieurs interfaces, permet de décrire une spécification géométrique si les interfaces appartiennent à la même pièce, une spécification de contact dans le cas où les interfaces sont potentiellement en contact ou plus généralement toute condition géométrique entre des éléments du produit. La correspondance entre les deux modèles, produit et tolérancement, est résumée par la figure suivante :

Entités tolérancement	entités produit
Pièce, sous-assemblage, assemblage	Composant
Élément géométrique	Interface
Spécification: condition géométrique, spécification de contact, spécification géométrique	Fonction

Figure III-2 : Correspondance sémantique entités de tolérancement entités produit

III.1.2 Correspondance graphique

Après avoir défini la correspondance sémantique entre les entités de tolérancement et les entités produit nous décrivons les correspondances au niveau du graphisme pour chaque entité (Figure III-3). Cette formalisation du graphisme de représentation du graphe produit et du graphe de surfaces permet de faciliter le dialogue entre les acteurs du processus de conception.

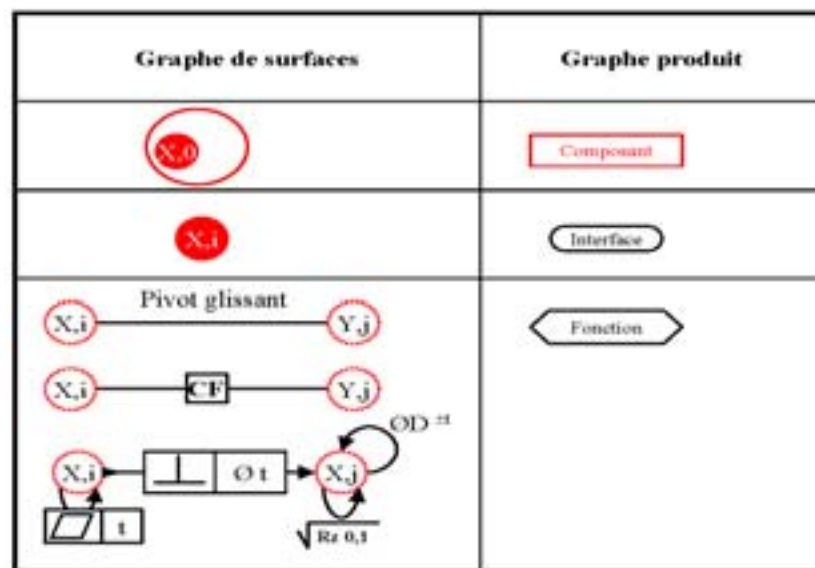


Figure III-3 : Correspondance graphique entre modèle de tolérancement et produit

III.2 Attributs des entités de bases spécifiques au tolérancement

Nous avons présenté au paragraphe précédent la correspondance entre les données attachées au modèle de tolérancement et les entités du modèle produit. Il faut maintenant détailler les attributs liés à l'expertise tolérancement géométrique pour chaque entité du modèle produit. La description de ces attributs repose sur les travaux de A. BALLU et L. MATHIEU [ISO/TC213/WG14/N187, 2004].

III.2.1 Attributs d'un composant

Un composant permet de donner la description structurelle du produit. Cet objet nous permet de décrire aussi bien un assemblage qu'un sous-assemblage ou bien une pièce.

Dans l'expertise tolérancement géométrique, nous avons besoin de connaître la granularité du composant ce qui nous amène à décrire un composant par les attributs suivants :

- le nom du composant qui doit être unique. Cet attribut est décrit par une chaîne de caractères.
- la granularité qui nous permet de savoir si le composant est un assemblage, un sous-assemblage ou une pièce (Figure III-4). Cet attribut est une énumération de type [**pièce, sous-assemblage, assemblage**].



Figure III-4 : Attributs d'un composant

III.2.2 Attributs d'une fonction

Une fonction permet de décrire à la fois un contact, une fonction issue du cahier des charges fonctionnel et une spécification géométrique. Les attributs de l'objet fonction nécessaires à l'expertise de tolérancement géométrique sont les suivants :

Condition fonctionnelle

- le nom de la fonction qui est décrit par une chaîne de caractères
- la description qui est une description textuelle de la fonction et du critère d'appréciation
- le critère d'appréciation de la fonction
- l'échelle associée à ce critère qui correspond par exemple à l'unité associée à ce critère
- la flexibilité associée au critère. Cet attribut est décrit par une énumération [**F0, F1, F2, F3**]
- et les limites du critère d'appréciation. Cet attribut décrit les limites supérieures et inférieures du critère d'appréciation.

Dans l'exemple du plateau arbré une condition fonctionnelle peut être le respect de l'angle formé par le plateau avec l'axe de l'arbre. Les attributs utilisés pour décrire cette condition fonctionnelle sont décrits sur la figure suivante :

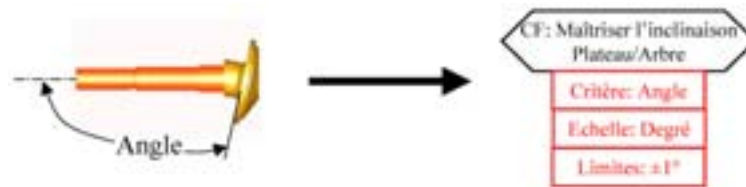


Figure III-5 : Description d'une condition fonctionnelle

Spécification de contact

- le nom de la spécification de contact
- la nature de la liaison qui permet de décrire les liaisons cinématiques de base. Dans les graphes produit nous utiliserons les symboles ISO de liaisons cinématiques [ISO 3952-1, 1981].
- le type du contact est décrit par l'énumération [**fixe, glissant, flottant**] [DANTAN, 2000]
- les éléments de position et d'orientation de la liaison. Ces éléments sont décrits par un point de situation (centre de la liaison) et deux vecteurs.

Nous décrivons dans l'exemple du montage du plateau sur l'arbre (Figure III-6), la spécification de contact correspondant à l'emmanchement serré entre ces deux éléments.

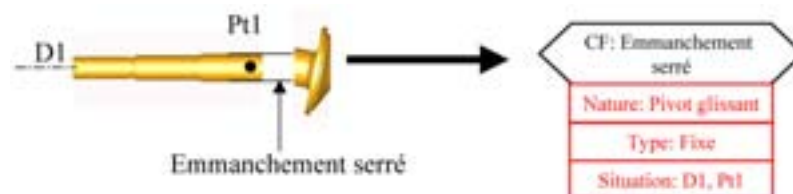


Figure III-6 : Description d'une spécification de contact

Spécification géométrique

- le type de caractéristique GPS qui est une énumération [**Texture, Form, Size, Variation, Gap**]. La localisation et l’orientation sont incluses dans la variation.
- le type et la dimension de la zone de tolérance
- le repère de tolérancement
- les directions de tolérancement qui sont les axes selon lesquels les tolérances sont spécifiées. Cet attribut est un choix dans l’énumération suivante [**tx, ty, tz, rx, ry, rz**]. La cardinalité de cet attribut est de 1 à 6, la valeur 6 correspondant à une spécification contraignant les 3 translations et les 3 rotations

Sur l’arbre nous décrivons la spécification géométrique correspondant à une rectitude d’axe en zone commune des deux axes des portées des roulements (Figure III-7).

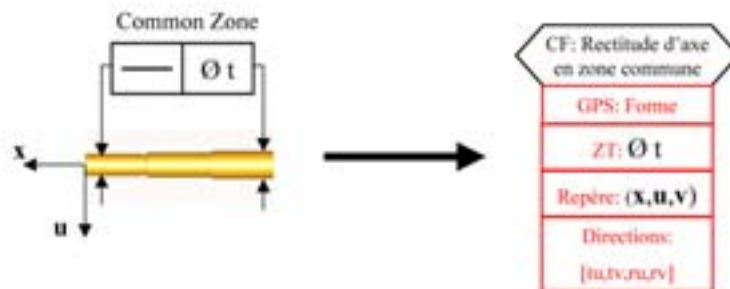


Figure III-7 : Description d’une spécification géométrique

Le repère de tolérancement correspond à l’axe de l’arbre (axe x), les deux autres axes u et v sont obtenus tel que $x.v = 0$ et $u \wedge v = x$. Dans ce repère les directions de tolérancement sont les translations suivant les axes u et v (tu et tv) ainsi que les rotations (ru et rv) suivant ces mêmes axes.

III.2.3 Attributs d’une interface

Une interface correspond à un élément réel ou à un élément de substitution. Pour décrire cet élément géométrique nous avons besoin de connaître les attributs suivants :

- le nom de l'interface qui est décrit par une chaîne de caractères
- le type de l'élément. Un élément tolérancé peut être soit surfacique, soit linéique, soit ponctuel.
- les éléments de situation de l'interface qui décrivent la position et l'orientation de l'interface [BALLU et al, 1995]. Les éléments de situation sont définis par des **points** et/ou des **droites** et/ou des **plans**. Une autre possibilité pour décrire les éléments de situation est d'utiliser les EGRM [CLEMENT et al, 1991].
- les caractéristiques intrinsèques de l'élément. Dans le cas d'une sphère, d'un cercle, d'un cylindre, la caractéristique intrinsèque est décrite par le **diamètre**. Pour un cône, la caractéristique intrinsèque est l'**angle au sommet**.
- les limites physiques de l'élément. Par exemple les limites d'une surface cylindrique peuvent être les points extrémités de l'axe du cylindre, une surface plane est limitée par son contour et deux plans de jauge limitent une surface conique.
- la classe d'invariance de la surface. Cet attribut est un choix dans l'énumération [**plane**, **prismatique**, **révolution**, **cylindrique**, **sphérique**, **hélicoïdale**, **complexe**] [RIVIERE, 1993]
- la géométrie nominale. Cet attribut va pointer sur la définition géométrique de l'interface fournie par un modelleur CAO. Pour permettre le dialogue entre les intervenants du cycle de conception cette définition peut utiliser un format d'échange neutre (STEP ou IGES).

Pour les éléments qui sont des partitions d'un élément complet, il nous faut définir la géométrie permettant de décrire cette portion. Pour cela nous avons :

- la géométrie de section. Cet attribut définit le volume, le contour ou la ligne de section permettant d'obtenir la portion que l'on souhaite tolérer.

L'exemple de l'arbre permet de décrire l'interface correspondant à la portée d'un roulement à billes. Cette interface correspond à une surface nominalement cylindrique de diamètre 20 (Figure III-8).

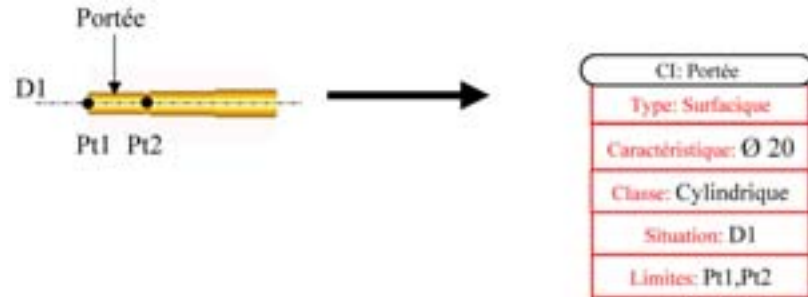


Figure III-8 : Description d'une interface

III.3 Description et intégration des composants standards

Dans l'industrie mécanique, la conception de nombreux produits fait appel à des composants standards (vis, rivets, roulements, etc.). Leur utilisation est liée à la réalisation d'une fonction du produit. Par exemple un roulement à billes permet de satisfaire une fonction de guidage en rotation. De nombreux efforts ont été faits par les éditeurs de logiciels CAO pour fournir aux concepteurs des bibliothèques de composants standards permettant de récupérer la géométrie de ces composants.

Cependant lorsqu'un composant standard est intégré dans la description d'un produit, seule sa description géométrique est importée et il n'est pas possible de relier la géométrie du composant avec la fonction qu'il remplit. Notre objectif est de distinguer les spécifications issues de l'intégration des composants standards de celles issues du transfert des fonctions du cahier des charges. Distinguer les spécifications induites par l'intégration d'un composant standard permet d'aider le concepteur à choisir une solution avec des critères supplémentaires correspondant aux spécifications induites.

III.3.1 Description d'un composant standard

Selon notre point de vue, un composant standard est « **un ensemble de un ou plusieurs composants qui assurent une fonction sous réserve de satisfaire des conditions de montage** » (Figure III-9). Dans la pratique, les méthodes de choix des composants standards (vis, roulements à billes, transmission par courroie) sont très formalisées et reposent sur des hypothèses.

Par exemple pour un roulement à billes la durée de vie est quantifiée en fonction des efforts appliqués sous réserve que l'on ne dépasse pas les valeurs limites des angles de rotulage et qu'il n'y ait pas de laminage des bagues des roulements par rapport aux portées. Cependant lorsque le composant est intégré, par exemple dans un modèle CAO, il n'y a pas d'intégration des ces hypothèses. Nous proposons donc en utilisant le modèle produit d'intégrer ces hypothèses sous la forme de fonctions.

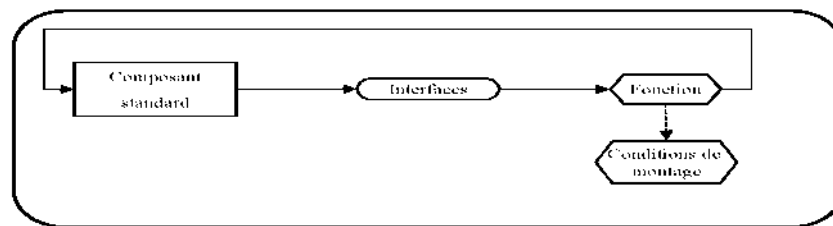


Figure III-9 : Description de la structure d'un composant standard

A partir de cette description de base, commune à tous les composants standards, nous pouvons spécialiser cette description pour chaque élément standard intervenant dans la description du produit. Par exemple la Figure III-10 donne la représentation d'un roulement à billes non monté.

