



HAL
open science

Intégration Produit / Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques.

Alain Etienne

► **To cite this version:**

Alain Etienne. Intégration Produit / Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques.. Génie logiciel [cs.SE]. Université de Metz, 2007. Français. NNT : . tel-00224938

HAL Id: tel-00224938

<https://theses.hal.science/tel-00224938>

Submitted on 30 Jan 2008

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

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

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ PAUL VERLAINE - METZ

ÉCOLE DOCTORALE IAEM LORRAINE - DFD AUTOMATIQUE

Par Alain ETIENNE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPECIALITÉ : Automatique - Productique

Intégration Produit / Process par les concepts d'activités et de caractéristiques clés - Application à l'optimisation de l'allocation des tolérances géométriques.

Soutenance le : **15 Octobre 2007**

Commission d'examen formée de :

Mme. Zohra CHERFI, Professeur, ODIC, UTC
M. Bernard ANSELMETTI, Professeur, LURPA, IUT de Cachan
M. Maurice PILLET, Professeur, SYMME, IUT d'Annecy
M. Jean-Pierre NADEAU, Professeur, TREFLE, ENSAM de Bordeaux
M. Gabriel RIS, Professeur, CRAN, Université Henri Poincaré Nancy I
M. Patrick MARTIN, Professeur, LGIPM, ENSAM de Metz
M. Jean-Yves DANTAN, Maître de Conférences, LGIPM, ENSAM de Metz
M. Ali SIADAT, Maître de Conférences, LGIPM, ENSAM de Metz

Présidente
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Encadrant
Encadrant



Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique
ENSAM, CER de Metz

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse a été réalisé au sein de l'équipe IFAB du Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique (LGIPM), dirigée par le Professeur Patrick MARTIN. C'est grâce à lui, à ses remarques, conseils et à son soutien que j'ai pu débiter dans le monde de la recherche dans d'excellentes conditions. Je l'en remercie grandement !

Mes remerciements vont également à Ali SIADAT et Jean Yves DANTAN qui me suivent depuis un certain projet *d'assemblage de produits manufacturés en 6G02*. Je ne vous remercierai jamais assez pour ces nombreuses années de collaborations (PFE, DEA et thèse), pour m'avoir accordé votre confiance et pour m'avoir transmis votre passion pour l'enseignement et la recherche. Je souhaite à mes successeurs autant de plaisir que j'en ai eu de travailler avec vous !

Je remercie vivement les Pr. Bernard ANSELMETTI et Pr. Maurice PILLET, pour m'avoir accordé de leur temps durant les vacances d'été, afin d'évaluer mes travaux de thèse en tant que rapporteurs. Je remercie également les membres du jury de thèse : Pr. Zohra CHERFY, Pr. Jean-Pierre NADEAU et Pr. Gabriel RIS, de m'avoir fait l'honneur de leur présence : leurs remarques et questions, très enrichissantes, me motivent à poursuivre mon travail de recherche.

Un grand merci à l'ensemble de mes camarades de la discipline Math/Info de l'ENSAM de Metz (Aamer, Alaa, Alexandre, Jean-Luc, Jean-Paul, Jérôme, Magali) qui ont su établir une ambiance de travail à la fois conviviale et studieuse... Je leur souhaite bon courage pour la suite de leurs travaux ; le monde de la recherche est si petit que je suis certain que nous nous retrouverons bientôt !

Je remercie également ma famille et plus particulièrement mes parents, qui, depuis la Guyane n'ont cessé de me soutenir : un grand merci à ma correctrice de fautes d'orthographe pour sa patience !

Cette page de remerciements ne pourrait pas se conclure sans que je remercie vivement l'ensemble du personnel de l'ENSAM, les membres honoraires de la salle de convivialité (la liste est trop longue pour figurer ici :)), les Mouths (Val'mouth, Xav'mouth, Nico'Mouth, Cyril'Mouth), les membres de la Bamboü, les étudiants et leurs « questions bêtes » pas si bêtes que ça, l'ensemble de mes camarades de la promotion Me200 et leur célèbre question : « Quoi tu es en thèse ? Mais tu comptes travailler quand ? » et tous ceux que j'ai oublié de citer ici...

Un grand merci à vous tous !!!

Glossaire

ABTA : Activity Based Tolerance Allocation - Traduction : Allocation de tolérances basée sur le concept d'activités.

ABC : Activity Based Costing.

Activité : Ensemble distinct d'actions identifiées, observables en tant que tel, et exécutées par une ou plusieurs ressources.

Assemblabilité : Aptitude d'un produit à autoriser la connexion physique de ses composants.

Capabilité : Aptitude d'un processus ou d'un procédé à produire les caractéristiques sélectionnées pendant une période suffisamment longue, avec un taux théorique de rebuts inférieur aux exigences, internes à l'entreprise ou contractuelles.

Caractéristique Clé (Key Characteristic) : "The product valuable property and manufacturing process valuable property that significantly impact the final cost, performance, or safety of the product when the key characteristics vary from their target" [Dantan 2006a].

Connaissance : La connaissance est le résultat d'une interaction entre des informations et le système d'interprétation du domaine d'application donné. Elle peut être modélisée par le triplet information / utilisateur / domaine et peut être décomposée en trois catégories : les savoirs formalisés, les savoirs formalisables et les savoirs implicites [Labrousse 2004].

Coût : Charge ou dépense supportée par un intervenant économique par suite de la production ou de l'utilisation d'un produit.

DFM : Design For Manufacturing.

Entité coût : Regroupement de coûts associés à la consommation de ressources par une activité. La condition fondamentale tient à l'homogénéité des ressources consommées par l'entité coût, ce qui permet de leur associer un inducteur [H'Mida 2002].

Exigence : Demande formelle, exprimée en terme qualitatif et/ou quantitatif de provenance externe (par exemple l'expression des besoins d'un client) ou interne (par exemple exigences propres à un métier).

Exigence géométrique : Exigence fonctionnelle exprimée sous forme géométrique sur une ou plusieurs pièces élémentaires ou sur les composants d'un produit.

Fonction : Action ou réaction d'un produit ou de l'un de ses composants, exprimée exclusivement en terme de finalité. La totalité des fonctions décrit l'usage attendu du produit.

Gamme d'usinage : Ordre chronologique de l'ensemble des opérations d'usinage réalisant les différentes pièces composant le produit. Dans le cas de l'ABTA, une gamme de fabrication correspond à une liste ordonnée d'activités.

Gamme d'assemblage : Ordre chronologique de l'ensemble des opérations d'assemblage existant entre les composants du produit.

Opération (d'usinage) : Travail d'un outil qui réalise une unique forme géométrique [GAMA 1990].

Phase d'usinage : Succession de sous-phases réalisées sur une même machine, cellule ou îlot de fabrication [GAMA 1990].

Pièce : Composant mécanique du produit.

Posage / Entité de posage : Une entité de posage correspond à une surface de mise en position et de maintien en position de la pièce pendant l'usinage. Elles sont la représentation de la prise de pièce, et sont représentées par une géométrie de posage et un ensemble d'attributs qui sont intrinsèques à la prise de pièce ou dépendants de l'environnement dans lequel ces entités sont utilisées.

Pré-gamme (d'usinage) : Ebauche de gamme d'usinage identifiant principalement le séquençement des posages, les types de montages d'usinage, les types de machines-outils nécessaires à la réalisation des pièces.

Procédé : Moyen ou activité appliqué au produit, qui en modifie les caractéristiques.

Processus : Un processus est une organisation séquentielle, spatiale et hiérarchique d'activités faisant appel à des ressources et conduisant à des produits [Labrousse 2004]. Appliquée au cas de l'usinage le processus est vu comme une suite ordonnée interruptible de séquences d'usinage [GAMA 1990].

Produit : Ensemble de composants reliés entre eux et travaillant ensemble pour fournir les fonctions attendues par le client.

Rebut : Produit ayant fait l'objet d'une décision de destruction parce qu'il n'est pas conforme aux exigences fonctionnelles demandées et qu'il est, de ce fait, inutilisable et irrécupérable.

Séquence d'usinage : Suite ordonnée interruptible d'opérations d'usinage.

Sous-phase d'usinage : Processus d'usinage réalisé sans démontage de la pièce, ni transfert du couple Pièce / porte-Pièce d'une broche de machine à une autre [GAMA 1990].

Spécification : Condition sur une caractéristique.

Tolérance : Limites tolérées par une caractéristique.

Travail d'enveloppe : La forme de la génératrice de la surface correspond à l'enveloppe des positions successives de l'outil.

Travail de forme : La forme de la génératrice de la surface correspond à la forme de l'arête coupante de l'outil.

Variation : Phénomène tel que la valeur prise par une caractéristique n'est pas constante.

Table des matières

Introduction	9
Chapitre I “Design For Manufacturing” et Tolérancement	15
1 DFM - Diminution du coût.....	18
1.1. Estimation du coût.....	19
1.2. Discussion.....	30
2 Le concept de « KCs ».....	31
2.1. Caractéristiques clefs.....	31
2.2. Formalisation.....	33
3 Le tolérancement.....	35
3.1. Les deux approches.....	37
3.2. La synthèse des tolérances.....	38
4 Conclusion.....	52
Chapitre II Allocation des tolérances basée sur le concept d’activité (ABTA)	55
1 Allocation des tolérances - Problématique.....	60
1.1. Le coût comme indicateur de performance.....	62
1.2. Le coût pondéré qualité.....	63
2 Evaluation de l’indicateur d’efficacité - ABTA.....	65
2.1. Etape 1 : Synthèse descendante.....	66
2.2. Etape 2 : Analyse ascendante.....	68
3 Approche par activités.....	71
3.1. Activité de production.....	72
3.2. Activité de contrôle de conformité.....	73
3.3. Activités de retrait et de réajustement.....	74
3.4. De la méthode ABC à l’ABTA : Enrichissements.....	75
3.5. Analyse des causes de la non qualité prise en compte dans l’indicateur d’efficacité.....	76
3.6. Exemple.....	78
4 Modélisation de l’approche et enrichissement du modèle KC.....	80
5 Optimisation.....	85
5.1. Les méthodes d’optimisation.....	86
5.2. Algorithmes génétiques.....	90
5.3. Discussion.....	94
5.4. Application à l’optimisation des tolérances.....	95
6 Conclusions.....	97
Chapitre III Modèles et outils pour la sélection de processus de fabrication	99
1 Génération de processus.....	104
1.1. Génération par système expert.....	105
1.2. Sélection par programmation par contraintes.....	111
1.3. Bilan et remarques.....	115
1.4. L’approche développée par algorithme.....	115
1.5. Implémentation et résultats.....	129
2 Formalisation et capitalisation des connaissances.....	130

2.1. Formalisation des connaissances.....	130
2.2. Capitalisation des connaissances.....	136
2.3. Modélisation support de la sélection du processus dans l'environnement ABTA/Activités	137
2.4. Implémentation des interfaces de capitalisation.....	141
3 Conclusion.....	144
Chapitre IV Analyse des tolérances dans l'environnement ABTA	145
1 Modélisation du comportement géométrique avec défauts et techniques d'analyse des tolérances.....	148
1.1. Paramétrage.....	149
1.2. Modélisation du comportement géométrique.....	152
1.3. Techniques d'analyse des tolérances.....	158
2 Analyse des tolérances dans le cadre de l'ABTA	161
2.1. Evaluation des écarts par Monte Carlo	162
2.2. Etape 1 : Analyse au niveau Processus / Pièce.....	163
2.3. Etape 2 : Analyse au niveau Pièce / Produit.....	170
3 Conclusion.....	175
Conclusions.....	177
Bibliographie.....	181
Annexe - Mode d'emploi de l'application TolOptimizer	195
1.1. Pré-requis	195
1.2. Enrichissement des bases de données et de connaissances	195
1.3. Réglages	200
1.4. Exécution et résultats	202

Introduction

La conception d'un produit consiste à établir la définition de celui-ci, en satisfaisant des spécifications fonctionnelles, des critères de performances... des critères de « fabricabilité », de « réutilisabilité », « maintenabilité », de recyclage... Dans un contexte d'ingénierie intégrée, la notion d'intégration consiste à assurer la prise en compte de l'ensemble des contraintes du cycle de vie du produit, dès la phase de conception. L'intégration permet de réduire les coûts pour l'entreprise en concevant un produit plus facilement fabricable, réutilisable... En effet, les décisions prises lors de la conception influencent très fortement le coût de fabrication de celui-ci. Les choix opérés durant les étapes du processus de conception contraignent 70% du coût de fabrication. Il est donc important de considérer les contraintes de fabrication dès les premières étapes du processus de conception, d'identifier les paramètres pertinents influençant les performances du produit et son coût, puis de les évaluer de façon à assurer **l'optimisation globale du produit**.

Afin de réaliser cette intégration de nombreuses approches ont été développées. L'approche du moindre engagement est l'une d'elles (une définition de cette approche est proposée dans [Brissaud 1998]). Selon cette approche, il est nécessaire de recentrer la conception non plus autour de la définition géométrique du produit mais autour des savoir-faire des collaborateurs participant au projet. Cette approche propose donc que chaque activité d'expertise puisse choisir et valider ses solutions technologiques en limitant son engagement et donc en contraignant au minimum les autres domaines d'expertise. Cette approche est par exemple décrite et employée par L. Roucoules dans ses travaux, synthétisés dans l'ouvrage [Roucoules 2006].

Les objectifs de ces travaux de thèse s'inscrivent dans ceux des démarches d'intégration et de co-conception du produit et du processus de fabrication. Afin de mieux positionner nos travaux, il est intéressant de détailler leurs positions dans les différentes formalisations du processus de conception.

Il existe de nombreuses définitions et modélisations du processus de conception. La synthèse proposée par Scaravetti [Scaravetti 2004] et illustrée *Figure 1*, permettent de positionner le cadre de ces travaux de thèse dans le processus de conception du produit. Comme l'illustre cette figure, nous avons limité notre domaine d'étude aux interactions entre la conception du produit et sa fabrication en s'intéressant plus particulièrement aux relations entre la phase de conception détaillée du produit et la phase de conception préliminaire du processus. Ainsi, à chaque approche résumée dans la synthèse de la *Figure 1*, sont grisées les activités qui correspondent à notre cadre d'étude. Les étapes antérieures sont considérées comme des données d'entrée de ces travaux, qu'il faut néanmoins formaliser.

De plus, parmi l'ensemble des formalisations des démarches de conception, nous pouvons positionner nos travaux par rapport à la démarche décrite par [Troussier 2006], qui précise que la conception robuste d'un nouveau produit s'effectue de façon générale en trois phases :

- l'étape de définition du système ou produit : *solution design*. C'est à cette étape que la structure du produit est définie, et que certains choix technologiques sont effectués.

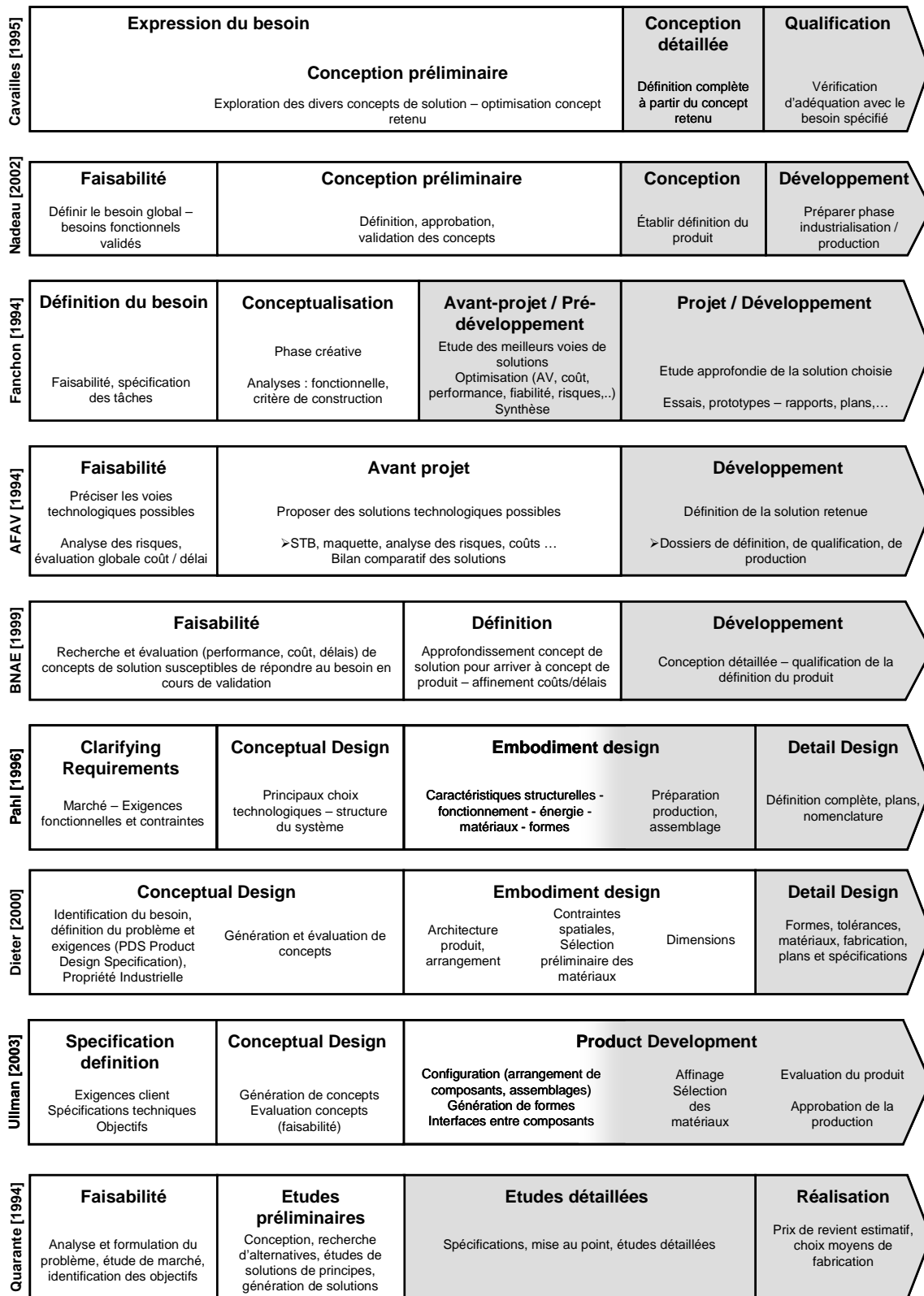


Figure 1 : Mise en parallèle des processus de conception [Scaravetti 2004]

- L'étape de détermination des paramètres : **parameter design**. Cette étape consiste à quantifier les paramètres de conception en optimisant sa robustesse tout en respectant les conditions fonctionnelles. Cette opération s'effectue dans l'hypothèse que le produit est libre de toutes perturbations.
- L'étape de détermination des tolérances : **tolerance design**. Cette étape revient à ajuster les tolérances afin d'obtenir une robustesse suffisante. Elle nécessite une connaissance complète du comportement des processus de fabrication afin d'anticiper des problèmes qui peuvent émerger lors de la production.

L'étape de tolérancement est nécessaire car elle vise à limiter les variations des caractéristiques du produit dues aux imperfections inhérentes aux procédés et processus de fabrication, afin d'assurer un certain niveau de qualité du produit. Ces travaux de thèse se situent ainsi plus précisément dans la troisième phase, d'ajustement (voir d'optimisation) des tolérances par la prise en compte des difficultés et pratiques de la conception préliminaire de processus de fabrication.

Cette activité de tolérancement est une étape clef dans le cycle de vie du produit car elle impacte fortement sur la conception du processus de fabrication, sur la fabrication et le contrôle du produit [Feng 1999] [Nederbragt 1998]. Il est alors important de décloisonner cette activité pour permettre :

- d'un côté, une **gestion des variations** au cours du processus de conception (préliminaire et détaillée) afin de garantir un niveau de **qualité du produit** acceptable,
- de l'autre, une prise en compte de **l'impact des tolérances** principalement sur la préconception du processus de fabrication, et donc **sur le coût** de fabrication.

Ces deux considérations sont synthétisées dans la *Figure 2*, qui est une adaptation de la modélisation des échanges et flux entre les processus de conception et ceux de fabrication, proposée par Feng [Feng 1999]. Cette dernière précise notre idée selon laquelle l'intégration des considérations du processus de fabrication au processus de conception peut se réaliser par l'interface du tolérancement.

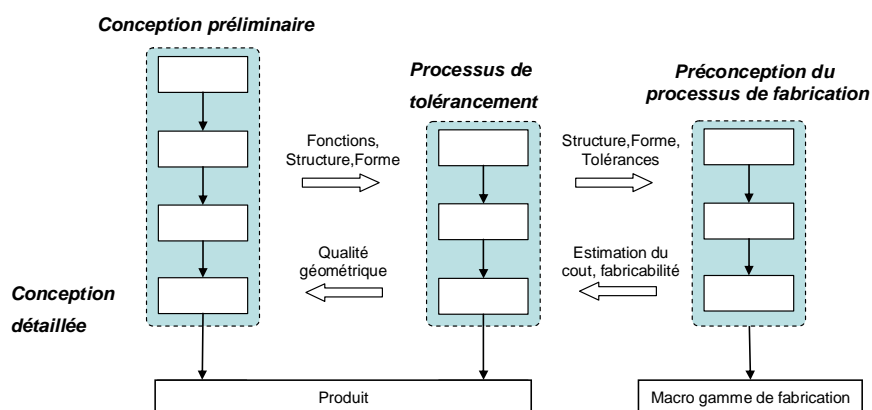


Figure 2 : Interactions Conception / Tolérancement / Fabrication [Dantan2006b]

Les deux préoccupations que sont le coût et la qualité, sont usuellement antinomiques. Notre approche vise donc à allouer les tolérances fonctionnelles qui offrent le meilleur équilibre performance fonctionnelle / coût de fabrication et à présélectionner le processus de fabrication. Il consiste ainsi à déterminer les valeurs des tolérances de façon à minimiser

le coût de fabrication du produit par la sélection de processus de fabrication optimaux (viables et minimisant le coût).

La problématique, inhérente à cette approche d'intégration des préoccupations du processus de fabrication au plus tôt dans le processus de conception, a été synthétisée en une question, en mettant en exergue ses points clés :

« Comment, de façon **optimale**, quantifier les **bornes des domaines de validité des variations des paramètres clés** Produit afin de respecter les exigences définies par l'utilisateur tout en **sélectionnant les processus de fabrication** et les ressources associées dont les variations sont inhérentes ? ».

Pour répondre à cette problématique, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été employées, tant les relations et les interactions entre les domaines de la conception et de la fabrication sont complexes, peu formalisables ou appréhendables, dénotant de la dimension systémique de ce problème.

Comme exemple de ces hypothèses nécessaires à ces travaux, on peut citer que l'approche d'assistant de conception proposée dans ce mémoire ne se base uniquement sur des considérations géométriques. On s'intéresse particulièrement au processus de la finition des surfaces fonctionnelles par usinage, ce qui correspond à la majorité des cas dans les industries manufacturières. D'autres critères de conception importants comme le choix des matériaux, les aspects technologiques ou organisationnels ne sont pas actuellement intégrés à notre démarche. Par rapport à l'approche de moindre engagement proposée D. Brissaud et L. Roucoules, nos travaux peuvent intégrer des contraintes issues d'autres expertises lors des prises de décisions. De plus, une fois les connaissances pertinentes formalisées et structurées, notre démarche peut prendre en compte d'autres procédés et critères.

Ce mémoire de thèse s'articule autour de quatre chapitres, comme l'illustre la *Figure 3* donnée ci-dessous.

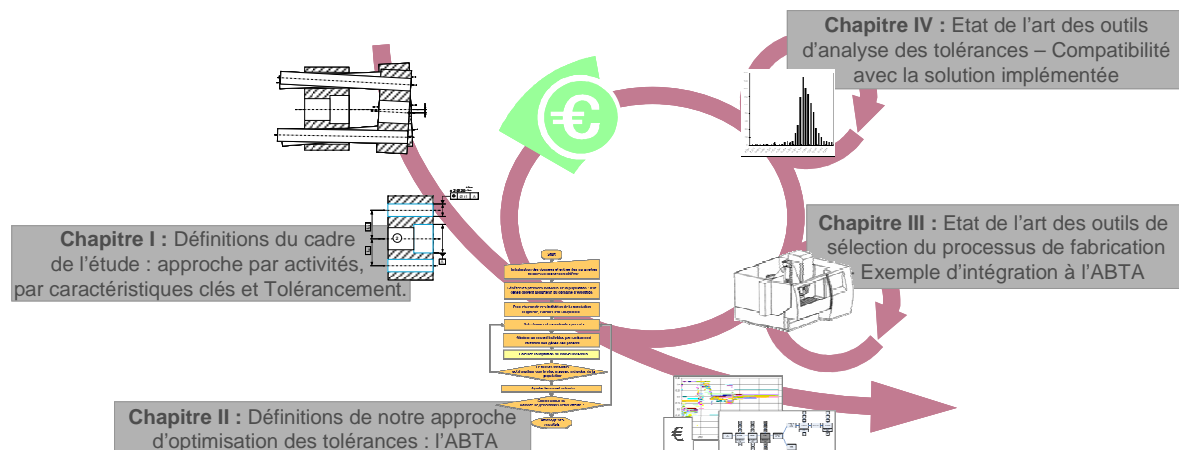


Figure 3 : Articulation des chapitres de l'optimisation de l'allocation des tolérances

Le chapitre I dépeint le cadre de réflexion dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse, et propose une étude bibliographique des approches d'ingénierie intégrée en se focalisant plus particulièrement sur l'estimation du coût. Il s'intéresse également à la modélisation des variations du produit et de son processus de fabrication en proposant une étude du concept des caractéristiques clés. L'activité de tolérancement, dont le rôle principal est de

déterminer les bornes acceptables d'évolution de ces variations, est également détaillée dans ce chapitre.

Cette analyse permet de délimiter le cadre de ces travaux en précisant les données considérées comme entrée de notre démarche d'optimisation en illustrant principalement les méthodes d'identification et de détermination des spécifications géométriques du produit. Il se conclut par la difficulté de définir un indicateur de performance fiable, généralisable et pertinent d'une allocation de tolérances.

Le second chapitre a pour objectif de répondre à la problématique énoncée ci-avant en proposant une solution d'optimisation des tolérances basées sur les approches par caractéristiques clés et par activités que nous dénommons : l'**Activity Based Tolerance Allocation (ABTA)**. Cette proposition s'accompagne de la définition d'un indicateur de performance des allocations de tolérances : le coût pondéré qualité, qui permet de quantifier le compromis coût de fabrication / fiabilité des produits fabriqués induit par l'allocation.

Cet indicateur permettant de comparer la performance entre deux allocations, il est alors possible de réaliser une optimisation de ces dernières. Une étude des différentes solutions disponibles dans la littérature permet de conclure que dans le cas de l'optimisation des tolérances, dont la fonction objectif n'est pas explicitée d'une manière totalement analytique et compte tenu du très grand nombre de combinaisons de solutions, l'algorithme génétique est une solution adéquate.

Cette démarche d'optimisation, et plus particulièrement l'analyse de l'adaptation des solutions, est réalisée par deux grandes activités : la sélection du processus de fabrication et l'analyse du respect des tolérances des produits fabriqués. Ces deux parties sont débattues dans les Chapitre III et Chapitre IV.

Le chapitre III, comme l'annonce le paragraphe précédent, se focalise sur l'activité de sélection du processus de fabrication. Il propose une étude bibliographique des méthodes disponibles pour la génération des processus en s'intéressant plus particulièrement à deux d'entre elles : le système expert et la propagation par contraintes. Plusieurs implémentations et maquettes sont réalisées pour valider l'emploi de ces approches pour la sélection de processus dans le cadre d'une optimisation des tolérances.

Basé sur cette analyse bibliographique et intégré à la démarche ABTA globale, le module de sélection de processus de fabrication propose une sélection simplifiée de l'ensemble des ressources adaptées à l'allocation des tolérances désirées. En effet, puisque le cadre de ces travaux se limite à la conception préliminaire du processus, ce n'est pas une génération de processus complet et optimisé qui est proposée, mais un enrichissement de pré-gammes proposées par l'expert gammiste. Cet aspect permet d'intégrer des contraintes de sélection du processus de fabrication issues d'autres expertises (principe d'intégration).

Ce chapitre propose également la modélisation des connaissances, données et informations nécessaires à l'activité de sélection des processus et à l'outil qui automatise cette activité. Les modèles proposés, sur lesquels est basée l'implémentation informatique, permettent la formalisation des connaissances pour faciliter leur capitalisation via un outil dédié et proche des experts gammistes.

Le chapitre IV se concentre sur l'activité d'analyse des tolérances et sur son automatisation dans la démarche ABTA. Il propose dans une première partie une étude bibliographique des méthodes permettant la paramétrisation, la modélisation du comportement géométrique du produit et l'analyse des tolérances de ce dernier.

La seconde partie de ce chapitre correspond à l'illustration du module de la démarche ABTA permettant cette analyse, en décrivant précisément les deux niveaux d'analyse : au niveau Process/Pièce, puis au niveau Pièce/Produit. Bien que ce module soit basé à la fois sur une approche par ΔL et sur une fonction explicite du comportement géométrique du produit, ce chapitre souligne la modularité et la généralisation de l'application en montrant la compatibilité de celle-ci avec d'autres approches. Il précise également le déroulement de l'application sur un exemple en soulignant l'intégration et les relations entre les variations du processus, du produit et les exigences du client.

Le dernier chapitre fait une synthèse de ces travaux et permet de proposer des pistes pour des travaux de recherche ultérieurs.

Un exemple commun à l'ensemble des chapitres est proposé afin d'illustrer et de valider les concepts, choix de solutions ou démarches de l'application. Cet exemple est un produit industriel : le guide linéaire de bras de robot. Ce dernier, illustré à la *Figure 4*, est un mécanisme hyperstatique constitué de quatre composants qui doit assurer un guidage en translation en limitant au maximum les débattements latéraux entre les pièces 1 et 2. Il est volontairement simple : le produit est un assemblage de peu de pièces principalement prismatiques (dont on peut deviner rapidement le processus de fabrication) afin de mettre en évidence l'intérêt de l'approche.

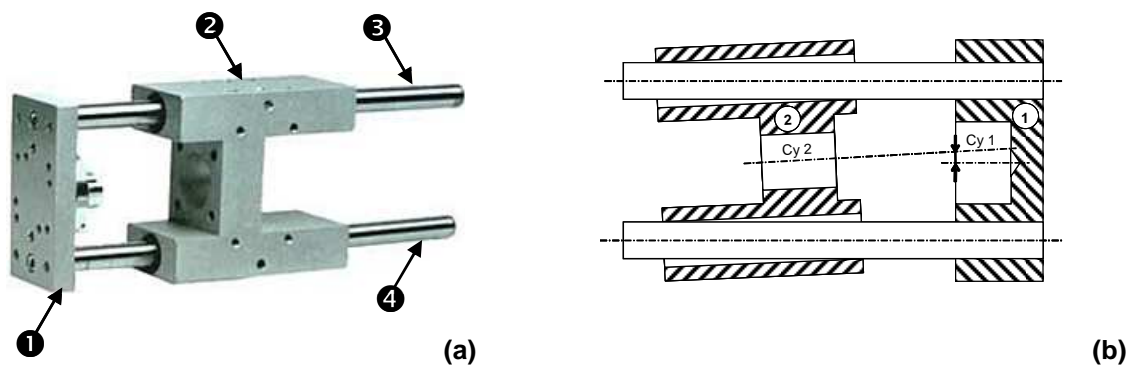


Figure 4 : Le guide linéaire (a) Produit réel (b) Condition fonctionnelle

La définition géométrique de ce produit est connue, et est considérée comme une entrée de la démarche ABTA dont l'objectif est de réaliser l'optimisation de l'allocation des tolérances. Cet exemple est ainsi le support de la description de l'activité de sélection de processus d'usinage au chapitre III et de l'analyse des tolérances dans le chapitre IV.

Chapitre I

“Design For Manufacturing” et Tolérancement

L'objectif de ce chapitre est de présenter le cadre de réflexion dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse. Il propose un état de l'art sur les approches « Design For Manufacturing » (appartenant à l'approche d'ingénierie intégrée), en se focalisant sur la partie estimation du coût, sur les approches de gestion des caractéristiques (des variations) ainsi que sur le processus de tolérancement. Cette étude permet de dégager les difficultés actuellement rencontrées pour définir un indicateur de performance fiable et pertinent d'une allocation de tolérance dont les approches d'estimation soient généralisables.

Sommaire de ce chapitre :

1 DFM - Diminution du coût.....	18
1.1. Estimation du coût.....	19
1.1.1 Les méthodes par analogie	19
I - La technologie de groupe.....	19
II - Le raisonnement à base de cas.....	21
1.1.2 Les méthodes paramétriques	23
I - La FEC	23
II - Application à l'estimation du coût des tolérances	24
1.1.3 Les méthodes analytiques.....	24
I - La méthode ABC	25
II - L'entité coût.....	27
1.1.4 Synthèse.....	28
1.2. Discussion.....	30
2 Le concept de « KCs ».....	31
2.1. Caractéristiques clefs.....	31
2.1.1 Définition.....	31
2.1.2 Les caractéristiques clés (Key Characteristics : KC).....	31
2.1.3 Les liens de causalité : le KC Flowdown	32
2.2. Formalisation.....	33
3 Le tolérancement	35
3.1. Les deux approches	37
3.2. La synthèse des tolérances.....	38
3.2.1 Support de la synthèse de tolérances	39
I - Les outils d'identification des exigences ③ (Figure 26).....	39
II - Normes des spécifications ④ (Figure 26).....	42
III - Technique d'analyse des graphes ① (Figure 26).....	43
IV - Règle de détermination des spécifications ② (Figure 26).....	44
3.2.2 Support de l'allocation des tolérances	46
I - La capacité ⑧ (Figure 26).....	46
II - Les outils d'analyse des tolérances ⑦ (Figure 26).....	48
A - La composition de déplacements	48
B - Les approches par domaines.....	50
4 Conclusion.....	52

Table des figures :

Figure 5 : Définition du DFM selon [Vliet 1999].....	17
Figure 6 : Coût engagé et dépenses réelles durant le cycle de vie du produit [Bourdichon 1994].....	18
Figure 7 : Les méthodes d'estimation du coût.....	19
Figure 8 : Les deux étapes de la TGAO.....	20
Figure 9 : Principe de fonctionnement du raisonnement à base de cas.....	21
Figure 10 : Création d'une FEC - logigramme.....	23
Figure 11 : Coût des tolérances par combinaison des moyens de production.....	24
Figure 12 : Principe des méthodes analytiques.....	25
Figure 13 : Méthode ABC : Principe.....	25
Figure 14 : Concept de l'entité coût et exemple de l'entité coût chariotage.....	27
Figure 15 : Exemple de modèle CostGramme.....	28
Figure 16 : Synthèse des méthodes analysées pour l'estimation du coût.....	29
Figure 17 : Fonction perte de Taguchi [Taguchi 1992].....	30
Figure 18 : Taxinomie des caractéristiques [Dantan 2006a].....	31
Figure 19 : Arborescence des caractéristiques selon D. Whitney.....	32
Figure 20 : Modèle de classe UML de l'environnement KC [Dantan 2006b].....	34
Figure 21 : Parallèle entre les caractéristiques et leurs conditions.....	35
Figure 22 : Variation d'une caractéristique et tolérances associées.....	36
Figure 23 : Le tolérancement dans une vision concourante [Desrochers 2001].....	36
Figure 24 : Allocation et Analyse des tolérances [Chase 1988].....	37
Figure 25 : Analyse et Synthèse de tolérances dans le Condition Flowdown [Thornton 2001].....	37
Figure 26 : Décomposition de l'activité synthèse des tolérances.....	38
Figure 27 : La matrice QFD - ou « Maison de la qualité ».....	40
Figure 28 : Exemple d'un AMDEC Produit [FMEA 2007].....	41
Figure 29 : Extrait d'un TAFT.....	42
Figure 30 : Exemple de graphe des liaisons détaillé (cas de la pièce exemple).....	43
Figure 31 : Exemple d'un cycle influent.....	44
Figure 32 : Exemple de règle [Dantan 2005b].....	45
Figure 33 : Logigramme de la génération de spécifications [Anselmetti 2006].....	45
Figure 34 : Exemples de Cp et Cpk.....	47
Figure 35 : Exemple du torseur de jeu d'une liaison pivot glissant et d'un torseur d'écart d'une surface plane [Bourdet 2007].....	48
Figure 36 : Analyse des torseurs dans une phase d'usinage [Tichadou 2007].....	49
Figure 37 : Exemple de pièce virtuellement usinée [Tichadou 2004].....	50
Figure 38 : Exemple de graphe de simulation [Bourdet 2007].....	51
Figure 39 : Exemple de domaine écart sur un plan localisé [Girodano 2005].....	52
Figure 40 : Rôle des tolérances dans le cycle du produit [Hong 2002].....	53

Tables des équations :

Équation 1 : Calcul de la similarité.....	22
Équation 2 : Calcul du coût d'un produit connaissant ses liens de consommation.....	26
Équation 3 : Calcul du coût d'une solution par l'entité coût.....	27
Équation 4 : Définition mathématique du Cp.....	46
Équation 5 : Définition mathématique du Cpk.....	47
Équation 6 : Définition de l'inertie (dans le cadre du tolérancement inertiel).....	47

Le DFM (Design for Manufacturing), ou en français la conception pour la fabrication, est une « *méthodologie employée dans l'industrie lors de la phase de conception afin d'optimiser la fabrication, la qualité, la fiabilité, le coût et le temps de production* » [Skander 2006]. Cette approche, qui permet de prendre en compte les contraintes de la fabrication aux stades les plus en amont de la conception du produit, se concrétise fréquemment par l'amélioration de la facilité et de la rapidité d'assemblage des composants du produit dont le nombre a été réduit et dont la qualité augmentée. Cette amélioration s'accompagne alors d'une réduction du coût de production et d'assemblage des produits conçus dans cet environnement.