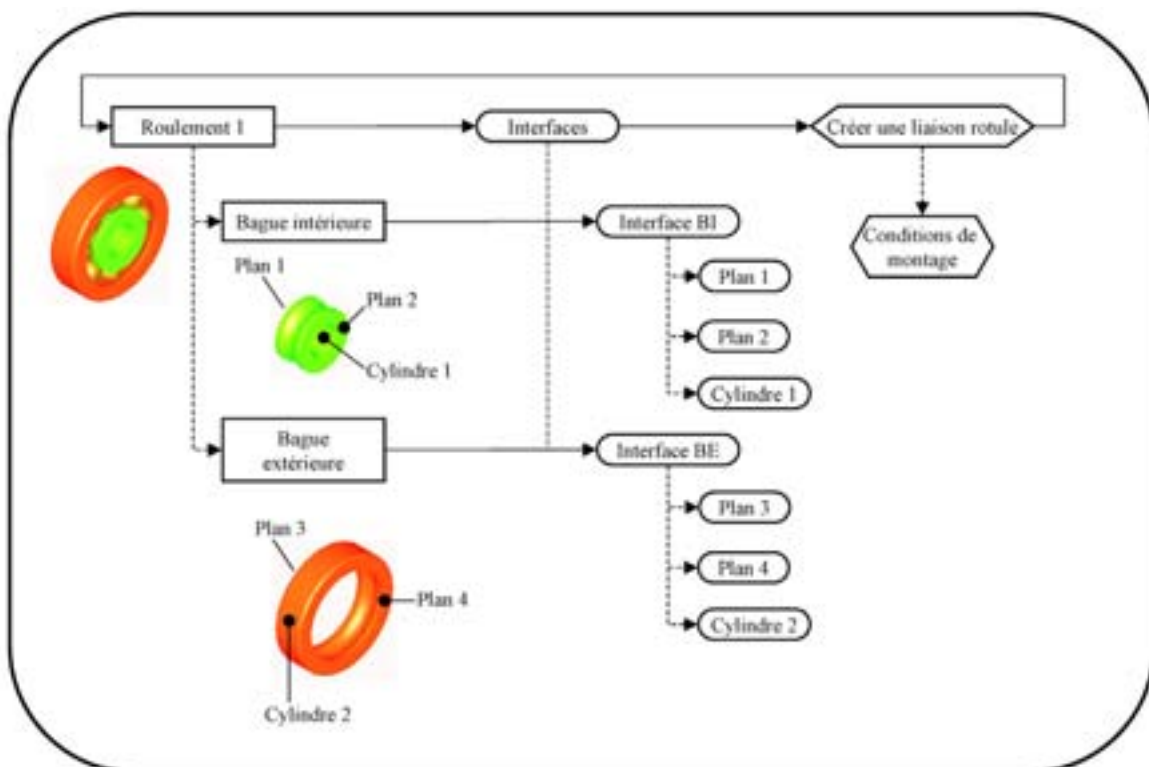


Figure III-10 : Description d'un roulement à billes

Dans la description d'un roulement à billes nous ne voyons apparaître que la décomposition structurelle minimale à savoir la bague intérieure et la bague extérieure. En effet les éléments roulants et la cage du roulement n'apportent rien à la description du composant standard car ces éléments ne servent pas à accrocher le composant avec le milieu extérieur. De plus ces deux bagues vont être mises en relation avec les autres composants du produit par l'intermédiaire des interfaces lors de l'opération de montage du composant standard. Pour la bague intérieure, il existe trois interfaces qui sont une surface cylindrique (Cylindre 1) et deux surfaces planes (Plan 1 et Plan 2). Les caractéristiques intrinsèques du roulement à savoir les valeurs de jeu axial, radial et de rotulage peuvent être décrites par les attributs décrivant la fonction « créer une liaison rotule ».

III.3.2 Intégration dans le modèle produit

Lorsque nous intégrons un composant standard dans la description d'un mécanisme ce que nous cherchons à décrire c'est comment les interfaces de ce composant standard vont être mises en relation avec les autres composants qui décrivent le mécanisme. Reprenons la figure I-26 du chapitre 1. Nous retrouvons dans la figure suivante la description d'un composant standard qui répond à la fonction créer une liaison rotule. Ce composant est un roulement à billes.

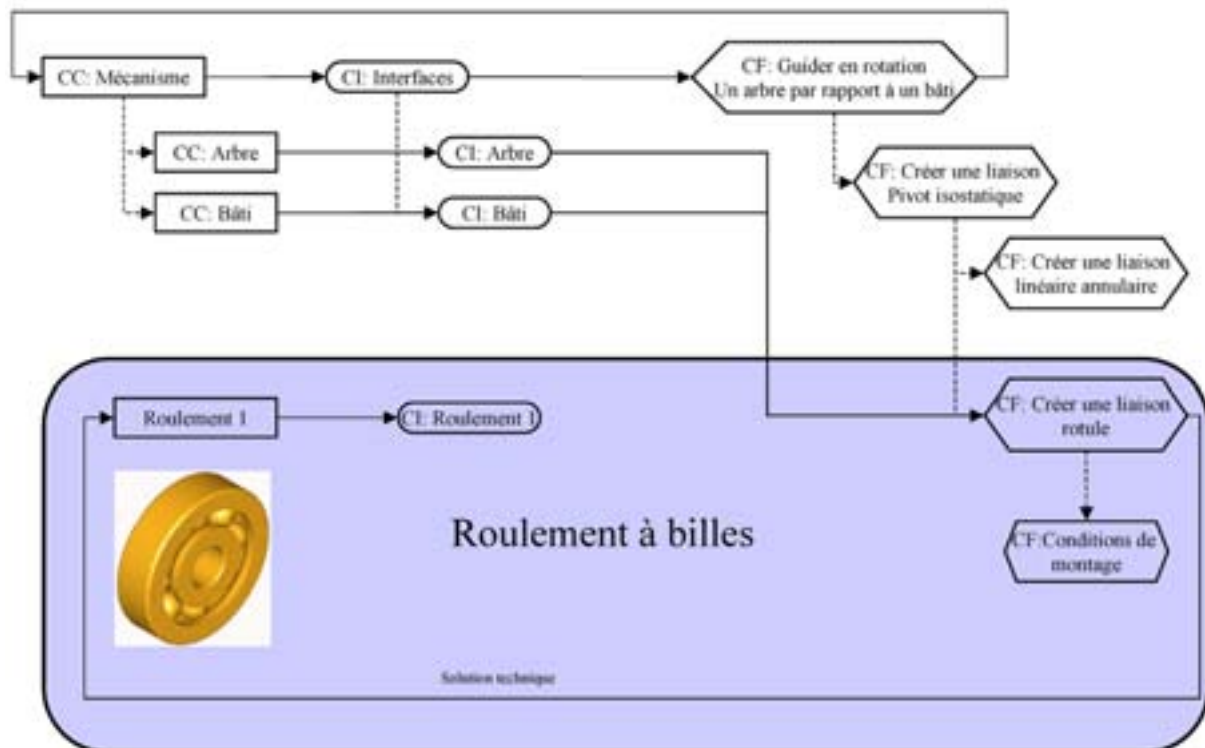


Figure III-11 : Intégration d'un composant standard

La structure du composant standard est maintenant intégrée à la description du mécanisme et il nous faut alors décrire les relations entre les interfaces du composant standard et les interfaces du mécanisme. Pour cela le concepteur va détailler la fonction « Conditions de montage » avec comme contrainte le respect de la fonction que le composant standard doit satisfaire : « créer une liaison rotule ». Les règles métiers doivent être prises en compte à ce moment et nous savons que pour qu'un roulement à billes remplisse le rôle de liaison rotule il faut immobiliser la bague intérieure et la bague extérieure en translation. De plus, il faut aussi monter serrée la bague tournante par rapport à la direction de la charge. Dans cet exemple la bague tournante par rapport à la direction de la charge est la bague intérieure. Toutes ces contraintes peuvent être exprimées à l'aide du modèle produit que nous avons proposé. L'intégration complète d'un composant standard est décrite en Figure III-12.

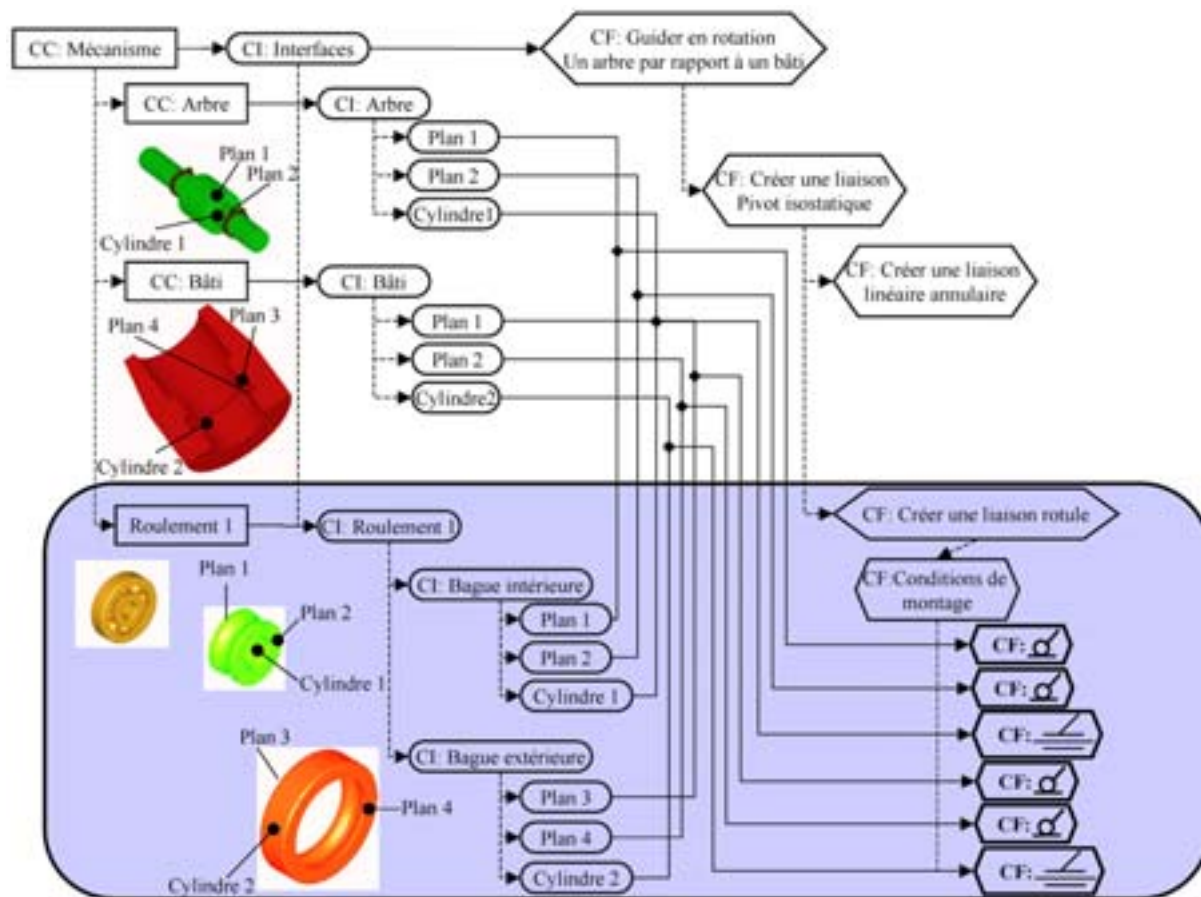


Figure III-12 : Intégration complète d'un composant standard

Cela permet d'identifier les spécifications géométriques liées à l'intégration des composants standard. Dans l'exemple présenté les spécifications dimensionnelles sur l'arbre et le logement sont induites par la réalisation du guidage en rotation à l'aide de roulements à billes. Si cette technologie est remise en cause ou bien abandonnée au cours du processus de conception du produit, il est alors possible de modifier le schéma de tolérancement du produit ainsi que la décomposition structurelle du produit. En effet si la fonction créer une liaison rotule est supprimée alors via le lien entre les fonctions et les composants du modèle produit nous sommes capables de supprimer ces composants qui deviennent inutiles dans la description du produit.

III.4 Traçabilité des spécifications géométriques au cours du processus de conception

Comme nous l'avons présenté dans le paragraphe précédent, les spécifications géométriques mises en place sur un produit peuvent provenir de l'intégration de composants standards mais elles peuvent aussi être issues du cahier des charges fonctionnel.

Cette méthode permet d'obtenir le schéma de spécifications juste nécessaire et suffisant. En effet pour des raisons économiques il est inutile de vouloir spécifier toutes les surfaces d'un mécanisme, seules les surfaces fonctionnelles (celles qui remplissent un rôle vis à vis d'une fonction du mécanisme) doivent être spécifiées. Une représentation utilisée pour mener à bien le transfert est l'utilisation des graphes de surfaces pour représenter les spécifications géométriques à un instant du processus de conception du produit. Cette représentation permet de décrire le schéma de tolérancement du produit mais qu'en est il si au cours du processus de conception les exigences au niveau du produit évoluent ?

La réponse que nous apportons à ce problème est de décrire les fonctions issues du cahier des charges et les spécifications géométriques à l'aide d'une même entité. Une fonction et une spécification sont décrites par l'entité « **Fonction** ». Ceci permet en effet de lier les spécifications fonctionnelles aux spécifications géométriques.

De plus par l'utilisation de l'opération de décomposition de l'entité « Fonction », les spécifications géométriques découlent naturellement de la fonction, au sens du cahier des charges, qu'elles décomposent. Par ce moyen, la traçabilité des spécifications géométriques est assurée au cours du processus de conception. Nous sommes en effet capables de savoir de quelle fonction est issue une spécification géométrique. Si le cahier des charges évolue en cours de conception, une fonction peut être supprimée ou être modifiée, nous savons automatiquement quelles sont les spécifications géométriques qu'il faut enlever ou modifier. Contrairement à l'utilisation de n graphes de surfaces distincts, nous proposons, par l'utilisation de l'objet « Fonction », de représenter le processus de transfert des spécifications géométriques des fonctions de plus haut niveau correspond au cahier des charges jusqu'aux spécifications géométriques normalisées au niveau des pièces du mécanisme.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une passerelle entre le formalisme du produit et le formalisme de l'expertise « tolérancement géométrique ». Etant donnée que la représentation par graphe de surfaces est communément utilisée dans le domaine du tolérancement géométrique il était donc nécessaire que notre description du produit soit compatible avec cette représentation.

De plus nous avons démontré qu'il est possible de décrire à l'aide d'un même modèle à la fois les exigences fonctionnelles au niveau du produit et les exigences géométriques par l'utilisation de l'entité fonction du modèle produit. Par conséquent la traçabilité des spécifications géométriques est grandement facilité car en partant des exigences fonctionnelles et par décomposition de celles ci nous obtenons les spécifications géométriques qui répondent à ces exigences fonctionnelles.

D'autre part, nous proposons une description structurelle et fonctionnelle des composants standards ce qui est souvent mal géré dans les modeleurs de CAO. L'avantage de cette description est double. Premièrement les informations liées à l'intégration du composant standard sont regroupées à un seul endroit dans la description du produit ce qui facilite grandement les problèmes de mise à jour de la description du produit. En effet si la solution technologique d'utiliser un composant standard est remise en cause nous sommes capables de supprimer toutes les informations qui lui sont rattachées.

Deuxièmement au niveau du schéma de tolérancement du produit, nous distinguons les spécifications géométriques liées aux exigences fonctionnelles sur le produit de celles qui apparaissent suite à l'intégration des composants standards. Le but de cette démarche est de faciliter le calcul des chaînes de cotes. En effet en utilisant un graphe de surfaces pour le calcul des chaînes de cotes nous sommes obligés de faire une recherche des chemins influents sur le graphe complet du mécanisme, opération longue et bien souvent difficile. Au contraire en utilisant la méthode que nous proposons le calcul des chemins influents n'est effectuée que sur la partie du graphe correspondant à la satisfaction de la fonction

Enfin nous arrivons aussi à dissocier le calcul de chaîne de cotes provenant d'un transfert des conditions fonctionnelles vers les spécifications géométriques du calcul des chaînes de cotes répondant aux conditions d'intégration des composants standards.

Le fait de distinguer les spécifications induites par l'intégration de composants standards permet d'optimiser le choix du composant en prenant en compte les spécifications induites. Ces apports vont être illustrés sur des exemples dans le chapitre suivant.

- Chapitre IV -

Mise en oeuvre du modèle produit dans l'expertise tolérancement géométrique

« Dans ce chapitre nous présenterons l'utilisation du modèle produit sur des exemples pour montrer que l'expertise « tolérancement géométrique » peut être amorcée dès la phase de conception préliminaire d'un produit.

La structure de données mise en place permet de décrire des alternatives de conceptions et donc des schémas de tolérancement correspond à chaque alternative. La comparaison de ces schémas de tolérancement alternatifs peut apporter une aide au concepteur dans le choix de la solution de conception optimale.

De plus à l'aide de la notion de composant standard, le concepteur peut également savoir quelles seront les contraintes géométriques liées à l'intégration de tel ou tel composants standard. Ces contraintes géométriques supplémentaires peuvent aussi être un critère de choix d'une solution technique ou peuvent être un support de dialogue entre le concepteur et les autres intervenants (fabrication, choix de composants, analyse mécanique) du cycle de conception du produit. »

Chapitre IV

Mise en oeuvre du modèle produit dans l'expertise tolérancement géométrique

IV.1	Traçabilité des spécification géométriques.....	82
IV.1.1	Utilisation du modèle produit présenté	82
IV.1.2	Méthodes actuelles en tolérancement géométrique.....	85
IV.1.3	Traçabilité des spécifications géométriques par l'utilisation du modèle produit....	86
IV.2	Gestion des alternatives de conception.....	87
IV.2.1	Description des alternatives de conception	87
IV.2.2	Spécifications induites par l'intégration d'un composant standard	92
IV.2.3	Aide au choix de solutions techniques	95
IV.3	Conclusion	98

Ce chapitre aborde la mise en œuvre du modèle produit dans l'expertise tolérancement géométrique.

Il s'agit d'exploiter la structure de données collaborative du produit dans une vue métier : le tolérancement géométrique.

L'utilisation d'une structure de données unique de la conception préliminaire à la conception détaillée permet d'assurer plus facilement la traçabilité des spécifications.

L'hétérogénéité des différents modèles de conception couramment utilisés (diagramme pieuvre, FAST, modèle cinématique, modèle géométrique CAO et graphe de surfaces) rend difficile voire impossible la traçabilité des spécifications. Nous allons montrer comment nous pouvons identifier les spécifications issues du transfert d'une fonction et comment nous pouvons justifier la provenance d'une spécification donnée.

De plus, la gestion des alternatives de conception par le modèle produit utilisé permet à l'expertise « tolérancement géométrique » d'assister le concepteur dans le choix d'une solution particulière parmi une famille de solutions envisagées en prenant en compte les spécifications induites par la solution retenue. Par l'intermédiaire des alternatives de conception nous pouvons prendre en compte la notion de composant standard. La caractérisation d'un composant standard dans le modèle produit permet d'apporter une aide supplémentaire au concepteur qui pourra identifier les spécifications induites par l'intégration de ce composant. La détermination d'un composant standard repose sur une méthode de choix qui aboutit rarement à une solution unique. Les spécifications induites par la sélection de tel ou tel composant apporte un critère de choix supplémentaire permettant d'optimiser la conception du produit.

La traçabilité des spécifications, l'aide apportée au concepteur dans le choix d'une solution parmi des alternatives et dans le choix d'un composant standard sont les principaux aspects que nous allons essayer de mettre en valeur dans ce chapitre. Nous utiliserons pour cela l'exemple académique du consortium IPPOP : un malaxeur.

IV.1 Traçabilité des spécification géométriques

Nous avons présenté dans le premier chapitre le modèle produit permettant de décrire un produit au cours du processus de conception. Le produit est décrit à l'aide de trois entités de base qui sont le composant, l'interface et la fonction. Ces trois entités permettent de donner à la fois une description fonctionnelle et structurelle du produit. Dans le second chapitre nous avons présenté les différents modèles utilisés dans l'activité tolérancement géométrique. Dans le troisième chapitre nous avons décrit la correspondance entre les données manipulées par l'expertise de tolérancement géométrique et les entités du modèle produit. Nous présentons maintenant comment utiliser le modèle produit dans le but de faciliter la traçabilité des spécifications géométriques au cours du processus de conception.

IV.1.1 Utilisation du modèle produit présenté

L'exemple traité dans ce paragraphe a pour objectif de mettre en avant l'intérêt du modèle produit dans le cadre de la prise en compte au plus tôt l'expertise « tolérancement géométrique » dans le processus de conception d'un produit. L'exemple repose sur le mécanisme permettant de régler la position du bol contenant les ingrédients par rapport au fouet (Figure IV-1).

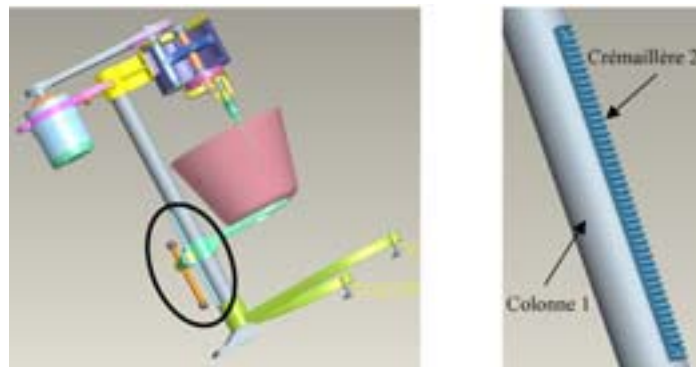


Figure IV-1 : Description du réglage de la position bol/fouet

La solution technique permettant de réaliser cette fonction de réglage est un système pignon crémaillère. La condition que nous traiterons ici est la condition de montage de la crémaillère sur le bâti du malaxeur ce qui se traduit dans le modèle produit par la fonction positionner et fixer (Figure IV-2) .

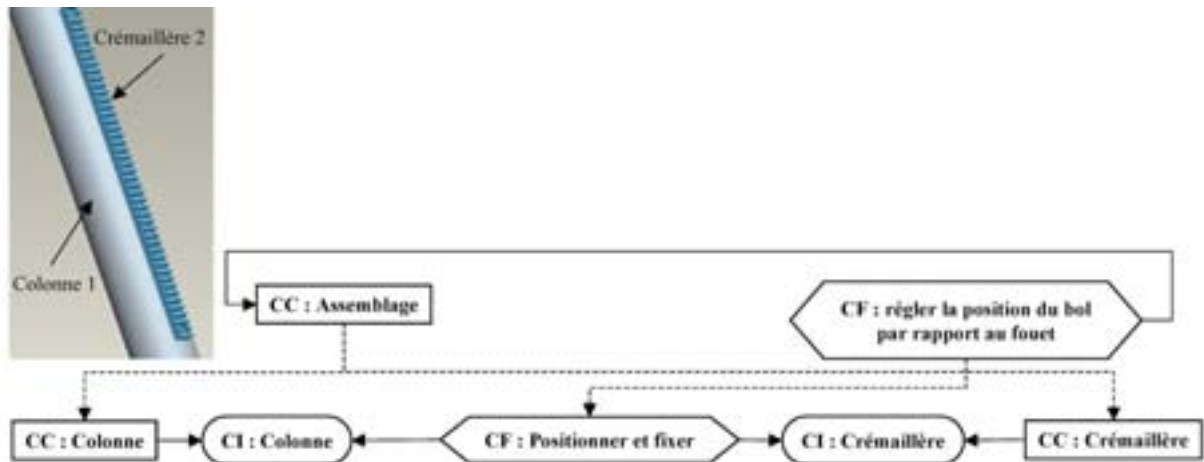


Figure IV-2 : Description de la condition de montage crémaillère/colonne

Pour assurer la mise et le maintien en position de la crémaillère par rapport à la colonne nous décomposons la fonction en deux sous-fonctions qui sont une liaison pivot glissant entre deux interfaces « cylindre » appartenant respectivement à la colonne et à la crémaillère et une fonction technique qui permet de maintenir le contact entre les deux composants via les interfaces « Fixation » (Figure IV-3).

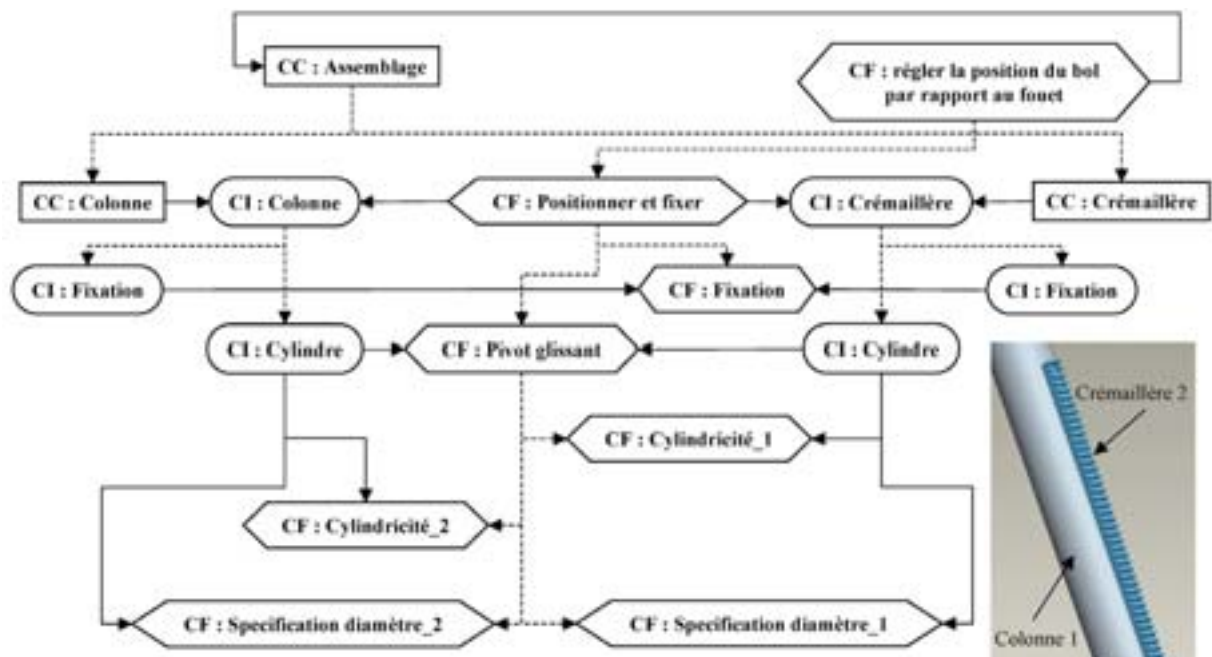


Figure IV-3 : Spécifications assurant la liaison pivot glissant

Contrairement aux pratiques actuelles en conception, nous pouvons dès cette phase de description qui est incomplète proposer un début de schéma de tolérancement du produit. En effet pour assurer la liaison pivot glissant, il est obligatoire de maîtriser les dimensions et les défauts de forme des deux surfaces nominalemeent cylindriques.

Les spécifications que nous apportons au modèle sont donc des spécifications dimensionnelles sur les diamètres des surfaces cylindriques et des spécifications de cylindricité pour maîtriser les défauts de forme (Figure IV-3). De plus lorsqu'un graphe de surfaces est extrait du modèle produit, nous constatons que pour fermer le cycle et ainsi garantir la fonction de position et de maintien entre les interfaces de la colonne et de la crémaillère, nous sommes obligés de maîtriser la position et l'orientation entre les surfaces cylindriques et les interfaces de fixation. Ceci se traduit par une spécification de localisation entre ces éléments géométriques (Figure IV-4).

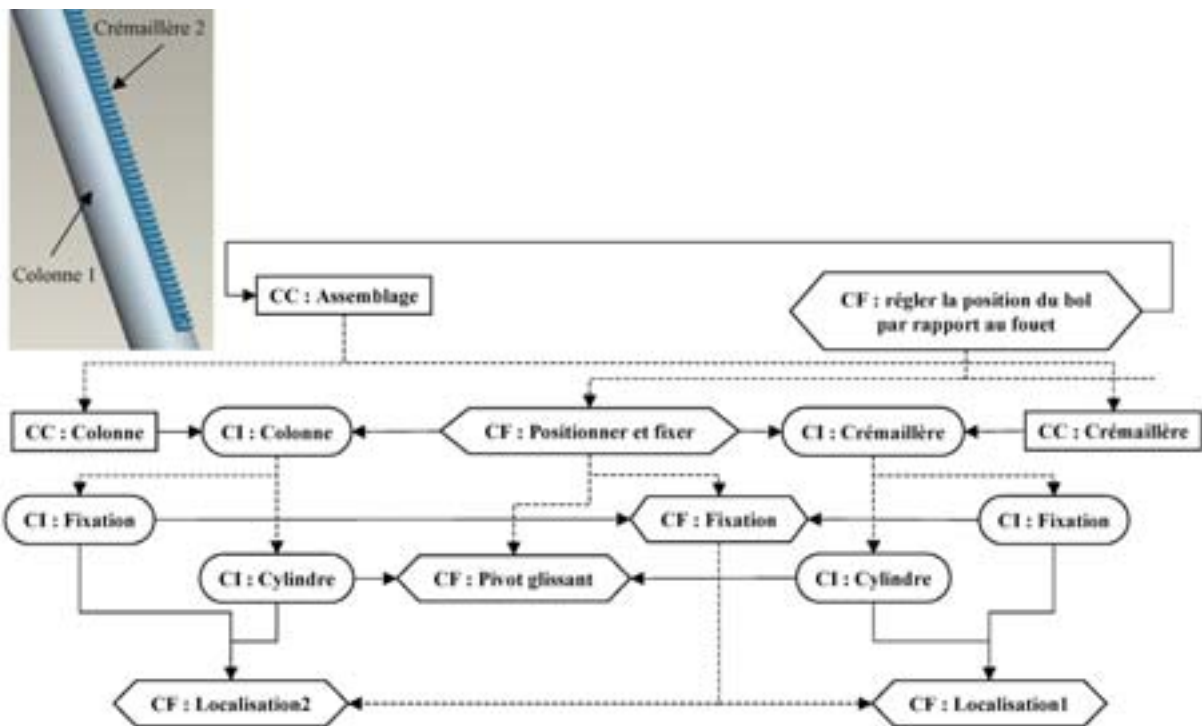


Figure IV-4 : Description des spécifications de localisation

Même avec une définition aussi réduite du mécanisme nous montrons par cet exemple qu'il est possible de prendre en compte l'expertise « tolérancement géométrique » assez tôt dans le processus de conception. La définition complète des fixations n'est pas définie géométriquement ce qui n'empêche en rien de décrire la spécification de localisation entre cette fixation et la surface cylindrique pour les composants colonne et crémaillère. Un autre avantage est que la définition d'un groupe d'éléments apparaît naturellement. En effet si la fonction fixation est réalisée à l'aide de vis (ici deux composants vis), la spécification de localisation entre la surface cylindrique et la fixation porte sur le groupe d'éléments formé par les deux interfaces qui décomposent les interfaces fixation (deux trous taraudés sur la colonne et deux trous lisses sur la crémaillère) qui sont en contact avec les vis.