Les auteurs de [Mellichamp 1993] définissent la conception pour la fabrication comme : « *the optimization of the product and process concepts during the design phase of a product in order to ensure ease of manufacture and Assembly* »

De ce fait, les cinq bénéfices majeurs de l'approche DFM ont été synthétisés par [Boothroyd 1994] et [Ramaswamy 2005] :

- ❶ La minimisation du coût,
- ❷ La réduction du temps de développement des nouveaux produits,
- ❸ L'amélioration de la fabrication en assurant à la fois qualité et fiabilité,
- ❹ L'implication du fabricant et des contraintes de fabrication dans le processus amont [Feng 1999],
- ❺ L'amélioration de la communication entre les départements, qui est particulièrement détaillée dans [Gilson 1999].

[Vliet 1999] propose une décomposition synthétique des activités composant le DFM. Selon lui, cette approche est composée par exemple : du choix des procédés et des matériaux, de l'étude de la « *manufacturabilité* » des produits,...comme le montre la Figure 5 :

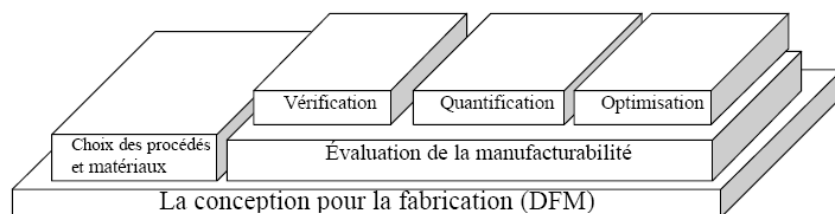


Figure 5 : Définition du DFM selon [Vliet 1999]

Il décompose alors l'évaluation de la « *manufacturabilité* » en trois grandes étapes :

- La vérification, qui détermine si le produit est réellement fabricable. Cette opération nécessite de connaître à la fois les intentions de conception et les capacités de fabrication afin de déterminer si une solution est viable.
- La quantification, qui cherche à évaluer principalement le coût, mais aussi la qualité (tolérance) et le temps de fabrication. L'essentiel de la littérature traite de ce point.
- L'optimisation, dans ce cas la fonction objectif de cette optimisation est la quantification énoncée ci-dessus. Elle peut s'opérer aussi bien au niveau humain, des moyens et des produits.

L’objectif de ces travaux de thèse étant « *Comment, de façon optimale, quantifier les bornes des domaines de validité des variations des paramètres clés Pièce/Produit afin de respecter les exigences définies par l'utilisateur tout en sélectionnant les process de fabrication et les ressources associées dont les variations sont inhérentes ?* », ils s’inscrivent bien dans la démarche DFM en soulignant le besoin de minimiser le coût (bénéfice ❶) et d’améliorer la fabrication en assurant la qualité (bénéfices ❸ et ❹). L’état de l’art détaillé dans la suite de ce chapitre se focalise sur les aspects :

- « diminution du coût » où nous présentons différentes approches d’estimation des coûts,
- « gestion des caractéristiques » afin d’évaluer la robustesse, la qualité d’une solution, et l’impact des variations de fabrication sur les caractéristiques attendues du produit,
- Et les aspects « processus de tolérancement » où nous présentons un processus global et situons le domaine de nos travaux.

1 DFM - Diminution du coût

Parmi les 5 bénéfices qu’apporte une approche DFM, la diminution du coût reste la plus couramment étudiée. En effet, cette diminution du coût, bien qu’étant un impact de la démarche DFM, reste le bénéfice le plus « visible » et intéressant pour un industriel, qui voit pour une qualité identique une diminution potentielle de son coût de production ou/et de maintenance.

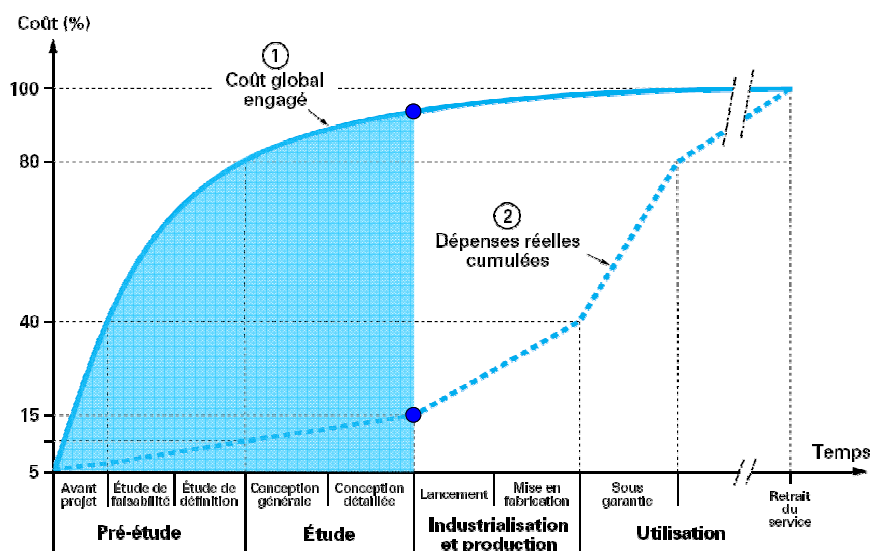


Figure 6 : Coût engagé et dépenses réelles durant le cycle de vie du produit [Bourdichon 1994]

Des études menées au sein de plusieurs entreprises [Berliner 1988] ont montré que les décisions prises lors des phases de conception préliminaire et détaillée du produit déterminent la majorité de son coût global. Ainsi, comme l’illustre la Figure 6, plus de 90% du coût final du produit (Courbe : ❶ *Coût global engagé*) dépendent des choix faits dans les phases de conception de ce dernier. Ces coûts engagés sont à mettre en comparaison aux dépenses que coûtent réellement ces activités (Courbe : ❷ *Dépenses réelles cumulées*), soit moins de 15% des coûts réels cumulés. C’est donc dans cette phase,

qui impacte fortement le coût de par ses décisions, que les réelles économies sont possibles.

Dans ce cas, il est important d'anticiper lors des phases de conception préliminaire ou détaillée, les impacts de ces choix sur la suite du développement du produit. A cette fin, un grand nombre de méthodes et d'outils sont disponibles afin d'estimer le coût d'une solution lors de la phase de conception, réalisant ainsi la partie « quantification » du DFM (*Figure 5*). Le chapitre suivant propose un aperçu non exhaustif de ces approches d'évaluation des coûts.

1.1. Estimation du coût

Parmi l'ensemble des outils et méthodes disponibles, la *Figure 7* propose une classification (non exhaustive) de ces dernières en trois grandes catégories : les méthodes paramétriques, analytiques et analogiques.

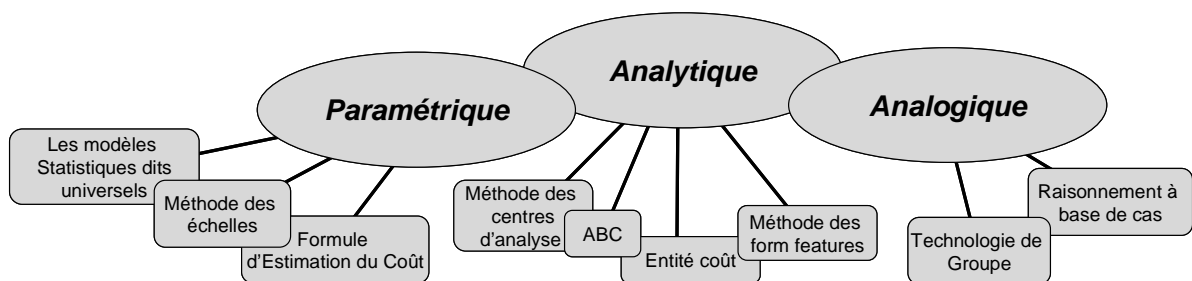


Figure 7 : Les méthodes d'estimation du coût

Afin de bien comprendre les spécificités, les avantages et faiblesses de chacune de ces trois catégories, les paragraphes suivant proposent une analyse de plusieurs méthodes basées sur ces trois approches. Ainsi, sont présentés, la technologie de groupes et son évolution, le raisonnement à base de cas, puis les formules d'estimation du coût, et finalement le couple méthode ABC et Entité Coût. Afin de conclure cette analyse, un comparatif de ces trois approches est proposé.

1.1.1 Les méthodes par analogie

Les méthodes par analogie **reposent sur l'évaluation du coût d'un nouveau produit à partir de ceux déjà réalisés**. Ces derniers sont décrits à l'aide de paramètres jugés discriminants et pertinents (comme la morphologie, la qualité, les dimensions,...) qui permettront également de décrire le nouveau produit dont on veut une estimation du coût. Parmi les nombreuses solutions basées sur ce principe, les deux principales sont décrites dans les paragraphes suivants : la technologie de groupe et le raisonnement à base de cas.

I - La technologie de groupe

Apparue à la fin des années 40, la technologie de groupe est essentiellement dédiée à l'élaboration de gammes de fabrication. Elle s'est développée au fil des innovations informatiques pour devenir la TGAO ([Mutel 1988], [Gao 2000] et [Chang 1990]). Deux grandes étapes la constituent (elles sont illustrées *Figure 8*) :

- L'étape préparatoire (notée 1 sur la figure) consiste à créer les familles de pièces en fonction de critères morpho-dimensionnels et d'y regrouper les pièces produites par

l’entreprise. Cette phase de capitalisation dépend grandement des paramètres discriminants sélectionnés. En effet, le compromis doit être trouvé entre :

- avoir trop de familles de pièces car les paramètres sont trop discriminants => on risque de ne pas pouvoir associer une nouvelle pièce à l’une des familles existantes.
- avoir trop de pièces dans une famille car les paramètres ne sont pas assez discriminant => les familles alors composées ne sont alors pas assez représentatives.

Dès que les paramètres de codification sont connus, on associe à chaque famille de pièces son coût et sa gamme type de fabrication.

- La seconde étape dite *productive* [Mutel 1988] (notée 2 sur la Figure 8), consiste à trouver à quelle(s) famille(s) peut appartenir la pièce dont on essaye d’évaluer le coût. Les mêmes paramètres discriminants sont évalués afin de déterminer le code de la pièce à analyser. Connaissant ce code, les familles similaires sont recherchées dans la base et le couple coût / gamme de fabrication est proposé.

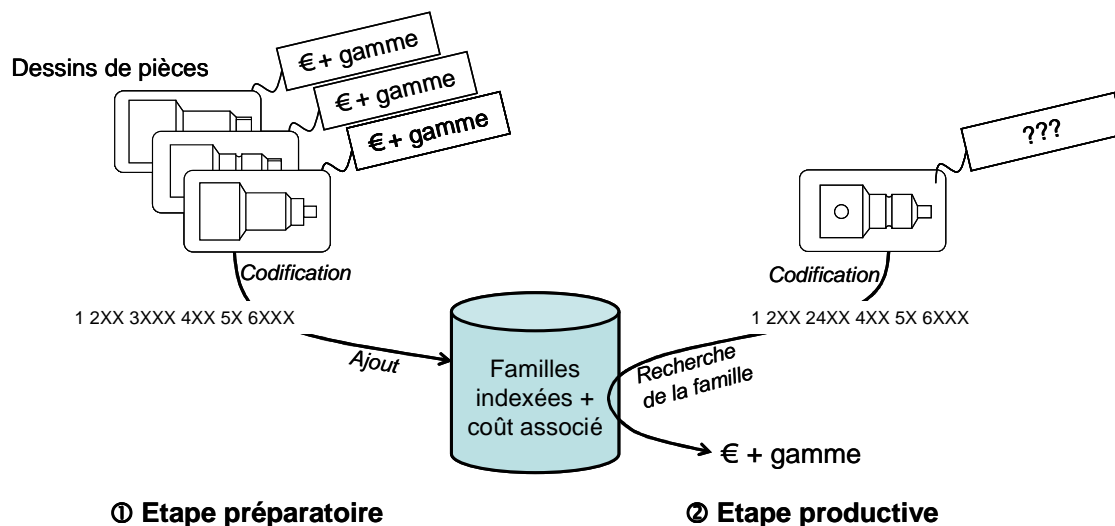


Figure 8 : Les deux étapes de la TGAO

Malheureusement ces deux étapes sont limitées et difficiles d’emploi car l’opération de codification est très subjective. En effet suivant la personne analysant la pièce et les paramètres descripteurs, plusieurs codifications peuvent être proposées pour une unique pièce.

A ce problème de subjectivité s’ajoute le temps de capitalisation (de préparation) nécessaire avant de pouvoir obtenir des résultats. En effet selon [Noel 1990] qui a industrialisé cette méthode chez Citroën, il faut près de 5 à 7 années (soit 3900 pièces codifiées) avant d’avoir une base suffisamment enrichie pour être juste. A cet investissement en temps et en argent, le risque d’obsolescence des solutions dans le cas de domaine où la technologie et les méthodes évoluent très rapidement est un frein supplémentaire à son utilisation.

En conclusion, cette solution s’avère intéressante pour les entreprises produisant des pièces de morphologies très semblables, et disposant de ce fait d’un grand nombre de cas enregistrés nécessaires à cette approche.

II - Le raisonnement à base de cas

Les limites de la technologie de groupe, dues principalement à la codification (expression des experts limités à un nombre fini de paramètres descriptifs très formalisés), ont mené les chercheurs à proposer une évolution plus radicale en ayant recours à la puissance de l'intelligence artificielle. Ainsi apparut le raisonnement à base de cas dans les années 80. Cette méthode ne se limite pas à la recherche de solutions en se basant sur des regroupements (comme précédemment des familles de pièces) mais à l'ensemble des cas connus.

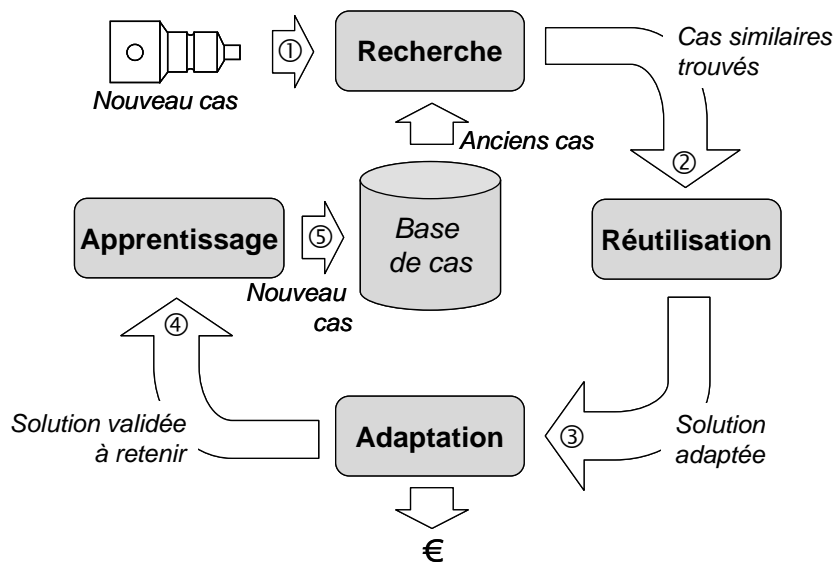


Figure 9 : Principe de fonctionnement du raisonnement à base de cas

Les grandes étapes de ce raisonnement, illustrées sur le schéma *Figure 9*, sont les suivantes :

- ① Extraire les paramètres descriptifs du nouveau cas dont on essaye d'évaluer le coût.
- ② Sélectionner les cas appartenant à la base les plus similaires possible au nouveau cas.
- ③ Adapter les solutions des cas sélectionnés au cadre du nouveau cas.
- ④ Tester la solution ainsi générée et proposer le coût associé.
- ⑤ Apprendre le nouveau cas, après validation de la solution générée, en enregistrant à la fois le cas et sa solution.

L'intérêt principal de cette approche réside dans son découplage entre le problème et sa solution. Ce découplage est par ailleurs concrètement réalisé puisque les cas et les solutions sont enregistrés dans des mémoires distinctes. Une mémoire est la structure de données permettant de capitaliser les cas ou les solutions. Elles intègrent plus particulièrement les données discriminantes et jugées impactant les caractéristiques du produit. Ces modélisations prennent principalement la forme de taxinomie, de bases de données relationnelles, etc.

Une fois ces mémoires réalisées et plusieurs cas enregistrés, il est nécessaire de pouvoir sélectionner parmi ces cas ceux similaires au nouveau cas que l'on essaye d'analyser

(étape②). Cette reconnaissance est réalisée par la mesure de similarité. Elle peut se traduire mathématiquement par le rapport suivant :

L’analyse de similarité des attributs dépend fortement du type des paramètres comparés [Duverlie 1996]. Par exemple, elle peut prendre la forme d’une soustraction pour des paramètres numériques ou une matrice de similarité pour les paramètres de type symbolique. La définition des méthodes de calcul de similarité est un enjeu important mais c’est aussi sa principale difficulté, particulièrement lorsque l’on désire analyser la similarité pour des données de type relationnel (comme des interactions topologiques par exemple).

$$\text{Sim}_{\text{globale}}(\chi_1, \chi_2) = \frac{\sum_j p_j \times \text{Sim}_j(\chi_1, \chi_2)}{\sum_j p_j}$$

Équation 1 : Calcul de la similarité

- p_j : pondération de l’attribut j
- Sim_j : fonction de similarité de l’attribut j
- χ_i : cas à comparer

La dernière étape qui fait l’originalité du raisonnement à base de cas est son étape d’adaptation (étape③). Bien qu’un certain nombre de méthodes d’adaptation existent dans la littérature (une synthèse intéressante de ces dernières est proposée dans [Mille 1996]), les applications concrètes en sont généralement dépourvues tant cette tâche est complexe à élaborer. Bien souvent, cette adaptation est laissée au bon sens de l’expert l’utilisant : l’outil ne lui fournissant que l’ensemble des cas similaires comme base de travail.

Le raisonnement à base de cas est employé dans un grand nombre de domaines (comme par exemple la conception [Sun 1995], la planification ou l’aide au diagnostique [Caulier 1994]) où la réutilisation de l’existant est une part importante du travail. Afin de démontrer que ce type de raisonnement peut être employé pour des cas industriels, P. Duverlie a utilisé le raisonnement à base de cas pour évaluer le coût des pistons de motrices diesel [Duverlie 1999] en se basant sur une étude du CETIM [Jiménez 1995]. Avec seulement 39 cas stockés en mémoire, des résultats satisfaisants ont été obtenus sur un ensemble de pièces dont certains paramètres étaient incomplets ou inconnus (les écarts moyens constatés comparés aux résultats obtenus par une approche paramétrique sont inférieurs à 15%).

Une comparaison de cette méthode avec les réseaux de neurones, dans le cas d’estimation de coût de bâtiment, montre que cette solution, tout en étant plus simple d’utilisation et de mise en place est tout aussi efficace qu’un réseau de neurone [Kim 2004].

Le raisonnement à base de cas est donc une solution proposant une estimation d’un produit partiellement décrit (où tous les paramètres ne sont pas encore définis) en se basant sur les connaissances de l’entreprise stockées dans une base de cas. Malheureusement les concepts nécessaires à son fonctionnement tels que le calcul de similarité et l’adaptation des solutions restent difficiles à mettre en œuvre.

1.1.2 Les méthodes paramétriques

Par méthodes paramétriques sont regroupées toutes les méthodes qui **permettent l'évaluation du coût en se basant sur la connaissance de relations mathématiques le reliant aux paramètres quantifiables du produit** tels que le volume, la dureté, le temps, etc. Parmi les différentes méthodes paramétrées disponibles (la méthode des échelles, les modèles statistiques, et les Formules d'Estimation du Coût ou FEC), le paragraphe suivant se focalise plus précisément sur le cas de la FEC. Après la description de cette méthode, les modèles paramétriques dédiés à l'estimation du coût des tolérances sont analysés.

I - La FEC

Les FEC, ou Formules d'Estimation du Coût, est la méthode paramétrique la plus employée. Cette démarche est illustrée *Figure 10* ([Farineau 2001]) où une décomposition de la méthode en trois grandes étapes est proposée. La première (les cases colorées en gris clair et cerclées de traits discontinus) correspond à la collecte des données pertinentes et à la sélection des paramètres qui, par expertises ou expériences, sont supposés influencer le coût du produit. Cette analyse peut s'outiller en ayant recours à l'analyse des composantes principales ou la classification.

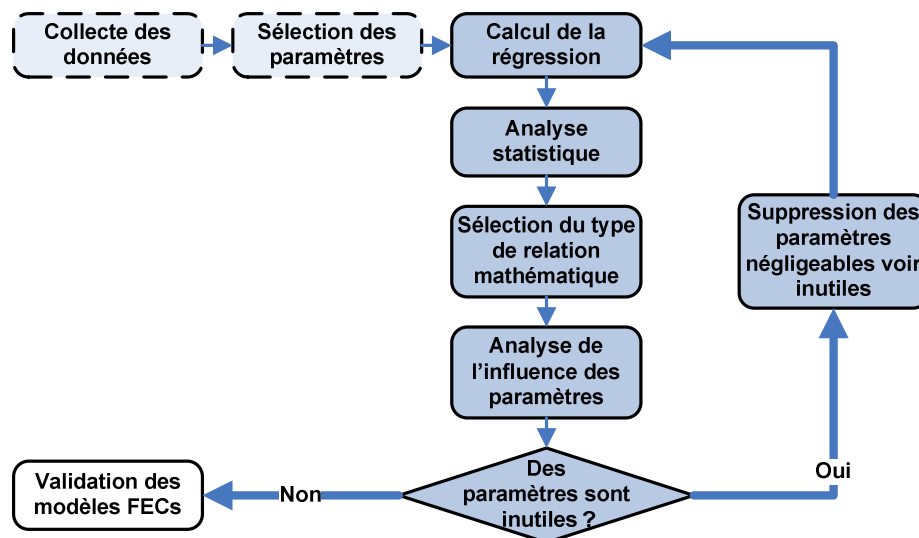


Figure 10 : Création d'une FEC - logigramme

Une fois cette étape préparatoire effectuée, la suivante (cases colorées en gris foncé) revient à chercher parmi une bibliothèque de patrons (qu'ils soient linéaires [Saporta 1978] ou non [Antoniadis 1992]) un modèle fidèle reliant mathématiquement les paramètres sélectionnés précédemment au coût final du produit. Afin de choisir le modèle le plus adapté, un jeu de tests statistiques, basés principalement sur les coefficients de corrélation [Liorzou 1976], est employée.

L'étape finale consiste à éprouver le modèle généré sur un certain nombre de cas et d'en valider la pertinence (cases colorées en blanc).

Cette méthode est efficace et rapide dans le cas où les inducteurs de coût sont aisément identifiables. Plusieurs ouvrages traitent de l'emploi des FEC dans le monde industriel qu'elles soient adaptées au cas de l'estimation du coût de bruts moulés [Cavaliere 2004] ou du coût de pistons de motrices diesel [Duverlie 1999]. Plus particulièrement adapté au

tolérancement, le paragraphe suivant s’intéresse à l’emploi et limites des méthodes paramétriques dans le cadre de l’estimation du coût des tolérances.

II - Application à l’estimation du coût des tolérances

Appliquées au cas du calcul de coût des tolérances, les approches actuelles sont principalement basées sur des fonctions paramétriques datant de plus de trente années. Dans ces modèles, le coût est fonction de la tolérance à réaliser ainsi que d’autres paramètres reflétant le contexte de production. Parmi l’offre importante (en nombre) de ces modèles paramétriques, on peut distinguer les modèles les plus employés :

- Rationnel : $C(t) = A + \frac{B}{t^2}$ [Spotts 1973]
- Exponentiel : $C(t) = B.e^{m.t}$ [Speckhart 1972]
- Puissance : $C(t) = A + \frac{B}{t^k}$ [Sutherland 1975]

D’autres modèles plus évolués proposent de définir la fonction coût de tolérance par morceaux (Figure 11). Chacun de ces morceaux, basés sur une des fonctions paramétriques vues ci-dessus, modélisent pour une tolérance donnée le procédé le moins coûteux [Abdel 1996].

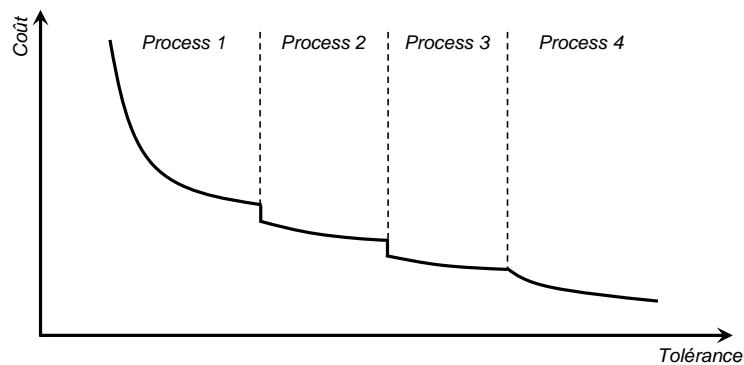


Figure 11 : Coût des tolérances par combinaison des moyens de production

Ces coûts paramétrés restent une solution rapide et facile d’utilisation car ils donnent directement le coût de production connaissant la tolérance à réaliser. Cette approche, apparue dans les années 70, là où les problèmes de tolérancement étaient essentiellement dimensionnels et limités aux chaînes de cotes 1D, est encore très employée aujourd’hui [Diplaris 2000] [Schmitt 2007]. Néanmoins cette solution est difficile à utiliser dans un environnement industriel où les conditions de fabrication sont nombreuses et complexes.

En effet, ces paramètres ont une plage de validité très restreinte car ils dépendent d’un grand nombre de caractéristiques (localisation de l’entreprise, matériau usiné, machine employée, conditions de coupe, etc.). De plus, l’évaluation de ces paramètres est coûteuse aussi bien en temps qu’en ressource, ce qui en fait une donnée stratégique (expliquant le peu de bibliographie quantifiée disponible) pour les entreprises ayant investi dans de coûteux plans d’expériences...

1.1.3 Les méthodes analytiques

On regroupe sous la bannière des méthodes analytiques l’ensemble des solutions qui, pour **estimer le coût d’un produit s’appuient sur les opérations et activités nécessaires**

à son cycle de vie (que ce soit son processus de conception, de fabrication, d'exploitation ou de fin de vie).

La *Figure 12* illustre cette décomposition et cette analyse des différents postes de coûts que rencontre le produit. Bien que cette figure illustre uniquement une succession de postes de production, les méthodes analytiques ne se limitent pas à cette dernière et intègrent l'ensemble du cycle de vie du produit de sa conception à son recyclage...

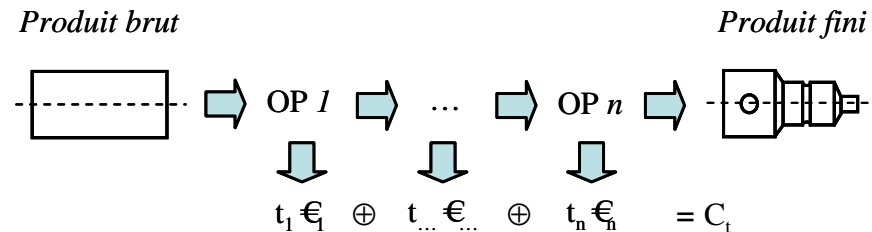


Figure 12 : Principe des méthodes analytiques

Parmi l'ensemble des méthodes analytiques existantes (les *form features* [Feng 1996], le *Manufacturing Engineering Reference Model*, la méthode des centres d'analyse,...) nous nous sommes focalisés sur deux de ces méthodes : la méthode ABC et l'entité coût.

I - La méthode ABC

C'est au courant des années 80 que la méthode ABC a été développée [Johnson 1987] [Gupta 2003] (et en France par [Mévellec 1993]). Elle consiste à casser la hiérarchie des activités au sein d'une entreprise en bannissant la distinction usuelle entre d'un côté, les activités directes et considérées comme productive et de l'autre, les activités de support et considérées comme improductives.

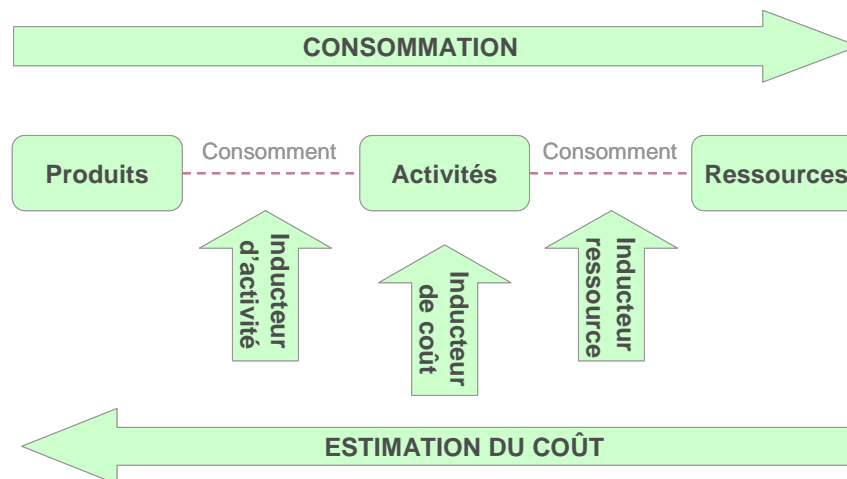


Figure 13 : Méthode ABC : Principe

Pour ce faire, la méthode ABC débute par un découpage de l'entreprise et de ses relations en plusieurs activités significatives. Puis elle propose de décrire les liens de consommation entre les activités et les ressources, puis entre les objets de coûts et les activités qu'ils rencontrent (« les objets de coût consomment des activités, et les activités consomment des ressources » [Bescos 2001]). Ces objets de coût peuvent être des clients,

des produits ou des services. Dans le cadre de ces travaux, nous limiterons ces objets de coût aux produits/pièces. Ces liens sont illustrés sur la *Figure 13*.

L’identification des activités et des ressources faite, l’étape suivante revient à quantifier ces liens de consommation par le jeu de trois inducteurs afin de faire émerger le coût :

- **Inducteur de ressources** : permet de ventiler les ressources entre les différentes activités. Cette répartition peut prendre la forme, par exemple, du temps consacré à chaque activité, ou la quantité de matière première, etc. Ce type d’inducteur permet le management des coûts.
- **Inducteur de coût** : facteur influençant le niveau de performance de l’activité et sa consommation de ressources associées. Il peut prendre la forme, par exemple, de la qualité des matières premières reçues, du niveau de qualification des opérateurs, ou de l’expérience du personnel, etc.
- **Inducteur d’activité** : Cet inducteur permet de répartir les coûts des activités entre les différents produits.

Dans ce cas, pour trouver le coût final d’un produit il suffira de calculer la somme suivante :

$$\text{Coût} = \sum_i (\text{Ind}_i^A \cdot \text{Ind}_i^C \cdot \text{Ind}_{i,j}^R \cdot \text{Cout}_j)$$

Équation 2 : Calcul du coût d’un produit connaissant ses liens de consommation

- Ind_i^A : Inducteur d’activité i
 Ind_i^C : Inducteur de coût de l’activité i
 $\text{Ind}_{i,j}^R$: Inducteur de Ressource reliant l’activité i à la ressource j
 Cout_j : Coût de la ressource j

Afin de pouvoir déterminer les activités et quantifier l’ensemble des inducteurs, il est nécessaire de connaître son moyen de production et de savoir le modéliser : c’est la principale difficulté de cette approche. Ce travail, assez long et nécessitant l’implication de l’ensemble des acteurs, est usuellement effectué une fois par an, en se basant sur le bilan de l’année en cours. De même lorsque le devis d’un nouveau produit devra être effectué, il sera nécessaire de pouvoir lui associer les activités ainsi que les inducteurs d’activités. Le niveau de connaissance et la granularité de modélisation nécessaire dépend essentiellement de la précision que l’estimateur désire obtenir.

Malgré ces quelques difficultés, la justesse et la fiabilité de cette méthode est bonne : les effets d’échelle et de taille de série sont pris en compte. Par exemple, en analytique classique le coût de facturation est usuellement contenu dans le coût de main d’œuvre d’une pièce, produire de grandes séries de pièces ne fera pas diminuer le coût unitaire. A l’opposé, dans la méthode ABC, à l’objet de coût, seront associées une unique activité de facturation et n activités de fabrication : ainsi plus n est grand et plus le coût unitaire diminue.

De même, dans le contexte actuel où les coûts indirects prennent une part croissante dans le coût d’un produit, cette méthode présente l’avantage de proposer une estimation plus fiable et plus précise car toutes les activités y sont intégrées. En effet, ces coûts sont

certes indirects par rapport au produit mais sont directs par rapport aux activités (et aux ressources) [Bescos 1994] et donc plus facilement identifiables et quantifiables.

II - L'entité coût

Le modèle Entité Coût, basé sur la méthode ABC, permet l'estimation du coût par l'analyse de la consommation des ressources par les activités, en y ajoutant une contrainte d'homogénéité. Ainsi, selon H'Mida une entité coût est un « *regroupement de coûts associés à la consommation de ressources par une activité. La condition fondamentale tient à l'homogénéité des ressources consommées par l'entité coût, ce qui permet de leur associer un inducteur* » [H'Mida 2006].

Par homogénéité l'auteur précise que les ressources sont homogènes lorsqu'elles sont à la fois stables (c'est à dire que le taux d'imputation ne dépend pas du produit traité) et solidaires (les ressources sont consommées dans les mêmes proportions quelque soit le produit qui les déclenche).

Une représentation générale de ce concept ainsi qu'un exemple sur l'entité coût chariotage sont données Figure 14 :

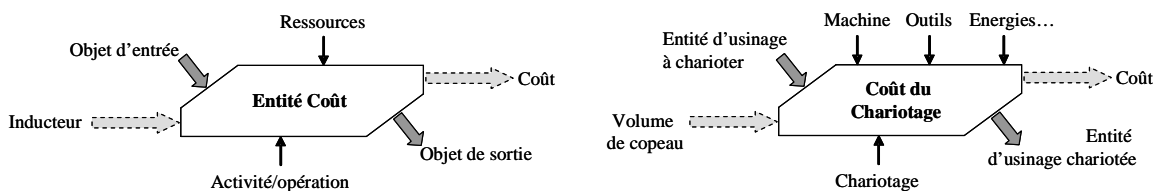


Figure 14 : Concept de l'entité coût et exemple de l'entité coût chariotage

Cette figure permet d'illustrer les deux principaux flux traversant cette entité et leur support y participant :

- un flux économique (en gris clair et cerclé de trait discontinu sur l'image) qui est constitué de l'inducteur de coût et du coût de l'activité,
- un flux d'objets (en gris plus foncé) physiques. La différence entre les deux états de cet objet correspond à la valeur ajoutée par l'activité.

Néanmoins, le concept d'entité coût est limité aux activités qui sont en contact direct avec le produit et la production. En effet, cette approche modélise les coûts directs (comme les coûts d'usinage, etc.) et les coûts indirects virtuels comme l'ordonnancement ou la préparation par exemple. Les activités associées à des coûts indirects réels comme les activités administratives ou financières ne sont quant à elles pas prises en compte.

Un des points clefs de cette approche est la détermination de l'inducteur d'une entité coût. Parmi l'ensemble des paramètres entrant en jeu dans une activité, il est nécessaire, par expérience ou par calcul, de déterminer lequel considérer comme le plus impactant sur le coût de l'entité (suivant le niveau de description du produit). Une fois les inducteurs déterminés, l'expert est capable de chiffrer le coût de sa solution :

$$\boxed{\text{CoûtSolution} = \sum_j EC_j = \sum_j \sum_k CR_k^j = \sum_j \sum_k C_k \cdot (y_k^j(x_j))}$$

Équation 3 : Calcul du coût d'une solution par l'entité coût

- EC_j : Coût de l'entité coût j
 CR_k^j : Coût de la ressource k consommée par l'entité j
 x_j : Inducteur de l'entité j
 y_k^j : Quantité de la ressource k consommée par l'activité de l'entité j
 C_k : Taux d'imputation de la ressource k

L'ensemble des entités coût est alors consigné et ordonné dans le modèle CostGramme, en y faisant figurer les liens de décomposition des entités de plus haut niveaux. Par exemple l'entité coût « *logistique* » est décomposée d'entités coûts « *manutention* » apparaissant à plusieurs étapes du processus de fabrication du produit.

En plus d'illustrer cette relation de décomposition (dite de *causalité*), la Figure 15 montre la relation étroite entre un modèle produit et le modèle CostGramme. En effet, l'auteur propose ainsi via ces modèles une passerelle entre la conception (et son modèle produit) et le processus de fabrication, dont le coût est évaluable grâce aux entités coût.