Ceci est assez difficile à réaliser avec les outils actuels basés sur l'utilisation des graphes de surfaces car il faut à partir de la description exhaustive de toutes les surfaces synthétiser ces informations pour mettre en évidence la notion de groupe d'éléments. Ici cette notion apparaît naturellement car l'évolution de la description géométrique et fonctionnelle du produit est décrite de manière continue.

IV.1.2 Méthodes actuelles en tolérancement géométrique

Comme nous l'avons souligné précédemment, l'activité tolérancement géométrique est souvent reléguée dans les dernières phases du processus de conception. Ceci est en grande partie lié à la dépendance des outils actuels de tolérancement vis à vis des modeleurs géométriques. En effet les modeleurs CAO ne supportant pas une description géométrique incomplète des produits, les outils de tolérancement qui utilisent la description géométrique d'un modeleur ne sont donc utilisables que dans les dernières étapes du processus de conception. Ajouté à cela, le fait que la description structurelle et fonctionnelle d'un produit en cours de conception ne se fait généralement pas à l'aide du même modèle, l'expertise tolérancement géométrique doit pouvoir puiser des informations dans des modèles hétérogènes.

La description fonctionnelle du produit donne lieu à une description géométrique du produit. La description géométrique étant réalisée dans un outil différent de la description fonctionnelle, le lien entre fonction et géométrie est souvent rompu.

En prenant l'exemple du réglage en position du bol par rapport au fouet, un graphe de surfaces permet d'obtenir la représentation suivante :

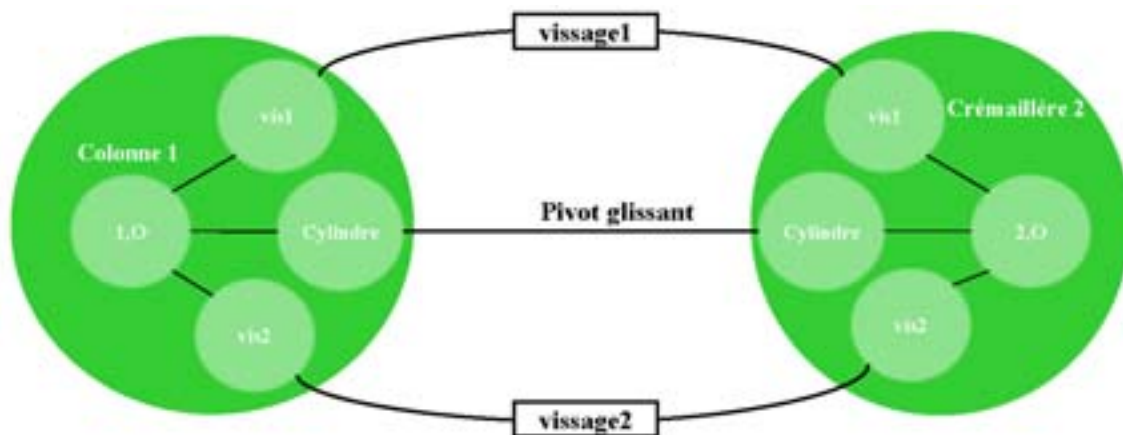


Figure IV-5 : Graphe de surfaces assemblage colonne-crémaillère

En utilisant cette représentation du mécanisme nous sommes capables de déterminer la nature des spécifications géométriques nécessaires pour assurer la condition de montage du mécanisme. Les spécifications géométriques utiles sont donc représentées sur le graphe de surfaces de la manière suivante :

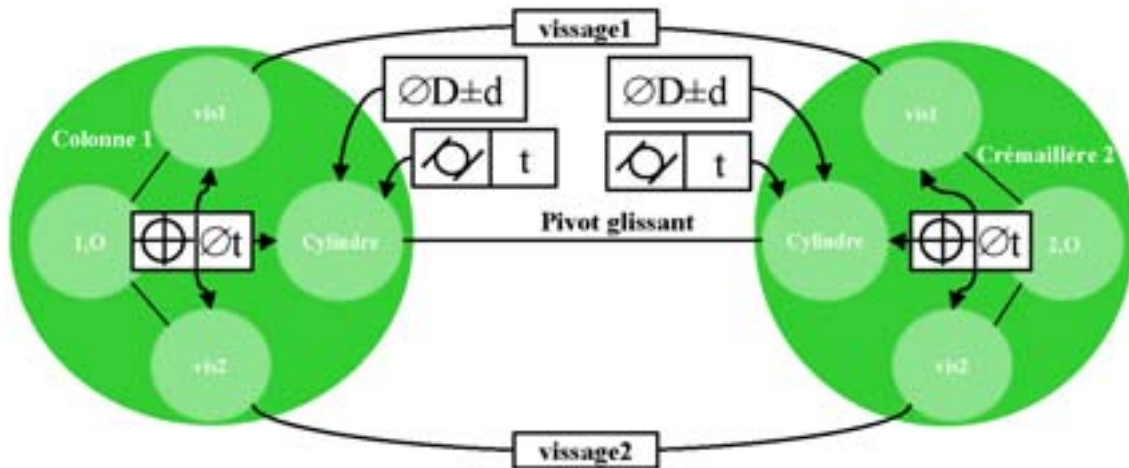


Figure IV-6 : Spécifications géométriques garantissant le montage colonne-crémaillère

Pour garantir le montage de la crémaillère sur la colonne par l'intermédiaire de deux vis, il faut évidemment maîtriser le défaut de forme des surfaces cylindriques de la colonne et de la crémaillère mais aussi gérer la localisation des vis par rapport aux surfaces cylindriques de la colonne et de la crémaillère.

IV.1.3 Traçabilité des spécifications géométriques par l'utilisation du modèle produit

Les résultats obtenus aux paragraphes précédents sont équivalents en termes de spécifications géométriques (Figure IV-3, Figure IV-4 et Figure IV-6). Cependant l'utilisation du modèle produit par rapport à l'utilisation seulement du graphe de surfaces permet d'assurer la traçabilité des spécifications géométriques. En effet les résultats obtenus en utilisant le modèle produit (Figure IV-3, Figure IV-4) reflètent bien que les spécifications par dimension et de forme sur les surfaces cylindriques de la colonne et de la crémaillère garantissent la satisfaction de la condition de contact « pivot glissant » et que les spécifications de localisation assurent le respect de la fonction « fixation ».

Ces deux informations ne sont pas facilement lisibles sur le graphe de surfaces (Figure IV-6). De plus la notion de groupe d'éléments, ici les éléments correspondant aux deux vis, n'apparaît pas directement sur le graphe de surfaces.

En utilisant le modèle que nous proposons, le lien entre fonction et structure du produit est toujours maintenu et ces deux descriptions sont décrites au sein d'un même modèle. Contrairement à ce que l'on fait avec les outils actuels, c'est à dire attendre la description géométrique exhaustive du produit pour la transformer par exemple en un graphe de surfaces, nous pouvons en utilisant le modèle produit transférer les spécifications géométriques au fur et à mesure de l'évolution de la description du produit. Au lieu de travailler sur le graphe de surfaces complet du mécanisme et de rechercher les chemins influents vis à vis de telle ou telle condition géométrique, le modèle produit nous permet d'extraire directement la partie du graphe qui correspond à la condition géométrique que nous voulons étudier.

IV.2 Gestion des alternatives de conception

Comme nous l'avons présenté au chapitre 1, le modèle produit permet de décrire des alternatives de conception. Nous montrerons dans ce paragraphe comment l'expertise tolérancement géométrique peut aider le concepteur à choisir une solution parmi un ensemble de solution techniques en prenant comme critère le schéma de tolérancement résultant de chaque alternative.

IV.2.1 Description des alternatives de conception

Nous présentons dans ce paragraphe la description des alternatives de conception répondant à l'assemblage de la crémaillère sur la colonne. Cette fonction est décrite par une mise en position et de fixation de la crémaillère sur la colonne (Figure IV-7).

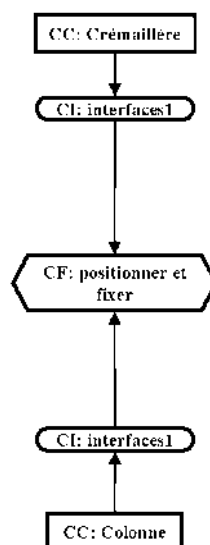


Figure IV-7 : Assemblage de la crémaillère sur la colonne

Le concepteur choisit de réaliser l'assemblage de la crémaillère sur la colonne en décrivant deux sous-fonctions. La première correspond à la mise en position de la crémaillère sur la colonne. La seconde sous-fonction décrit la fixation de la crémaillère sur la colonne. Cette fonction est de type « alternative » car il souhaite envisager plusieurs solutions de fixation Figure IV-8.

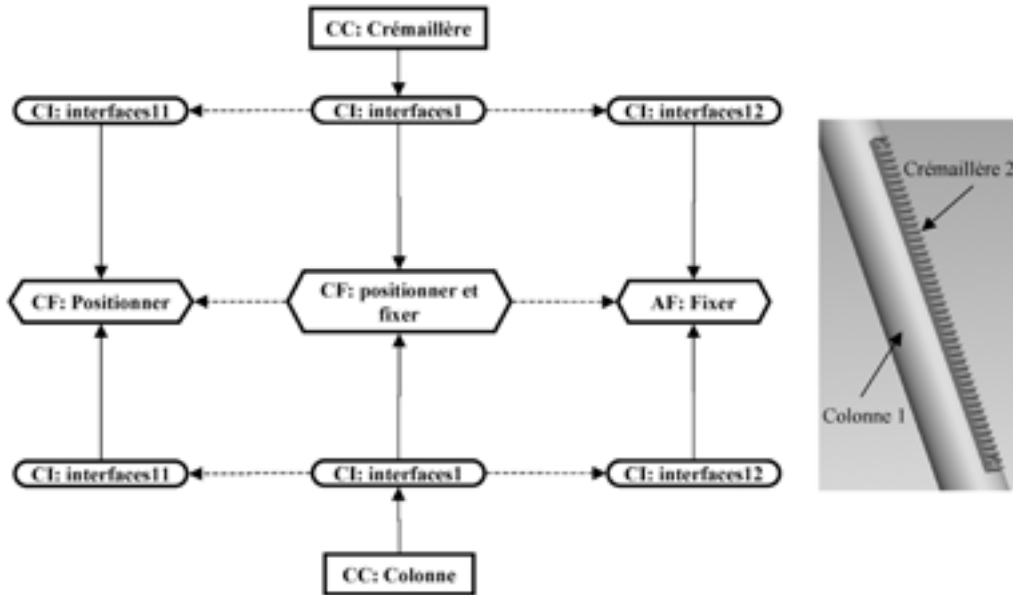


Figure IV-8 : Mise et maintien en position de la crémaillère par rapport à la colonne

A partir de ce stade les deux alternatives peuvent être étudiées séparément. Une alternative de conception peut être vue au niveau du processus de conception du produit comme une désynchronisation de l'évolution des alternatives correspondant à la fonction « Fixer ». D'un côté la fonction « Positionner » est décrite par une pivot glissant entre les interfaces cylindriques des deux composants : la crémaillère et la colonne. D'autre part, la fonction alternative « Fixer » est décomposée en deux sous-fonctions qui correspondent respectivement au collage et au vissage de la crémaillère sur la colonne (Figure IV-9).

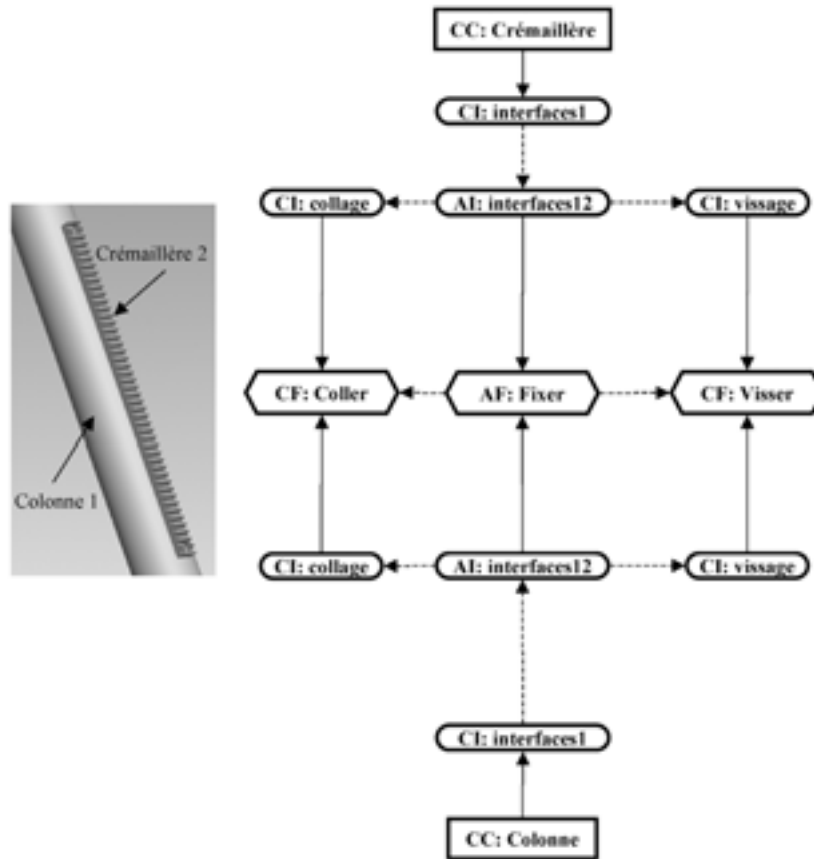


Figure IV-9 : Description des alternatives de la fonction « Fixer »

Les deux alternatives de fixation peuvent être étudiées séparément l'une de l'autre. La première alternative de fixation correspond à coller la crémaillère sur la colonne alors que la seconde décrit un montage de la crémaillère sur la colonne par l'intermédiaire de vis. Ces deux alternatives de fixation peuvent être décrites dans le modèle produit.

Pour une raison de lisibilité des graphes, les solutions de fixation par vis et par colle seront étudiées séparément. Pour la solution collage nous décrivons la solution qui consiste à utiliser un composant colle et un composant pion. Le pion sert à bloquer la translation de la crémaillère le long de la colonne et la colle sert à maintenir en position la crémaillère sur la colonne. Ces deux nouveaux composants sont insérés dans le modèle produit.

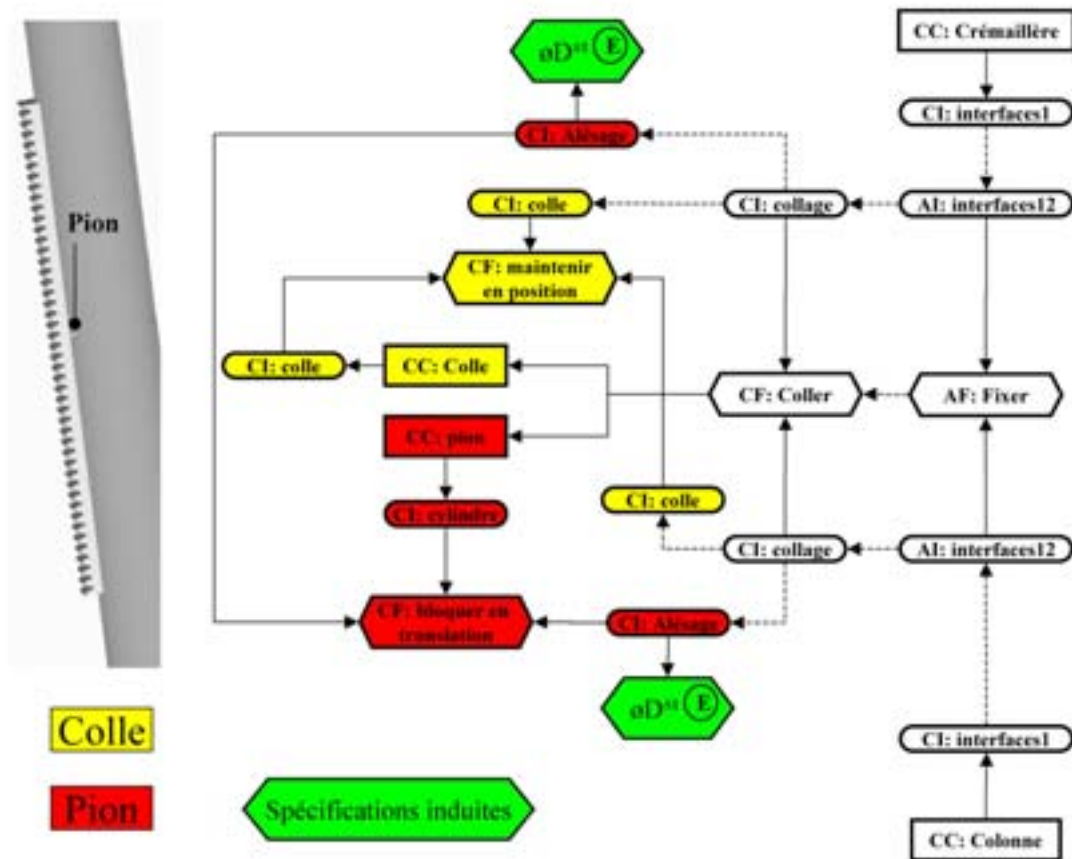


Figure IV-10 :description de l'alternative par collage

Pour l'alternative correspondant au collage de la crémaillère sur la colonne nous avons décrit dans la modèle produit les spécifications induites par cette solution. Dans ce cas les spécifications géométriques nécessaires au montage sont des spécifications par dimension avec l'exigence de l'enveloppe sur les alésages de la colonne et de la crémaillère. Ces exigences sont liés à l'utilisation du pion de centrage (Figure IV-10).

La seconde alternative consiste à maintenir la crémaillère sur la colonne par l'intermédiaire de deux vis. Les composants vis sont insérés dans la description du produit comme étant une solution de la fonction « Visser ».

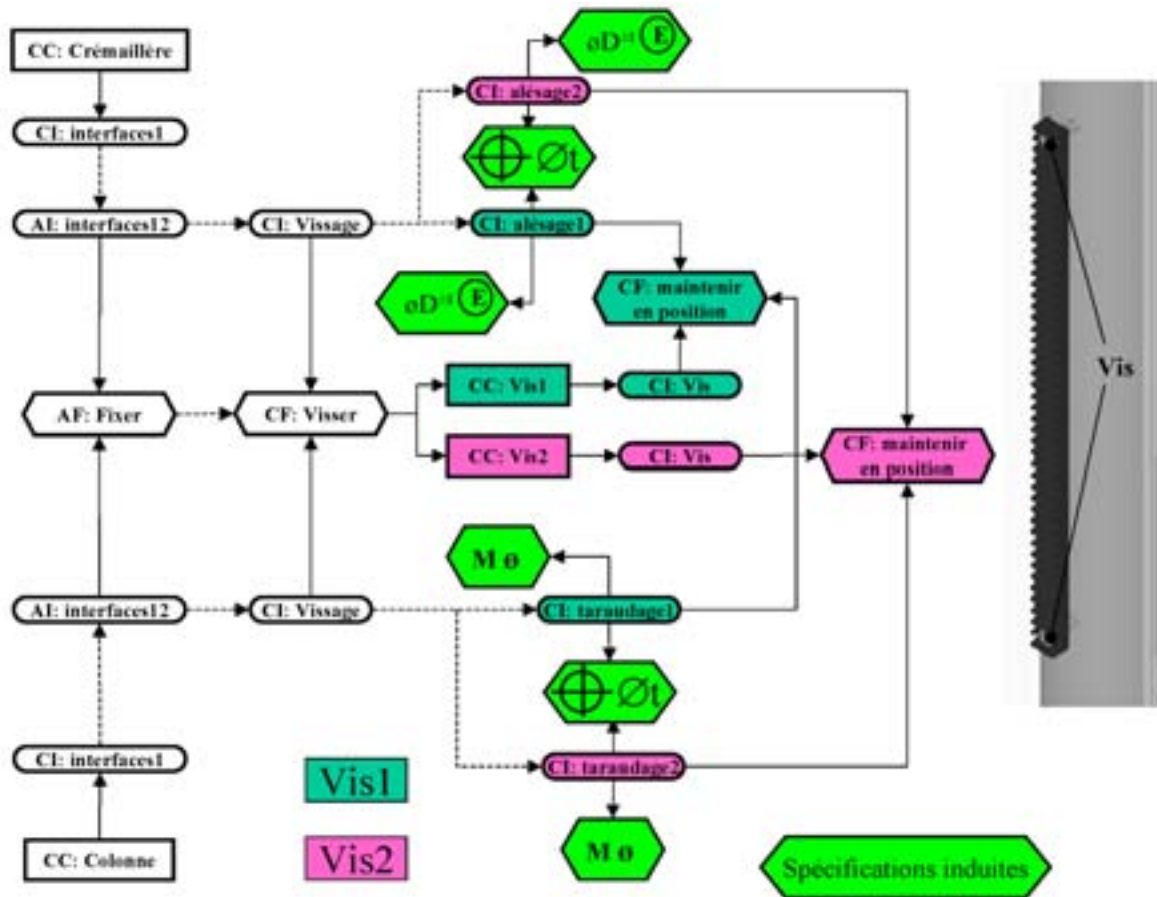


Figure IV-11 : Description de l'alternative par vissage

L'utilisation de deux vis implique de localiser les deux taraudages sur la colonne ainsi que les deux alésages sur la crémaillère. De plus, pour assurer le montage des vis dans les alésages de la crémaillère, il faut spécifier la dimension de ces trous avec une exigence de l'enveloppe. Pour garantir le montage des vis sur la colonne, il faut spécifier les diamètres des taraudages (Figure IV-11).

Dans le cadre d'une conception collaborative, la description d'alternatives est importante pour aider le concepteur à faire le choix d'une conception optimale. Dans l'exemple que nous avons choisi d'illustrer, nous obtenons deux schémas de tolérancement distincts (Figure IV-12). D'un point de vue du tolérancement géométrique, l'alternative vis est plus contraignante que celle par collage de la crémaillère sur la colonne. Les spécifications induites par l'utilisation de deux vis sont plus nombreuses et plus complexes à maîtriser.

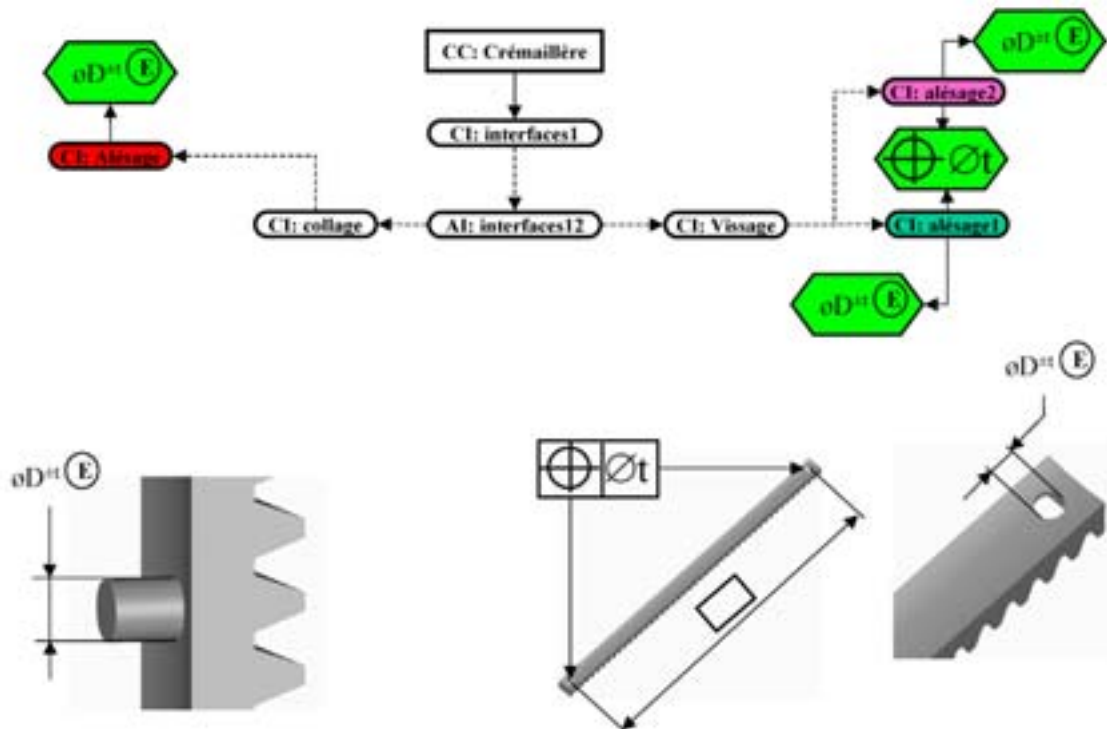


Figure IV-12 : Comparaison des schémas de tolérancement liés aux deux alternatives

Comme nous l'avons présenté précédemment le modèle produit permet de faciliter le dialogue entre les acteurs du cycle de conception du produit. Sur l'exemple du montage de la crémaillère sur la colonne, le concepteur peut aussi faire appel, dans son choix de la solution optimale, à l'expertise « usinage ». En effet dans l'alternative par vis la géométrie de la crémaillère doit être modifiée (deux perçages). Suivant l'outillage et la dureté du matériau de la crémaillère, l'expert usinage peut indiquer au concepteur que cette modification de géométrie ne pourra pas se faire en interne à l'entreprise ou bien coûtera plus chère.

La description des alternatives de conception est un apport non négligeable au dialogue entre les acteurs du processus de conception mais aussi une aide au concepteur dans son choix de solutions parmi une famille de solutions possibles.

IV.2.2 Spécifications induites par l'intégration d'un composant standard

Dans un premier temps nous nous intéressons à la description des conditions de montage des roulements à billes avec un point de vue tolérancement géométrique. Les conditions d'intégration d'un roulement à billes sont le non-laminage des portées des roulements sur l'arbre et le bâti et le respect des angles de rotulage limites pour chacun des roulements. Ces deux conditions sont décrites dans le modèle produit dans la figure suivante.