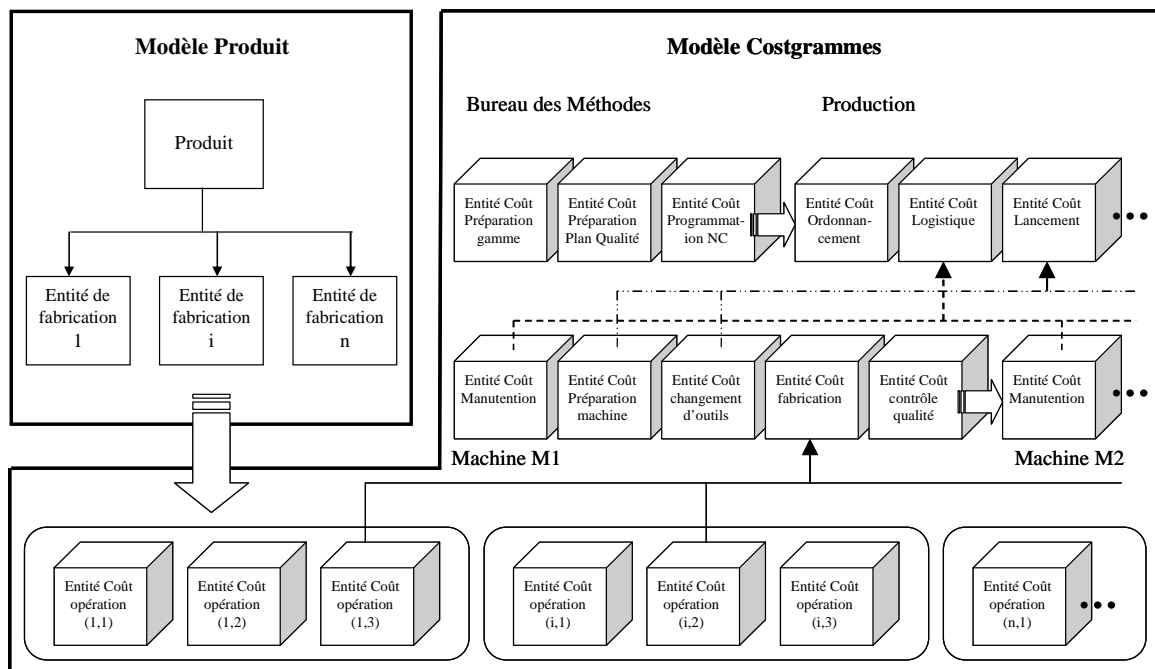


Figure 15 : Exemple de modèle CostGramme

En conclusion, le concept d'entité coût est intéressant car il permet une décomposition et une description assez fine des activités engendrant des coûts. De plus leur traçabilité est facilement exploitable via le modèle CostGramme proposé. Cependant, les résultats obtenus dépendent fortement des choix des experts des entités sélectionnées et de la définition et quantification des inducteurs.

1.1.4 Synthèse

Afin de pouvoir comparer les méthodes d'estimation du coût exposées dans les paragraphes précédents, il est intéressant de les confronter aux fonctionnalités attendues de ce type de méthodes en établissant les critères permettant de choisir la solution la plus adaptée. Dans cette étude nous avons retenu comme caractéristiques discriminantes :

- la **sensibilité** de l'évaluation (répétabilité et robustesse) : capacité de la méthode à intégrer et prendre en compte les variations des données manipulées.
- la **justesse** de l'évaluation (précision) : propension de la méthode à donner des résultats exacts considérant le coût final du produit.
- la **difficulté de mise en œuvre** : difficulté de formalisation des données préparatoires, nécessaires à l'évaluation du coût. Ces données sont usuellement réalisées par des experts du domaine.
- la **rapidité d'estimation** : comprend aussi bien le temps de calcul que le temps nécessaire à modéliser un nouveau problème.
- l'étendue du **domaine de validité** : capacité d'évolution de la méthode.

Ces paramètres sont loin d'être exhaustifs mais représentent les besoins sous-jacent à la problématique de ces travaux de thèse qui nécessitent d'avoir une méthode à la fois flexible, sensible, juste et rapide afin d'éviter que les nouveaux cas nécessitent une modélisation trop longue. Afin d'avoir une vue plus synthétique permettant la comparaison des différentes méthodes et donc un choix, un diagramme radar est proposé *Figure 16*. Sur ce diagramme les cinq paramètres énoncés ci avant, sont évalués pour les méthodes analytiques, analogiques et paramétriques. Cette évaluation (allant de 1 à 5) est effectuée considérant notre expérience des méthodes présentées dans les paragraphes précédents.

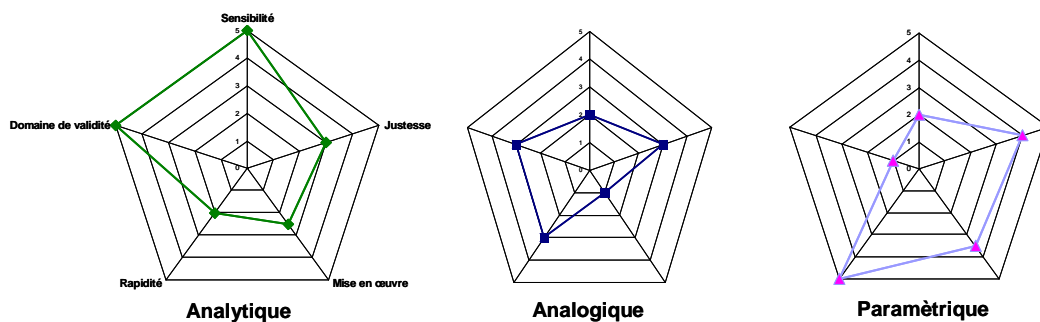


Figure 16 : Synthèse des méthodes analysées pour l'estimation du coût

Ainsi en conclusion de cette étude des différentes méthodes disponibles pour estimer le coût d'un produit dans la phase de conception détaillée du produit et préliminaire du processus, nous sommes capables de résumer les avantages et inconvénients de ces dernières en commentant le diagramme radar ci dessus :

- **Paramétriques** : Bien que justes et très rapides à utiliser dans leur domaine de validité, ces méthodes sont principalement limitées par leur domaine de validité restreint.
- **Analogiques** : Ces méthodes sont intéressantes mais la phase préparatoire (enrichissement de la base de connaissance, définition des paramètres discriminant, définition des méthodes de calcul de similarité) est trop longue pour les résultats escomptés...
- **Analytiques** : Bien que le processus d'estimation de ces approches est assez long car elles génèrent et analysent l'ensemble des opérations nécessaires à l'obtention d'un produit déterminé, elles restent séduisantes de part leur flexibilité et leur justesse.

Toutes ces méthodes d'estimations du coût nécessitent une modélisation du produit et de ses composants, ainsi que de l'entreprise et de son organisation. Il existe actuellement

un grand nombre de modèles permettant de formaliser ces données et leurs relations : que ce soit le modèle IPPOP [Dufaure 2004] ou FBS PPRE [Labrousse 2004] par exemple.

1.2. Discussion

En conclusion de cette synthèse des différentes méthodes disponibles pour l'évaluation du coût, ce paragraphe se focalise sur la sélection de l'approche **la plus adaptée à l'évaluation rapide des coûts de fabrication de produits de morphologie très variée.**

Cette diversité morphologique est incompatible avec les approches analogies, telle que la technologie de groupe, qui nécessitent un grand nombre de cas semblables pour devenir efficace. De même l'étendue du domaine de validité des approches paramétriques, qui ne peuvent être à la fois précise et avoir un grand domaine d'application, est difficilement conciliable avec l'évaluation de ces produits à forte diversité morphologique.

De ce fait, il semble que les approches analytiques soient les plus adaptées à ce type de besoin. Néanmoins, si l'estimation ne s'intéresse qu'à l'évaluation des coûts de production en ne manipulant que des activités de même niveau (des activités uniquement liées à la production), l'approche par entités coûts, et sa contrainte d'homogénéité (justifiée pour une analyse plus complète et plus précise), n'est pas forcément nécessaire.

Finalement, la méthode ABC semble la plus adaptée. Afin de pallier aux défauts de rapidité, de mise en œuvre et d'automatisation, certains enrichissements et adaptations de cette approche doivent être appliqués.

Les méthodes d'évaluation du coût, décrites et comparées tout au long des paragraphes précédents n'effectuent leur estimation que sur les paramètres du produit, du processus et des moyens dans leurs dimensions nominales, et ne prennent que trop rarement (et le plus souvent sous la forme d'un simple coefficient multiplicateur en fin d'estimation) en compte les variations que peut subir le produit et donc sa qualité finale. Or les variations ont un coût non négligeable comme le précisent certaines approches comme le modèle de coût process [Thornton 2001] ou la fonction perte proposée par Taguchi [Taguchi 1992].

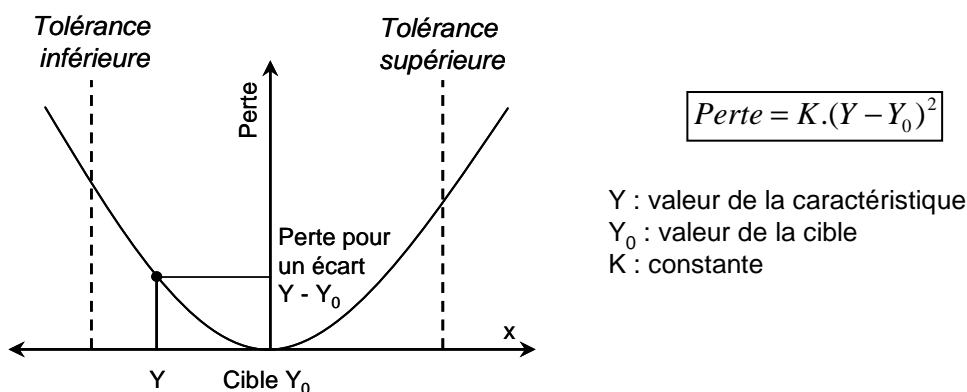


Figure 17 : Fonction perte de Taguchi [Taguchi 1992]

Selon lui, tout écart par rapport au nominal, et ce même dans l'intervalle de tolérances, engendre une perte (Figure 17). Employer une telle approche nécessite dans un premier

temps de pouvoir identifier ces variations et leurs causes, de les quantifier et de retenir les plus critiques. C'est l'objectif principal de l'approche par caractéristiques clefs.

2 Le concept de « KCs »

Le concept de Key Characteristics (en français : caractéristiques clés) est apparu au cours des années 80, principalement dans de grandes entreprises américaines comme Boeing ou GM [Boeing 1992]. Les paragraphes suivants proposent une description de ce concept et de sa formalisation en s'appuyant sur des exemples.

2.1. Caractéristiques clefs

2.1.1 Définition

Parmi les nombreuses définitions disponibles dans la littérature [Boeing 1992] [GM 1996] [Edleman 1998] [Srinivasan 1999], celle habituellement citée est celle de [Thornton 1999] qui définit une caractéristique clef comme étant « *the product, sub-assembly, part, and process features that significantly impact the final cost, performance, or safety of a product when the KC vary from the nominal. Special control should be applied to those KCs where the cost of variation justifies the cost of control* ». A cette définition, Thornton précise qu'un paramètre ne peut être considéré comme une caractéristique que s'il peut être mesurable.

La description de ces caractéristiques a pour objectif une description plus fine du monde réel en appréhendant les variations par rapport à un modèle « idéal ». Dans la définition de [Thornton 1999] ces variations sont définies par rapport au nominal qui ne « matérialise » pas forcément l'« idéal ». De ce fait, [Dantan 2006a] et [Marguet 2001] proposent une nouvelle définition intégrant cette notion de variation : « *Key Characteristics are the product valuable properties and manufacturing process valuable properties that significantly impact the final cost, performance, or safety of the product when the KCs vary from their target* ». C'est cette définition que nous avons retenue dans ces travaux.

2.1.2 Les caractéristiques clés (Key Characteristics : KC)

Une classification et une décomposition des types de caractéristiques ont émergé au fil de la littérature. Cette classification est synthétisée dans une taxinomie, proposée par [Dantan 2006a] et illustrée ci-dessous.

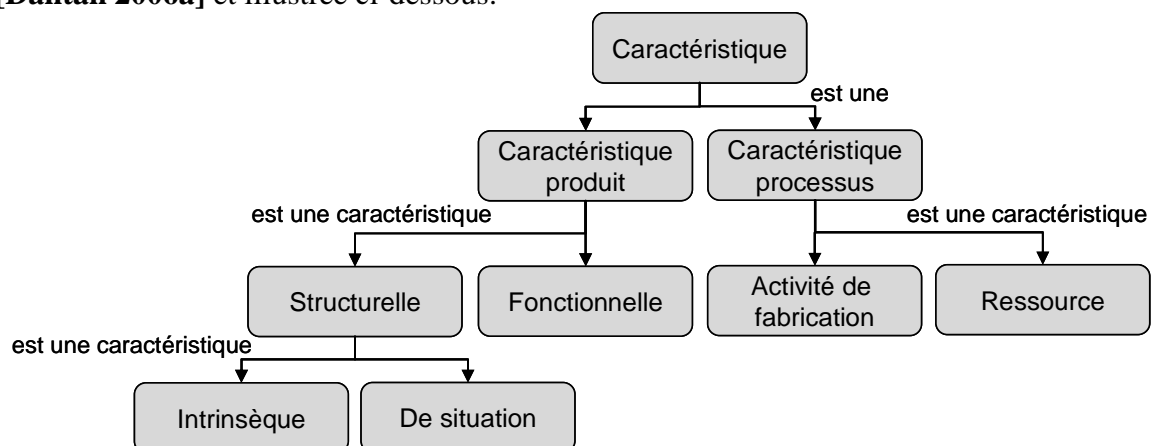


Figure 18 : Taxinomie des caractéristiques [Dantan 2006a]

Sur cette figure on peut distinguer trois particularisations majeures du concept de caractéristique :

- Tout d’abord, [Thornton 2004] et [Etienne 2004] proposent de distinguer les caractéristiques propres au produit et celles liées au processus.
- Un enrichissement similaire à l’approche *Axiomatic Design* proposée par [Suh 1990], décompose les caractéristiques du produit en caractéristiques fonctionnelles (*Functional Requirement*) et structurelles (*Design Parameter*). Les premières représentent principalement les fonctions attendues et quantifiées que doit respecter le produit : elles peuvent prendre la forme d’une performance, d’un coût, etc. Les secondes, du domaine physique, représentent la structure même du produit : les caractéristiques intrinsèques d’une pièce ou d’une entité, les relations (cinématiques ou topologiques) entre les composants, etc.
- De la même façon que la caractéristique produit a été décomposée en sous classes, deux types de caractéristiques processus sont proposées [Dantan 2005] [Etienne 2004]. Ainsi une distinction est faite entre les caractéristiques liées aux ressources et celles liées aux activités de fabrication, et donc dues à la fois aux procédés et aux processus.

Cette taxinomie, résultat d’enrichissements successifs, permet de prendre en considération aussi bien les variations du produit, de sa structure ou de son processus, afin d’offrir un traitement et une modélisation adaptés à chacun d’eux.

2.1.3 Les liens de causalité : le KC Flowdown

L’ensemble des caractéristiques est alors consigné dans une arborescence, appelée *KC Flowdown* [Thornton 2004], où les relations de causalité les reliant sont alors formalisées. Cette arborescence est constituée d’un nombre fini de niveaux, relatifs au niveau de granularité de la description du produit.

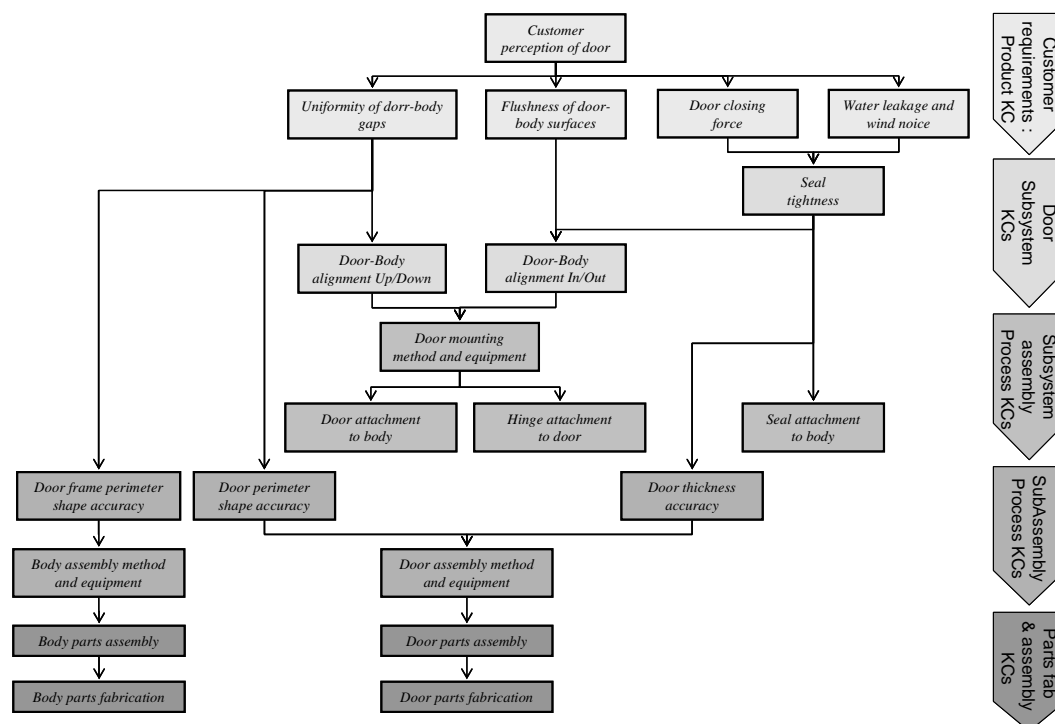


Figure 19 : Arborescence des caractéristiques selon D. Whitney

La *Figure 19*, tirée du livre de D. Whitney [Whitney 2004] est le *KC Flowdown* d'une portière automobile. Dans ce cas, c'est la qualité perçue du produit et les caractéristiques responsables de cette dernière qui sont consignées dans ce diagramme. Il est possible d'utiliser cette cartographie des caractéristiques de deux façons : ascendante (*bottom up*), afin d'analyser les impacts d'une variation sur celles de plus haut niveau ou descendante (*top down*) pour lister les responsables d'une variation. Par exemple, la caractéristique de haut niveau 'qualité perçue de la portière' dépend de quatre caractéristiques 'filles' : la force de fermeture de la porte, des bruits audibles lorsqu'elle est fermée, de l'uniformité du jeu et de l'alignement entre la portière et la carrosserie.

Qui plus est, comme l'illustre cet exemple, les différents niveaux de description des caractéristiques vont des caractéristiques produits aux caractéristiques de plus bas niveau, celle du processus. Puisque ces caractéristiques du processus ont un impact important sur toutes les autres (car elles sont à la base de l'arbre de causalité), il est nécessaire de les sélectionner le plus judicieusement possible.

La formalisation de ces relations, qui intervient peu de temps après l'identification des caractéristiques, reste un point bloquant de l'approche par caractéristiques. En effet, bien que certaines de ces relations soient modélisables et quantifiables en ayant recours par exemple aux abaques, aux relations mathématiques (comme par exemple l'analyse de la qualité perçue de la fermeture de portière [Thornton 1999]), aux tables de correspondance, aux régressions, aux simulations ou autres... un grand nombre de relations causales entre caractéristiques restent implicites et non quantifiables. Ce type de relation, que les experts ont identifié par expérience, mais qu'ils ne sont pas capables de formaliser.

Remarque : Dans le cadre de ces travaux, les relations causales ne seront, comme dans la majorité des modèles actuellement proposés dans la littérature, modélisées uniquement par des relations mathématiques simples (équations et inéquations). En effet, que ce soit pour l'allocation des tolérances, l'analyse géométrique ou l'analyse de l'impact des variations de fabrication, l'ensemble des relations causales est modélisé par un jeu d'équations/inéquations.

Dès que ce modèle arborescent est connu, l'étape suivante est d'essayer de limiter ou de contrôler ces variations. Cette étape usuellement réalisée par les concepteurs, revient à appliquer des bornes aux caractéristiques. Le modèle proposé dans le paragraphe suivant intègre cette notion, trop peu formalisée par les experts du concept KC.

2.2. Formalisation

A ce jour peu de modélisation du concept de caractéristique ou de formalisation des relations entre ces variations sont proposées dans la littérature. On peut néanmoins citer le modèle de données de [Dantan 2006b], illustré *Figure 20*.

Ce modèle est intéressant car il formalise un grand nombre des concepts vus dans ce paragraphe :

- Les caractéristiques sont modélisées. L'emploi des liens d'héritage permet de formaliser l'arborescence des différents types de caractéristiques vu dans le paragraphe précédent et illustrées *Figure 18*. Puisque les caractéristiques sont des variations, plusieurs indicateurs statistiques leur sont associés tels que : la moyenne, l'écart type, la distribution statistique, etc.

- Les relations causales sont formalisées par une classe d’association entre plusieurs caractéristiques. On peut ainsi préciser que dans cette modélisation, les relations sont considérées uniquement comme étant explicites et formalisables par des équations mathématiques ou des règles de conception du type « si... alors... sinon ». Cette limite peut être facilement dépassée en ayant recours à une particularisation de cette classe *characteristics relation*, et ainsi dissocier formellement les relations causales explicites de celles qui ne sont pas. La notion de domaine de validité est également présente. Elle permet de définir pour une même relation causale, plusieurs expressions mathématiques en fonction du domaine d’évolution des variations qu’elle relie.

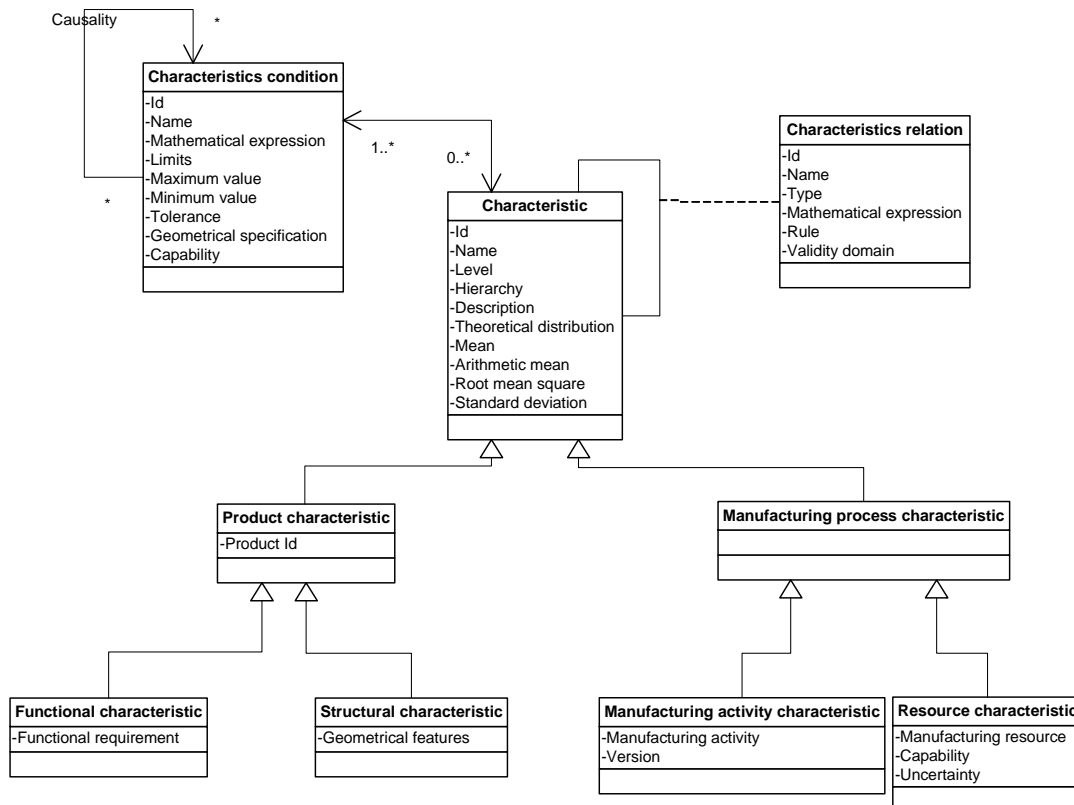


Figure 20 : Modèle de classe UML de l’environnement KC [Dantan 2006b]

- Le concept de borne a été lui aussi formalisé dans ce modèle par le biais de la classe *characteristics condition*. Différentes conditions, permettant aux concepteurs de contrôler les variations du produits, sont modélisées : les bornes de domaine de variation, des limites supérieures ou inférieures,... mais on peut également y voir apparaître les contraintes du monde du tolérancement. Ainsi les spécifications, les tolérances (géométriques ou non), ou les capabilités dans le cas des caractéristiques processus sont intégrées à ce modèle.

De plus, de même que les *characteristics relation* modélisent les liens de causalité entre plusieurs caractéristiques, l’association réflexive *causality* permet d’exprimer ce type de relation entre les conditions. La Figure 21 précise le parallèle qui peut être fait entre les caractéristiques, le KC Flowdown, les conditions et le *Condition Flowdown*.

Ce type de liaison est intéressant pour formaliser par exemple l’activité d’allocation des tolérances, qui revient à distribuer une exigence du produit ou du système (et

donc une condition sur une caractéristique du produit) sur un ensemble de tolérances qui sont elles des conditions sur des caractéristiques propres à une pièce. Cette allocation est illustrée dans le *Condition Flowdown Figure 21*.

En conclusion, par le biais de ces caractéristiques clefs et de leurs relations, nous pouvons effectuer une sélection des paramètres produit ou processus qu'il faut surveiller afin de minimiser le coût des variations et le taux de rebus. Cette approche certes longue à mettre en place car elle suppose de connaître parfaitement le produit et son outil de production, reste une solution intéressante pour minimiser les coûts de contrôle, voir optimiser la structure de son produit ou de son processus.

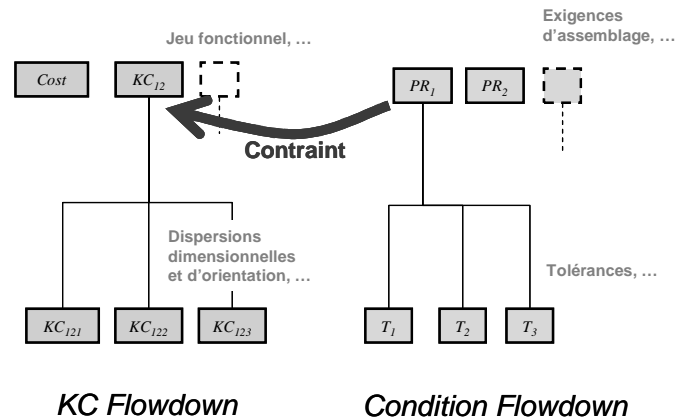


Figure 21 : Parallèle entre les caractéristiques et leurs conditions

Le concept de caractéristiques clefs permet de formaliser les différentes variations et les relations causales qui les lient. L'objectif principal de ces travaux de thèse consiste à quantifier les bornes qui permettent le contrôle de ces variations. Le chapitre suivant, consacré au tolérancement, précise en quoi cette activité privilégiée dans les relations entre deux domaines souvent cloisonnés : la conception du produit et sa fabrication, participe à la réussite de cet objectif.

3 Le tolérancement

Comme démontré dans le paragraphe précédent, les variations sont formalisables en un ensemble de caractéristiques, reliées les unes aux autres par les liens de causalité. Cette approche permet de sensibiliser les concepteurs de la criticité d'une caractéristique et de ses impacts probables sur la qualité du produit. L'objectif suivant est donc d'essayer de contrôler ces variations et de formaliser ce contrôle afin qu'il puisse être compréhensible et manipulable par tous. C'est l'objectif du processus de tolérancement géométrique.

A. Ballu, dans sa définition de spécification [Ballu 2001], souligne que le tolérancement lie les concepts de variation et de condition expliqués dans les paragraphes précédents. Ainsi, il explique que : « A geometrical specification describes a **condition**, which must be satisfied by a part or a set of parts. This condition is expressed from a geometrical **characteristic** between geometrical features or on geometrical features. »

Loin de vouloir faire un état de l'art exhaustif de ce qu'est le tolérancement (un travail conséquent est proposé par [Hong 2002]), ce paragraphe a pour objectif de souligner les enjeux du tolérancement et de situer certains de nos choix (techniques ou conceptuels) parmi la pléthore des solutions existantes.

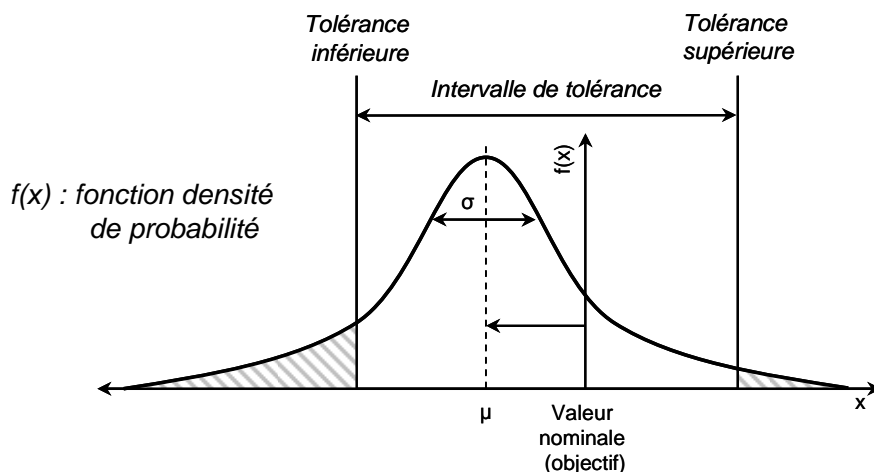


Figure 22 : Variation d'une caractéristique et tolérances associées

En effet, comme le décrit la Figure 22, déterminer une tolérance c'est définir un (ou plusieurs) domaine dans lequel tout paramètre y évoluant sera considéré comme valide. La détermination de ces bornes de validité s'inscrit dans le processus complexe de la conception à la fois du produit et de son processus. De ce fait un grand nombre de paramètres, de connaissances et d'outils sont nécessaires pour déterminer de façon optimale les valeurs des tolérances bornant les variations. La Figure 23, illustre la vision de Desrochers [Desrochers 2001] de l'intégration de l'activité de tolérancement dans le cycle de conception d'un produit. Ainsi on peut remarquer (via les icônes sur la figure) que le tolérancement intervient à tous les niveaux de la conception (du niveau du produit au niveau beaucoup plus granulaire de l'entité) et est également un vecteur d'échange entre la fabrication et la conception.

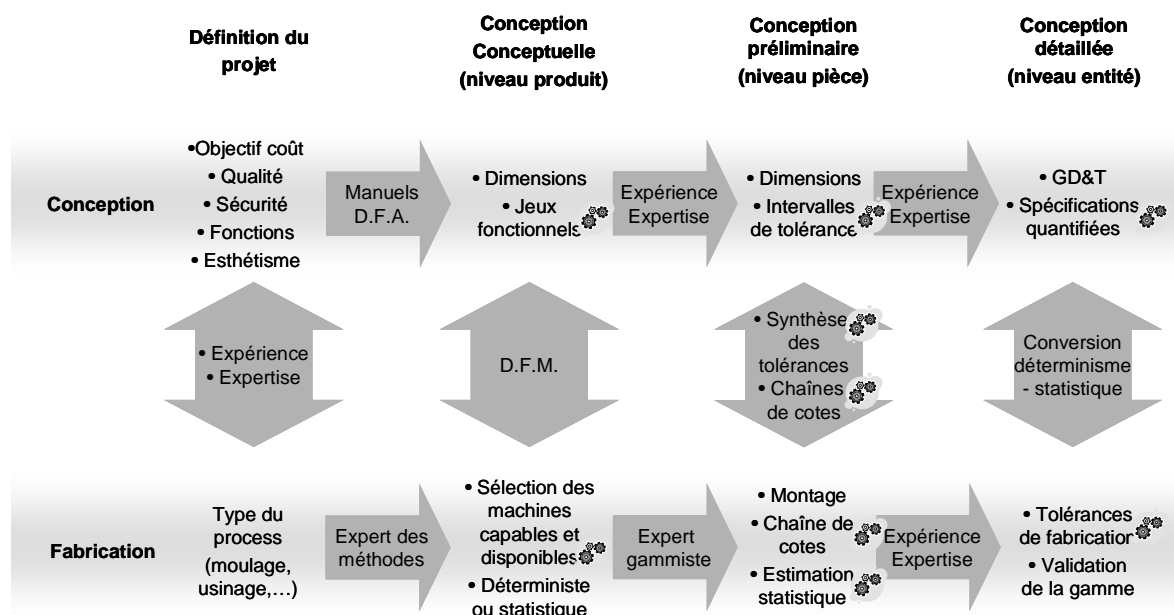


Figure 23 : Le tolérancement dans une vision concurrente [Desrochers 2001]

Le paragraphe suivant s'intéresse plus particulièrement à la synthèse et à l'analyse des tolérances. Après une description de ce que sont ces deux activités, nous montrerons en

quoi la synthèse des tolérances et plus particulièrement l'allocation des tolérances est une étape clef dans la vie du produit.

3.1. Les deux approches

La Figure 24 illustre les deux approches possibles pour manipuler les tolérances :

- L'**analyse** des tolérances (à droite sur la figure) consiste à analyser l'impact des variations admissibles sur les exigences et ainsi vérifier que les tolérances allouées sur chaque composant permettent d'avoir un produit vérifiant ses exigences et contraintes de conception. Cette approche ascendante puisqu'elle remonte des variations du processus vers les contraintes de conception est généralement employée lors de la phase de conception du processus ou d'analyse de robustesse d'une solution.

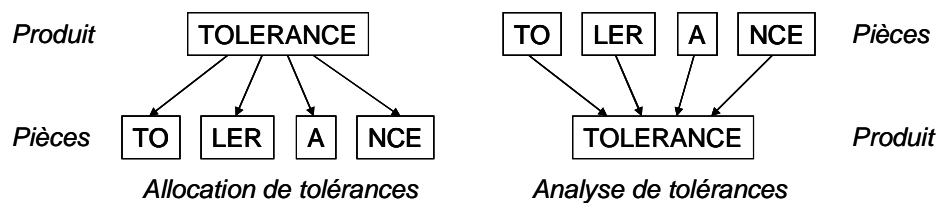


Figure 24 : Allocation et Analyse des tolérances [Chase 1988]

- La **synthèse** des tolérances (à gauche sur la figure), consiste à transférer les exigences (fonctionnelles principalement) sur l'ensemble des composants du produit. Elle vise à la fois à déterminer et quantifier les spécifications sur les différentes pièces. Cette étape, qui est l'approche la plus employée par les concepteurs, est généralement élaborée lors de la phase de conception détaillée du produit lorsque les exigences sont connues et quantifiées.

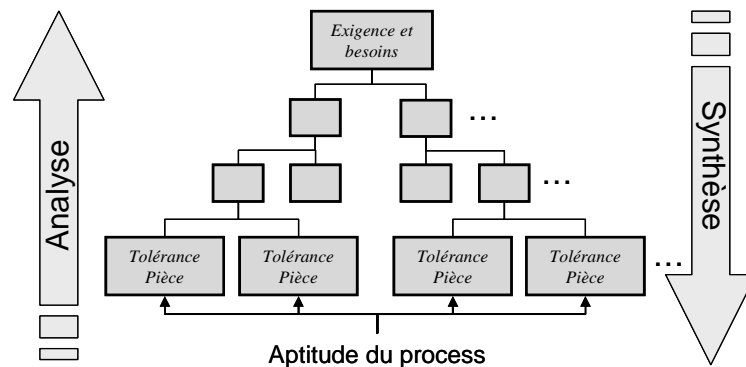


Figure 25 : Analyse et Synthèse de tolérances dans le Condition Flowdown [Thornton 2001]

Thornton [Thornton 2001], via son modèle *KC Flowdown* et *Condition Flowdown*, illustre (Figure 25) la différence entre ces deux approches et leur intégration dans cet environnement. Selon elle, allouer des tolérances (faire leur synthèse) nécessite de comprendre parfaitement les relations causales entre les besoins exprimés par le client et leurs impacts sur les différents niveaux du produits (assemblage, pièces, entités,...). L'arbre des causalités entre caractéristiques est alors un outil facilitant cette compréhension et qui permet dans un second temps de trouver le compromis entre les contraintes et les moyens de production disponibles dans l'entreprise.

L’analyse des tolérances est facilitée dans le cadre des KCs. En effet puisque les liens de causalité entre caractéristiques sont connus, il suffit de remonter des aptitudes du process vers les caractéristiques de plus haut niveau afin de vérifier que ce qui est produit vérifie bien les besoins et exigences exprimés par le client.

On peut alors remarquer que le *KC Flowdown* est un environnement très intéressant pour ce qui est des deux approches du tolérancement : l’analyse et la synthèse des tolérances. En effet, la modélisation des liens de causalité ainsi que l’intégration du processus et de ses impacts sur les caractéristiques de plus haut niveaux est un environnement propice au tolérancement car il lui fournit l’ensemble des données nécessaires à sa réalisation.

Le chapitre suivant propose de se concentrer uniquement sur la synthèse des tolérances qui est à la fois l’activité la plus complexe et la plus importante du processus de conception car elle conditionne à la fois la qualité et le coût du produit.