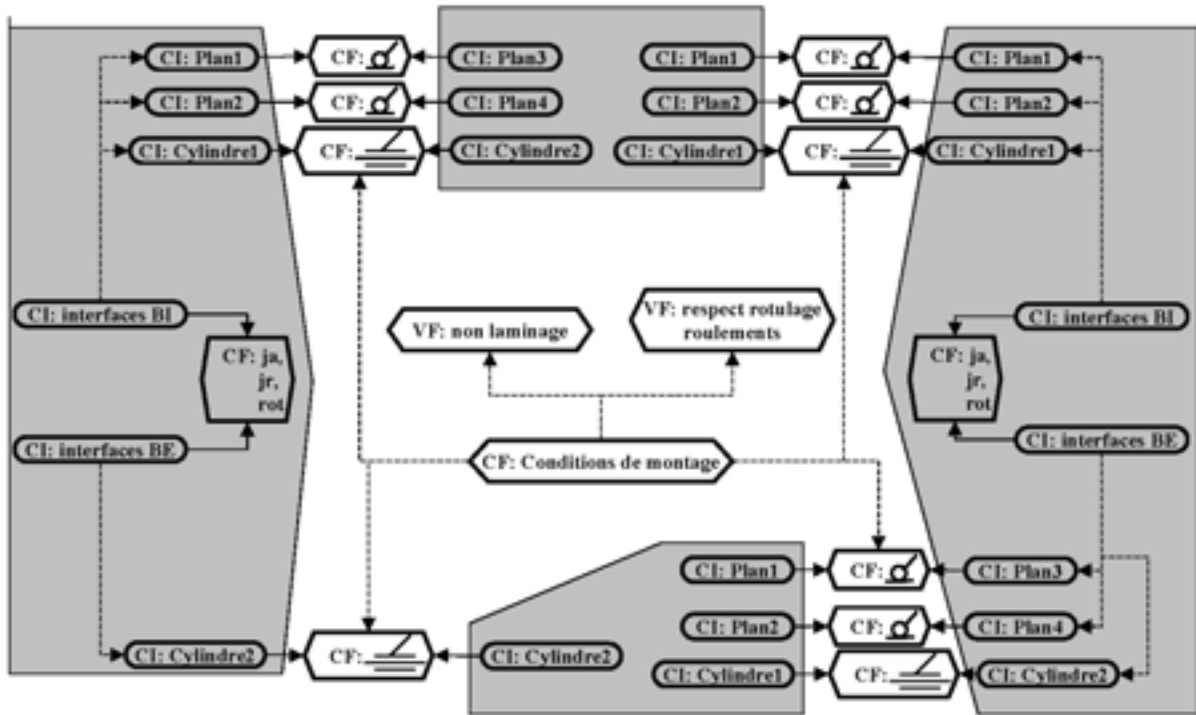


Figure IV-13 : Description des conditions de montage liées au tolérancement

Pour la condition de non-laminage des portées de roulement, le sous-graphe correspondant est décrit (Figure IV-14) et le résultat correspondant est la définition de spécifications par dimension sur chaque portée. Pour la condition de respect des angles de rotulage maximum des roulements, la boucle influente vis à vis de cette condition contient les portées cylindriques de l'arbre et du bâti et donne lieu à des spécifications de rectitude d'axe en zone commune entre ces éléments géométriques (Figure IV-15). Les spécifications géométriques correspondant à chaque condition fonctionnelle (non-laminage et respect des angles de rotulage) sont décrites dans le modèle produit comme des sous-fonctions des conditions de montage. Par conséquent nous pouvons à n'importe quel moment du cycle de conception du produit savoir de quelle fonction proviennent les spécifications géométriques ce qui assure la traçabilité des spécifications mais aussi de distinguer les spécifications géométriques découlant du respect d'une condition géométrique de celles provenant de l'intégration d'un composant standard.

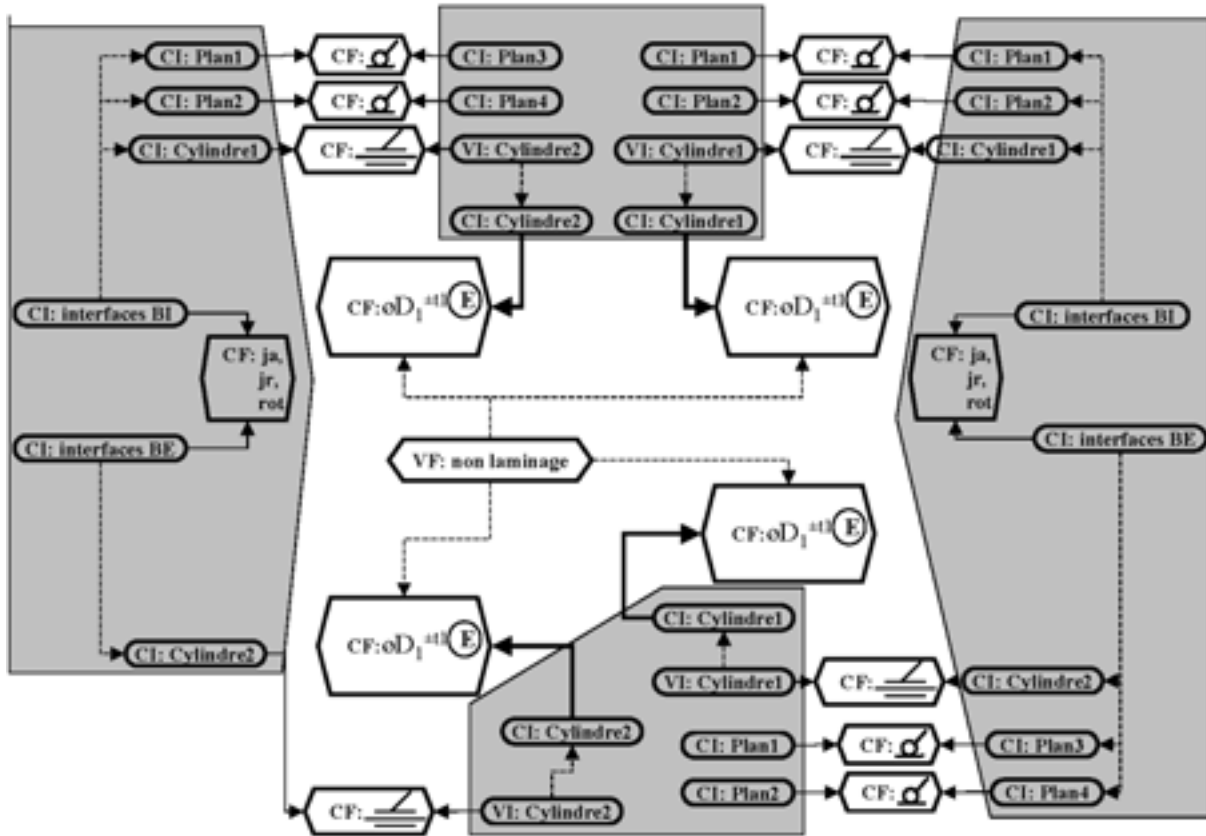


Figure IV-14 : Respect de la condition de non-laminage des portées de roulements

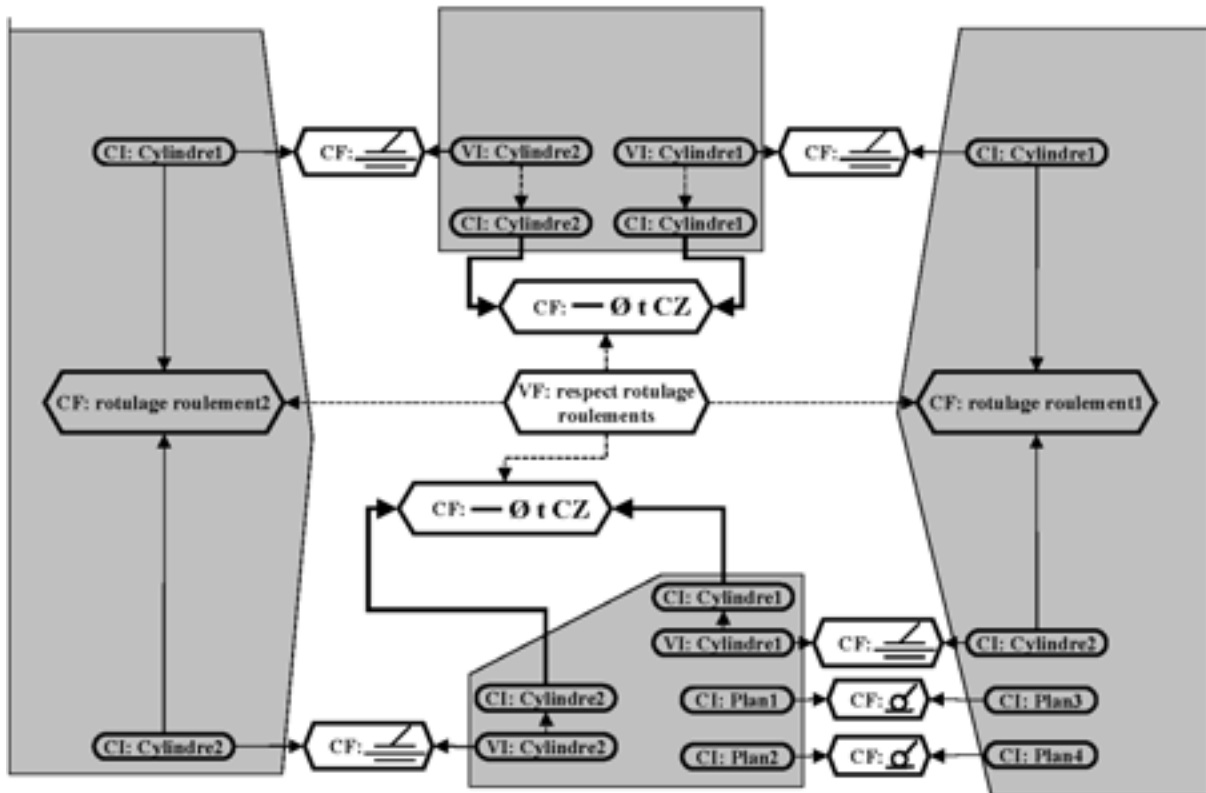


Figure IV-15 : Respect des angles de rotulage maximum

Le respect de l'ensemble des conditions de montage des roulements sur l'arbre peut être représenté graphiquement sur le modèle nominal.

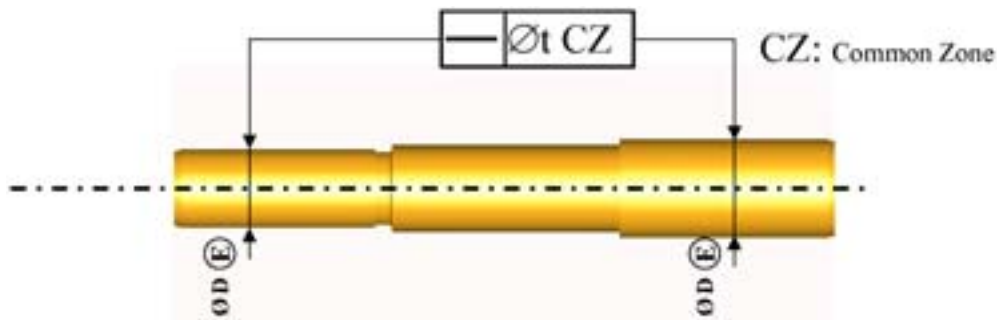


Figure IV-16 : Cotation de l'arbre induite par l'intégration des roulements à billes

IV.2.3 Aide au choix de solutions techniques

Dans les paragraphes précédents, nous avons montré comment décrire des alternatives de conception. De plus nous avons montré que l'intégration de composants standards dans la description d'un produit implique la description de spécifications géométriques spécifiques à ce composant.

Le but de ce paragraphe est de montrer que la description des alternatives de conception et la notion de composants standards peuvent apporter une aide au concepteur pour choisir la solution optimale en terme de spécifications géométriques.

Pour illustrer l'aide apportée au concepteur nous utiliserons l'exemple de la transmission de puissance du malaxeur entre le moteur et le réducteur. L'alternative de conception choisie est d'utiliser soit une transmission de puissance par poulie-courroie soit par engrenage. Ces deux solutions techniques entraînent deux schémas de tolérancement distincts qui permettent au concepteur de faire le choix de la solution la moins contraignante au vue des spécifications induites par ces deux solutions techniques.

Dans un premier temps nous décrivons à l'aide du modèle produit les deux alternatives de conception répondant à la fonction « adapter le taux de rotation » (Figure IV-17).

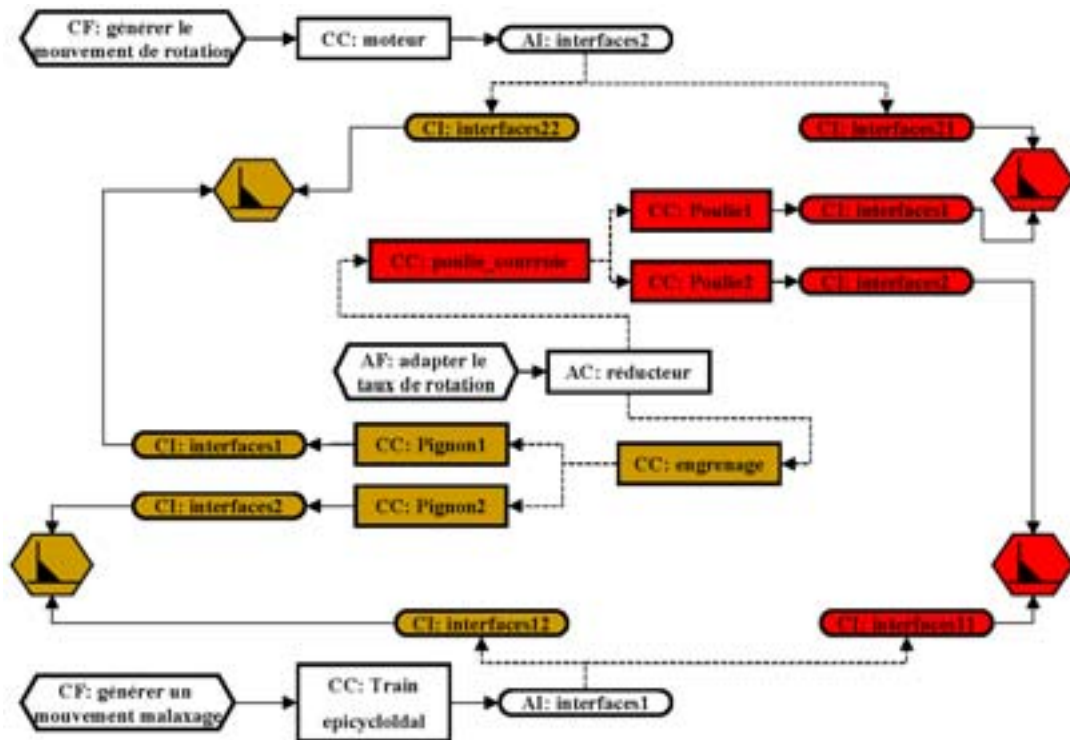


Figure IV-17 : Alternatives de la fonction adapter le taux de rotation

Les composants standards garantissant l'alternative à la fonction adapter le taux de rotation étant intégrés dans la description du produit, nous avons montré au paragraphe précédent que l'intégration de composants standards implique le respect de spécifications géométriques spécifiques. Pour l'alternative correspondant à l'utilisation d'une transmission par poulie-courroie, il faut garantir que les plans médians des gorges des deux poulies soient coplanaires. Cette condition géométrique peut être décrite dans le modèle produit par une spécification de planéité en zone commune entre les plans médians de gorges. Pour l'alternative correspondant à l'utilisation d'engrenages nous devons garantir la position et l'orientation des deux dentures des pignons. Pour décrire cette condition géométrique dans le modèle produit nous plaçons une spécification de localisation entre les interfaces des pignons correspondant aux éléments de situation des dentures.