3.2. La synthèse des tolérances

Comme illustré par la *Figure 26* dans le cas des spécifications géométriques, la synthèse des tolérances peut être décomposée en deux principales activités :

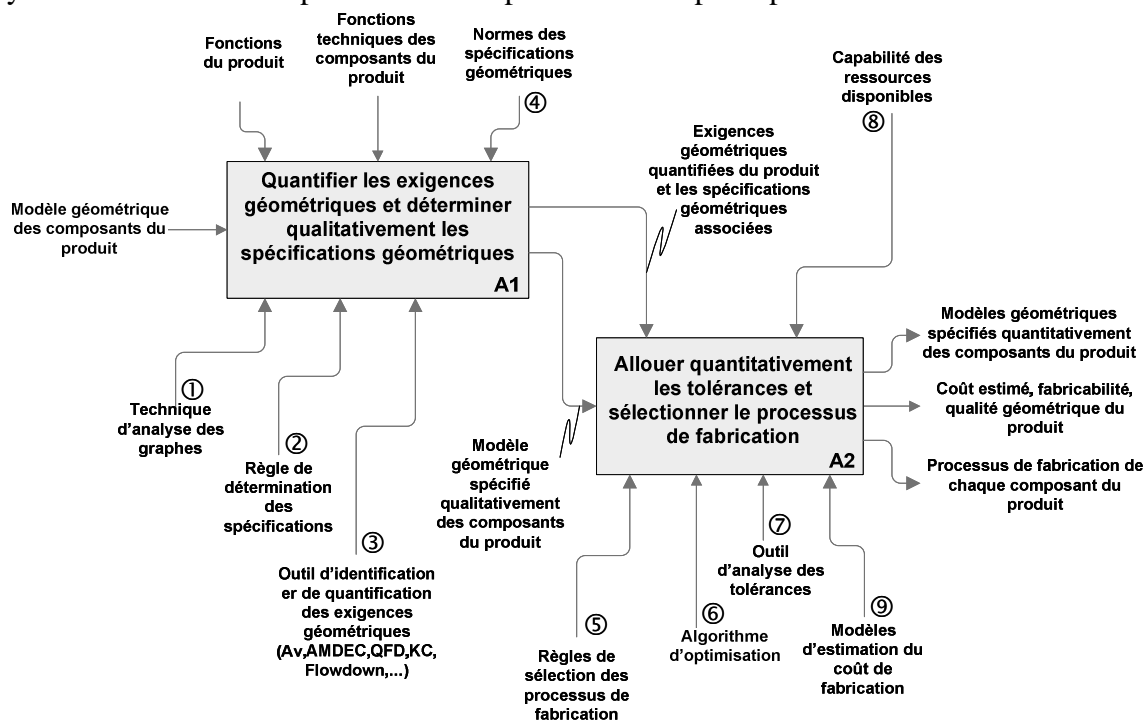


Figure 26 : Décomposition de l'activité synthèse des tolérances

- **Activité A1 :** En se basant sur un ensemble d’outils tels que les matrices QFD, l’AMDEC, etc., le concepteur doit dans un premier temps formaliser les besoins et contraintes afin de **quantifier les exigences** du produit (fonctionnelles, d’assemblage, et autres...). Puis, en se basant principalement sur les normes, le concepteur doit déterminer les spécifications qui sont les contraintes qualitatives que doit respecter l’ensemble des composants. Le résultat de cette activité est un

enrichissement du modèle produit par un ensemble de **spécifications purement qualitatives** qu'il faut évaluer.

- **Activité A2** : La seconde étape revient à **allouer les tolérances** et ainsi **quantifier les spécifications** précédemment définies. Cette allocation est un enjeu important car elle doit trouver le compromis entre tolérances serrées (faible intervalle de tolérance), coûteuses mais assurant le respect des exigences, et tolérances larges, peu coûteuses mais à fort taux de rebus. Elle ne peut donc pas s'effectuer sans sélectionner en parallèle le processus de fabrication. Cette sélection nécessite des connaissances métiers spécifiques que ce soit des règles de sélection ou les capacités des diverses ressources disponibles.

Remarque : Dans le cadre de ces travaux, nous nous limiterons à l'allocation des tolérances et à son optimisation (Activité A2) : la définition des spécifications et la quantification des exigences (Activité A1) sont considérées comme l'une des données d'entrée de ces travaux, dont le cadre se limite aux interactions entre la conception détaillée du produit et la conception préliminaire du processus.

Le résultat de cette synthèse des tolérances est double. On dispose d'un côté du modèle produit spécifié dont les tolérances sont quantifiées et de l'autre, le processus de fabrication et une estimation de son coût. Néanmoins comme l'illustre la *Figure 26*, cette activité nécessite un grand nombre d'outils et de connaissances très hétéroclites à la fois du domaine de la fabrication que de celui de la conception, de la logistique ou de la gestion, etc. C'est là l'un des points bloquant actuels : permettre d'intégrer l'ensemble de ces points de vue afin de trouver l'allocation optimale. C'est également l'un des objectifs principaux de ces travaux.

Les paragraphes suivants précisent ces outils et méthodes nécessaires au bon déroulement de l'activité de synthèse des tolérances. Dans un premier temps sont décrits les supports de l'identification des exigences du produit et de la définition des spécifications qui leur sont associées. Puis, les outils et approches nécessaires à l'analyse des tolérances sont plus précisément explorés.

3.2.1 Support de la synthèse de tolérances

Comme illustré par la *Figure 26*, la première activité composant la synthèse des tolérances nécessite un grand nombre de supports et de contrôles. Ce paragraphe décrit ces différents outils, méthodes ou connaissances permettant à la fois d'identifier et de quantifier les exigences du produit ainsi que les méthodes de détermination qualitative des spécifications. Nous nous limiterons aux spécifications géométriques.

I - Les outils d'identification des exigences ③ (*Figure 26*)

Un grand nombre d'outils sont mis à disposition des concepteurs afin d'explicitier les fonctions techniques du produit les plus importantes, afin de chiffrer les exigences qui leur sont associées :

- La **matrice QFD**, appelée également la « maison de la qualité », est un outil graphique normalisé permettant aux concepteurs d'identifier les fonctions que doit réaliser le produit ainsi que leurs solutions techniques [Akao 2004] (dans sa dernière édition). Cette matrice est constituée de plusieurs zones :
 - *QUOI* : Elle contient les besoins exprimés du client et donc les exigences que doit respecter le produit.

- *POURQUOI* : Elle modélise le marché actuel et permet de situer le produit dans ce marché (concurrents, clients,...)
- *COMMENT* : Elle représente les solutions qui permettent de satisfaire les attentes du client.
- *COMBIEN* : Cette zone contient les critères d'évaluation des *COMMENT*.
- *COMMENT vs COMMENT* : Cette zone permet de qualifier les corrélations entre les différentes solutions apportées pour satisfaire le client, et mettre ainsi à jour les contradictions qui peuvent apparaître entre ces solutions [Chen 2001].

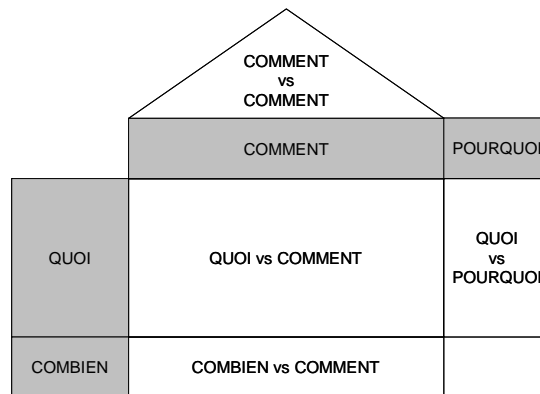


Figure 27 : La matrice QFD - ou « Maison de la qualité »

- *QUOI vs COMMENT* : Elle permet de quantifier la satisfaction qu'apporte une solution pour répondre à une attente du client.
 - *QUOI vs POURQUOI* : Elle permet de situer les besoins en fonction du marché. C'est la partie marketing de la matrice.
 - La dernière zone joue un rôle dans l'élaboration des spécifications et dans la quantification des exigences. En effet la partie *COMBIEN vs COMMENT* chiffre les *COMMENT* et permet une évaluation de l'importance de ces derniers : cette **étape réalise donc la quantification des exigences du produit** et de ses solutions.
- Un second outil : l'AMDEC, pour Analyse des Modes de Défaillances de leur Effets et de leur Criticité, permet lui aussi de hiérarchiser les exigences du produit afin de sélectionner les plus critiques et les spécifier en conséquence.

Cette méthode repose sur l'analyse complète du produit (la démarche complète est exposée dans [Pillay 2003]) afin d'identifier les modes de défaillances du produit et de quantifier sa criticité. Pour se faire, les experts effectuent la notation (usuellement entre 1 et 10) de la fréquence d'apparition de la défaillance (F), de sa gravité (G) et de sa probabilité de non détection (D) et consignent l'ensemble dans un tableau.

La criticité est alors le produit de ces trois notes : $C = F.G.D$, ce qui permet de classer les défaillances et définir les priorités. **Les plus critiques devront donc, dans ce cas porter les exigences les plus contraignantes.**

Le tableau ci-dessous (tiré du site de ressources FMEA [FMEA 2007]), est un exemple d'analyse AMDEC sur une pièce automobile Chrysler. On peut y

distinguer premièrement la fonction analysée, la liste des modes de défaillances de cette fonction et leurs effets associés. Une fois la gravité évaluée, les concepteurs y ont synthétisé les causes de cette défaillance, leurs occurrences et pour chacune, la méthode disponible pour les détecter. Le résultat de ce tableau est la criticité (RPN pour Risk Priority Number) de chacune de ces causes.

Item / Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of the Failure	Sev	Potential Cause(s) / Mechanisms of Failure	Occur	Current Design Controls	Detect	RPN
Filter for assembly with B44 to firewall	Insufficient wax coverage over specified surface	Deteriorated life of door leading to : Unsatisfactory appearance due to rust through paint over time, Impaired function of interior door hardware	4	Insufficient wax thickness specified	4	Supplier certification	1	16
				Inappropriate wax specified	5	Set up	4	80
						Five piece setup, in-process, end of run study	2	40

Figure 28 : Exemple d'un AMDEC Produit [FMEA 2007]

Cette approche, usuellement employée en phase d'amélioration du produit ou du processus commence à être intégrée aux phases préliminaires de conception du produit comme le montre les nombreux travaux actuellement réalisés. On peut citer comme exemple de cette intégration, les travaux effectués dans l'équipe de recherche [Hassan 2007] qui propose de combiner l'AMDEC à l'environnement KC.

- L'**Analyse fonctionnelle technique** est également un outil permettant d'identifier qu'elles sont les fonctions techniques élémentaires les plus critiques, ce qu'elles impactent en terme de conditions fonctionnelles géométriques (les exigences) sur un assemblage. Une description détaillée de cette approche est disponible dans l'article [Charpentier 2005]. Des travaux portant sur les étapes antérieures de conception sont proposés par J.P. Nadeau et synthétisées dans [Nadeau 2006]. L'objectif principal de cette approche est d'identifier l'ensemble des fonctions techniques et de les consigner dans un tableau, le TAFT (Tableau d'Analyse Fonctionnelle Technique), à des fins de traçabilité principalement. Ce dernier est composé de plusieurs sections :
 - La première consigne l'ensemble des fonctions techniques élémentaires que réalise la pièce. Ces fonctions techniques sont usuellement identifiées par l'utilisation de schéma de flux (appelés blocs diagramme). Ces schémas permettent graphiquement de souligner les relations entre les composants d'un produit, en analysant les contacts souhaités ou non souhaités entre les pièces ou les flux (d'effort, de déplacement, énergétique,...) entre celles-ci. Le résultat de cette analyse est l'identification des FTE de contact, de flux fonctionnels et de flux bouclés.
 - La seconde partie de ce tableau contient les éléments géométriques qui contribuent à cette fonction technique.
 - La troisième zone permet au concepteur d'exprimer ce à quoi est soumise la pièce. Elles sont usuellement associées aux fonctions techniques de flux qui sont quantifiables.

- La quatrième partie est importante car elle s’intéresse aux critères d’acceptation (le triplet grandeur physique, sa valeur cible et comment la mesurer) d’une fonction technique face aux sollicitations. Ainsi à une sollicitation d’effort le concepteur peut, par exemple, exprimer comme critère d’acceptation une valeur limite de contrainte.
- A l’instar de l’AMDEC, la cinquième partie du TAFT évalue les risques de non-conformité, et ainsi pour chacun des modes de défaillance d’une fonction technique, une classe de gravité est évaluée.
- La dernière partie concerne les spécifications. Le tableau bien qu’il ne permette pas de générer les spécifications, donne au concepteur toutes les informations nécessaires à la détermination d’une spécification adaptée à la fonction technique élémentaire.

Corps			Liaisons-surfaces				So	Critères d'acceptation			Spécifs surfaces	
agit	sur quoi	complément	Surf 1	Surf 2	Surf 3	GF	Q	Quoi	Combien	Comment	Quoi (symbole ISO)	Combien
se positionne	sur le joint	axial ^t	PL1			x						t ₁
se positionne	sur les 4 vis	radial ^t		CY1 à CY4		x						t ₂
laisse passer	les 4 vis	radial ^t	CY1 à CY4					J ₁ mini	J ₁ ≥ 0			t ₃
positionne	les 4 vis	axial ^t	PL2									t ₄
laisse passer	les 4 vis (∅ ext.)	radial ^t	SQ1					J ₂ mini	J ₂ ≥ 0	Ch de cotes		t ₅
laisse passer	les 4 vis (Ss t)	radial ^t	CY1 à CY4					J ₃ mini	J ₃ ≥ 0	Ch de cotes		t ₆

De la définition des fonctions élémentaires techniques... ... à la spécification géométrique du composant

Figure 29 : Extrait d'un TAFT

Un exemple de ce type de tableau est donné Figure 29. On peut remarquer sur cet extrait de TAFT (d’un plot de positionnement) partiel (il manque l’analyse des risques et la description des sollicitations) six fonctions techniques élémentaires de contact, les surfaces jouant un rôle dans chacune d’entre elles, les critères associés (essentiellement des jeux fonctionnels) et les spécifications qui en découlent.

En conclusion cette approche est intéressante car elle permet à la fois de proposer et de tracer l’ensemble des données nécessaires à la définition de spécifications géométriques à partir des fonctions techniques. Elle permet également à l’instar du *Condition Flowdown* (décrit au paragraphe 2.1.3) de tracer les liens de causalité entre les conditions qui s’appliquent aux caractéristiques de haut niveau.

- Le **KC Flowdown**, vu dans le paragraphe 2.1.3 est également un moyen de détecter quelles sont les spécifications critiques et dans ce cas, quantifier les exigences et conditions qu’il est nécessaire de leur associer.

Une fois ces spécifications identifiées et les exigences quantifiées, il est nécessaire de les exprimer dans un langage univoque. Les normes participent à cet effort d’universalité ; c’est le thème du paragraphe suivant.

II - Normes des spécifications ④ (Figure 26)

Un ensemble de règles de bonnes pratiques dans l'expression des spécifications (principalement géométriques), provenant aussi bien du monde industriel qu'universitaire, ont été synthétisées dans un ensemble de normes. Ces normes ont pour objectif de mettre en place un langage commun et international permettant d'améliorer les échanges de documents techniques dans un monde industriel de plus en plus concourant et international. Basées sur plusieurs cas illustratifs elles donnent au concepteur un ensemble de règles à suivre lors de sa conception des spécifications du produit.

Dans son article, [Humienny 2007] propose un bilan des normes sur les spécifications géométriques du produit (nommées *GPS* : *Geometrical Product Specifications*) en illustrant les différences notables entre les normes américaines de l'ASME et internationales de l'ISO. Parmi l'ensemble des normes à venir ou déjà publiées [ISO/TC213 2007], on peut citer comme exemple les plus utiles pour la spécification géométrique :

- ISO/TS 17450-1:2005 GPS : Concepts généraux – Partie I : Modèles pour la vérification et la spécification géométrique. Cette norme est basée sur le concept de Geospeeling de Ballu et Mathieu [Ballu 2001].
- ISO 1101:2004 GPS : Spécifications géométriques : De forme, d'orientation et de localisation
- ISO/DIS 5459.2 GPS : Spécifications géométriques, cotation et système de références
- ISO 2692:2006 GPS : Spécifications au minimum et maximum de matière

III - Technique d'analyse des graphes ① (Figure 26)

La technique d'analyse des graphes est une solution graphique **permettant de déterminer les spécifications d'un point de vue uniquement qualitatif**. Cette méthode repose sur un ensemble d'étapes [Ballu 2005] [Ballu 1999] :

- La première étape revient à décrire le produit en représentant les composants, les liaisons mécaniques et les éléments géométriques constituant chacun des composants. Puis, sur ce graphique, sont ajoutées les spécifications qui peuvent prendre la forme d'une fonction principale, technique ou une spécification géométrique (GPS). Cette description peut être faite à différents niveaux (produit, composant pièce ou éléments géométriques). Un exemple de cette description est donnée Figure 30.

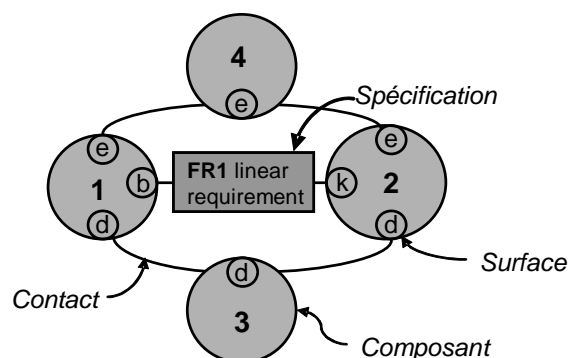


Figure 30 : Exemple de graphe des liaisons détaillé (cas de la pièce exemple)

La seconde étape revient à rechercher les cycles influents, c'est-à-dire les successions de composants qui ont une influence sur les spécifications. Cette étape, basée sur l'expérience, permet d'écartier les pièces qui n'ont aucune influence, et qui, de ce fait peuvent recevoir des spécifications moins exigeantes. Dans l'exemple précédant, il existe plusieurs cycles influençant l'exigence fonctionnelle FR1. La *Figure 31* décrit un de ces cycles (le cycle influent 1-3-2-5-6), et met en valeur le fait que deux composants (le 7 et 8) n'ont aucune influence sur cette fonction.

A noter que pour faciliter la recherche des cycles influents, [Ballu 1999][Mejbri 2005] proposent une méthode de réduction des graphes.

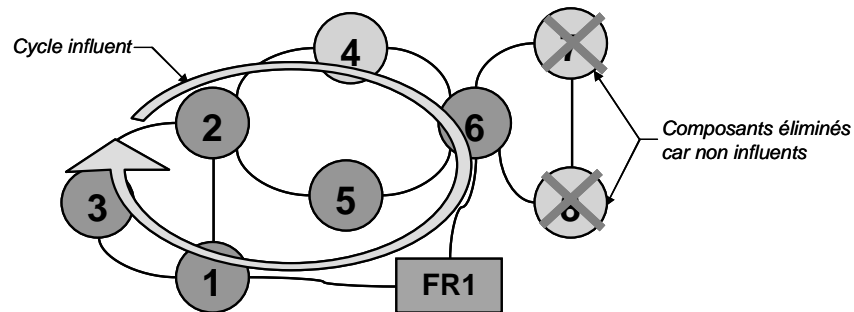


Figure 31 : Exemple d'un cycle influent

- A cette étape sont connus les éléments géométriques influençant une spécification. La méthode propose alors de « transférer la spécification mère ». Ce transfert revient à analyser les influences et de propager les spécifications associées à un système ou plusieurs pièces, à chacune des pièces appartenant au cycle influent. De ce fait les concepteurs, connaissant les éléments géométriques importants, peuvent plus facilement définir les spécifications géométriques de chaque composant. Cette méthode est plus amplement décrite dans l'article pédagogique [Ballu 2005].

En conclusion, cette approche permet d'identifier les surfaces influentes dans un mécanisme, et connaissant les fonctions que doit remplir le produit, elle permet de réaliser une spécification géométrique qualitative du mécanisme. Cette notion de graphes est actuellement employée dans plusieurs outils informatiques tels que MECAMaster [Clozel 2007] ou CE-TOL de Sigmetrix.

IV - Règle de détermination des spécifications ② (*Figure 26*)

En plus des approches graphiques présentées ci avant, apparaissent des règles de détermination des spécifications. Ces règles, méthodes formelles permettant de réaliser cette activité, sont la première étape d'une future automatisation de la synthèse des tolérances.

Les premiers travaux illustrant cette tendance, sont basés sur la technique d'analyse des graphes vue au paragraphe précédent [Ballu 1999]. Ainsi [Dantan 2005b] proposent un ensemble de règles (21 règles) permettant la génération des spécifications géométriques à partir d'un graphe des liaisons détaillé et l'illustrent sur un compresseur à piston. Un extrait de ces règles est donné *Figure 32*. Cet exemple traite du cas du minimum et maximum de matière et formalise dans quel cas employer ces exigences.

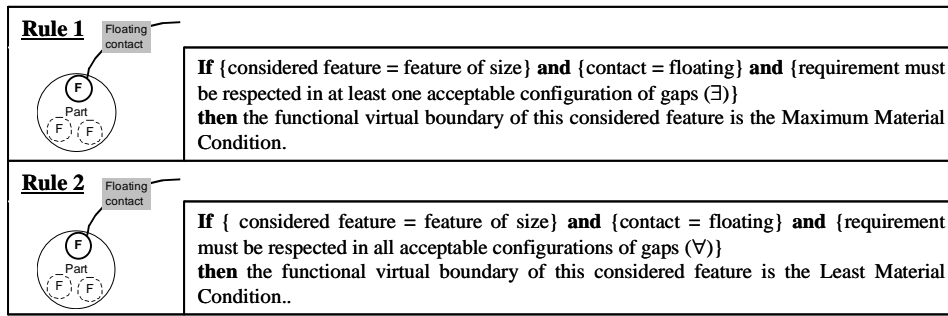


Figure 32 : Exemple de règle [Dantan 2005b]

Parmi l'ensemble des travaux actuels, on peut également s'intéresser à la méthode CLIC (Cotation en Localisation avec Influence des Contacts) car elle illustre parfaitement cette volonté de formalisation, en vue d'une automatisation ou d'une intégration aux outils de CAO [Anselmetti 2006]. Qui plus est, ces travaux sur la détermination des spécifications sont les plus aboutis à ce jour.

Dans un premier temps cette approche propose, comme la technique d'analyse des graphe, de modéliser le problème que l'on veut spécifier en décrivant la structure du modèle nominal du produit, les exigences externes, et la gamme d'assemblage à l'aide d'un ensemble d'entités de positionnement et d'interfaces entre ces dernières. Cette étape, très formalisée a été automatisée afin de faciliter la saisie du problème.

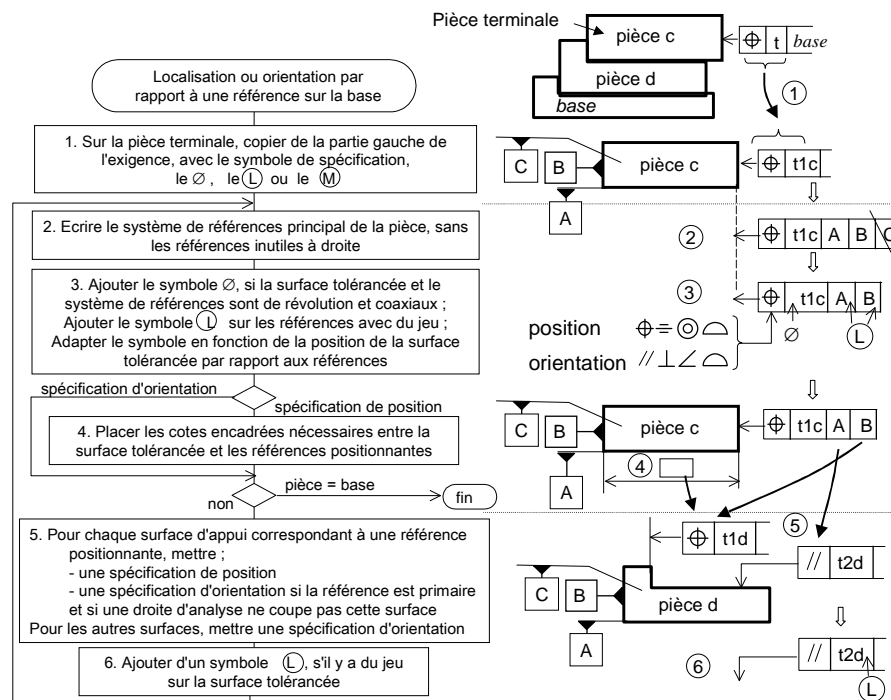


Figure 33 : Logigramme de la génération de spécifications [Anselmetti 2006]

Puis, la méthode propose d'analyser le tableau de mise en position, qui modélise la gamme d'assemblage, et de comparer l'ensemble des entités de positionnement à une base de cas formalisée sous la forme d'un tableau. Ce tableau à deux entrées : la première pour le type d'entité et la seconde pour la position (primaire, secondaire ou tertiaire) de cette

entité dans la mise en position de deux pièces, associée à un cas un « squelette de spécification ».

Intervient alors le logigramme illustré *Figure 33*, qui formalise la procédure de génération des spécifications lorsque les composants influant sont connus. De plus, cette figure propose en parallèle les différentes étapes de cette démarche sur un assemblage composé de trois pièces.

La dernière étape de cette méthode est la quantification des spécifications, c'est-à-dire l'optimisation des tolérances en minimisant la difficulté de réalisation (loi mathématique de type : tol^{-1}). Une grande partie de cette démarche a été implémentée sur Excel, et l'on peut suivre cette démarche sur deux exemples : [Anselmetti 2006] et [Anselmetti 2007].

En conclusion, pour réaliser l'activité d'identification des exigences et de quantification de celles-ci, ainsi que la détermination des spécifications associées, un grand nombre d'outils sont proposés aux concepteurs. Cette étape et son résultat, c'est-à-dire un modèle produit spécifié, est une entrée de ces travaux de thèse qui se focalisent plus particulièrement sur l'étape suivante : l'allocation des tolérances. De la même façon que cette partie s'est efforcée de présenter les outils les plus employés pour effectuer la spécification, les paragraphes suivants décrivent les méthodes et supports de l'activité de quantification de ces spécifications.

3.2.2 Support de l'allocation des tolérances

La *Figure 26* souligne les besoins nécessaires à la réalisation de l'activité d'allocation de tolérance. Certains de ces supports, comme les méthodes de sélection de processus^⑤ ou les algorithmes d'optimisation^⑥ sont plus amplement détaillés dans des chapitres dédiés (respectivement les chapitres III et IV). Ce paragraphe est essentiellement axé sur les outils d'analyse des tolérances^⑦ et sur l'indicateur de capabilité^⑧.

I - La capabilité ^⑧ (*Figure 26*)

La capabilité est un indicateur sans unité, qui permet de quantifier l'aptitude du procédé à réaliser des pièces dans un intervalle de tolérance fixé. Cette capabilité permet alors d'effectuer un choix objectif car chiffré du processus le plus adapté (ni trop capable ni pas assez) parmi l'ensemble des ressources disponibles. Il existe plusieurs déclinaisons de cette capabilité : C_p , C_{pk} , C_{pm} , C_{pmk} , etc. (une synthèse de ces indicateurs est proposée par [Palmer 1999])... ce paragraphe ne s'intéresse qu'au C_p et C_{pk} , qui sont les deux indicateurs les plus couramment employés.

Ces deux capabilités sont associées au procédé et ne prennent en compte que les dispersions à court terme dues essentiellement à la machine et à la gamme de fabrication [Pillet 1994]. Le C_p se calcule de la façon suivante :

$$C_p = \frac{\text{Intervalle de tolérance}}{\text{Dispersion à court terme}} = \frac{IT}{6 \cdot \sigma_{CT}}$$

Équation 4: Définition mathématique du C_p

Un procédé est alors dit capable lorsque sa capabilité est supérieure à 1.33. La Figure 34 illustre l'impact de la dispersion du procédé (en grisé) et des deux limites bornant cette dispersion et formant l'intervalle de tolérance sur le Cp et Cpk. On peut ainsi remarquer que la dispersion du premier cas (noté ①) est beaucoup trop importante pour être capable de réaliser l'intervalle de tolérance demandé.

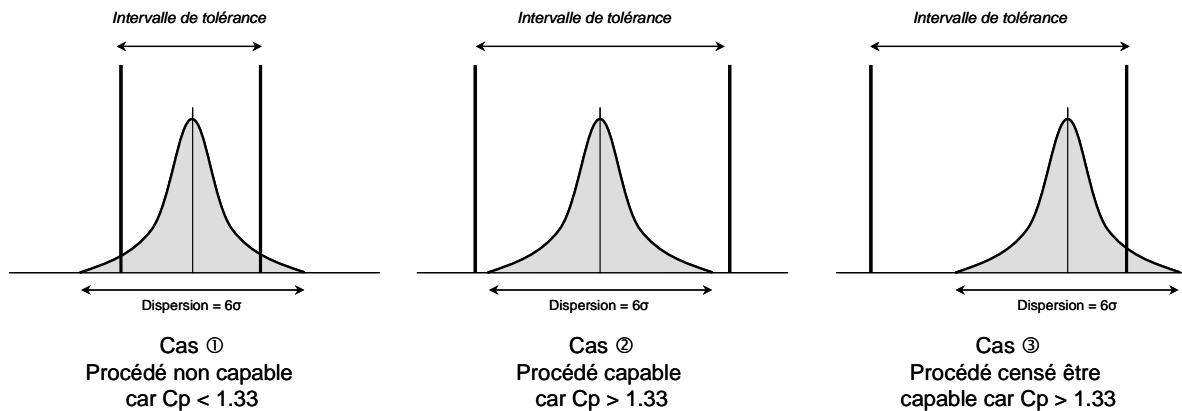


Figure 34 : Exemples de Cp et Cpk

Le Cp permet ainsi d'évaluer rapidement l'aptitude d'un procédé, néanmoins il n'est réellement pertinent que pour les dispersions centrées sur la cible à atteindre. En effet le cas ② et ③ ont le même Cp (car la même dispersion et le même intervalle de tolérance) alors que dans le cas ③ un certain nombre de pièces sont hors tolérance. Afin d'améliorer la pertinence de la capabilité, le Cpk prend en compte ce décentrage :

$$Cpk = \frac{\text{Distance(Moyenne / Limite la plus proche)}}{1/2 \cdot \text{Dispersion à court terme}} = \frac{\text{Dist(Moy / Lpp)}}{3 \cdot \sigma_{CT}}$$

Équation 5: Définition mathématique du Cpk

Finalement, à l'aide de ces indicateurs, il est possible de sélectionner facilement (tant que l'on dispose des valeurs des dispersions σ_{CT}) parmi les ressources disponibles celles les plus adaptées à la fabrication de pièces dans un intervalle de tolérance objectif.

Remarque : Ces indicateurs sont également la base du tolérancement inertiel [Pillet 2005], qui propose non plus de spécifier en s'appuyant sur des intervalles de tolérance mais sur une inertie. Cette méthode basée sur la fonction perte de Taguchi vue précédemment (Figure 17), propose donc au concepteur de limiter l'inertie dont la définition est donnée ci-dessous :

$$I_x = \sqrt{\delta_x^2 + \sigma_x^2}$$

Équation 6 : Définition de l'inertie (dans le cadre du tolérancement inertiel)

Avec :

δ_x : Ecart type de la distribution des X.

σ_x : Ecart entre la moyenne de la distribution et la cible.

Cette méthode synthétise à la façon du Cpk, les deux paramètres descriptifs d’une variation : son écart type et sa position par rapport à la cible. Cette inertie est intéressante car elle permet de définir une zone de validité autour de la cible, sans que le concepteur ait à estimer l’intervalle de tolérance admissible qui modélise le risque acceptable de non-qualité. Qui plus est, cette méthode inertielle, grâce à son additivité, est intéressante pour l’analyse des assemblages.

II - Les outils d’analyse des tolérances $\text{\textcircled{D}}$ (Figure 26)

Un des points essentiels de l’allocation de tolérance consiste à vérifier que la quantification des spécifications et son impact sur les paramètres du produit respectent les exigences spécifiées par le client. Cette vérification est réalisée par l’analyse des tolérances. Il existe à ce jour, deux grandes approches permettant de réaliser cette analyse des tolérances : l’approche par composition des déplacements et l’approche variationnelle.

A - La composition de déplacements

La première approche est basée sur la composition des déplacements, qui suppose que les causes de variation sont indépendantes, propose de les composer (les additionner) afin d’évaluer la variation résultante. On peut ainsi distinguer le cas 1D du cas 3D :

- En 1D : Dans le cas unidimensionnel, cette analyse s’effectue usuellement à l’aide des chaînes de cotes. Cette approche est basée sur une modélisation de la géométrie réelle par une géométrie de substitution, sur la modélisation d’un déplacement entre deux éléments géométriques. Elle est également basée sur la composition des déplacements dans les cycles topologiques.
- En 3D : Les chaînes de cotes en 3D s’appuient essentiellement sur le concept de torseur de petits déplacements, sur la classification SATT et sur les liaisons cinématiques synthétisées dans [Bourdet 2007].
 - Le concept de petits déplacements est utilisable car les déplacements non désirés des composants (considérés comme des solides indéformables) sont faibles comparés aux autres dimensions géométriques (dimensions nominales et cinématiques). Dans ce cas, on peut effectuer une linéarisation du premier ordre de ces petits déplacements. Cette linéarisation est usuellement synthétisée dans un torseur : le torseur des petits déplacements (SDT).

Deux types de torseurs sont ainsi employés afin de décrire ces déplacements : les torseurs d’écarts (noté E) et les torseurs de jeu (noté J). Les premiers permettent de décrire les défauts géométriques d’une surface en utilisant le SDT pour passer de la surface nominale à la surface réelle, et les seconds modélisent les déplacements dans une liaison cinématique dues aux jeux dans celle-ci. Un exemple de torseur écart et de torseur jeu est donné Figure 35.

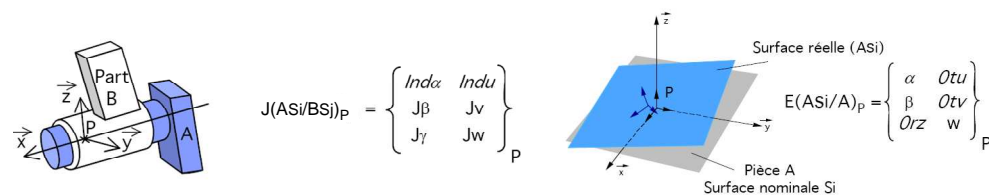


Figure 35 : Exemple du torseur de jeu d’une liaison pivot glissant et d’un torseur d’écart d’une surface plane [Bourdet 2007]

Le résultat de cette modélisation est usuellement un système d'équations qu'il faut résoudre. Les outils sont nombreux et divers, allant de la résolution numérique directe exacte qu'est le pivot de Gauss à la résolution du système de façon numérique. Néanmoins, résoudre ces équations reste complexe lorsque le mécanisme à analyser est composé de plusieurs pièces et hyperstatique.

A noter que [Tichadou 2004] propose une solution originale dans son approche de l'analyse de l'impact de la fabrication sur les surfaces finales. En effet, au lieu d'essayer de calculer les défauts des surfaces, il propose de les simuler à l'aide d'un outil de CAO.

Ainsi, chaque montage d'usinage est paramétré par un jeu de variables qui correspondent aux petits déplacements des torseurs d'écart ou de jeu. Ces déplacements sont aléatoirement quantifiés et la pièce est alors virtuellement usinée (dans un module usinage de l'outil de CAO). Cette opération est répétée pour chacune des opérations d'usinage en respectant l'ordre de la gamme. La *Figure 37* illustre le passage d'une pièce sortant d'une étape d'usinage simulé (à gauche) au montage suivant dans sa gamme de fabrication (à droite). On peut également remarquer les défauts géométriques (accentués) sur cette pièce partiellement usinée.

On obtient alors après la dernière simulation la pièce virtuelle réelle. Afin d'affiner le résultat cette opération est effectuée plusieurs fois.

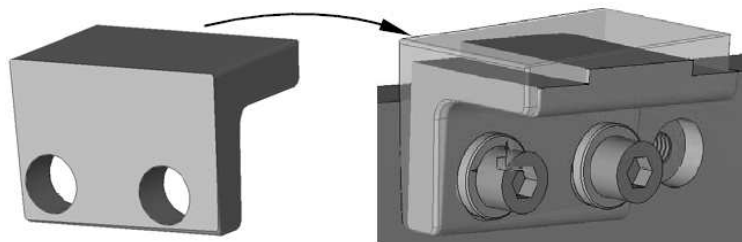


Figure 37 : Exemple de pièce virtuellement usinée [Tichadou 2004]

Cette approche permet ainsi une analyse quantitative des choix de conception du process de fabrication et vérifie que le produit ainsi usiné respecte les exigences.

B - Les approches par domaines

La seconde approche permettant l'analyse des tolérances est basée sur le concept de domaine. Il existe à l'instar des torseurs de petits déplacements deux types de domaines : les domaines écarts qui représentent l'espace dans lequel peut évoluer la surface réelle considérant les tolérances, et les domaines jeux qui modélise les déplacements possibles dans une liaison cinématique. Deux représentants de cette approche sont détaillés ci-dessous :

- L'approche variationnelle unidimensionnelle : les Δl (reprise dans [Bourdet 2007]). Cette approche permet de relier une dimension d'une surface aux défauts introduits par les différentes étapes de production (montage et démontage des pièces, écarts d'usinage,...). Elle se compose de deux grandes étapes :
 - La première revient à établir le graphe de simulation, qui formalise les différentes étapes de production rencontrées par le produit. Un exemple de graphe de simulation est donné *Figure 38*. On peut y distinguer les différentes surfaces de la pièce, et les phases qui la réalisent.