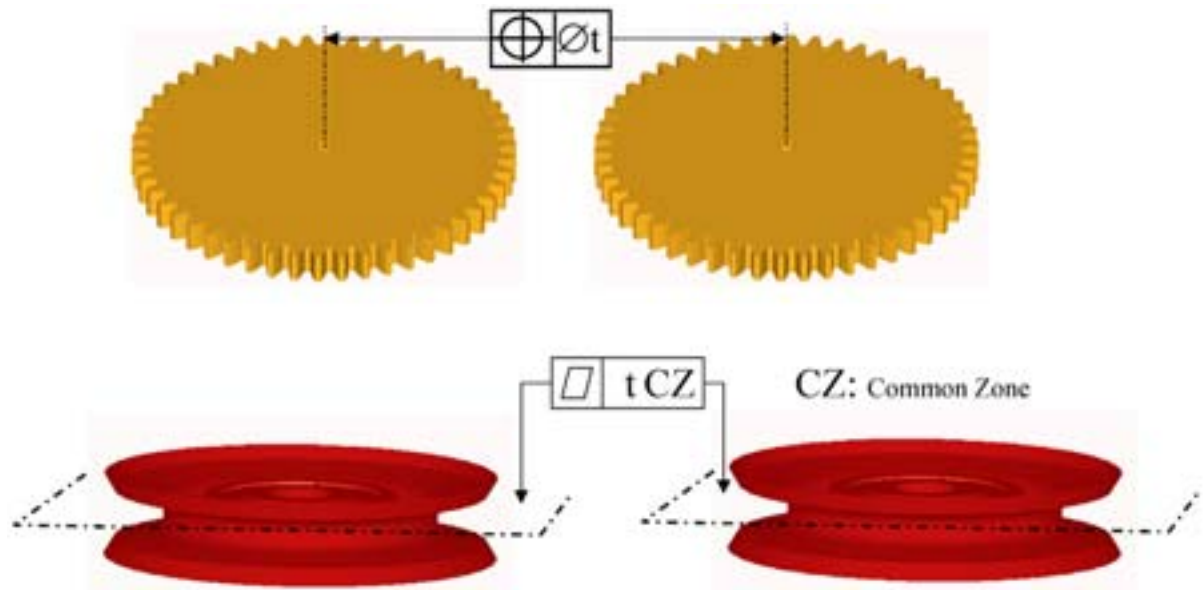


Figure IV-18 :Description des spécifications induites par les poulies et les pignons

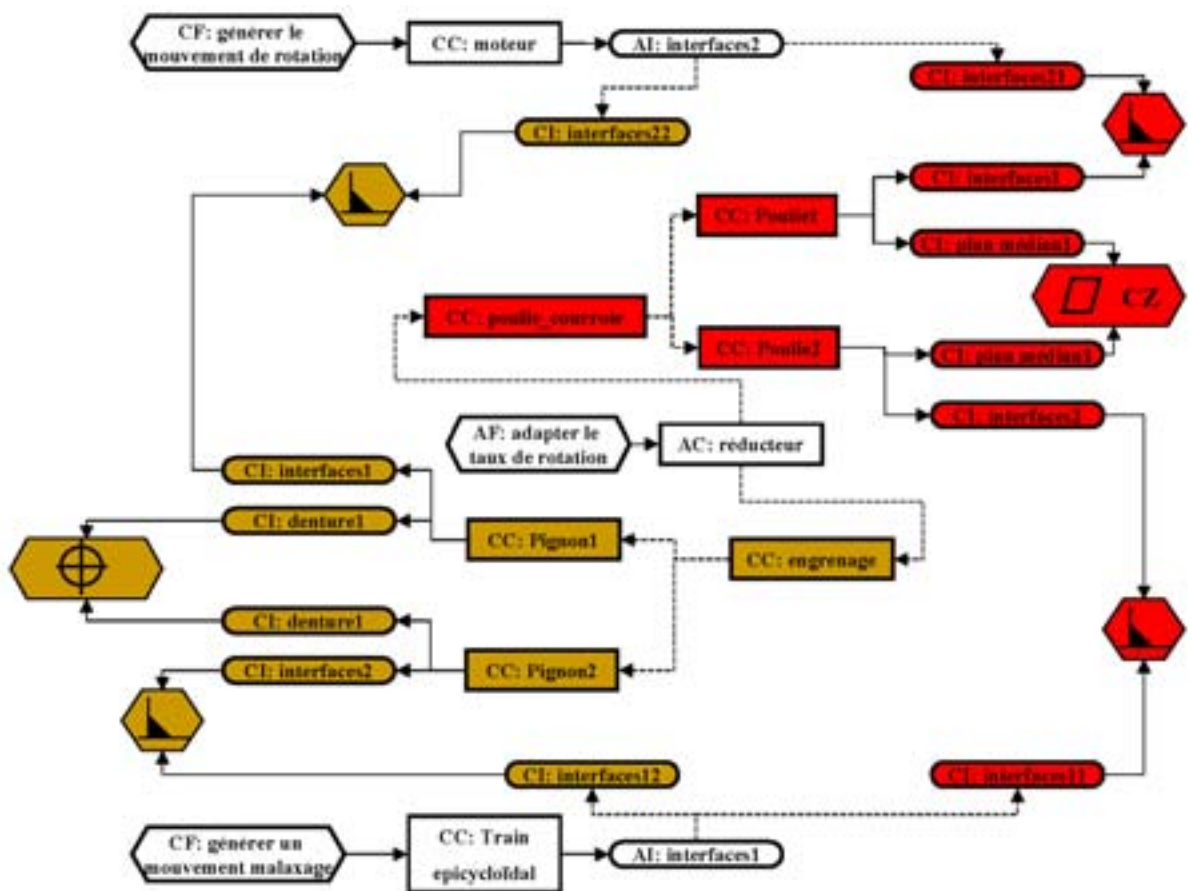


Figure IV-19 : Description du schéma de tolérancement lié à chaque alternative de conception

Dans le cas de l'exemple traité ci-dessus, le concepteur est aidé dans le choix d'une solution optimale. En effet si le couple à transmettre entre le moteur et le réducteur n'est pas trop important, il aura intérêt à privilégier la solution par poulie-courroie qui est la moins contraignante en terme de schéma de spécifications. Alors que la solution par engrenages impose que l'on garantisse la localisation des deux dentures de pignons, la transmission par poulie-courroie est garantie si l'on contraint seulement les plans médians des gorges des poulies à être coplanaires.

IV.3 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence que la structure de données proposée permet, dans le cadre de l'expertise tolérancement géométrique, de faciliter la traçabilité des spécifications géométriques au cours du processus de conception du produit. A tout moment le lien entre les fonctions de haut niveau (issues du cahier de charges) et les spécifications géométriques sur les pièces est maintenu. De plus nous avons montré que la notion de composant standard présentée au chapitre 3 permet de distinguer les spécifications induites par l'intégration d'un composant standard de celles issues du transfert des conditions géométriques au cours du processus de conception.

Enfin la description des alternatives de conception permet d'envisager plusieurs solutions techniques qui impliquent différents schémas de tolérancement. Cette prise en compte des schémas de tolérancement alternatifs permet d'apporter une aide au concepteur dans le choix de la solution optimale. Nous montrons par conséquent, contrairement aux outils commerciaux (Meca Master par exemple [CLOZEL, 2001]), que l'expertise tolérancement géométrique peut intervenir plus tôt dans le processus de conception d'un produit.

Conclusion générale
et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté s'intègre dans une activité de conception collaborative. Dans ce type d'activité de conception il est nécessaire de faciliter le dialogue entre les acteurs du processus de conception d'un produit. Ceci est d'autant plus important que les acteurs intervenant sur le produit sont répartis sur différents sites. Pour permettre le dialogue entre ces acteurs, nous avons présenté une structure de données permettant de décrire dans un même modèle la totalité des informations liées au produit. La structure de données est basée sur trois entités : le composant, l'interface et la fonction. Grâce à ces entités, aux liens et aux opérations sur les entités, les concepteurs peuvent à la fois représenter la décomposition structurelle et fonctionnelle d'un produit. Dans le cadre de la conception innovante de produits, il est également nécessaire de décrire les différentes alternatives de conception. La solution optimale de conception n'étant pas connue a priori, le modèle produit présenté permet de décrire des familles de solutions. De plus la structure produit mise en place permet de mémoriser l'historique de conception du produit tant au niveau fonctionnel que structurel. La traçabilité des informations produit ainsi que la description des alternatives de conceptions sont les deux atouts majeurs que nous avons mis en avant pour répondre aux attentes des pratiques de conceptions actuelles qui sont multi-sites et multi-acteurs.

Parmi les expertises intervenant dans le processus de conception de produit nous nous sommes focalisés sur l'expertise « tolérancement géométrique ». Une formalisation de l'expertise a été présentée au travers des modèles de description des spécifications géométriques et des outils de transfert de spécifications géométriques. Concernant l'activité « transfert de spécifications géométriques », nous nous sommes attachés à décrire les informations nécessaires à cette activité, les activités influentes sur cette expertise ainsi que les données de sortie de l'activité. En utilisant les outils commerciaux de transfert de spécifications géométriques, nous avons constaté que la traçabilité des résultats au cours de l'activité n'est souvent pas garantie du fait de l'hétérogénéité des modèles utilisés par les différents outils.

Etant donné que le modèle produit présenté permet d'assurer la pérennité des données au cours du processus de conception, nous avons présenté comment organiser les données liées au tolérancement géométrique dans le but d'assurer la traçabilité des conditions géométriques des fonctions du cahier des charges jusqu'aux spécifications géométriques. De plus, de nombreuses fonctions d'un mécanisme sont assurées par des composants standards cependant les outils actuels de description de produits (modeleurs CAO) proposent une description exhaustive de la géométrie des composants standards mais sont très pauvres concernant la description des fonctions qu'ils remplissent. A partir des entités de base du modèle produit nous avons proposé une modélisation des composants standards en décrivant à la fois leur géométrie, leur fonctionnalité et également les spécifications géométriques induites par leur intégration dans la description du produit. La gestion des alternatives dans la structure de données permet également de décrire des schémas de tolérancement liés soit à des alternatives fonctionnelles de conception soit à des alternatives de choix de composants standards. La comparaison des schémas de tolérancement de chaque alternative peut être une aide au concepteur dans le choix d'une solution de conception optimale.

Pour vérifier les résultats de ce travail de recherche plusieurs exemples ont été traités pour démontrer la possibilité d'intégrer et d'assurer la traçabilité des spécifications géométriques. Nous avons aussi montré comment la comparaison de schémas de tolérancement induits par des alternatives de conception peut être une aide au concepteur. Par la formalisation de la notion de composant standard nous avons montré comment décrire les spécifications induites par leur intégration dans la description d'un produit.

Les outils informatiques qui ont été développés sont :

- le noyau de la structure de données. Ce développement informatique a été réalisé par la société Open CASCADE SA. L'exemple du montage de la crémaillère sur la colonne est décrit ci-dessous Figure V -20,

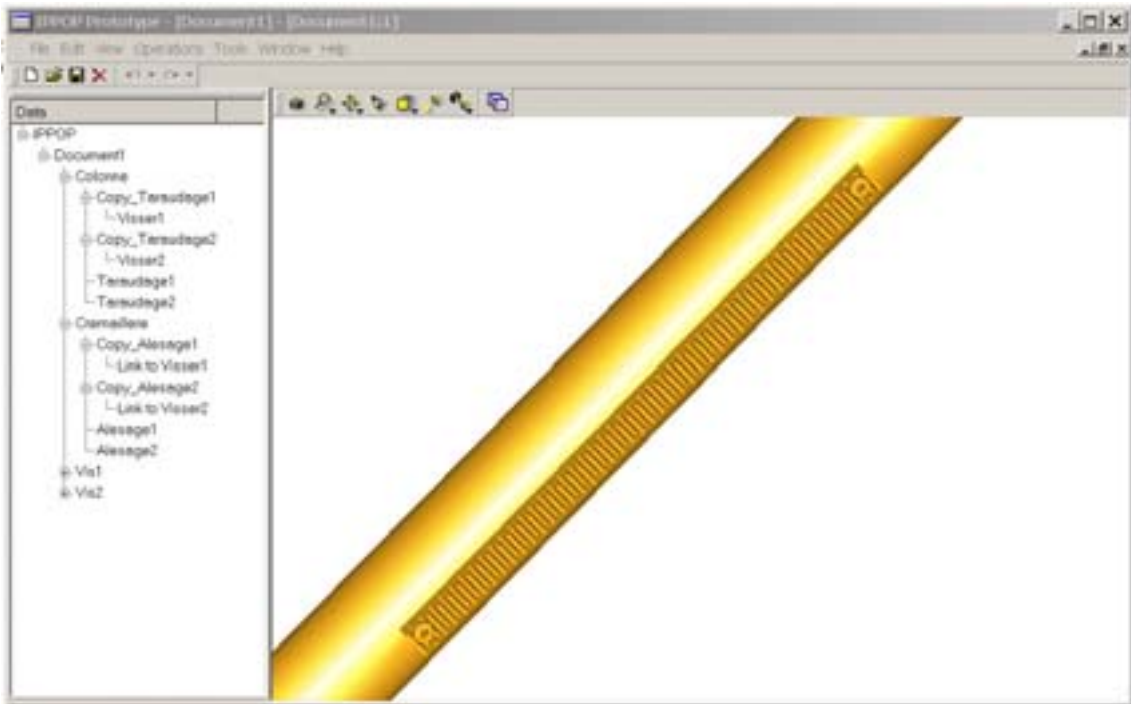


Figure V-20 : Prototype de l'application IPPOP

- des outils de transfert de spécifications par des opérations sur les polytopes ainsi que des outils de représentation graphique des spécifications géométriques ont été développés au sein du laboratoire dans l'atelier logiciel Open CASCADE. Dans la figure ci-dessous nous avons habillé le modèle CAO de la colonne avec les spécifications géométriques nécessaires à l'assemblage de la crémaillère sur la colonne Figure V-21.