- Une fois le graphe de simulation établi, il est possible d'écrire les relations entre les cotes fonctionnelles et les cotes fabriquées. Ces relations, souvent sous la forme d'inéquations, permettent dans le cadre de l'analyse des tolérances des tolérances de vérifier que les tolérances fonctionnelles sont respectées en utilisant le processus simulé. La méthode des ΔI est donc une approche à la fois accessible et complète qui permet également d'effectuer l'allocation des tolérances et la répartition des ressources de production. Un article à volonté pédagogique est proposé par [Villeneuve 2005] qui décrit l'ensemble de la procédure de cette approche sur un exemple industriel.

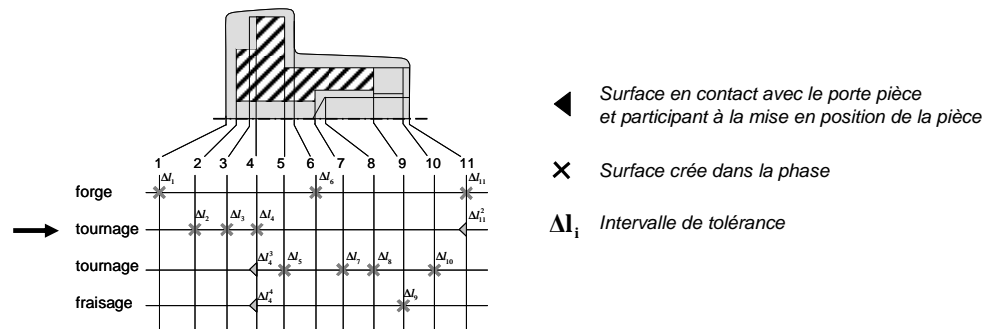


Figure 38 : Exemple de graphe de simulation [Bourdet 2007]

- L'approche variationnelle tridimensionnelle : Les domaines sont construits à partir des petits déplacements permis par les tolérances appliquées aux surfaces ou autorisés par les liaisons cinématiques. Le domaine (qu'il soit de jeu ou d'écart) est alors le polytope résultant de l'intersection de l'ensemble des demi-domaines formés par les inéquations provenant de l'activité de tolérancement et exprimées par le concepteur [Giordano 2007] [Roy 1999] [Teissandier 1999] [Bhide 2001] (par le concept de T MAPS ®).

On peut ainsi préciser la grande différence entre cette approche et la précédente. En effet, contrairement à l'analyse par composition des déplacements qui se focalise sur l'expression des relations entre les jeux et les écarts des composants, l'approche par domaines s'appuie sur le mécanisme spécifié et tolérancé ce qui permet une réelle analyse des tolérances. L'objectif est alors de vérifier si la latitude offerte par les tolérances n'engendre pas des incompatibilités avec les exigences du produit.

Qui plus est, contrairement à l'approche précédente qui somme les déplacements afin d'évaluer le déplacement résultant, cette méthode, basée sur les domaines effectue la somme Minkowski [Minkowski 1896] de ces domaines. Par cette somme, on peut qualifier l'approche par domaines comme étant une approche au pire des cas.

La Figure 39(a) illustre le cas d'un domaine d'écart pour une tolérance de localisation d'un plan par rapport à un second nominale parallèle. La partie (b) quant à elle, illustre les petits déplacements possibles de ce plan spécifié. On peut alors remarquer que deux rotations (r_x et r_y) sont mesurables ainsi qu'une translation (t_z).

La troisième partie (c) de cette figure représente le polyèdre résultant de ces petits déplacements tolérés par la spécification exprimé dans le repère tz , ry et rx . Les faces de ce polyèdre correspondent à une contrainte et les sommets correspondent à une configuration particulière du plan.

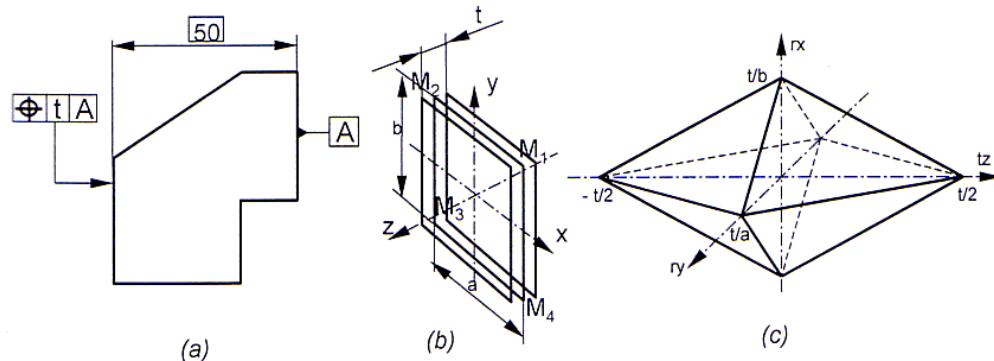


Figure 39 : Exemple de domaine écart sur un plan localisé [Girodano 2005]

Malheureusement, tout comme l’approche par composition des déplacements, cette somme devient complexe à évaluer pour un grand nombre de domaines. En effet, pour trouver le domaine résultant de cette opération il est nécessaire d’effectuer la combinaison de l’ensemble des sommets des domaines sommés et de rechercher le domaine convexe passant ou englobant ces points. On se retrouve donc face à un problème d’explosion combinatoire dont la complexité est fonction du nombre des domaines.

Les approches variationnelles ne se limitent pas à ces deux représentants et l’on peut également noter l’émergence d’approches mixtes déplacement/variationnelle comme par exemple l’approche par droites d’analyse de B. Anselmetti ou l’approche par UPEL de D. Teissandier. La première consiste à analyser les déplacements de plusieurs points de la surface terminale par rapport à leur position nominale, selon une direction d’analyse normale à la surface terminale [Anselmetti 2006] [Anselmetti 2007]. La seconde approche repose quant à elle sur l’analyse des sommets des domaines de jeux ou d’écarts [Teissandier 1999b].

4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre s’est focalisé sur le cadre de ces travaux de thèse, en les situant par rapport aux objectifs des approches de conception pour la fabrication. Puisque la diminution des coûts est un but important de ces approches, une étude des méthodes d’estimation des coûts a été synthétisée. Cette étude a permis de sélectionner, parmi les solutions analytiques, paramétriques et par analogie, la plus adaptée à l’évaluation rapide des coûts de fabrication de produits de morphologies très variées. Nous avons donc retenu la solution basée sur une approche analytique.

Puisque le but de ces travaux consiste à développer une méthode permettant de trouver un compromis entre la qualité des produits et le coût de fabrication, il est nécessaire d’identifier et de structurer les caractéristiques (écarts, dispersions, ou autres variations) qui ont un impact sur ces deux préoccupations. C’est le concept des caractéristiques clés,

dont une étude bibliographique illustrée est proposée dans ce chapitre, qui réalise cette structuration des variations du produit, des pièces et du processus de fabrication.

Afin de contrôler et limiter ces variations, nous proposons d'associer à l'arborescence *KC Flowdown*, qui modélise les relations causales entre les différents niveaux de caractéristiques, l'arbre des conditions ou : *Condition Flowdown*. Grâce à cette arborescence, il est possible de décrire l'ensemble des conditions et contraintes qui s'applique aux caractéristiques.

Limiter le domaine d'évolution des caractéristiques est un rôle important de l'activité de tolérancement ; c'est pourquoi une grande partie de ce chapitre est dédiée aux outils et méthodes d'analyse et d'allocation des tolérances. Le schéma proposé par [Hong 2002] (*Figure 40*) synthétise cette activité de tolérancement. Sur cette figure, les icônes mettent en relief les flux et les activités nécessaires à nos travaux et qui sont explicités dans le paragraphe 3 de ce chapitre, ou dans les chapitres suivants de ce mémoire.

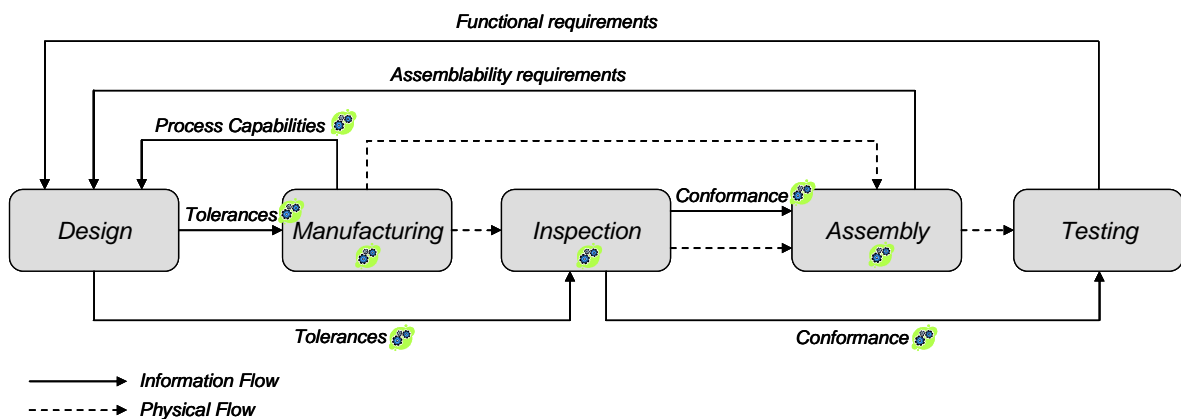


Figure 40 : Rôle des tolérances dans le cycle du produit [Hong 2002]

Ce chapitre propose ainsi un état de l'art des approches permettant la détermination des spécifications (paragraphe 3.2.1), et des outils et méthodes disponibles à leur quantification (dans les paragraphes 3.2.2). Cette étude souligne la diversité et le nombre d'outils, de méthodes et de connaissances que doivent manipuler les concepteurs uniquement pour la phase finale de conception du produit et la phase préliminaire de la conception du processus de fabrication.

Les besoins de ces outils et approches, nécessitant une certaine expertise et une connaissance la plus complète possible du produit et de ses fonctions, limitent considérablement la définition d'un indicateur de performance d'une allocation de tolérances. Qui plus est cette diversité complique l'automatisation d'une approche effectuant une optimisation de cette allocation et son intégration dans un environnement de conception intégrée.

C'est cette difficulté que nous proposons de supplanter par la définition et l'implémentation de la méthode ABTA qui permet, dans l'environnement KC, d'estimer la performance d'une allocation de tolérance, en prenant en compte aussi bien la dimension économique de la solution que sa qualité. Cette méthode est entièrement décrite dans le chapitre suivant de ce mémoire.

Chapitre II

Allocation des tolérances basée sur le concept d'activité (ABTA)

Ce chapitre est consacré à l'ABTA (« Activity Based Tolerance Allocation »), qui est une approche d'allocation des tolérances basée sur le concept d'activité. L'approche d'allocation des tolérances proposée vise à définir les tolérances qui offrent le meilleur équilibre performance fonctionnelle / coût de fabrication. L'une des difficultés d'une telle approche est la définition et la mesure d'un ou plusieurs indicateurs de performance permettant comparer des solutions différentes entre elles. A cette fin, le coût pondéré qualité est proposé comme indicateur d'efficacité d'une solution d'allocation de tolérances. Son évaluation est basée sur l'analyse des impacts des choix des spécifications sur le coût et la qualité, elle s'appuie sur le concept d'activité. L'ABTA propose d'enrichir la méthode ABC des besoins et spécificités de la conception préliminaire du processus, afin qu'elle puisse retourner à la fois le coût et les variations du produit. Une modélisation de cette évaluation est proposée sous forme d'un IDEF0 et un diagramme de classes permet d'explicitier et de structurer les données manipulées lors de cette évaluation. Etant capable de comparer des solutions d'allocation de tolérances entre elles, il est possible d'optimiser la définition des tolérances, la fonction objectif de cette optimisation est « Minimiser le coût pondéré qualité ». Cette optimisation est réalisée par un algorithme génétique car le critère d'optimisation n'est pas explicité d'une manière totalement analytique.

Table des matières :

1 Allocation des tolérances - Problématique	60
1.1. Le coût comme indicateur de performance	62
1.2. Le coût pondéré qualité	63
2 Evaluation de l'indicateur d'efficacité - ABTA	65
2.1. Etape 1 : Synthèse descendante	66
2.2. Etape 2 : Analyse ascendante	68
3 Approche par activités	71
3.1. Activité de production	72
3.2. Activité de contrôle de conformité	73
3.3. Activités de retrait et de réajustement	74
3.3.1 Activité de retrait	74
3.3.2 Activité de réajustement	74
3.4. De la méthode ABC à l'ABTA : Enrichissements	75
3.5. Analyse des causes de la non qualité prise en compte dans l'indicateur d'efficacité	76
3.6. Exemple	78
4 Modélisation de l'approche et enrichissement du modèle KC	80
4.1.1 Modélisation de l'approche	80
4.1.2 Modèle KC	82
4.1.3 Les conditions	83

4.1.4 Les activités	84
4.1.5 Modèle final	84
5 Optimisation	85
5.1. Les méthodes d'optimisation	86
5.1.1 Définition	86
5.1.2 Etat de l'Art.....	86
5.2. Algorithmes génétiques.....	90
5.2.1 Principe.....	90
5.2.2 Codage des gènes	91
5.2.3 Opérateurs de reproduction	92
5.2.4 Critères d'arrêt.....	93
5.3. Discussion	94
5.4. Application à l'optimisation des tolérances	95
5.4.1 Paramètres retenus.....	95
5.4.2 Maquette informatique + Résultats	96
6 Conclusions	97

Table des Figures :

Figure 41 : Généralisation de l'activité d'allocation des tolérances	59
Figure 42 : Intégration Produit / Process – Rôle du tolérancement [Dantan 2006b].....	59
Figure 43 : Allocation des tolérances : Objectif.....	60
Figure 44 : Limite des approches paramétriques - Exemple	61
Figure 45 : Décomposition en entités géométriques - Exemple	66
Figure 46 : Etape 1 : Synthèse descendante.....	67
Figure 47 : Sélection de processus – Modèle simplifié	68
Figure 48 : Etape 2 : Analyse Ascendante	69
Figure 49 : Relations entre activités / ressources / caractéristiques –Exemple	70
Figure 50 : Modélisation d'une gamme et d'une activité	71
Figure 51 : Activité de production – (a) Cas général et (b) Exemple	72
Figure 52 : Activité de préparation – (a) Cas général et (b) Exemple	73
Figure 53 : Rôle de l'activité de contrôle de conformité.....	73
Figure 54 : Activité de suivi de production	74
Figure 55 : ABTA - Extension de la méthode ABC pour l'allocation de tolérances.....	75
Figure 56 : Les causes des variations et l'intérêt de l'approche par activités	76
Figure 57 : Modèle Ishikawa (cause/effets)	77
Figure 58 : Pièces exemple	78
Figure 59 : Exemple d'une gamme réalisant l'exemple.....	79
Figure 60 : IDEF0 de notre approche d'estimation	81
Figure 61 : Décomposition de l'activité "Evaluer"	81
Figure 62 : Modèle de classe de l'arborescence KC enrichi par notre modèle produit	82
Figure 63 : Modèle UML de l'arborescence des contraintes.....	83
Figure 64 : Modèle UML - Activités et leurs relations	84
Figure 65 : Modèle UML final du support de notre approche.....	85
Figure 66 : IDEF0 de l'optimisation des tolérances.....	86
Figure 67 : Les différentes méthodes d'optimisation disponibles – Liste non exhaustive... 87	87
Figure 68 : Transformation des polytopes - Exemples.....	87
Figure 69 : Exemple d'Algorithme Génétique - Logigramme.....	91
Figure 70 : Croisement classique - Exemple.....	92
Figure 71 : Électromagnétisme - Principe	93
Figure 72 : Mutation des gènes d'un individu - Exemple.....	93
Figure 73 : Implémentation de notre algorithme génétique - Interface.....	96
Figure 74 : Résultats obtenus - Exemple.....	97
Figure 75 : Démarche ABTA - Résumé	98

Table des Equations :

Équation 7 : Expression du coût pondéré qualité	63
Équation 8 : Définition mathématique de l'optimum.....	86
Équation 9 : Croisement de Guo – Définition	92
Équation 10 : Critère d'arrêt absolu et relatif	94
Équation 11 : Adaptation des individus	95

Le chapitre précédent a permis de préciser le cadre dans lequel s'inscrivent ces travaux, en décrivant notamment les concepts de caractéristiques clés et le tolérancement. Les imperfections inhérentes aux procédés et aux processus de fabrication entraînent une dégradation des caractéristiques du produit, et donc de la qualité du produit. L'objectif de l'activité de tolérancement est de définir les limites acceptables des variations des caractéristiques pièces permettant d'assurer un certain niveau de qualité à un coût optimal. L'allocation des tolérances est une importante activité du processus de tolérancement qui, dans les pratiques courantes, se situe généralement durant les dernières étapes de la conception détaillée et impacte énormément la conception du processus de fabrication, la fabrication et le contrôle du produit. Cette activité a un double objectif : garantir un certain niveau de qualité du produit et minimiser le coût de fabrication du produit.

Ce chapitre a pour objectif de généraliser l'activité « Allouer la tolérance et sélectionner le processus de fabrication », proposée dans le chapitre précédent traitant du cas particulier des tolérances géométriques (Figure 41).

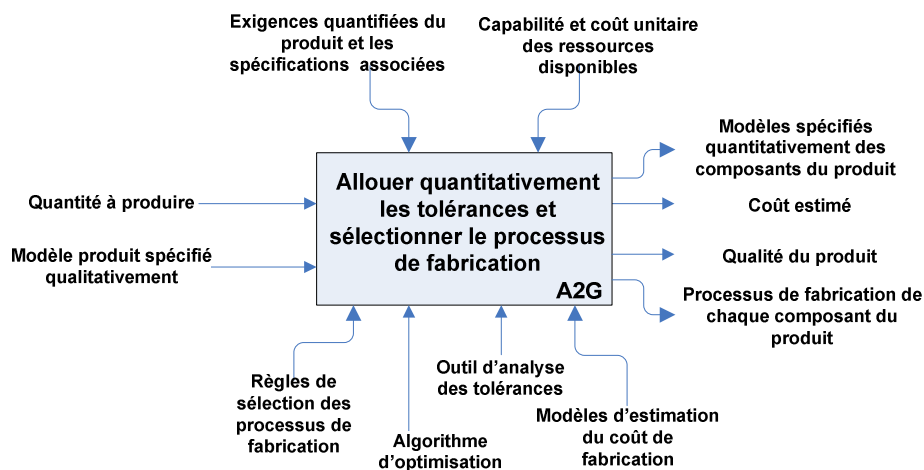


Figure 41 : Généralisation de l'activité d'allocation des tolérances

Ce chapitre a pour objectif de proposer une démarche permettant d'optimiser l'allocation des tolérances, en bornant les variations des caractéristiques clés, tout en prenant en compte l'impact de ces contraintes sur le processus de fabrication et donc sur le coût, la qualité et la fiabilité obtenue.

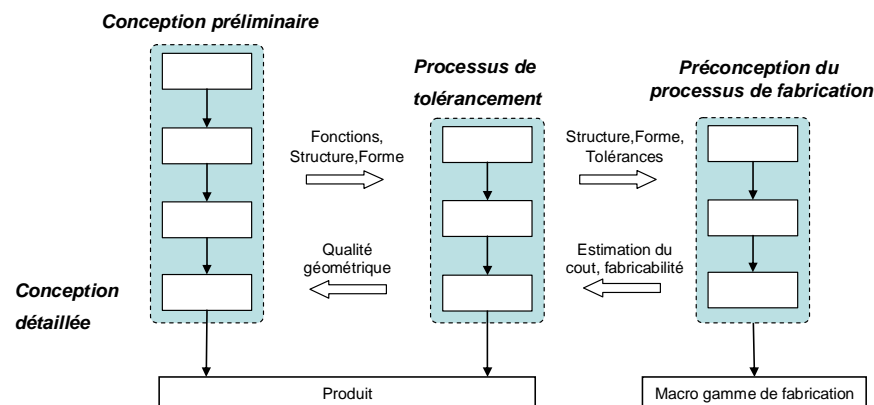


Figure 42 : Intégration Produit / Process – Rôle du tolérancement [Dantan 2006b]

Ces travaux s'inscrivent dans la même approche d'intégration produit process proposée par S. Feng [Feng 1999] dans laquelle nous positionnons le processus de tolérancement comme une interface entre le processus de conception du produit et le processus de préconception du processus de fabrication (comme cela est illustré dans la Figure 42).

Dans un premier temps, ce chapitre décrit la problématique posée par l'activité de tolérancement et présente les solutions couramment employées pour tenter de répondre à ce besoin. A partir de cette étude bibliographique, il propose une nouvelle approche dont l'objectif est d'allouer les tolérances fonctionnelles qui offrent le meilleur équilibre performance fonctionnelle / coût de fabrication. Cette dernière est basée sur la mesure d'un indicateur de performance de l'allocation. Cet indicateur de performance doit synthétiser deux préoccupations : coût de fabrication et qualité du produit qui sont généralement antinomiques. L'un des obstacles à la mise en œuvre de cette approche est la mesure de cet indicateur. De ce fait, nous proposons une approche basée sur l'analyse des activités afin de le mesurer. L'approche par activités permet de relier conditions et caractéristiques (dans la gestion des caractéristiques) en considérant le ou les processus de fabrication. Les besoins à la fois de cette approche et de l'environnement dans lequel elle s'inscrit sont finalement synthétisés dans un modèle IDEF0.

Ce chapitre se conclut par l'intégration d'un indicateur de performance dans une démarche d'optimisation de l'allocation des tolérances. Sont ainsi détaillées et comparées, dans un état de l'art, les approches disponibles. Ce paragraphe se focalise plus particulièrement sur l'approche par algorithme génétique, retenue comme outil de l'optimisation.

1 Allocation des tolérances - Problématique

La problématique de l'allocation des tolérances peut alors se décrire dans les modèles *KC* et *Condition Flowdown* (Figure 43). En effet, comme le montre le premier chapitre, une tolérance est une condition qui contraint l'amplitude d'une ou plusieurs variations, qui peuvent être par exemple dimensionnelle.

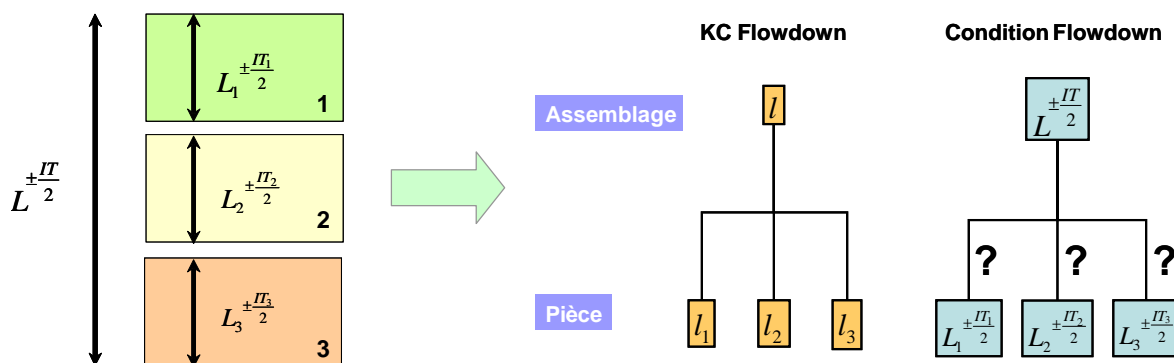


Figure 43 : Allocation des tolérances : Objectif

Ainsi, prenons l'exemple d'un assemblage simple (illustré à gauche de la Figure 43). Une exigence fonctionnelle est déterminée pour cet assemblage : une condition sur la variation l de l'assemblage apparaît alors dans le modèle *Condition Flowdown*. On sait que cette caractéristique l dépend des variations sur les longueurs de ses composants : l_1 , l_2 et l_3 , tel que $l = l_1 + l_2 + l_3$. L'objectif de l'allocation des tolérances est de déterminer comment répartir l'exigence portant sur l'assemblage sur les trois tolérances s'appliquant sur les trois composants.

Il existe à ce jour plusieurs méthodes permettant de faire l'allocation des tolérances. On peut ainsi en citer quatre :

- L'**équi-répartition** : On divise simplement l'intervalle de tolérance de l'exigence par le nombre de tolérances. Dans le cas précédent cela donne : $IT_1=IT_2=IT_3=IT/3$. Cette approche bien que rapide et facile ne prend absolument pas en compte la capacité du process et engendre souvent des surcoûts de production : elle ne prend donc absolument pas en compte l'impact de l'allocation sur la fabrication.
- L'**équi-capabilité** : La répartition de l'exigence se fait en fonction de la capabilité de chacun des moyens de production réalisant les composants [Freyd 1996]. Ainsi la répartition de l'exigence se traduit mathématiquement :

$$Cp_1 = Cp_2 = Cp_3 = k ; \quad \text{où} \quad Cp_i = \frac{IT_i}{6\sigma_i} ; \quad \text{d'où} : \quad IT \geq 6.k \cdot \sum_{i=1}^3 \sigma_i$$

Cette approche suppose que les processus de fabrication soient définis avant l'allocation des tolérances, ce qui conduit à la non optimisation du coût.

- Les **fonctions pertes de Taguchi** qui représente la perte associée à une variation par rapport à la cible. L'approche du tolérancement inertiel proposé par M. Pillet [Pillet 2005] limite l'« inertie statistique » d'une caractéristique qui est proportionnelle à la fonction perte de Taguchi. L'originalité de cette approche réside dans la nature de la valeur limitée qui est « homogène » à une perte et « homogène » à certains indicateurs de capabilité process. Par contre, cette modification de la nature de la valeur limitée ne résout pas le problème d'allocation : comment limiter les fonctions pertes associées à chaque caractéristique pièce afin de garantir des fonctions pertes des caractéristiques produit « admissibles ».
- La **minimisation du coût**, principalement basée sur des fonctions paramétriques du coût (définies dans le chapitre I).

C'est principalement pour leur limite de flexibilité, que les approches par fonctions paramétriques du coût n'ont pas été retenues. Afin d'explicitier ces limites, prenons l'exemple d'une spécification de type perpendicularité entre un alésage et un plan (donnée Figure 44).

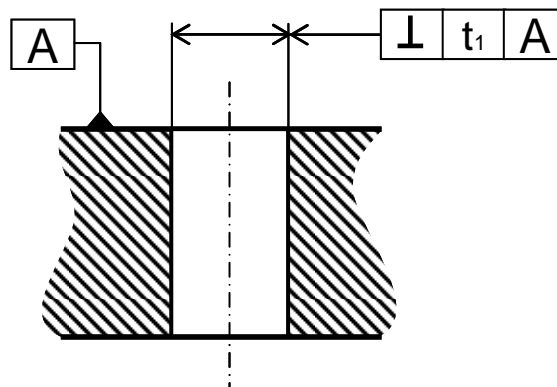


Figure 44 : Limite des approches paramétriques - Exemple

Via une estimation du coût par l'emploi des fonctions paramétriques, le coût de la tolérance est fonction, principalement, de l'intervalle de tolérance spécifié et d'un ensemble de paramètres (essentiellement fonction du matériau de la pièce à réaliser). De ce fait, qu'elle que soit la solution technique retenue pour la fabrication de cette spécification,

le coût estimé sera le même. Or dans le cas de cette spécification, plusieurs solutions techniques peuvent être employées, comme par exemple :

- Réaliser dans la même phase sur une machine 3 axes le surfaçage du plan et le perçage du trou.
- Réaliser ces entités géométriques en deux phases différentes : dans la première on usine le surfaçage et dans la seconde, après posage sur le plan précédemment usiné, on réalise le perçage.

Chacune de ces deux solutions permet l'usinage des entités géométriques en respectant la spécification de perpendicularité, à un coût néanmoins différent. Cette diversité n'est donc pas prise en compte par ces approches paramétriques.

De ce fait ces solutions paramétriques sont applicables dans le cas de la conception routinière de pièce à faible diversité morphologique, où l'emploi de *patterns* de conception est possible. Néanmoins, dans une optique de généralisation de l'approche, cette solution trop spécifique, ne peut être retenue. Nous nous sommes alors intéressés à l'approche par minimisation du coût, non plus appliqué directement au coût des tolérances mais au coût impacté par ces dernières.

L'approche d'allocation des tolérances proposée vise à définir les valeurs des tolérances qui offrent le meilleur équilibre qualité du produit / coût de fabrication. Cette notion d'équilibre qualité du produit / coût de fabrication doit être explicité sous forme d'un indicateur de performance qui doit permettre de comparer des solutions différentes entre elles. Le paragraphe suivant présente la fonction coût pondéré qualité, qui permet de prendre en compte à la fois la dimension économique et technique de l'impact des tolérances.

1.1. Le coût comme indicateur de performance

Avant de rechercher à optimiser les tolérances, il est nécessaire de définir un ou plusieurs indicateurs de performance d'une allocation. Cet ou ces indicateurs sont essentiels lors de la définition de la fonction objectif de l'optimisation des tolérances qui est un point essentiel de la démarche ABTA : la méthode employée doit être à la fois rapide (vu qu'elle s'inscrit dans une démarche d'optimisation) et précise. Elle doit également prendre en considération les impacts sur et du processus de fabrication.

Dans la littérature, il existe plusieurs types d'indicateur de performance qui ont comme objectif d'évaluer des solutions, ... Avant d'explicitier, l'indicateur de performance retenue pour l'allocation des tolérances, il est important de définir plus précisément le concept de performance. L'évaluation des performances d'une entreprise, d'une solution à un problème ou d'une activité consiste à mesurer les divers niveaux de mise en œuvre à travers l'efficacité (les résultats sont-ils à la hauteur des objectifs ?), l'efficience (au vu des moyens mis en œuvre, les résultats sont-ils satisfaisants ?), la pertinence (les moyens alloués sont-ils adaptés aux objectifs du projet ?) et la cohérence (en quoi l'action menée répond-elle au problème initialement posé ?). Par rapport à cette typologie des indicateurs de performance, seule l'indicateur d'efficacité nous intéresse pour l'allocation des tolérances qui résulte de la comparaison entre le résultat de l'allocation et les objectifs.

L'indicateur d'efficacité à mettre en œuvre pour l'allocation des tolérances doit être représentatif de nos objectifs : garantir un certain niveau de qualité du produit et minimiser le coût de fabrication.

Usuellement associée à une notion de coût, l'efficacité d'une allocation est ordinairement basée sur les différentes méthodes de calcul de coût de tolérances (majoritairement des lois paramétriques, décrites dans le paragraphe 1.2.II du chapitre I). Malheureusement, elles ne conviennent que partiellement aux besoins de flexibilité. En effet, ces modèles paramétriques ont un domaine de validité restreint limitant considérablement la flexibilité de leur utilisation (comme expliqué dans l'exemple *Figure 44* du paragraphe 1).

Par rapport aux objectifs (garantir un certain niveau de qualité du produit et minimiser le coût de fabrication), la seule composante coût n'est pas judicieuse comme indicateur d'efficacité. En effet, il peut être globalement pertinent d'utiliser des moyens de production peu coûteux avec un risque mesuré de non satisfaction des exigences fonctionnelles. C'est pour cette raison que nous proposons un autre indicateur d'efficacité d'allocation de tolérances qui ne représente pas le coût des tolérances mais le coût de fabrication impacté par les tolérances : le coût pondéré qualité. Ce coût pondéré qualité qui représente «*la mesure [...] de la conséquence (passée ou future, mais très probable) d'une action spécifique* » [H'Mida 2002] est présenté dans le paragraphe suivant.

1.2. Le coût pondéré qualité

La mesure de l'efficacité d'une allocation doit alors pondérer le coût de production par l'efficacité du processus de fabrication. Pour estimer ce dernier, il faudra alors identifier le cheminement d'un produit à travers les activités de l'entreprise et identifier particulièrement les conséquences en termes de consommation de ressources. Donc, nous proposons de pondérer les coûts de chaque activité par l'occurrence de cette activité et l'efficacité de celle-ci :

$$\text{Coût} = \frac{C_{\text{production}}}{P(\text{Ok})} + C_{\text{retraitement}} \cdot P(\text{NonConforme}) + C_{\text{réassortiment}} \cdot P(\text{NonMontable}) + \dots$$

Équation 7 : Expression du coût pondéré qualité

Ce coût pondéré qualité (Équation 7) se décompose en trois parties :

- Le rapport $\frac{C_{\text{production}}}{P(\text{Ok})}$ représente le coût de production des produits satisfaisant l'ensemble des contraintes, spécifications et/ou exigences. Le coût de production est pondéré par l'efficacité du processus employé. Ce rapport est composé de :
 - Au numérateur : $C_{\text{production}}$ est le coût de production du produit, et donc la somme des coûts des ressources employées pour la réalisation du produit. Plus les ressources utilisées sont coûteuses, plus cette partie de l'indicateur augmente.
 - Au dénominateur : $P(\text{Ok})$ est la probabilité que les produits fabriqués respectent les spécifications et les exigences définies par les concepteurs ainsi que les contraintes de montabilité. La prise en compte de la non-qualité lors de l'estimation du coût se traduit par le dénominateur de ce rapport. Ainsi plus cette probabilité de fabriquer

un produit conforme est faible plus le coût du produit conforme augmente.

Ainsi une solution technique peu coûteuse mais dont les incertitudes de fabrication ne permettent pas un respect des exigences de l'ensemble des produits fabriqués sera évalué d'une manière pertinente. En effet, la probabilité $P(Ok)$ est égale au nombre de produits conformes divisé par le nombre de produits fabriqués. Donc, le rapport $\frac{C_{production}}{P(Ok)}$ est égal au coût de fabrication d'un produit multiplié par le nombre de produits fabriqués (ce qui représente le coût de fabrication d'un lot de produits) divisé par le nombre de produits conformes.

$$\frac{C_{production}}{P(Ok)} = C_{production} \cdot \frac{\text{nombre de produits fabriqués}}{\text{nombre de produits conformes}}$$

Par exemple, le coût de production d'un produit est de 100€ via un processus de fabrication qui ne permet d'obtenir que 80% des produits conformes, alors le coût de production d'un produit conforme est de 125€.

- Le produit $C_{retraitement} \cdot P(NonConforme)$ représente le coût de retraitement des pièces ou produits non-conformes. Il est constitué de deux termes :
 - $C_{retraitement}$ est le coût de retraitement des pièces ou produits non-conformes, ce retraitement vise à recycler les matières premières, il devient nécessaire de prendre en compte cette dimension vis-à-vis des préoccupations environnementales.
 - $P(NonConforme)$ est la probabilité qu'au moins une spécification d'une pièce du produit ne soit pas satisfaite. Elle est alors considérée comme rebut.

Par exemple, le coût de production d'un produit est de 100€ via un processus de fabrication qui ne permet d'obtenir que 80% des produits conformes, et le coût de retraitement d'un produit non conforme est 10€ alors le coût de retraitement imputé à un produit conforme est de 2€.

- Le produit $C_{réassortiment} \cdot P(NonMontable)$ représente le coût de réassortiment des produits dû à une inadéquation entre les spécifications et les exigences fonctionnelles ou d'assemblage. Cette partie du coût pondéré qualité s'intéresse donc plus particulièrement aux problèmes d'assemblage. Il est constitué de deux termes :
 - $C_{réassortiment}$ est le coût de démontage et de réintégration des pièces dans la ligne d'assemblage. Ce coût essentiellement dû aux manipulations des opérateurs afin de trouver une combinaison de pièces conformes assemblables.
 - $P(NonMontable)$ modélise la probabilité que les spécifications géométriques de chaque pièce soient respectées et qu'au moins une exigence de montabilité ne soit pas respectée.

Par exemple, 5% des produits présentent des problèmes lors de l'assemblage, le coût de réassortiment d'un produit est 20€ alors le coût de réassortiment imputé à un produit conforme est de 1€.

A ce niveau, il est intéressant de remarquer que la fonction coût pondéré qualité n'est pas exhaustive. En effet, comme expliqué dans les paragraphes suivants, notre démarche est flexible : elle permet alors d'enrichir cette fonction d'évaluation de l'efficacité des tolérances par d'autres coûts comme des coûts logistiques ou environnementaux, qui sont eux aussi impactés indirectement par l'allocation des tolérances.

Nous pouvons envisager une adaptation de la fonction coût pondéré qualité par rapport à certaine réalité industrielle. Dans le cas de la fabrication de structure aéronautique, afin de remédier à des problèmes d'assemblage, les ingénieurs utilisent des pièces « fusibles » [Marguet 2001] ; alors la fonction coût pondéré qualité dédiée à ce type de problème serait :

$$\text{Coût} = C_{\text{production}} + C_{\text{pièce}} \cdot P(\text{NonAssemblable}) + C_{\text{logistique}} \cdot P(\text{NonAssemblable}) + \dots$$

Le coût pondéré qualité est donc la variable de décision pour estimer l'efficacité d'une allocation des tolérances. Néanmoins sa mesure ou son estimation nécessite de définir un environnement et une méthode permettant l'évaluation des paramètres constituant notre fonction et ainsi :

- D'être capable d'estimer les coûts de production, de retraitement, d'assemblage, ... ($C_{\text{production}}$, $C_{\text{retraitement}}$ et $C_{\text{réassortiment}}$). Pour estimer ces coûts, il est nécessaire de sélectionner ou de générer le ou les processus de fabrication en adéquation avec les tolérances spécifiées par le concepteur, et ainsi identifier les ressources consommées et leur coût.
- De pouvoir évaluer les différentes occurrences pondérant les coûts précédents : $P(\text{Ok})$, $P(\text{NonConforme})$, $P(\text{NonMontable})$, ... Ces probabilités nécessitent l'analyse des tolérances et la vérification que le process fabrique des produits ou/et des pièces en conformité avec les spécifications et exigences définies par le concepteur.