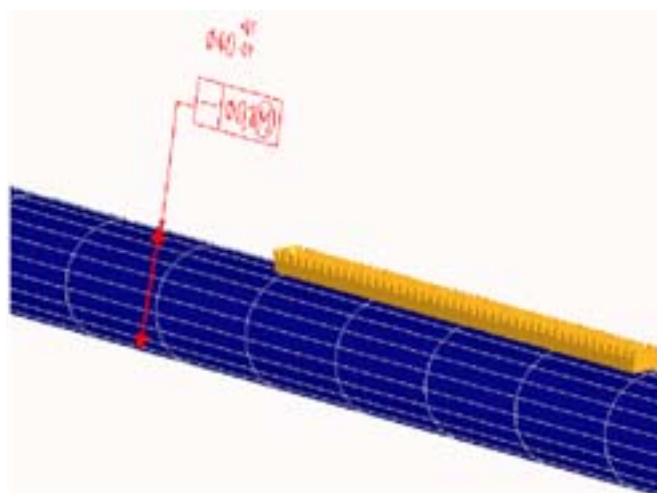


Figure V-21 : Habillage du modèle CAO

Les perspectives à ce travail sont d'une part, la prise de la hiérarchisation des spécifications géométriques. En effet toutes les spécifications géométriques répondant à une fonction n'ont pas la même influence. Les travaux [THORNTON, 1999] permettent de hiérarchiser l'importance des spécifications à l'aide du concept de « key characteristics ».

D'autre part nous souhaiterions approfondir la description du lien qui existe entre les expertises « tolérancement géométrique » et « fabrication ». En effet les spécifications géométriques d'un produit ont un coût de fabrication. La prise en compte du lien entre spécifications géométriques et coût de fabrication peut aussi apporter une aide au concepteur dans le choix de la solution de conception optimale.

Enfin nous voudrions étendre la notion de composant standard à la réutilisation de conceptions déjà effectuées. Lorsqu'un mécanisme répondant à une fonction précise a déjà été conçu et spécifié, il est souvent inutile de le décrire à nouveau de manière exhaustive dans un nouveau produit. De plus en plus d'entreprises, dans les domaines de l'aéronautique et de l'automobile, jouent le rôle d'intégrateur. La notion élargie de composant standard permet, dans le cadre de l'entreprise étendue, de spécifier aux sous-traitants le périmètre structurel mais aussi fonctionnel du produit à concevoir.

Bibliographie

Bibliographie :

Conférences et articles

- [ANSELMETTI et al, 2003] B. Anselmetti et K. Mawussi, " *Computer aided tolerancing using positioning features.*" Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 3, N° 1, pp. 15-21, 2003.
- [ARZUR et al, 2000] J. Arzur, M. Lombard et A. Bernard, " *Correspondance entre caractéristiques pour une application multi-vues, oriente metier, dans un modele de pièce mécanique.*" 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Montréal (Canada), 2000.
- [BALLOT, 1995] E. Ballot, " *Lois de comportement géométrique des mécanismes pour le tolérancement.*", Thèse de Doctorat de l'ENS Cachan, 1995.
- [BALLOT et al, 1997] E. Ballot et P. Bourdet, " *A computation method for the consequences of geometric errors in mechanisms.*" 5th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Toronto (Canada), 27-avr, 1997.
- [BALLU et al, 1995] A. Ballu et L. Mathieu, " *Univocal expression of functional and geometrical tolerances for design, manufacture and inspection.*" 4th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing , Tokyo (Japon), 1995.
- [BALLU et al, 1999] A. Ballu et L. Mathieu, " *Choice of functional specifications using graphs within the framework of education.*" 6th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Enschede (NL), 1999.
- [BOOCH et al, 2003] G. Booch, J. Rumbaugh et I. Jacobson, " *Le guide de l'utilisateur UML.*" Editions Eyrolles, ISBN : 2-212-09103-6, 2003.
- [BOURDET et al, 1995] P. Bourdet, L. Mathieu, C. Lartigue et A. Ballu, " *The concept of the small displacement torsor in metrology.*" IEAMT in Metrology, Septembre, 1995.

- [BRADLEY et al, 1998] H. D. Bradley et P. G. Maropoulos, " *A relation-based product model for computer-supported early design assessment.*" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 76, pp. 88-95, 1998.
- [CHASE et al, 1997] K. W. Chase et S. P. Magleby, " *A comprehensive system for computer aided tolerancing analysis of 2D and 3D mechanical assemblies.*", 5th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Toronto (Canada), 27-avr, 1997
- [CLEMENT et al, 1991] A. Clement, A. Desrochers et A. Riviere, " *Theory and practice of 3D tolerancing for assembly.*", 2nd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Penn State (USA), 1991.
- [CLEMENT et al, 1995] A. Clement, A. Riviere et P. Serre, " *A declarative information model functional requirements.*", 4th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing , Tokyo (Japon), 1995.
- [CLOZEL, 2001] P. Clozel, " *3D tolerances analysis, from preliminary study*", 7th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing , Cachan (France), 2001.
- [CONSTANT, 1996] D. Constant, " *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques.*", Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier- Grenoble I, 1996.
- [DANTAN, 2000] J. Y. Dantan, " *Synthèse des spécifications géométriques: modélisation par calibre à mobilités internes.*" Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux 1, 2000.
- [DANTAN et al, 2005] J. Y. Dantan, T. Landmann, A. Siadat et P. Martin, " *Information modeling to manage tolerances during product and process design.*", 9th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing , Tempe (Arizona USA), 2005.
- [DEBARBOUILLE, 1998] G. Debarbouille. " *Une structure abstraite de définition d'ensemble*", Rapport interne EADS-Matradatavision, 1998.
- [DUFAURE et al, 2003] J. Dufaure et D. Teissandier, " *Geometric tolerancing from conceptual to detail design.*", 8th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte (North Carolina, USA), 2003.

-
- [EYNARD et al, 1997] B. Eynard, P. Girard et D. Chen, " *Un modèle produit support à la conduite de processus de conception.*" 2ème Congrès International Franco-Québécois de Génie Industriel, Albi (France), 1997.
- [FLEMING, 1987] A. Fleming, " *Analysis of uncertainties and geometric tolerances in assemblies of parts.*", PhD Thesis of the University of Edinburgh, 1987.
- [FLEMING, 1988] A. Fleming, " *Geometric relationships between toleranced features.*" Artificial Intelligent, Vol. 37, pp. 403-412, 1988.
- [GAUNET, 1994] D. Gaunet, " *Modèle formel de tolérancement de position. Contributions à l'aide au tolérancement des mécanismes en CFAO.*", Thèse de Doctorat de Doctorat de l'ENS Cachan, 1994.
- [GAUNET et al, 1994] D. Gaunet et A. Clement, " *Modèle formel de tolérancement de position. Application à l'analyse des tolérances.*" Seminaire TEC, 1994.
- [GIORDANO, 1997] M. Giordano, " *Modèle de détermination des tolérances géométriques.*", 5^{ème} Colloque national sur la conception intégrée PRIMECA97, La Plagne (France), 1997.
- [GIORDANO et al, 2005] M. Giordano, S. Samper et J. P. Petit, " *Tolerance analysis and synthesis by means of deviation domains, axi-symmetric cases.*", 9th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Phoenix (Arizona USA), 2005.
- [GOSSARD et al, 1988] D. C. Gossard, R. P. Zuffante et H. Sakuria, " *Representing dimensions, tolerances, and features in MCAE Systems.*" IEEE, Vol. 1, pp. 51-59, 1988.
- [GRABOWSKI et al, 1999] H. Grabowski, R. S. Lossack et E. El-Mejbri, " *Towards a universal design theory.*" 6th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Enschede (NL), pp. 47-55, 1999.
- [HERVE, 1976] J. M. Herve, " *La geometrie du groupe des déplacements appliquée à l'analyse cinématique des mécanismes.*", thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Paris VI, 1976.
-

- [JIAN et al, 2005] A. D. Jian, G. Ameta, J. K. Davidson et J. J. Shah, " *Tolerance analysis and allocation using tolerance-maps for a power saw assembly.*" 9th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Phoenix (Arizona USA), 2005.
- [LEGOFF et al, 1999] O. Legoff, F. Villeneuve et P. Bourdet, " *Geometrical tolerancing in process planning: a tridimensional approach.*" Conference IMechE, 1999.
- [LINARES, 1996] J. M. Linares, " *Contribution à l'étude de la cotation fonctionnelle par une approche systémique.*", Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1996.
- [MATHIEU et al, 2003] L. Mathieu et A. Ballu, " *GEOSPELLING: a common language for geometric product specification and verification to express method uncertainty.*" 8th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte (North Carolina, USA), 2003.
- [MAWUSSI et al, 2004] K. Mawussi, B. Anselmetti et N. Anwer, " *Tolerance Specification data model for design and manufacturing.*" 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Bath (UK), 5-7 April, 2004.
- [NOEL et al, 2004] F. Noel, L. Roucoules et D. Teissandier, " *Specification of product modelling concepts dedicated to information sharing in a collaborative design context.*" 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Bath (UK), 5-7 April, 2004.
- [PAIREL et al, 2005] E. Pairel, P. Hernandez et M. Giordano, " *Virtual gauges representation for geometrical tolerances in CAD-CAM systems.*" 9th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Phoenix (Arizona USA), 2005.
- [PETIT et al, 2003] J. P. Petit, S. Samper et M. Giordano, " *Minimum clearance for tolerancing analysis of a vacuum pump.*" 8th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte (North Carolina USA), 2003.
- [PINO, 2000] L. Pino, " *Modélisation et analyse cinématique des tolérances géométriques pour l'assemblage de systèmes mécaniques.*" Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 2000.

-
- [REQUICHA, 1983] A. A. G. Requicha, " *Toward a theory of geometric tolerancing.*" The International journal of Robotics Research, Vol. 2, pp. 45-60, 1983.
- [RIVIERE, 1993] A. Riviere, " *La géométrie du groupe des déplacements appliquées à la modélisation du tolérancement.*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale Paris, 1993.
- [ROBINSON, 1997] D. M. Robinson, " *Geometric tolerancing for assembly with maximum material parts.*", 5th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Toronto (Canada), 27-avr, 1997
- [ROY et al, 1999] U. Roy et L. Bing, " *3D variational polyhedral assembly configuration.*", 6th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Enschede (NL), 22-24 March, 1999.
- [SALOMONS et al, 1996] O. W. Salomons, H. J. Jonge Poerink, F. J. Haalboom, F. Van Slooten, H. Van, F.J.A.M. et H. J. J. Kals, " *A computer aided tolerancing Tol I: Tolerance specification.*" Computer in Industry, Vol. 31, pp. 161-174, 1996.
- [SERRE et al, 2001] P. Serre et A. Riviere, " *Analysis of functional geometrical specification.*", 7th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Cachan (France), 2001.
- [SODHI et al, 1994] R. Sodhi et J. Turner, " *Relative positioning of variational part models for design analysis.*" Computer Aided Design, Vol. 26, pp. 366-378, 1994.
- [SUMMERS et al, 2001] J. D. Summers, N. Vargas-Hernandez, Z. Zhao, J. J. Shah et Z. Lacroix, " *Comparative study of representation structures for modeling function and behavior of mechanical devices.*" DETC Computers in Engineering, Pittsburgh, September 9-12, 2001.
- [TEISSANDIER, 1995] D. Teissandier, " *L'Union Pondérée d'Espaces de Liberté : un nouvel outil pour la cotation fonctionnelle tridimensionnelle.*", Thèse de Doctorat de l'Université Bordeaux 1, 1995.
- [TEISSANDIER et al, 1999a] D. Teissandier, Y. Couetard et A. Gerard, " *A computer aided tolerancing model: Proportioned Assemblies Clearance Volume.*" Computer Aided Design, Vol. 31, pp. 805-817, 1999.
-

- [TEISSANDIER et al, 1999b] D. Teissandier, V. Delos et Y. Couetard, " *Operations on polytopes: application to tolerance analysis.*" 6th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Enschede (The Netherlands), Mars 22-24, 1999.
- [TEISSANDIER et al, 2002] D. Teissandier et J. Dufaure, " *Tolerance synthesis with polytopes: Application to radial ball bearing arrangements.*", 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Clermont Ferrand (France), 2002.
- [THIEBAUT et al, 1999] F. Thiebaut et P. Bourdet, " *Specification tridimensionnelle, de la specification fonctionnelle à la specification geometrique.*", 6eme colloque national sur la conception mécanique intégrée PRIMECA99, la plagne (France), 1999.
- [THORNTON, 1999] A. Thornton, " *Variation risk management using modeling and simulation.*" Journal of Mechanical Design, Vol. 121, pp. 297-304, 1999.
- [TICHKIEWITCH et al, 1995] S. Tichkiewitch, E. Chapa et P. Belloy, " *Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée.*", Congrès International de Génie Industriel, Montréal, 1995.
- [TURNER, 1990] J. Turner, " *Relative positioning of parts in assemblies using mathematical programming.*" Computer Aided Design, Vol. 22, pp. 394-400, 1990.
- [TURNER, 1993] J. Turner, " *A feasibility space approach for automated tolerancing.*" Journal of Mechanical Design, Vol. 115, pp. 341-346, 1993.
- [VIGNAT et al, 2005] F. Vignat et F. Villeneuve, " *Simulation of the manufacturing process (2). Analysis of its consequences on a functional tolerance.*", 9th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Phoenix (Arizona USA), 2005.
- [VILLENEUVE et al, 2005] F. Villeneuve et F. Vignat, " *Simulation of the manufacturing process (1). Generic resolution of the positioning problem.*", 9th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Phoenix (Arizona USA), 2005.
- [WU et al, 1988] Z. Wu et W. H. Elmaraghy, " *Evaluation of cost tolerance algorithms for design tolerance analysis and synthesis.*" Journal of Manufacturing Systems, Vol. 1, pp. 168-179, 1988.

[ZHAO et al, 2003] X. Zhao, T. M. Kethara Pasupathy et R. G. Wilhelm, " *Representation of geometric Tolerance Information in Integrated Measurement Processes with XML.*" 8th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Charlotte (North Carolina, USA), 28-29 April, 2003.

Références ISO et AFNOR

[ISO 1101, 1983] ISO 1101, " *Tolérancement géométrique - Généralités, définitions, symboles - Indications sur les dessins.*", 1983

[ISO 5459, 1981] ISO 5459, " *Références et systèmes de référence pour tolérances géométriques.*", 1981

[ISO 8015, 1985] ISO 8015, " *Principes de tolérancement de base.*", 1985

[ISO 3952, 1991] ISO 3952, " *Kinematic diagrams-Graphical symbols- Part 1.*", 1991.

[ISO/TC213/WG14/N187, 2004] ISO/TC213/WG14/N187, " *Integration of ISO/TC213/WG14 concepts in the French project IPPOP.*", Paris, 2004.

[NFX50-151, 1991] NFX50-151. " *Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle, Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel.*", 1991.