Les deux paragraphes suivant décrivent la méthode ABTA, l'approche proposée permettant de mesurer cet indicateur d'efficacité.

2 Evaluation de l'indicateur d'efficacité - ABTA

Avant de pouvoir estimer la performance d'une allocation des tolérances, des travaux préparatoires, en amont de notre approche, doivent être effectués. Ces travaux sont considérés comme des entrées de la méthode ABTA. Elles sont au nombre de trois :

- La première est la **décomposition du produit en entités**, supportée par un modèle produit. Cette formalisation du mécanisme à étudier est nécessaire à une approche automatisée et informatisée. Un exemple de décomposition d'une pièce exemple est proposé *Figure 45* à titre illustratif.

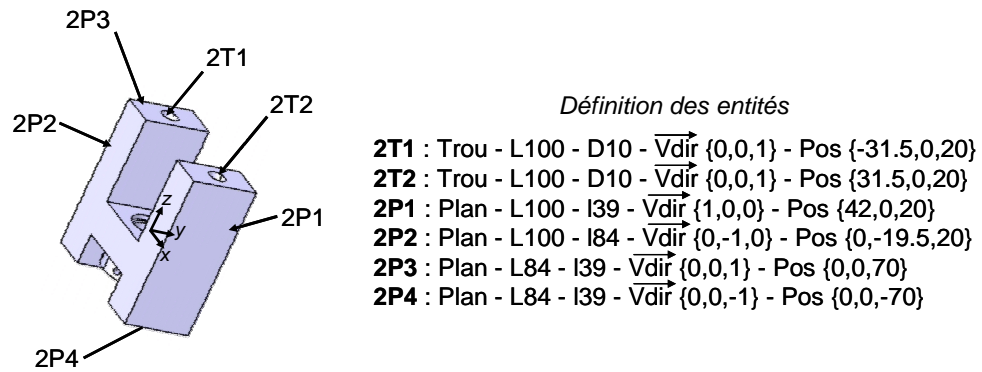


Figure 45 : Décomposition en entités géométriques - Exemple

- La seconde est la **description des spécifications et conditions** que le produit doit respecter. Ces données sont le résultat de la synthèse des tolérances dont les outils et méthodes sont décrits dans le chapitre précédent. Il s'agit de l'entrée principale de l'approche, plus particulièrement de **l'allocation des tolérances**, proposée par les concepteurs et dont on doit évaluer la performance.
- L'ensemble des **ressources disponibles**, ainsi que les conditions de leurs utilisations (exprimées par les connaissances métiers des experts gammistes) sont également des entrées clefs de notre approche.

Ces entrées sont alors formalisées dans les modèles *KC Flowdown* (paramètres produit) et *Condition Flowdown* (spécifications et tolérances principalement) du produit.

L'objectif de l'ABTA est, à l'instar de l'approche de [Feng 2000] donnée Figure 42, de proposer une interface entre le processus de conception du produit et le processus de conception du process en facilitant et optimisant la qualité des échanges entre ces deux grandes étapes du cycle de vie du produit.

L'évaluation de cet indicateur d'efficacité est constituée d'une synthèse descendante (dans la structure KC), la première étape, permettant la sélection du ou des processus de fabrication en fonction des tolérances, et d'une analyse ascendante qui vise à évaluer l'impact du processus de fabrication sur le produit et ses caractéristiques de haut niveau. Ce paragraphe est donc décomposé en suivant la chronologie de ces deux étapes.

2.1. Etape 1 : Synthèse descendante

A partir des tolérances quantifiées et d'un ensemble d'autres informations relatives à chaque pièce (matériau, morphologie de la pièce, ...), cette étape vise à explorer l'espace de conception du processus de fabrication, c'est-à-dire sélectionner l'ensemble des processus de fabrication viables (Figure 46).

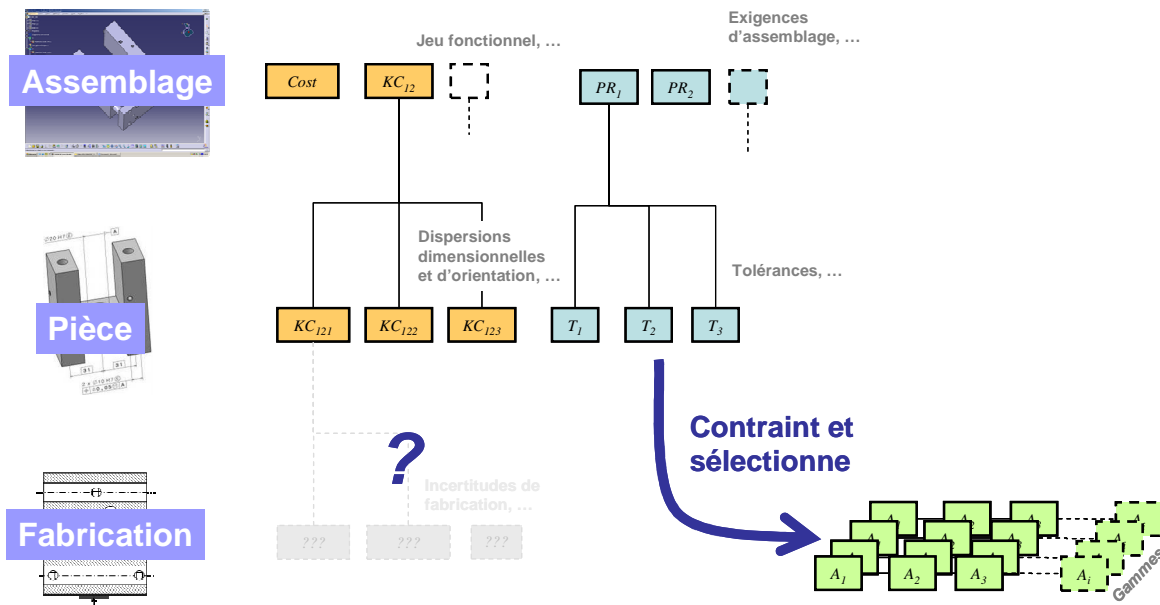


Figure 46 : Etape 1 : Synthèse descendante

Ainsi, cette étape débute dès que les modèles *KC Flowdown* et *Condition Flowdown* sont complétés et que le produit est décomposé en entités descriptives (notée ① dans la Figure 47). Les objectifs de cette étape sont illustrés dans la figure Figure 46 : sélectionner parmi les ressources disponibles celles qui sont capables de réaliser le mécanisme spécifié, et ordonner les activités de fabrication. Pour se faire, cette étape se déroule en quatre grandes activités :

- La première activité, noté ② dans la Figure 47, est la sélection des ressources disponibles, dont la combinaison permet de réaliser la géométrie des entités composant le mécanisme. Ces combinaisons « outils + machines + posages + opérations » sont alors synthétisées dans des activités de production qui constituent le processus de fabrication. Cette sélection nécessite la formalisation et la capitalisation des connaissances métier des experts gammistes. Ainsi, à la fin de cette sélection, pour chacune des entités composant le produit, peuvent être associées plusieurs activités de production.

Par exemple (Figure 47), à chaque entité considérée a été associé un ensemble d'opérations de fabrication et de ressources – trois activités $\{A_1, A_2, A_3\}$ ont été sélectionnées, ainsi que des ressources, qui permettent la réalisation de l'Entité₁.

- L'étape suivante (③) revient à confronter ces activités productives aux intervalles des tolérances définies par les concepteurs. On supprime ainsi les activités qui ne sont pas capables de satisfaire les spécifications exprimées dans le *Condition Flowdown*. Cette analyse peut être basée sur l'un des indicateurs de capacité décrits dans le chapitre précédent, par exemple : le Cp. Toute activité qui a sa capacité en dessous d'un seuil (par exemple fixé à 1.33) est alors supprimée de l'espace des solutions. Lors de cette étape, il s'agit d'une évaluation de la capacité au niveau de l'entité. Par exemple (Figure 47), au regard des spécifications que doit satisfaire l'entité 1, les activités $\{A_1, A_3\}$ ont été considérées comme capable et l'activité $\{A_2\}$ comme non capable.

- A cette étape, nous disposons pour chaque entité géométrique, d'un ensemble d'activités de production capables. L'objectif de cette troisième étape est de générer les gammes de fabrication du mécanisme complet en ordonnant ces activités de production. Ainsi comme l'illustre la *Figure 47*, le résultat de cette étape est un ensemble de combinaisons d'activités de production, ordonnées au sein de gammes de fabrication. La *Gamme₁* est constituée des activités ordonnées $\{A_1, A_5\}$.

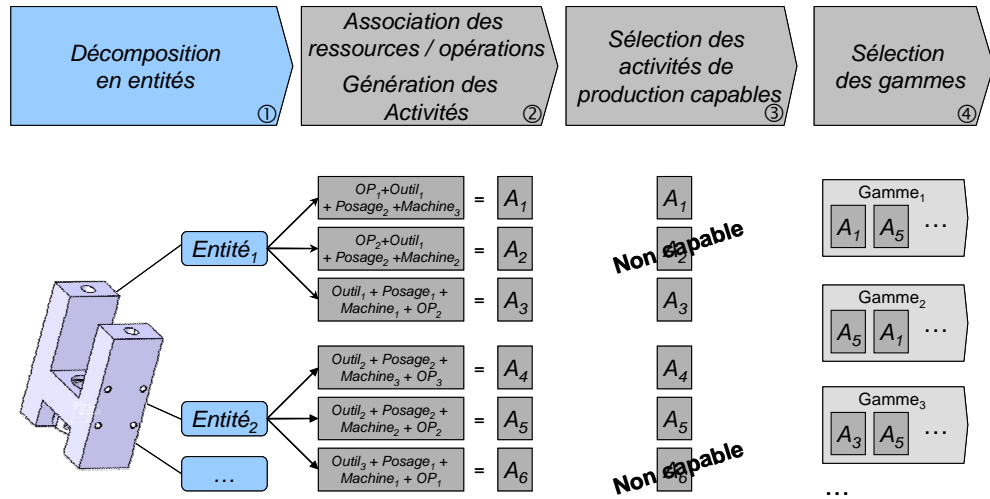


Figure 47 : Sélection de processus – Modèle simplifié

- La dernière étape (qui n'apparaît pas sur la *Figure 47*) consiste à enrichir les gammes précédemment générées qui sont, au début de cette étape, constituées uniquement d'activités dites de production. L'objectif de cette étape est d'enrichir les gammes précédemment générées d'activités de préparation, d'assemblage, ...

En conclusion, la première étape de l'ABTA correspond à la génération des gammes de fabrication capables, a priori, de produire le mécanisme spécifié. Ainsi, la sortie de cette étape de synthèse est un ensemble de gammes composées d'activités ordonnées.

Néanmoins ce résultat n'assure pas que ces processus de fabrication produisent des pièces respectant les conditions exprimées par le concepteur. Cette étape d'évaluation des impacts du processus généré est réalisée par la seconde étape de la méthode ABTA et est expliquée plus en détails dans le paragraphe suivant.

2.2. Etape 2 : Analyse ascendante

L'objectif de cette étape consiste à vérifier que les gammes générées dans l'étape précédente fabriquent des produits qui respectent les exigences définies par le concepteur et formalisée dans le *Condition Flowdown*. Contrairement à l'évaluation de la capacité effectuée lors de l'étape 1 afin de présélectionner les activités de fabrication, l'évaluation effectuée lors de cette étape est au niveau produit. Plus précisément le but est de quantifier la performance de l'allocation des tolérances et des autres conditions définies par les concepteurs. L'objectif secondaire est d'également de sélectionner la meilleure gamme parmi celles proposées par l'étape de synthèse.

Ainsi pour chaque gamme générée dans l'étape précédente, l'analyse ascendante s'opère en 5 grandes phases qui sont illustrées dans la *Figure 48* :

- ① **Identification** : Le fait de connaître le processus de fabrication permet, dans un premier temps d'identifier les incertitudes de fabrication et les ressources qui en sont la cause. Ainsi cette première analyse permet de compléter le *KC Flowdown* avec les caractéristiques process identifiées via les activités composant la gamme. Cette étape est importante ; en négligeant les impacts du milieu, l'ensemble des variations du produit dépend uniquement de ces caractéristiques de bas niveau. Ainsi dans l'exemple donné *Figure 49*, une activité de production est considérée : réalisation de l'entité 12, elle nécessite l'utilisation d'un ensemble de ressources, le résultat de cette opération d'identification est l'insertion des variations des ressources (notées V_{81} , V_{82} , et V_{83}) dans le modèle *KC Flowdown* au niveau des caractéristiques process.

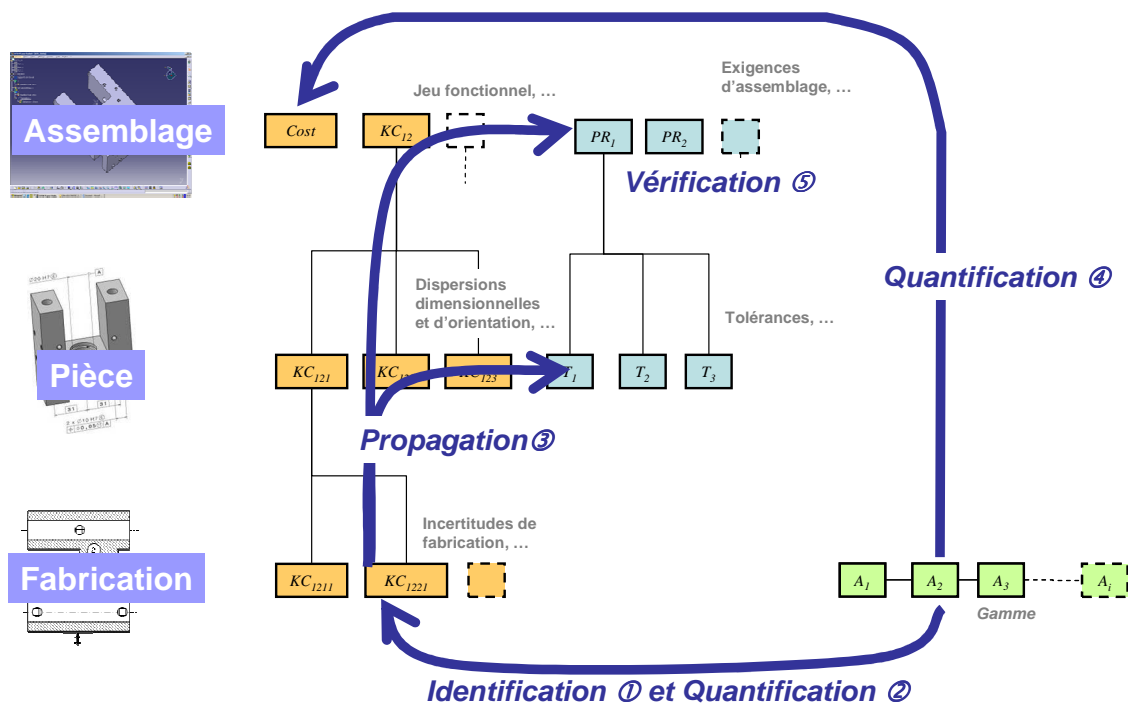


Figure 48 : Etape 2 : Analyse Ascendante

- ② **Quantification** : Une fois l'identification effectuée, la quantification de ces variations de bas niveau est aisément obtenue à partir des ressources employées par les activités de production. Cette analyse est facilitée avec notre approche par activités.
- ③ **Propagation** : L'analyse de la gamme réalisée permet également de déterminer les relations de causalité entre les caractéristiques d'une pièce (écarts dimensionnelles, de position ou d'orientation par exemple) et les caractéristiques du process (dispersions de fabrication). Une fois les relations de causalités process / pièce déterminées, et puisque que les relations de causalités pièces / produit sont considérées comme une entrée de la méthode, il est possible de propager les dispersions de fabrication à l'ensemble des caractéristiques du produit.

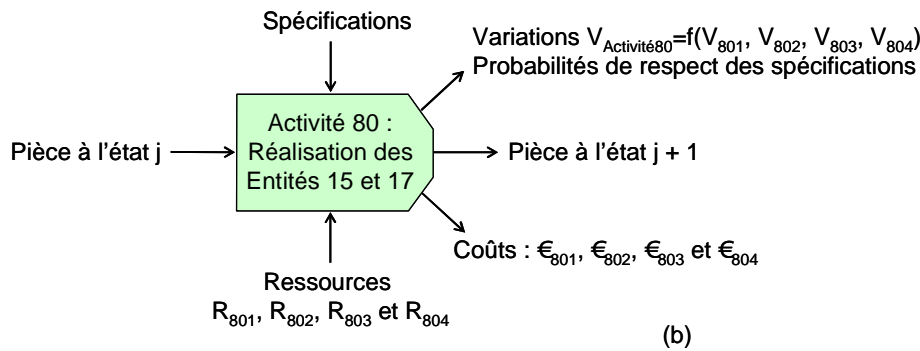


Figure 49 : Relations entre activités / ressources / caractéristiques –Exemple

Dans l'exemple *Figure 49*, l'activité *Activité₈₀* réalise les deux entités notées *Entité15* et *Entité17*. De ce fait les variations associées à ces entités dépendent alors directement des variations de cette activité donc des ressources utilisées lors de cette activité. Les variations de position de l'*Entité15* par rapport à l'*Entité17* dépendent des variations des ressources ce qui se traduit dans le *KC Flowdown* par l'apparition de liens de causalité entre ces caractéristiques.

- ④ **Vérification** : Une fois cette quantification des caractéristiques effectuée, l'étape suivante consiste à vérifier que l'ensemble des conditions contraignant les variations soient vérifiées. Cette étape, permet également d'enrichir la gamme analysée en y planifiant les activités de contrôle de conformité, de retrait et de réajustement permettant la surveillance de processus risqués. Qui plus est c'est à ce niveau qu'il est possible de quantifier les trois probabilités $P(Ok)$, $P(NonConforme)$ et $P(NonMontable)$ nécessaires à l'estimation du coût pondéré qualité.
- ⑤ **Quantification** : En plus de permettre la quantification des caractéristiques process, connaître la gamme de fabrication permet de quantifier le coût. En effet le coût, qui n'est pas une caractéristique (dans le sens défini par Thornton) est néanmoins un critère important dans l'analyse de la performance d'une allocation. L'approche par activité permet cette estimation du coût, puisqu'il suffit dans ce cas de sommer les coûts des différentes ressources employées. C'est également dans cette étape qu'il est possible d'estimer les trois coûts $C_{production}$, $C_{retraitement}$ et $C_{réassortiment}$ manipulés par le coût pondéré qualité.

Dans l'exemple *Figure 49*, le coût de l'*Activité₈₀* est la somme des coûts des ressources : $C_{Activité80} = \epsilon_{801} + \epsilon_{802} + \epsilon_{803} + \epsilon_{804}$

Le résultat de cette étape d'analyse est, pour une gamme donnée, l'évaluation à la fois des variations du produit et de son coût engendrés par le processus analysé.

Un point important doit être précisé. Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous manipulons un grand nombre de caractéristiques sans se soucier de leur criticité. En effet, afin de limiter le coût de contrôle, il est préférable de limiter la surveillance aux seules caractéristiques dont la criticité est importante et dont une faible variation peut impacter de façon « disproportionnée » la qualité finale du produit.

La démarche proposée dans ce paragraphe ne permet pas actuellement d'analyser la criticité de ces variations. Néanmoins sa conception est telle qu'elle reste un

environnement favorable et compatible avec de telles analyses. On peut également souligner que cette analyse de criticité n'existe pas non plus dans le concept original proposé par Thornton puisque les relations entre caractéristiques ne sont que purement qualitatives.

Cette structure itérative qui s'inspire de toutes démarches de conception, permet d'évaluer la performance d'une allocation et pour pouvoir jouer sur les valeurs des conditions jusqu'à obtenir une allocation performante. En s'inscrivant dans un processus d'optimisation, le résultat est alors un ensemble de conditions allouées accompagné de la meilleure gamme réalisant cette allocation.

Qui plus est, l'intégration de l'approche par activités est un apport majeur de l'ABTA car il permet de mettre en relation deux arborescences usuellement découplées : le *KC Flowdown* et le *Condition Flowdown*. Le paragraphe suivant détaille plus précisément le concept d'activités, en précisant les différents types d'activités modélisés et les enrichissements apportés.

3 Approche par activités

Comme illustré dans la *Figure 48* et dans les paragraphes précédents, la démarche ABTA repose sur une approche par activité afin de réaliser l'interface entre d'un côté le domaine de la conception et de l'autre celui de la production.

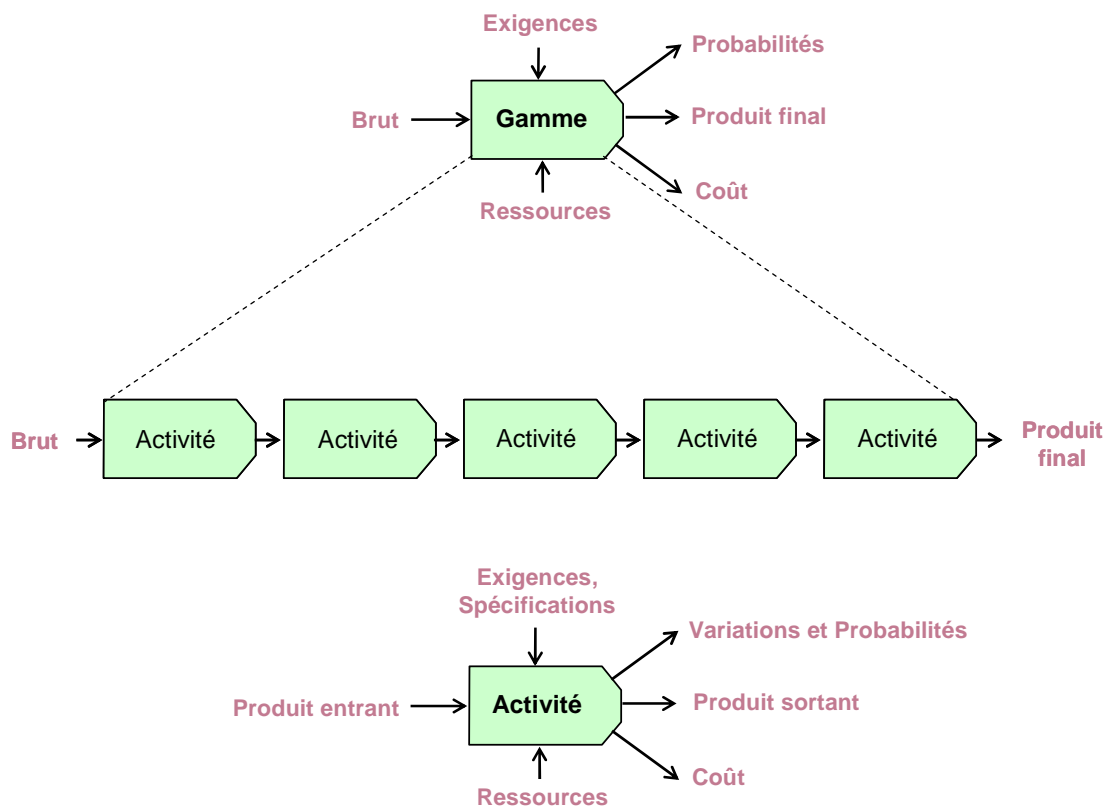


Figure 50 : Modélisation d'une gamme et d'une activité

L'objectif est alors de proposer un environnement permettant à la fois, la description complète du processus, l'analyse de l'impact des ressources et leur ordonnancement sur

les variations et les caractéristiques produit de plus haut niveau. Notre approche basée sur la méthode ABC, est plus précisément décrite dans les paragraphes suivants.

Le déploiement de l'ABTA nécessite la modélisation du processus de fabrication en un ensemble d'activités ordonnées : le concept de gamme. Une liste ordonnée d'activités est illustrée par la *Figure 50*. Cette modélisation est donc une représentation virtuelle de flux physiques. Dans la description d'une activité, d'une séquence d'activités ou d'une gamme, sont représentés : le flux relatif au produit, les ressources nécessaires à la fabrication, les exigences et spécifications qui contrôlent l'activité, les coûts de l'activité et ses impacts en termes de variations et probabilités (*Figure 50*).

Parmi l'ensemble des types d'activité possible, les paragraphes suivants se focalisent sur les activités clef de cette modélisation : les activités de production, les activités préparatoires, les activités de contrôle de conformité, de retrait et de réajustement. Les paragraphes suivants précisent pour chacune d'elle : leur but, le type de ressources qu'elles consomment et leur comportement.

3.1. Activité de production

Par activité de production, sont regroupées toutes les activités participant à une modification morphologique du produit ou de ses composants. Ces modifications ne se limitent pas à la géométrie (usinage, forgeage,...) mais peuvent être d'autres natures (cémentation, peinture,...).

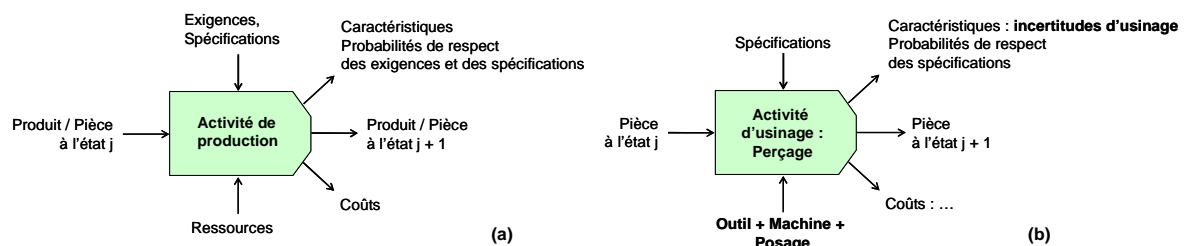


Figure 51 : Activité de production – (a) Cas général et (b) Exemple

Nous avons restreint l'étude de ces activités de production aux cas des produits uniquement usinés en phase de finition, où la qualité dimensionnelle est recherchée. Dans ce cas, l'activité de production principale est l'activité d'usinage. Ci-dessous sont donnés les points clefs de cette activité :

- **Rôle** : Comme énoncé ci-dessus (*Figure 51*), cette activité modifie la morphologie de la pièce ou du produit, elle est assimilable à une opération de fabrication.
- **Ressources consommées** : cette activité consomme principalement comme ressources : des machines, des outils, de la main d'œuvre, des posages...
- **Performance** : la performance dépend des variations des ressources consommées, de la façon de combiner les activités et des spécifications ou exigences définies par le concepteur. C'est la seule activité considérée comme imparfaite dans la méthode ABTA.
- **Coût** : Le coût de cette activité dépend uniquement des ressources consommées.
- **Génération d'activités** : L'activité de production peut générer une activité de contrôle de conformité ou une activité de suivi de fabrication lorsque sa

performance est trop faible afin de limiter les risques de produire des caractéristiques en dehors des intervalles bornés par les exigences.

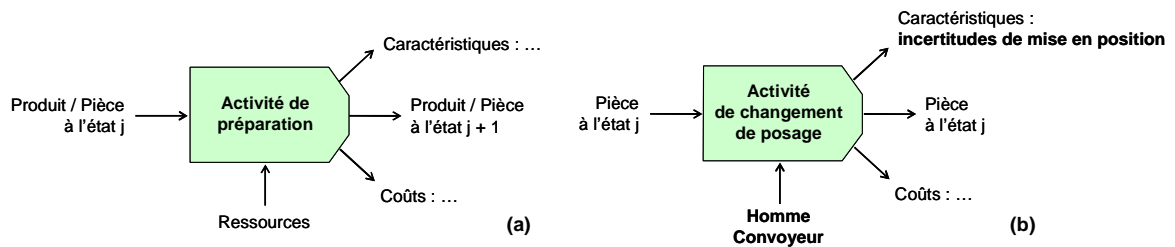


Figure 52 : Activité de préparation – (a) Cas général et (b) Exemple

Les autres activités de fabrication ne modifiant pas la morphologie de la pièce sont considérées comme étant des activités de « préparation » (Figure 52). Les changements d'outils ou de posage, les rotations de table sont quelques exemples de ce type d'activités. Les variations des pièces dépendent également de ces activités. En effet elles introduisent des erreurs de positions et ont un impact à la fois sur la position ou/et l'orientation entre les entités géométriques.

3.2. Activité de contrôle de conformité

Puisqu'aucun moyen de production n'est parfait il est nécessaire de pouvoir contrôler, à des étapes clés du processus, si les pièces réalisées respectent parfaitement les conditions exprimées par les concepteurs. Ce contrôle est réalisé par les activités dites de « contrôle de conformité », dont le diagramme est donné Figure 53.

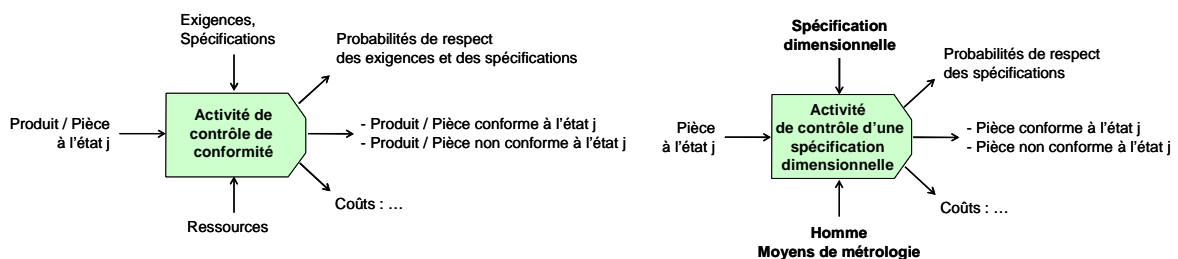


Figure 53 : Rôle de l'activité de contrôle de conformité

Les points clés de cette activité de contrôle de conformité sont

- **Rôle** : Le rôle de cette activité de contrôle de conformité est d'analyser les pièces produites dans les étapes précédentes du processus de fabrication afin de contrôler qu'elles respectent bien les spécifications définies par les concepteurs.
- **Ressources consommées** : Ce type d'activité consomme en tant que ressources : de la main d'œuvre, des machines et outils de contrôle (comme des machines à mesurer tridimensionnelles ou des calibres par exemple). Les méthodes et stratégies de contrôle sont considérées comme des ressources de cette activité.
- **Performance** : Ce type d'activité est supposé être parfait (suffisant par rapport aux objectifs de la méthode), les erreurs de mesure et de contrôle ne sont pas modélisées à l'heure actuelle dans l'ABTA.

- **Coût** : A l'instar de l'activité de production, le coût de contrôle d'une pièce ne dépend uniquement que des ressources consommées par l'activité de contrôle
- **Génération d'activités** : En fonction du type d'artefact contrôlé, cette activité peut générer deux types d'activité : une activité de retrait ou une activité de réajustement.

Cette solution, reposant sur une analyse totale des pièces fabriquées est la seule implémentée dans l'ABTA. Il est aussi possible de modéliser une activité de suivi de production (Figure 13) [Pillet 1994]. Cette activité est sensiblement identique à l'activité de contrôle de conformité, elle se distingue par le fait qu'elle peut générer une activité de préparation de type réglage.

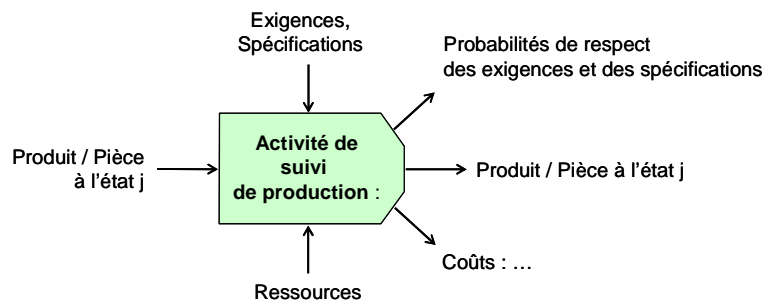


Figure 54 : Activité de suivi de production

3.3. Activités de retrait et de réajustement

Lorsque les pièces contrôlées ne respectent pas les exigences définies par les concepteurs, elles doivent être retirées de la ligne de production afin de rectifier leurs défauts si cela est possible, ou les recycler dans le cas contraire. Afin de modéliser ces opérations, ont été créés les activités de retrait et de réajustement.

3.3.1 Activité de retrait

- **Rôle** : Lorsqu'une pièce est hors tolérance, il est nécessaire de la retirer de la ligne de production (détruire).
- **Ressources consommées** : Cette activité de retrait consomme principalement de la main d'œuvre et des outils de convoyage et de stockage.
- **Performance** : Cette activité est considérée comme étant parfaite.
- **Coût** : Le coût de cette activité dépend uniquement de ressources qu'elle consomme, et dans ce cas plus particulièrement de la main d'œuvre. A noter que cette activité peut également rapporter de l'argent si l'on considère la matière revendue.
- **Génération d'activités** : Aucune

3.3.2 Activité de réajustement

- **Rôle** : Cette activité apparaît lorsque plusieurs pièces conformes ne sont pas assemblables. Dans ce cas, cette activité consiste à rechercher d'autres combinaisons possibles afin de rendre cet assemblage possible.
- **Ressources consommées** : Cette activité consomme essentiellement de la main d'œuvre et quelques outils dont le coût peut être négligé.

- **Performance** : Cette activité est considérée comme étant parfaite.
- **Coût** : Comme pour l'activité précédente son coût dépend des coûts de ses ressources.
- **Génération d'activités** : Aucune

3.4. De la méthode ABC à l'ABTA : Enrichissements

L'ABTA est basée sur la méthode ABC (*Activity Based Costing*) qui s'appuient sur la description des liens de consommation entre ressources, activités et produits. Cette méthode analytique, présentée plus précisément dans la première partie du Chapitre I., est exclusivement structurelle : elle se limite à la description et à la quantification des liens de consommation.

En effet, la méthode ABC propose, pour estimer le coût d'un produit, d'identifier les liens de consommation entre d'un côté les ressources et les activités et d'un autre côté les activités et les produits. Il suffit alors de sommer les coûts des ressources pondérés des consommations pour obtenir une valeur approchée du coût du produit.

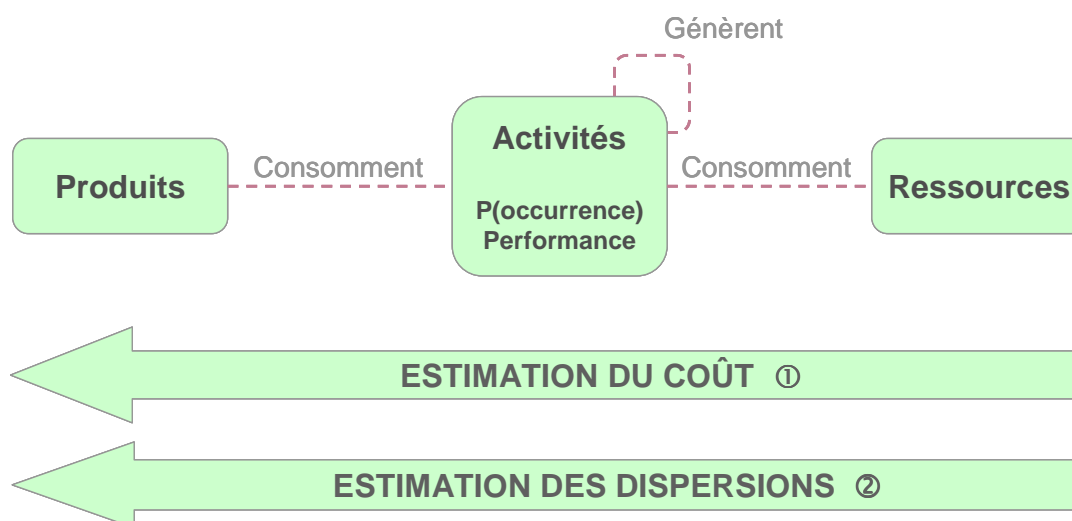


Figure 55 : ABTA - Extension de la méthode ABC pour l'allocation de tolérances

Cette approche ne permet alors de répondre qu'à une unique partie des besoins de l'approche ABTA : l'estimation du coût (*Figure 55*- flèche de rétro action①). Cependant elle reste inadaptée, dans l'état, à une estimation des variations finales du produit (*Figure 55* - flèche de rétro action②).

De ce fait, quelques enrichissements et modifications doivent être apportés afin d'être le support à la fois de l'estimation du coût et des variations du produit d'estimer tout en prenant en compte des spécificités et des besoins de la conception préliminaire du processus. Trois modifications majeures ont été apportées, elles sont données *Figure 55*.

- Le premier enrichissement concerne une notion inexistante dans la vue uniquement structurelle de la méthode ABC : **le concept d'ordre (ordonnement)**. En effet l'ordre est un paramètre important dans une gamme car il a un impact direct sur le risque de non qualité et également un impact indirect sur le coût de production.
- De plus, à la description structurelle et statique de la méthode ABC une **vue dynamique** est ajoutée par la génération conditionnée des activités. Ainsi une activité peut générer une seconde et l'ajouter à la gamme en cours. Par exemple,

dans le cas d'une activité de production, lorsque son indicateur de performance est trop faible, elle peut générer une activité de contrôle de conformité.

- Le dernier enrichissement des activités est l'ajout de deux paramètres : **l'indicateur de performance et d'occurrence**. Le premier permet de quantifier la probabilité qu'une activité produise une pièce (ou un produit dans le cas d'une activité d'assemblage) en adéquation avec les exigences et les spécifications. L'occurrence d'une activité est sa probabilité d'apparition dans la gamme, elle est modélisée par le second paramètre.

Ainsi enrichies, les activités sont alors à la fois le support de la description du processus de fabrication et de l'analyse des variations, toutes deux nécessaires à l'évaluation du coût pondéré qualité, l'indicateur d'efficacité d'une allocation de tolérances.

Le paragraphe suivant propose une analyse des causes de la non-qualité en effectuant un parallèle entre notre démarche ABTA et la méthode des 5M.

3.5. Analyse des causes de la non qualité prise en compte dans l'indicateur d'efficacité

Afin d'identifier les causes de non qualité, la *Figure 56* rappelle les relations entre les activités, les variations et les tolérances.

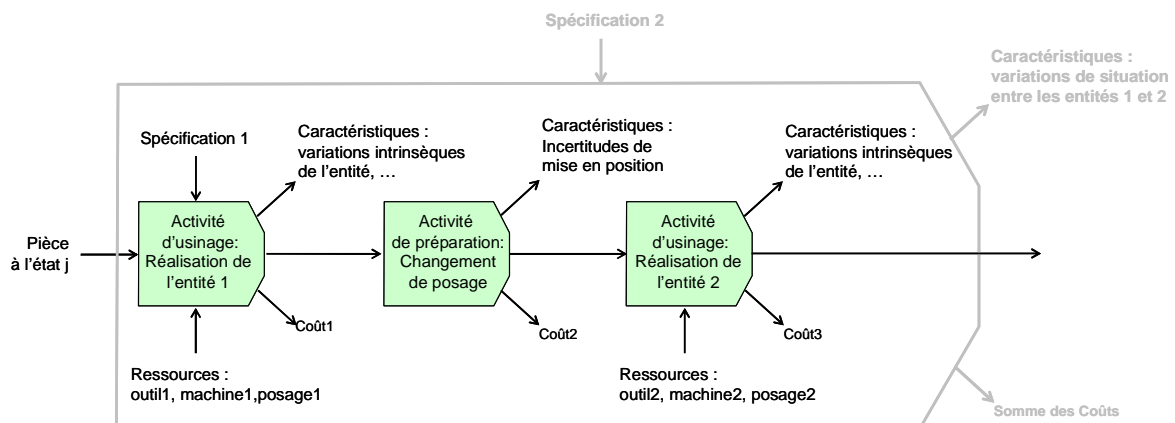


Figure 56 : Les causes des variations et l'intérêt de l'approche par activités - Exemple

Le produit est décomposé en un ensemble d'entités géométriques, qui sont réalisées par des activités. Les spécifications définies par le concepteur limitent des variations intrinsèques à l'entité ou de situation entre entités. L'objectif de l'allocation des tolérances est de quantifier les bornes dans lesquels le concepteur accepte l'évolution des variations. Puisque ces entités sont réalisées par une ou plusieurs activités, leurs variations dépendent des variations des ressources consommées ou utilisées par l'activité pour leur réalisation.

Par exemple *Figure 56*, une macro activité (en gris clair) réalise deux entités : *Entité1* et *Entité2*. Cette macro activité est décomposée en trois activités : « *Réalisation de l'entité 1* », « *Changement de posage* », et « *Réalisation de l'entité 2* ».

La première spécification considérée (*Spécification1* – *Figure 56*) limite des variations intrinsèques à l'*Entité1* qui sont dues aux dispersions de fabrication de l'activité « *Réalisation de l'entité 1* ». A partir des dispersions de fabrication de cette activité, donc des dispersions des ressources consommées par cette activité, il est possible de caractériser

les variations intrinsèques de l'entité ainsi que la probabilité de respect de cette spécification.

La deuxième spécification considérée (*Spécification2 – Figure 56*) limite des variations de situation entre l'Entité1 et l'Entité2 qui, dans ce cas, sont dues aux dispersions de fabrication de la macro activité donc des trois activités. En effet, les variations de situation entre l'Entité1 et l'Entité2 sont dues à la composition des dispersions des deux activités de réalisation, de l'activité de changement de posage (dispersions de remise en position), et peuvent être dues à d'autres activités antérieures sauf si le nouveau posage est effectué sur l'Entité1.

Afin de valider la pertinence de cette approche et sa prise en compte du plus grand nombre de causes de non qualité du produit, un parallèle est proposé entre l'ABTA et le diagramme Ishikawa du concept de 5M.

Selon ce concept, la qualité d'un produit dépend de 5 causes majeures, les 5M : Matériau, Machine, Main d'œuvre, Méthode et Milieu. Une représentation sous la forme d'un diagramme cause effet est illustré *Figure 57*.

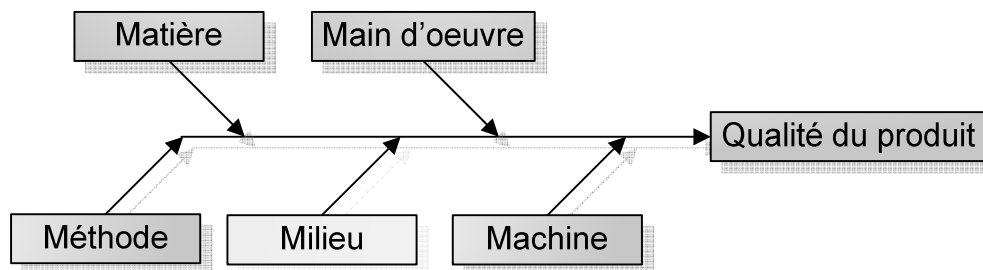


Figure 57 : Modèle Ishikawa (cause/effets)

La méthode ABTA modélise les impacts d'un certain nombre de ces causes :

- L'impact des **machines**, sur le coût et sur les variations, est pris en compte dans l'ABTA par le biais des activités de production. Ici, la notion de machine est synonyme de ressource incluant les porte-pièces, les outils, ...
- La **main d'œuvre** est quant à elle indirectement intégrée à l'approche via les activités en tant que ressource. Comme par exemple dans le cas des activités de production ou de contrôle.
- La **méthode** est également modélisée via la notion d'ordre des activités au sein d'une gamme ou d'un processus (comme illustré dans la section précédente)
- Les défauts engendrés par le **matériau** sont quant à eux indirects. En effet ils ont un impact sur le choix des ressources employées et donc sur la qualité du produit. Les variations engendrées par le matériau sont modélisables dans le diagramme KC Flowdown.
- Seul le **milieu** dans lequel le produit est réalisé n'a pas été modélisé dans l'ABTA. La trop grande complexité de ces paramètres (allant de la température des ateliers jusqu'aux problèmes sociaux) de part leurs relations, leur nombre et leur hétérogénéité n'est pas modélisable dans le cadre de notre démarche. Par conséquent, le milieu n'a pas été modélisé dans le modèle ABTA.

3.6. Exemple

Pour illustrer les concepts définis dans les paragraphes précédents ainsi que leur intégration dans la démarche générale définie au début de cette partie du mémoire, un exemple simple et purement illustratif est proposé à la *Figure 58*. Cet exemple est un sous-système constitué de deux pièces (nommées *Pièce1* et *Pièce2*) dont la fonction principale est de réaliser une liaison glissière. Ces pièces sont constituées de plusieurs entités géométriques (dans cet exemple simple, ce ne sont que des plans) précisées sur la *Figure 58*.

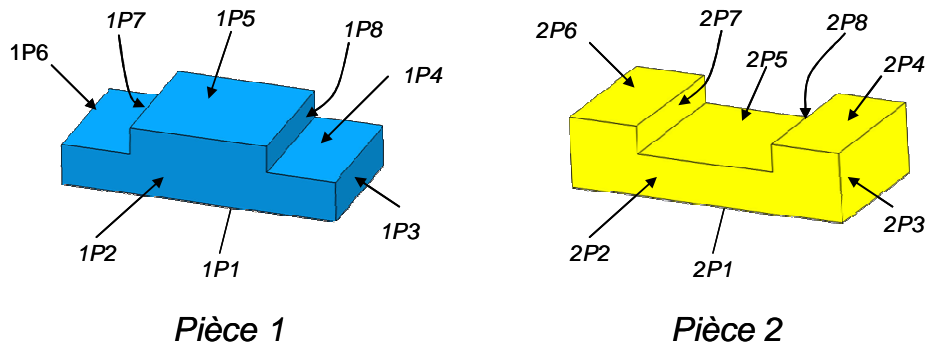


Figure 58 : Pièces exemple

Le résultat de la modélisation dans l'environnement ABTA est donné dans la *Figure 59*. Trois gammes sont modélisées : la gamme fabrication de la *Pièce1*, celle de la *Pièce2* et celle du sous-ensemble. Ces listes ordonnées d'activités ne se limitent pas aux activités productives.

La sélection des activités dépend essentiellement de la géométrie de la pièce, des spécifications qui lui sont associées et des capacités des ressources disponibles. Les méthodes employées pour sélectionner ces activités et générer le process complet du produit sont plus amplement détaillées dans le chapitre III.

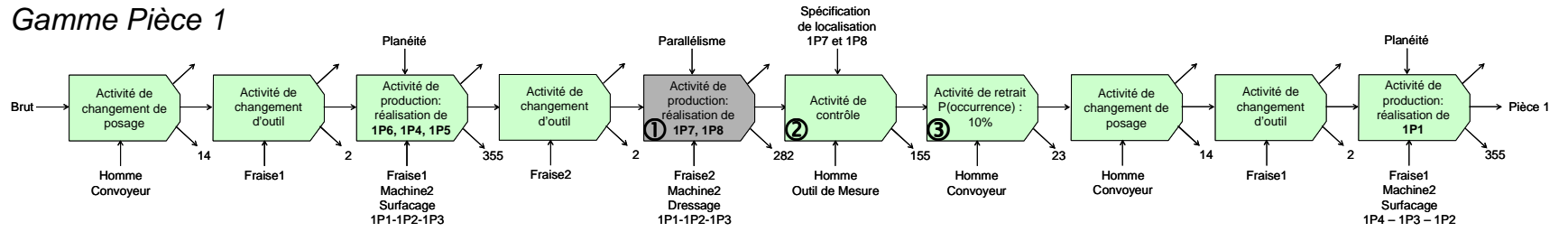
Soit l'exemple de la gamme de fabrication de la *Pièce1*, qui est réalisée en deux posages. La première l'activité de production (notée ① dans la *Figure 59*) réalise les deux plans *1P7* et *1P8*. Les variations intrinsèques de ces plans (leur rugosité par exemple) dépendent alors directement des ressources de cette activité (*Machine 2*, *Fraise 2*, le posage constitué des surfaces *1P1*, *1P2* et *1P3* et l'opération de fraisage). Cet exemple fictif suppose que cette activité à une capacité inférieure au seuil défini par l'utilisateur. Elle génère alors une activité de contrôle de conformité②.

Une analyse de la localisation des plans *1P7* et *1P8*, à partir des dispersions des ressources de l'activité de production, permet d'estimer que 10% des pièces réalisées par ce début de gamme sont non-conformes et doivent être retirées③. Une description plus précise de la méthode employée pour l'analyse des dispersions et leurs impacts sur les variations du produit et leurs conditions est proposée dans le chapitre IV

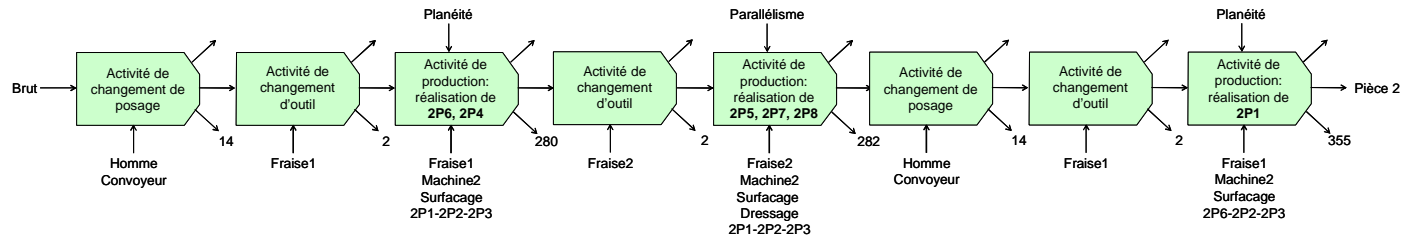
La suite de cette gamme se compose d'un changement de posage et du fraisage du plan *1P1*. De même, la gamme de fabrication de la *Pièce2* est détaillée.

Figure 59 : Exemple d'une gamme réalisant l'exemple

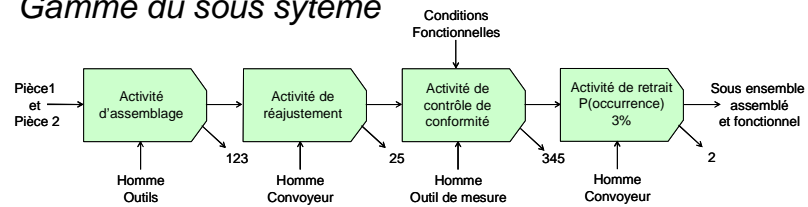
Gamme Pièce 1



Gamme Pièce 2



Gamme du sous système



Les deux pièces sont alors assemblées. Afin d'évaluer l'efficacité de l'activité d'assemblage④, il est nécessaire de caractériser les variations des deux pièces et de simuler, sur un nombre de cas virtuels assez nombreux pour être pertinent, le bon déroulement de l'assemblage. Par exemple, cette évaluation se conclut par la génération d'une activité de réajustement ⑤ car plusieurs cas de non assemblage ont été détectés. Il faut donc réintroduire les pièces incriminées dans le processus d'assemblage.

Qui plus est, puisqu'une exigence fonctionnelle a été définie entre le plan *IP5* et le plan *2P5* (un jeu fonctionnel), une activité de contrôle de conformité ⑥ est également générée suite à l'évaluation de l'efficacité du processus proposé. Le contrôle de conformité est associé à une activité de retrait ⑦ dont la probabilité d'occurrence est estimée à 3%.

Il est alors possible d'estimer les différents coûts et probabilité afin d'en quantifier le coût pondéré qualité. Ce coût permettra alors aux concepteurs d'analyser cette solution

Cet exemple fictif illustre l'ensemble des activités manipulées et implémentées dans l'ABTA actuellement. Elles respectent la définition du concept énoncée chapitre 3.4, et leurs impacts à la fois sur le coût et sur les caractéristiques du produit sont modélisés.

Il est néanmoins important de préciser que les activités présentées ci-dessus ne sont en aucun cas exhaustives, et qu'il est possible d'en rajouter pour enrichir l'ABTA de nouvelles dimensions d'étude (comme par exemple à l'aspect pollution d'un choix de conception).

4 Modélisation de l'approche et enrichissement du modèle KC

4.1.1 Modélisation de l'approche

Nous avons présenté dans les paragraphes précédents la définition du coût pondéré qualité, et l'approche d'estimation de celui-ci - ABTA. Afin d'opérationnaliser l'ABTA, il est nécessaire de formaliser celle-ci, c'est-à-dire de décrire les activités nécessaires à l'estimation du coût pondéré qualité, les entrées et sorties relatives à ces activités. Cette formalisation inclut deux modélisations, la première relative aux activités et aux flux via un modèle IDEF0, et la seconde relative aux données manipulées via un diagramme de classes.

Le but de l'activité d'évaluation ou d'estimation du coût pondéré qualité est de traiter les pré-gammes proposées par les experts gammistes et la proposition d'allocation de tolérances proposée par les concepteurs afin d'en estimer la performance. Le modèle IDEF0 proposé *Figure 60* synthétise cette activité.

Afin de réaliser cette activité plusieurs données ou connaissances sont nécessaires : Les connaissances métiers et les ressources disponibles (machines, outils, personnels,...) qui participent à l'élaboration de la gamme réalisant le produit. L'ensemble des contraintes que doit respecter cette évaluation est également nécessaire.

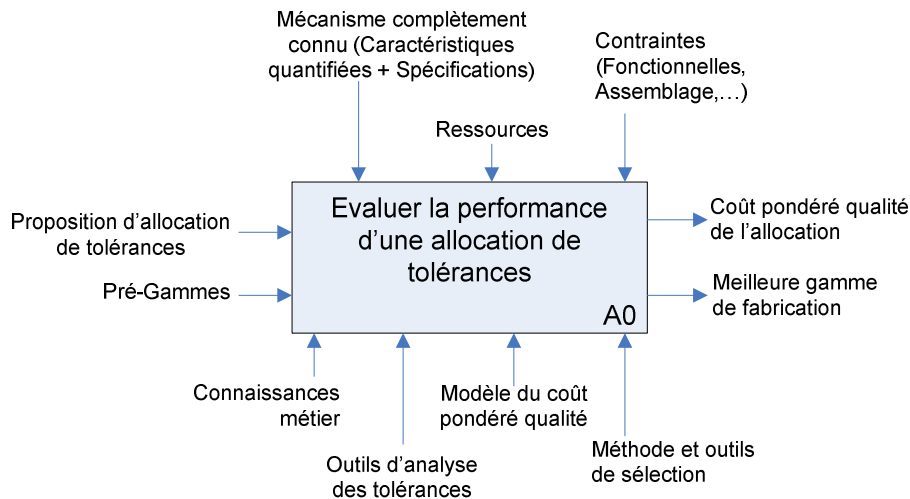


Figure 60 : IDEF0 de notre approche d'estimation

Le résultat de cette activité est principalement le coût pondéré qualité, indicateur d'efficacité d'une allocation de tolérances et sa gamme de fabrication (liste ordonnée des activités participant à l'élaboration du produit).

Il est intéressant de décomposer l'activité « Evaluer la performance d'une allocation de tolérances » en soulignant trois activités clef. Ces dernières sont illustrées dans le diagramme IDEF0 Figure 61 :

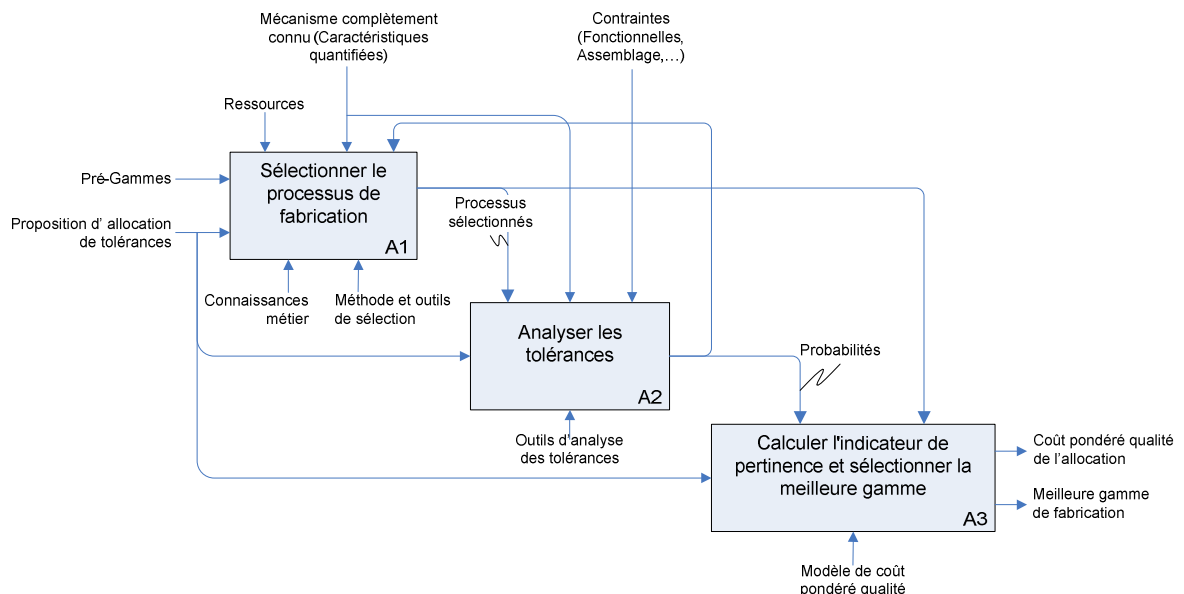


Figure 61 : Décomposition de l'activité "Evaluer"

- La première (A1) consiste à sélectionner les processus en adéquation avec les contraintes de conception (tolérances à analyser et les spécifications et paramètres du produits définis par les concepteurs) et de fabrication (ressources disponibles et les habitudes et connaissances des experts gammistes). Cette sélection s'opère en fonction d'une pré-gamme ou macro gamme, squelette de la future gamme, qui contient une liste ordonnée des posages proposés par les experts gammistes.

- L'analyse des tolérances est la seconde étape (A2) nécessaire à l'évaluation de l'efficacité d'une allocation. Cette dernière va vérifier si les caractéristiques du produit, évaluées à partir des dispersions des moyens de production préalablement sélectionnés, respectent les spécifications et autres conditions définies par le concepteur. C'est par cette activité que les probabilités $P(Ok)$, $P(NonConforme)$ et $P(NonMontable)$ sont estimées. Les méthodes employées pour réaliser cette évaluation sont décrites dans le chapitre IV.
- La dernière étape (A3) correspond à la mise en commun des données calculées par les deux premières activités. Cette synthèse est effectuée par le calcul du coût pondéré qualité. Cette dernière activité retourne également la gamme optimale parmi celles sélectionnées en A1, ainsi que les différentes probabilités (de non-conformité ou de non montabilité) pour permettre aux gammistes de faire évoluer leur proposition de pré gammes.

Ce modèle synthétique offre une vue globale de la méthode ABTA. Contrairement aux flux d'informations et de connaissances nécessaires qui sont clairement identifiés, les supports des activités ne sont pas encore sélectionnés.

4.1.2 Modèle KC

Avant de proposer une modélisation des données support de l'approche ABTA, et des modifications apportées à l'arborescence KC, il est nécessaire de rappeler le modèle original décrit dans le premier chapitre (Figure 62).

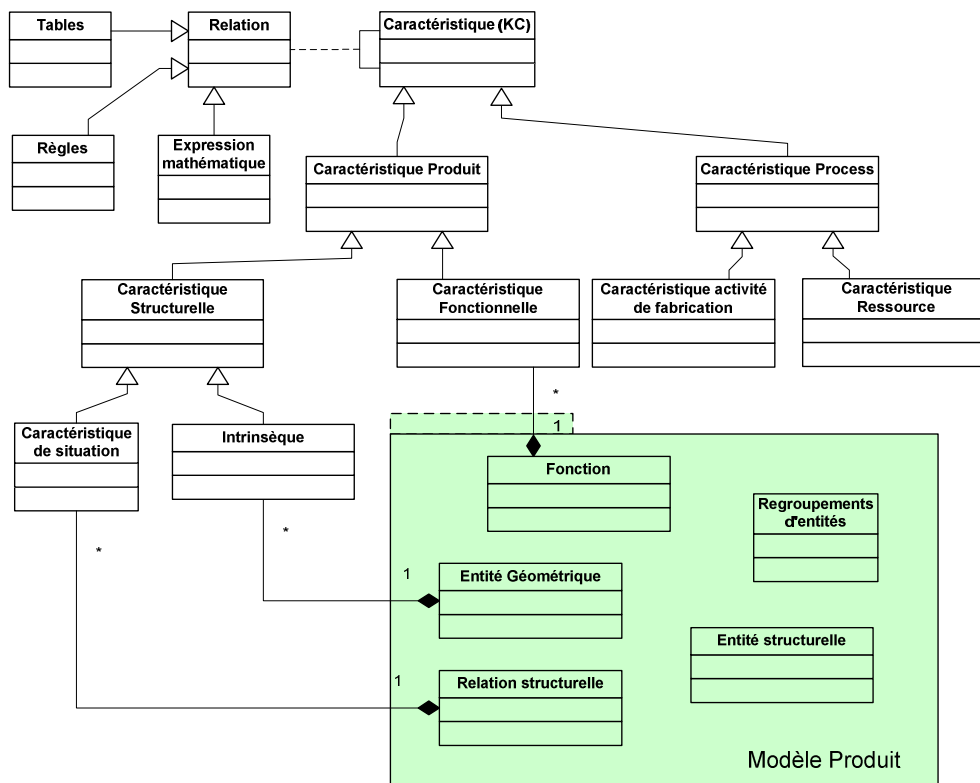


Figure 62 : Modèle de classe de l'arborescence KC enrichi par notre modèle produit

Un modèle produit (représenté en gris clair) peut être ajouté à cette modélisation du KC Flowdown afin de souligner les interactions entre caractéristiques (fonctionnelles et

structurelles) et les entités structurelles constituant le produit. Puisque l'objectif de ces travaux n'est pas de présenter un modèle produit unique et exhaustif, il est représenté sous la forme d'un package où seules quelques classes sont représentées. Leurs liens ne sont pas représentés car ils dépendent fortement du modèle produit retenu.

Ce package permet de souligner les interopérabilités possibles entre ces deux modèles :

- Les caractéristiques intrinsèques sont associées aux entités géométriques. Une entité peut être décrite via plusieurs caractéristiques intrinsèques. Ainsi une entité 'plan' peut être associée par exemple à la caractéristique 'rugosité' ou 'dureté'.
- Les caractéristiques de situation quant à elles sont associées à plusieurs entités qui sont reliées entre elles par des relations structurelles. Dans le cadre des spécifications géométriques, la perpendicularité est par exemple associée à plusieurs entités géométriques.
- Ces entités structurelles (non représentée sur la *Figure 62*) ainsi que les relations qui les lient sont associées aux fonctions qu'elles réalisent. Ces fonctions peuvent être de service, de contraintes ou techniques. Ces fonctions sont associées aux caractéristiques fonctionnelles, caractéristiques de haut niveau dans l'arborescence KC.

4.1.3 Les conditions

Le modèle précédant modélise la description structurelle du produit et de ses variations. L'objectif des concepteurs est de borner ces variations par un ensemble de conditions. Le modèle de classe suivant (*Figure 63*) propose une formalisation de ces conditions sur des caractéristiques.

Les conditions peuvent se présenter sous la forme de domaines, de bornes, ou par exemple d'une liste de valeur. Cette particularisation est loin d'être exhaustive. Les conditions peuvent s'appliquer à toutes les caractéristiques. Les conditions de haut niveau déterminent alors les exigences que doit respecter le produit, comme les fonctions de services ou techniques. Cette relation est visible sur le modèle de classe et est nommée 'Contraint'.

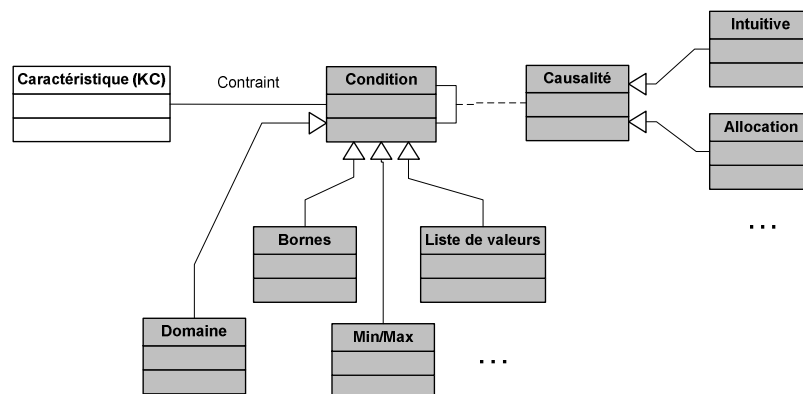


Figure 63 : Modèle UML de l'arborescence des contraintes

Comme souligné dans le précédent chapitre, un parallèle entre l'arborescence des conditions et l'arborescence des KCs est possible. En effet, les liens de causalité entre les différents niveaux de conditions sont modélisés de façon identique aux relations entre caractéristiques via une classe association « Causalité ».

Deux principaux types de causalité sont actuellement définis. Le premier type de causalité 'allocation' est explicite et même quantifié ; il représente la distribution d'une ou

plusieurs conditions d'un rang n sur des conditions d'un rang inférieur. A l'opposé de cette causalité, la causalité intuitive est modélisée par la classe 'intuitive', elle représente les situations où les experts et concepteurs ont défini des conditions à un rang inférieur sans formaliser ce transfert.

4.1.4 Les activités

Le dernier enrichissement apporté au modèle structurel KC est le concept d'activité défini dans le paragraphe 3. Le modèle proposé est illustré *Figure 64*.

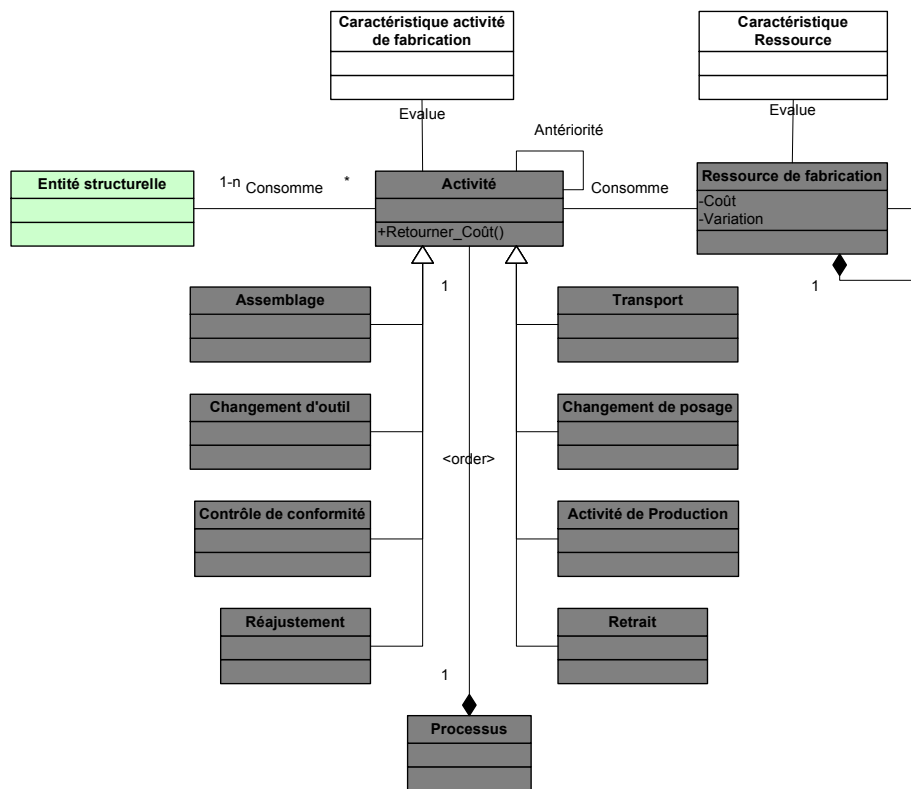


Figure 64 : Modèle UML - Activités et leurs relations

La partie activité du modèle est construite à partir de la structure de l'approche ABC avec les liens de consommation entre d'un côté l'activité et les ressources et de l'autre entre les composants du produit et les activités.

Plusieurs activités sont proposées à titre indicatif car il est possible de particulariser à l'infini la classe activité en fonction de ses besoins. L'ensemble des activités ainsi ordonnées forme un processus ou une gamme.

Une entité structurelle consomme au moins une activité. Une activité peut être également consommée par une entité : par exemple, une activité de fabrication usine une entité géométrique ou une activité d'assemblage agit sur une entité structurelle plus complexe.

Il est important de remarquer que ce modèle permet de capitaliser le bouclage de l'ABTA explicité dans les *Figure 46* et *Figure 48* : condition – activité – caractéristique – relation entre caractéristique – condition.

4.1.5 Modèle final

Le modèle final et complet, support de la démarche est donné *Figure 65*. Ces enrichissements apportés au modèle originel de l'arborescence KC (non colorés dans la

figure) n'impliquent en rien une modification de ce dernier. Ces trois modules : la décomposition structurelle du produit en entités, la description des contraintes et de leur causalité, et la description des activités et de leurs liens de consommation s'y greffent aisément.

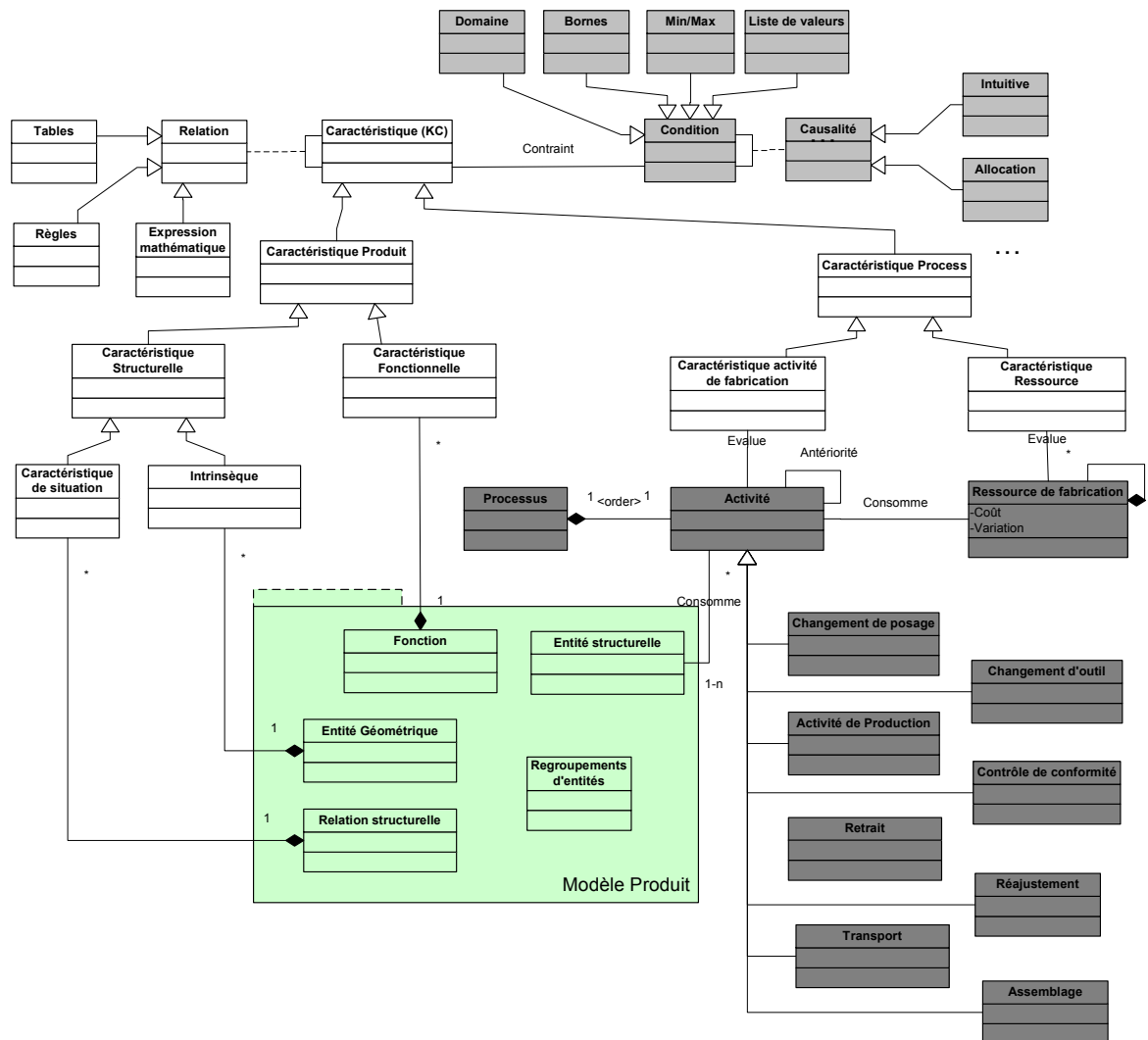


Figure 65 : Modèle UML final du support de notre approche

En conclusion, ce paragraphe propose une formalisation des différents concepts manipulés en mettant plus particulièrement en valeur leurs interactions. L'intégration des concepts d'activités et d'arbre des conditions au concept d'arborescence KC est modélisée.

La structure ayant été décrite, restent à expliciter les différentes étapes nécessaires à l'aboutissement de l'optimisation de l'allocation des tolérances.

5 Optimisation

Dans les paragraphes précédents nous avons défini, illustré et modélisé le couple ABTA / Coût pondéré qualité afin d'expliquer l'approche d'évaluation de l'efficacité d'une allocation des tolérances. Les paragraphes 1.1 et 1.2 précisent que cette évaluation est notre critère d'optimisation : sa fonction objectif. Cette activité d'optimisation peut être synthétisée sous la forme d'un modèle IDEF0, proposé Figure 66 :

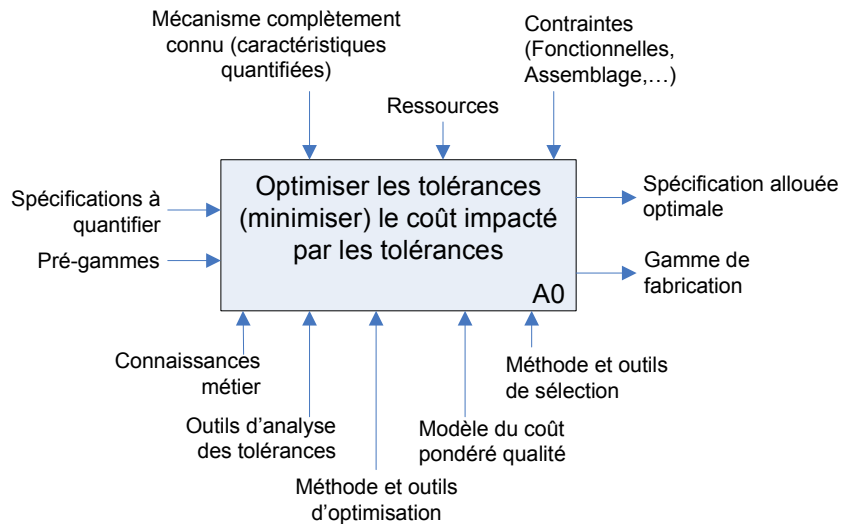


Figure 66 : IDEF0 de l'optimisation des tolérances.

Cette optimisation vise à minimiser le coût pondéré qualité, à quantifier les tolérances et à sélectionner le processus de fabrication. Seule la méthode d'optimisation n'est pas encore déterminée. L'objectif de ce chapitre est de proposer dans un premier temps un état de l'art de l'ensemble des méthodes et des outils disponibles pour effectuer ce processus d'optimisation. Puis, un zoom est proposé sur l'approche par algorithme génétique.

5.1. Les méthodes d'optimisation

5.1.1 Définition

Soit la fonction f , appelée fonction objectif, à valeurs réelles définie comme suit :

$$f : A \rightarrow \mathfrak{R}$$

$$\exists x_0 \in A \text{ tel que, quel que soit } x : f(x_0) \leq f(x)$$

Équation 8 : Définition mathématique de l'optimum

Dans la suite de cette étude, nous nous limiterons à la recherche des minima d'une fonction, la recherche des maxima pouvant se ramener à un problème de minimisation.

5.1.2 Etat de l'Art

L'ensemble des méthodes et d'outils d'optimisation peuvent être classifiés en fonction de trois grands critères discriminants :

- Le nombre de variables à optimiser constituant la fonction objectif que peut traiter l'approche. On parle alors d'optimisation mono ou multicritères.
- Le type de recherche : l'outil converge-t-il vers un optimum local ou global ?
- La « classe » de la méthode : selon [Goldberg 1989] les méthodes d'optimisation peuvent être divisées en trois grands types : les méthodes *déterministes*, les méthodes *stochastiques* et les méthodes *énumératives*.
- Le temps de calcul.

La Figure 67 propose une synthèse des outils et méthodes disponibles pour l'optimisation monocritère. On y distingue :

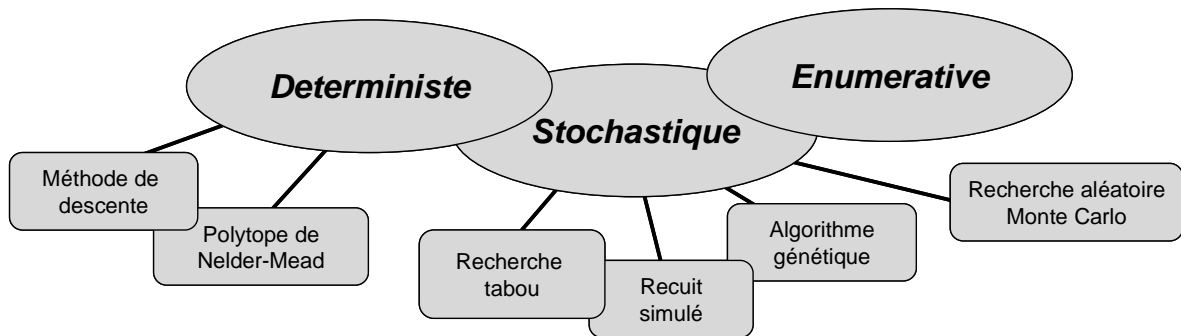


Figure 67 : Les différentes méthodes d'optimisation disponibles – Liste non exhaustive

- Les méthodes **déterministes**, qui nécessitent d'avoir une fonction objectif **continue et dérivable** en tout point du domaine des solutions, recherche les optimums par calcul et analyse du gradient de la fonction objectif. Ces méthodes se divisent en deux approches :
 - Les méthodes d'exploration directe. Elles recherchent l'optimum en évoluant dans l'espace de solutions en suivant le gradient de la fonction.
 - Les méthodes d'exploration indirecte. Dans ces méthodes, la recherche des extremums est basée sur la résolution de l'équation : $\vec{grad} f = \vec{0}$. Puis, il suffit de sélectionner l'optimum parmi l'ensemble des extremums ainsi identifiés.

Parmi ces méthodes déterministes à recherche d'optimum local, on peut citer la méthode dite de la descente et les polytopes de Nelder-Mead.

La méthode de la descente vise à atteindre un extremum en s'en approchant de points en points par l'évaluation de la fonction objectif [Hooke 1961].

A chaque itération de cette méthode, l'algorithme sélectionne de façon cyclique ou aléatoire des voisins du point courant. Puis, pour chacun de ces points, il évalue la valeur de la fonction objectif. Si l'une de ces valeurs est meilleure que celle du point courant, il devient le nouveau point courant, et l'itération suivante débute. Si aucun meilleur candidat n'est trouvé dans le voisinage du point courant, ce dernier est considéré comme l'extremum de la fonction et l'algorithme s'arrête.

La méthode des polytopes de Nelder-Mead [Nelder 1965] recherche une solution qui approche l'optimum par l'utilisation d'un polytope composé de $n+1$ points, n étant la dimension du problème à analyser. L'exemple d'un polytope dans un problème à 3 dimensions est donné Figure 68 (❶). Le polytope initial est généré à partir du tirage aléatoire d'un point de l'espace de recherche. Les autres points composant la figure géométrique sont générés de façon à obtenir une base orthogonale [Press 1988].

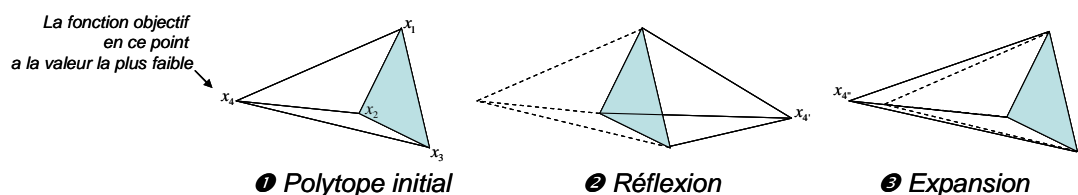


Figure 68 : Transformation des polytopes - Exemples

A chaque itération de l'algorithme, le polytope est déformé à l'aide de transformations simples comme la réflexion (②) ou l'extension (③) afin d'obtenir de meilleurs sommets. Ainsi, à chaque itération, le polytope va suivre l'allure de la fonction objectif sans jamais essayer d'en évaluer le gradient et finalement tendre vers l'extremum.

Cette évolution s'arrête lorsque l'écart des valeurs de la fonction objectif entre le meilleur et le plus mauvais sommet du polytope est inférieur à un seuil préalablement déterminé, et dépendant de la précision désirée. Le centre de gravité du polytope est alors considéré comme un extremum de la fonction.

Selon [Chelouah 1999], cette solution est couramment employée car elle est à la fois rapide, simple à implémenter et robuste.

Bien que leur rapidité de convergence soit la plus intéressante des approches d'optimisation, les approches déterministes ont deux inconvénients majeurs. Le premier est qu'il est rare d'avoir une fonction objectif qui respecte les besoins de continuité et de dérivabilité de ces approches, ce qui limite leur domaine d'application. Qui plus est, la convergence dépend fortement des conditions initiales : cette convergence vers l'optimum est assurée si le point de départ est proche de ce point.

- Les méthodes *énumératives* évaluent, dans un espace de recherche fini ou dans un espace infini mais discrétisé, la valeur de la fonction objectif en chaque point de l'espace solution.

Ce type de solution est intéressant lorsque l'espace de recherche, et donc le nombre de points à énumérer, est restreint. De ce fait, elles sont totalement inadaptées pour la majorité des cas d'optimisation dont les espaces de recherche sont trop vastes (infinis) pour en énumérer les éléments.

- Les méthodes *stochastiques* basent la recherche de l'optimum sur un processus pseudo-aléatoire. C'est donc un processus stochastique qui va explorer l'espace de recherche et mémoriser les meilleurs éléments rencontrés. Les approches actuelles associent à cette exploration aléatoire un processus plus « intelligent » afin de guider la recherche dans l'espace de solutions, et ainsi converger plus rapidement vers l'optimum.

Parmi les solutions disponibles, on peut citer les plus couramment employées : le recuit simulé [Cerny 1985], la méthode Tabou et les algorithmes évolutionnaires.

Le recuit simulé est une méthode pseudo-stochastique qui se base sur les principes de la thermodynamique appliqués au refroidissement d'un corps en fusion, passant par différents paliers de température et tendant vers une minimisation de son énergie [Kirkpatrick 1983].

Dans cette approche, deux paramètres sont importants : l'énergie du système $f(x)$ qui correspond à la valeur de la fonction objectif au point de l'espace de recherche courant x et la température du système T qui modélise un palier durant lequel le système peut évoluer énergétiquement.

Pour un palier de température T , on recherche une transformation de l'état courant (notée $s(x)$) de telle manière à minimiser son énergie : $\Delta f = f(s(x)) - f(x)$. Deux cas se présentent :

- L'énergie du point transformé est inférieure à celle du point courant : la transformation est acceptée.
- L'énergie du point transformé reste supérieure à celle du point courant et la transformation : la transformation a une probabilité $p(\Delta f, T) = \exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right)$ d'être tout de même acceptée.

Dès qu'une solution est acceptée, la température est diminuée et une nouvelle itération commence. Cet effet de palier de température permet d'accepter des solutions qui sont à priori mauvaises, évitant à l'algorithme de se piéger dans un extremum local. Initialement élevée afin d'explorer l'ensemble de l'espace de solutions, la température diminue de palier en palier afin d'accélérer la convergence vers l'optimum.

Cette solution stochastique guidée permet alors de trouver un optimum global. Néanmoins les résultats dépendent fortement de cette température et de l'évolution qu'elle doit suivre entre chaque pallier : une température trop faible et l'algorithme tend vers un extremum local, une température trop élevée et la convergence est compromise.

La méthode Tabou [**Glover 1986**], [**Hansen 1986**] est une amélioration des approches classiques de recherches d'extremums locaux. A la différence de ces approches qui recherchent autour d'un point considéré des points dont la valeur de la fonction objectif est meilleure, cette approche supprime le risque de convergence vers un extremum local en limitant cet élitisme.

A chaque itération de l'algorithme, sont analysés plusieurs points proches de la solution considérée à cette étape comme l'optimum. Parmi ces points est recherché le meilleur. Cependant, à la différence des approches précédentes qui ne remplacent la solution courante que si un des points analysés est meilleur, dans l'approche tabou, cette solution sera obligatoirement remplacée. Bien que ce remplacement entraîne une dégradation de l'optimum, il évite ainsi que l'algorithme ne soit piégé dans un extremum local.

Afin d'éviter tout risque de cyclage (c'est-à-dire que l'algorithme tourne en boucle sur un nombre fini de solutions) l'algorithme mémorise les meilleures solutions déjà visitées. Ces solutions sont donc considérées comme « tabou », d'où le nom de cette approche.

Cette procédure, qui est donc la combinaison d'une recherche d'extremum associée d'une protection contre le cyclage et la convergence vers un optimum local, est couramment utilisée dans les problèmes d'optimisation combinatoire.

Néanmoins l'inconvénient majeur de ces approches c'est que **la convergence n'est absolument pas garantie**, seule l'allure des résultats en asymptote permet de supposer que la convergence est atteinte.

La fonction objectif que nous souhaitons optimiser est la fonction coût pondéré qualité (définie au paragraphe 1.2). Or cette dernière est une fonction partiellement analytique qu'il est impossible dériver. De ce fait les méthodes déterministes ne peuvent pas être employées comme support de notre optimisation. Qui plus est, puisque notre espace de

recherche est infini (les tolérances sont des réels positifs), il nous est impossible d'employer une méthode énumérative.

C'est pour cette raison que nous nous sommes plus particulièrement focalisés sur une méthode stochastique : l'algorithme génétique. Le paragraphe suivant traite de ce sujet en précisant son principe de fonctionnement, et propose la validation de l'emploi de cette méthode dans une démarche d'optimisation de tolérances.

5.2. Algorithmes génétiques

5.2.1 Principe

L'algorithme génétique est basé sur la théorie de l'évolution proposée par Darwin selon laquelle, seuls les individus les plus adaptés à leur environnement survivent et peuvent transmettre leurs caractères génétiques à leurs descendants. Ainsi : « *It is not the strongest of the species that survive, nor the most intelligent, but the one most responsive to change.* » [Darwin 1859].

De cette théorie, ont été développés les principes fondamentaux de l'algorithme génétique par Holland [Holland 1975]. Ainsi chaque solution potentielle est modélisée par un individu dont on évalue l'adaptation (en anglais '*fitness*'). Plus la valeur de cette adaptation est faible, plus l'individu est adapté. Un individu est caractérisé par ses gènes qui modélisent l'ensemble des paramètres discriminants de la solution. On a ainsi autant de gènes que la dimension du problème.

L'algorithme génétique, dont le logigramme est donné Figure 69 se déroule en quatre étapes majeures :

- ❶ **Génération de la population initiale** : La première étape consiste à générer la population initiale. Cette dernière est composée de plusieurs individus qui ont leurs gènes générés (de façon déterministe ou aléatoirement) dans l'espace de recherche. Une fois générée, l'algorithme évalue l'adaptation, c'est-à-dire la valeur de la fonction objectif de ces individus. Cette adaptation est le paramètre discriminant qui permet de comparer les individus entre eux.
- ❷ **Étape de reproduction** : L'étape de reproduction, qui est une phase importante dans l'algorithme, est constituée de deux grandes étapes.

La première est la sélection des parents. Cette sélection, suivant les approches, peut être totalement aléatoire ou guidée par des critères de sélection plus guidés : ainsi certaines approches élitistes préfèrent sélectionner les meilleurs individus de la population comme parents.

La seconde étape est la reproduction des parents et plus particulièrement le croisement de leurs gènes afin de générer de nouveaux individus. Une nouvelle fois, suivant les approches différentes : les techniques de croisement, le nombre d'individus générés.

- ❸ **Remplacement de la population courante** : Suivant la littérature, il existe plusieurs méthodes de remplacement des membres de la population parente. Le nombre d'individus à remplacer, les méthodes de sélection employées (élitiste ou préservant la diversité de la population) sont deux points essentiels de cette étape.

On peut citer l'approche selon laquelle, les parents sont remplacés directement par leurs enfants générés à l'étape précédente. A la fin de cette étape, l'algorithme reboucle sur l'étape de reproduction jusqu'à ce qu'il ait atteint la convergence.

- ④ La dernière opération consiste donc à déterminer si l'algorithme a atteint la convergence. Cette dernière est déterminée par le critère d'arrêt.

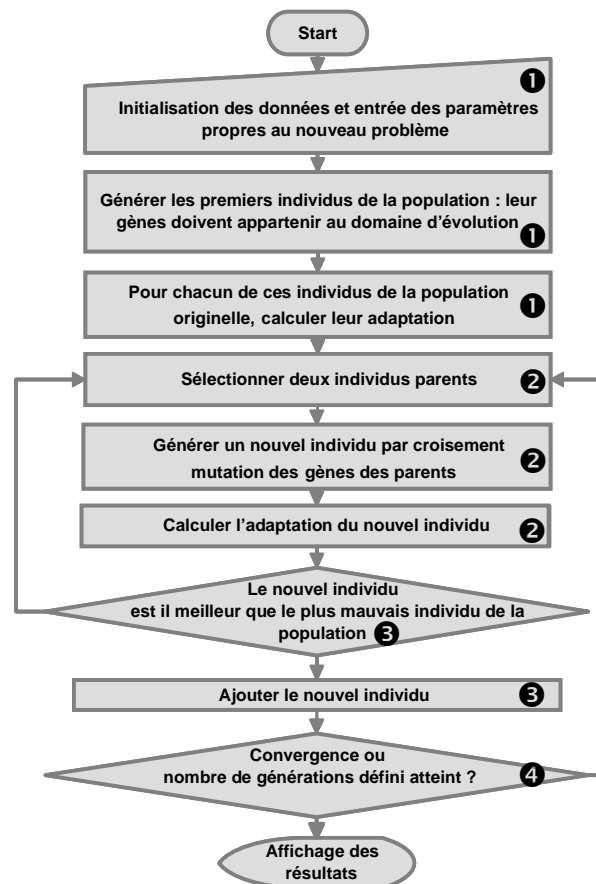


Figure 69 : Exemple d'Algorithme Génétique - Logigramme

Ainsi, au fil des itérations de l'algorithme, on obtient des populations de plus en plus adaptées. Lorsque le critère d'arrêt est atteint, le meilleur individu (celui ayant le 'fitness' le plus faible) de la dernière population générée est sélectionné : il est alors considéré comme l'optimum.

Les paragraphes suivants proposent de se focaliser sur des mécanismes clés de l'algorithme génétique, comme les méthodes de codage des gènes, sur les opérateurs de reproduction. Cette partie se conclut avec une discussion et un bilan sur le fonctionnement de ce type d'algorithmes.

5.2.2 Codage des gènes

L'opération de codage des gènes consiste à modéliser les paramètres de la solution dans un gène, qui pourra alors être croisé ou muté. Deux grands types de code sont actuellement employés : les *codes binaires* et les *codes réels*.

Employés à l'origine des algorithmes évolutionnaires [Goldberg 1989], le *codage binaire* décrit un gène par une succession de 1 et de 0. Ainsi tous les paramètres d'une solution sont convertis dans une base 2 et concaténés dans un mot binaire. Ainsi les gènes d'un individu, représentant une solution à trois paramètres, est par exemple codé ainsi : 1001|1100|1101.

Ce codage est intéressant car il simplifie la définition et l'utilisation des opérateurs de reproduction (et principalement le croisement et la mutation expliqués ci-dessous), en utilisant un alphabet limité. Néanmoins, pour des problèmes nécessitant un grand nombre de variables ou contenant des réels à grande précision, la taille des mots binaires devient lourde à manipuler.

Les *codes réels* concatènent non plus des mots binaires mais les différentes valeurs des paramètres descriptifs des solutions. Cette approche facilite le codage des gènes et améliore grandement la précision, en diminuant les temps de calculs dus précédemment à la conversion base 10 / base 2. Néanmoins, puisque l'alphabet de ces codes est infini, il est nécessaire de mettre en place des méthodes de reproduction adaptées.

5.2.3 Opérateurs de reproduction

La reproduction est composée de trois opérateurs principaux : l'opérateur de sélection des parents, celui de croisement des gènes et celui de mutation. Chacun joue un rôle important dans cette approche d'optimisation et peut influencer sur la convergence de l'algorithme ou la pertinence du résultat.

Le croisement est une opération qui, à partir des gènes des individus parents, génère les gènes de nouveaux individus. On peut citer en exemple trois approches :

- Le croisement classique, est employé dans le cas d'un codage binaire des gènes. Il est illustré *Figure 70*. Dans cette approche, les gènes des deux parents sélectionnés sont intervertis en fonction de points de croisement définis aléatoirement. Ainsi sur l'exemple, on peut remarquer la zone grisée contenue entre les deux points de croisement placés aléatoirement : les bits contenus dans cette zone sont intervertis. Les deux nouvelles chaînes ainsi obtenues, correspondent aux gènes de deux nouveaux individus.

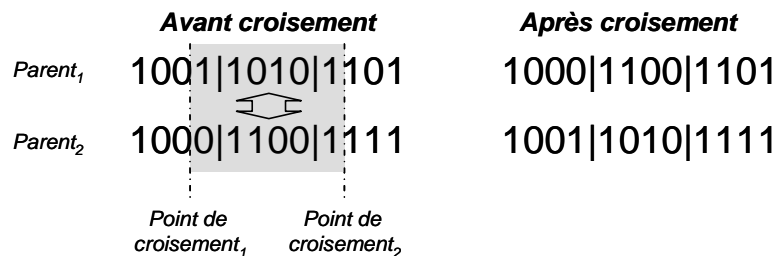


Figure 70 : Croisement classique - Exemple

- Le croisement de Guo [**Guo 1999**], est employé quant à lui dans le cas d'un codage réel des gènes. Il repose sur la génération de nouveaux individus (Ind^{NEW}) par la combinaison linéaire non convexe des gènes de m parents sélectionnés. Cet opérateur de croisement est particulièrement adapté à l'optimisation de fonctions continues non linéaires avec des contraintes de non-égalité. Il peut se définir ainsi :

$$Ind^{NEW} = \sum_i \omega_i \cdot Ind^i \text{ avec } \sum_i \omega_i = 1 \text{ et } \varepsilon \leq \omega_i \leq 1 + \varepsilon \quad \varepsilon, \text{ réel positif}$$

Équation 9 : Croisement de Guo – Définition

Il existe dans la bibliographie de nombreuses techniques de pondération des gènes des différents parents. La pondération aléatoire, proportionnelle à l'adaptation du parent ou logarithmique sont quelques exemples de ces stratégies.

- La méthode EM [Fang 2003] est également une approche dédiée au codage réel. Ce croisement est basé sur les phénomènes électromagnétiques (illustrés *Figure 71*). Ainsi le parallèle entre charges ponctuelles et individus est proposé : la valeur de la charge de cet individu dépend de son adaptation. De ce fait, les individus les plus adaptés ont un pouvoir d'attraction supérieur et attirent au fil des générations les individus les moins adaptés.

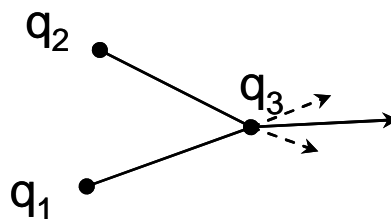


Figure 71 : Électromagnétisme - Principe

La mutation est un mécanisme qui permet aux algorithmes génétiques de conserver une diversité des gènes et donc un maximum d'informations pertinentes qui pourraient être perdues lors de croisements. On note Pm la probabilité que cette mutation apparaisse dans la génération de la population. Techniquement, cela évite à l'algorithme de converger vers un extremum local.

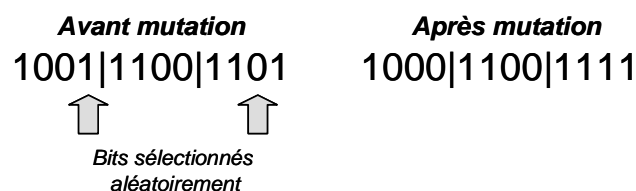


Figure 72 : Mutation des gènes d'un individu - Exemple

Dans le cas du codage binaire des gènes, cette mutation se concrétise par l'inversion de deux bits du mot binaire d'un individu choisi aléatoirement dans la population. La probabilité de cette transformation est déterminée par l'utilisateur ; elle est usuellement inférieure à 0.1 sans quoi l'algorithme risque de ne plus converger. Un exemple de cette mutation est donnée *Figure 72*.

5.2.4 Critères d'arrêt

Le paragraphe précédent décrit les mécanismes importants de l'algorithme génétique, qui permettent l'évolution de la population étudiée. Puisqu'à ce jour aucune étude n'a prouvée la convergence de ces algorithmes, il est nécessaire de mettre en place des critères d'arrêt qui stoppent l'algorithme génétique lorsque l'adaptation de la population est considérée comme assez proche de l'optimum.

Toute la difficulté de ces critères est d'éviter de stopper l'algorithme sur un extremum local. Deux stratégies principales existent :

- La première consiste à stopper l'évolution après un nombre déterminé de générations. Arrivé à cette population ultime, on considère que le meilleur élément est l'optimum. Quantifier cette limite est assez délicat car il faut trouver le bon compromis entre limiter le temps de calcul et laisser le temps à l'algorithme de converger.
- Le second critère d'arrêt se base sur les adaptations des individus. L'arrêt est donc conditionné par le calcul de l'écart (relatif ou absolu *Équation 10*) entre la meilleure adaptation et l'adaptation moyenne, comme dans la majorité des méthodes numériques itératives [Lignon 2002].

$$\varepsilon_{\text{absolu}} = A_{\text{moyen}} - A_{\text{meilleur}} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{\text{relatif}} = \frac{A_{\text{moyen}} - A_{\text{meilleur}}}{A_{\text{moyen}}}$$

Équation 10 : Critère d'arrêt absolu et relatif

L'évaluation de ce type de critère est lui aussi difficile à effectuer car il n'assure pas que l'algorithme ait atteint l'optimum.

5.3. Discussion

Les algorithmes génétiques sont des outils intéressants car leur flexibilité et leur facilité d'implémentation permettent de les adapter aux spécificités de la fonction que l'on veut optimiser et de son domaine d'application. Illustration de cette flexibilité, le calcul de l'adaptation des individus est réalisable aussi bien par de simples équations, des outils de simulation numérique, d'analyse statistique, ou d'autres applications spécifiques.

Cependant, un inconvénient majeur de cette approche reste l'incertitude sur le résultat obtenu. En effet, puisque cet algorithme n'a aucun fondement théorique, il est impossible de prouver qu'il converge réellement vers l'optimum et non pas vers un extremum.

On peut également reprocher à ce type d'outil la lenteur de sa convergence. Il faut en effet plusieurs générations (souvent un millier) avant d'atteindre l'optimum, ce qui peut, dans le cas de calcul de fitness complexes, donner lieu à des temps de calcul se comptant en semaines.

Une autre difficulté dans l'emploi de ces algorithmes est leur conception. En effet, toute la difficulté de la conception d'un algorithme génétique tient dans l'offre pléthorique des méthodes disponibles. Néanmoins il n'existe pas de règles de conception de ces derniers.

Afin de quantifier l'impact sur les résultats, le temps de calcul et de convergence, nous avons effectué un plan d'expériences (9600 combinaisons pour 50 jours de calculs) dans lequel sont testés différents opérateurs de reproduction (croisement, mutation, sélection et remplacement) sur deux problèmes d'optimisation de conception [Gaudemer 2006]. Une des conclusions de cette étude est, par exemple, que la sélection élitiste des parents favorise la convergence mais n'augmente pas le risque d'être piégé par un extremum.

Malgré ces inconvénients, l'algorithme génétique nous semble être une approche intéressante, car elle permet d'optimiser les fonctions non continues et non dérivables. C'est pourquoi nous avons étudié la faisabilité de son utilisation pour l'optimisation de l'allocation des tolérances. Le paragraphe suivant décrit précisément l'algorithme employé, les opérateurs de reproduction retenus, l'implémentation et les résultats obtenus.

5.4. Application à l'optimisation des tolérances

L'objectif de cette application est de montrer qu'il est possible d'employer un algorithme génétique comme support de l'optimisation d'allocation des tolérances. Il est important de préciser que l'application décrite ci-dessous n'implémente pas totalement l'approche ABTA. L'objectif est de montrer uniquement la faisabilité, l'analyse de la performance de l'allocation est volontairement simplifiée à un coût paramétrique pondéré qualité. Il est bien évidemment possible d'intégrer le coût pondéré qualité et la méthode ABTA dans une future réalisation.

Dans le cadre de cette optimisation, un individu modélise une allocation des tolérances et donc une tolérance allouée est codée dans un gène.

5.4.1 Paramètres retenus

Comme le montre les paragraphes 5.2.2, 5.2.3 et 5.2.4, il est nécessaire de choisir parmi un panel important, les méthodes et outils qui composent un algorithme génétique. Ce paragraphe présente quels sont les choix opérés pour l'optimisation des tolérances.

Codage des gènes : Pour coder les tolérances au sein des gènes nous avons retenu l'emploi du codage réel.

Calcul de l'adaptation : Le calcul de l'adaptation (notée A) se fait en deux grandes étapes :

- La première revient à évaluer le comportement géométrique du mécanisme ainsi tolérancé. Pour ce faire, l'algorithme quantifie aléatoirement les différentes dimensions du mécanisme en considérant le domaine dans lequel elles peuvent évoluer et formé à partir des dimensions nominales et des intervalles de tolérances. A partir de ce mécanisme virtuel, l'algorithme vérifie que les composants sont assemblables et que les conditions fonctionnelles sont respectées. Cette quantification aléatoire / vérification du comportement géométrique est répété plusieurs fois (une centaine de fois) afin d'obtenir une estimation de la part de bonnes pièces $P(Mecanismeok)$ réalisées avec cette allocation.
- La seconde étape du calcul enrichi la précédente probabilité d'une dimension économique en calculant le coût de l'allocation $Coût(tol)$ à partir d'une fonction coût paramétrée classique. L'adaptation des individus suit donc cette expression, qui permet de prendre en compte à la fois les problèmes économiques et fonctionnels :

$$A = \frac{Coût(tol)}{P(Mecanismeok)}$$

Équation 11 : Adaptation des individus

Sélection : La sélection des parents repose sur une approche purement aléatoire. Deux parents sont alors sélectionnés.

Croisement et Mutation : Pour réaliser cette étape nous avons employé le croisement de Guo défini dans le paragraphe précédent, en générant aléatoirement les poids des différents des parents. Un unique individu est ainsi calculé par génération.

Remplacement : Le remplacement de la population est lui, basé sur une approche élitiste. Ainsi, si le nouvel individu a une adaptation meilleure que l'individu le moins adapté, il le remplace. Dans le cas contraire, la population n'évolue pas.

5.4.2 Maquette informatique + Résultats

Dans une optique de réutilisation, l'algorithme a été réalisé par programmation objet. Chaque individu est alors un objet dont la méthode principale est de retourner son adaptation et dont les attributs sont ses gènes. L'interface de cette application est donnée Figure 73. On peut y distinguer quelques paramètres de l'algorithme (la taille de la population, le critère d'arrêt), l'évolution moyenne de la population et du meilleur individu, ainsi que les gènes de l'individu optimal et son adaptation.

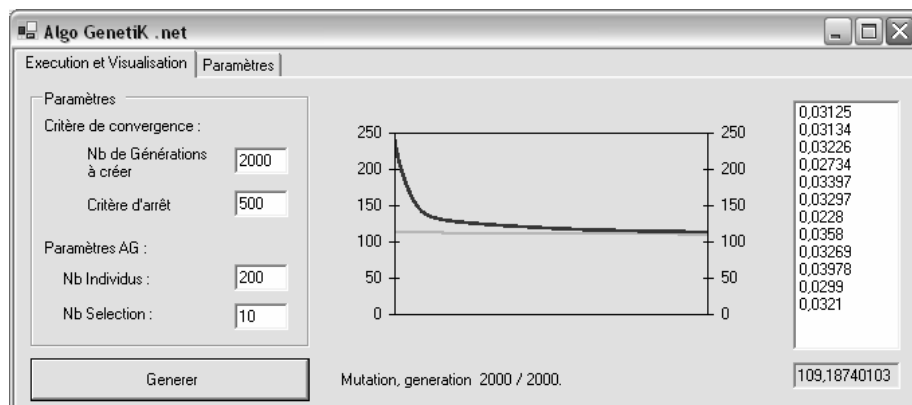


Figure 73 : Implémentation de notre algorithme génétique - Interface

La Figure 74 illustre un des résultats obtenus. Le graphique à gauche représente l'évolution de l'adaptation moyenne de la population (en pointillé) et du meilleur individu. On peut ainsi distinguer différents paliers, pendant lesquels l'algorithme explore l'espace de recherche sans trouver de meilleur élément. Une cassure est alors due à la découverte d'un individu plus adapté.

On peut également remarquer que la convergence est atteinte après environ 5000 générations, ce qui représente dans notre cas d'étude un temps de calcul de moins d'une minute. Ce temps de convergence, pour des paramètres déterminés, dépend fortement des individus de la population initiale. En effet, puisque cette dernière est aléatoirement générée, il est possible d'obtenir l'individu optimal dès les premières itérations. Nous n'avons pas cherché à optimiser cette première génération.

Dans la partie droite de la Figure 74, est donnée la valeur du gène *t1* (représentant un intervalle de tolérance du mécanisme) pour l'ensemble des individus au fil des générations. On peut alors remarquer sur ce gène, la convergence vers une valeur optimale, au bout d'environ 5000 générations.

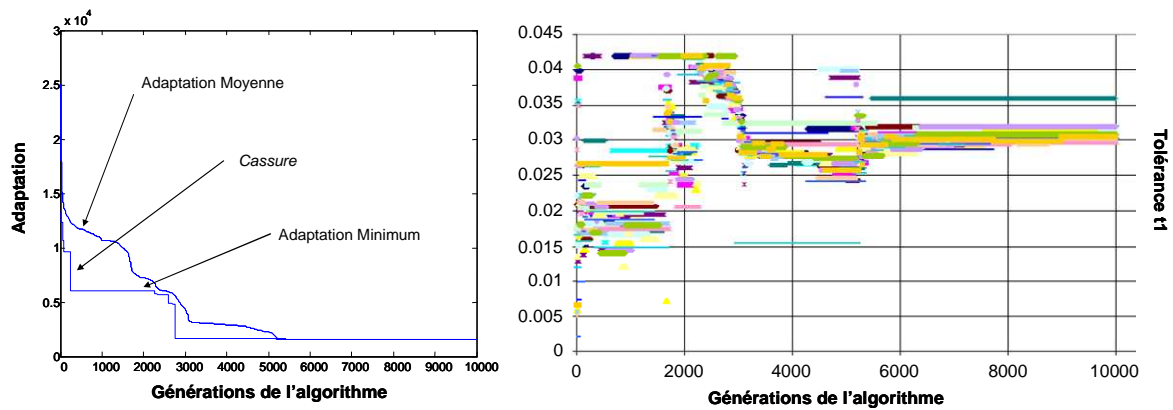


Figure 74 : Résultats obtenus - Exemple

Cette réalisation a ainsi validé (conceptuellement et opérationnellement) l'optimisation par algorithme génétique d'une allocation de tolérances. En effet, bien que la fonction objectif n'est pas intégralement le coût pondéré qualité, cette réalisation a permis de valider nos choix en terme de paramètres de l'algorithme (taille de la population, type d'opérateur de reproduction) et du codage utilisé. Il suffit alors de remplacer la méthode de calcul de l'adaptation pour que l'algorithme génétique devienne le support de notre optimisation.

6 Conclusions

En conclusion, ce chapitre s'est focalisé sur la définition et la description de l'approche proposée, l'ABTA et de notre indicateur d'efficacité d'une allocation des tolérances : le coût pondéré qualité. Afin de réaliser l'interface entre la conception du produit et celle du processus, nous avons eu recours à l'approche par activités. Cette approche, basée sur la méthode ABC a été adaptée et enrichie de nouveaux paramètres afin d'ajouter à l'estimation du coût, une évaluation des variations du produit. Plusieurs activités comme les activités de production ou de contrôle de conformité ont été modélisées afin de valider cette approche par activités. L'ensemble des concepts manipulés dans cette approche ont été formalisés et modélisés.

Cette analyse de la performance d'une allocation de tolérance est le point clef pour l'optimisation des tolérances car c'est elle qui en est la fonction objectif. Un état de l'art des méthodes d'optimisation a donc été proposé, ainsi qu'une comparaison de ces approches afin de sélectionner la plus adaptée à l'optimisation des tolérances. Un zoom plus particulier sur l'algorithme génétique, sur ses mécanismes et paramètres clés est alors proposé. Afin de valider l'emploi de cette approche, une maquette logicielle a été implémentée et un plan d'expérience a été réalisé.

Il est intéressant de préciser que dans ce chapitre, l'ABTA est considérée uniquement comme le support permettant l'évaluation du coût pondéré qualité. Néanmoins le recours à l'approche par activités permet de l'utiliser seule comme estimateur de la performance d'une allocation. En effet, puisqu'il est possible de faire supporter par chaque type d'activité son coût et sa probabilité d'occurrence, il est possible de généraliser la fonction coût pondéré qualité (composée de somme de coût*probabilité). Il est alors possible d'améliorer la précision de l'estimation de la performance d'une allocation en prenant en compte beaucoup plus d'impacts sur le processus de fabrication.

Comme rappelé ci dessus ce chapitre s'est focalisé sur la définition et la modélisation de notre approche (dont la décomposition est proposée dans le paragraphe 4 et illustrée Figure 61).

La Figure 75 synthétise l'ensemble de la démarche ABTA, en y faisant figurer les étapes majeures de notre approche. Ainsi cette démarche s'initialise par l'étape d'analyse fonctionnelle de l'assemblage et par la définition des spécifications, qui sont considérées comme les entrées de notre approche.

Puis intervient la démarche d'optimisation, réalisée par l'algorithme génétique, dont le rôle est de trouver l'allocation des tolérances optimale en prenant comme fonction objectif le coût pondéré qualité. L'évaluation de ce coût nécessite la génération du processus et l'analyse des tolérances. Afin d'illustrer la robustesse de l'approche et de démontrer son opérationnalisation, il est important d'étudier l'interopérabilité des systèmes « Générer le processus de fabrication » et « Analyser les tolérances ». Dans notre cas, nous entendons par interopérabilité la capacité d'un système à interagir au moindre effort.

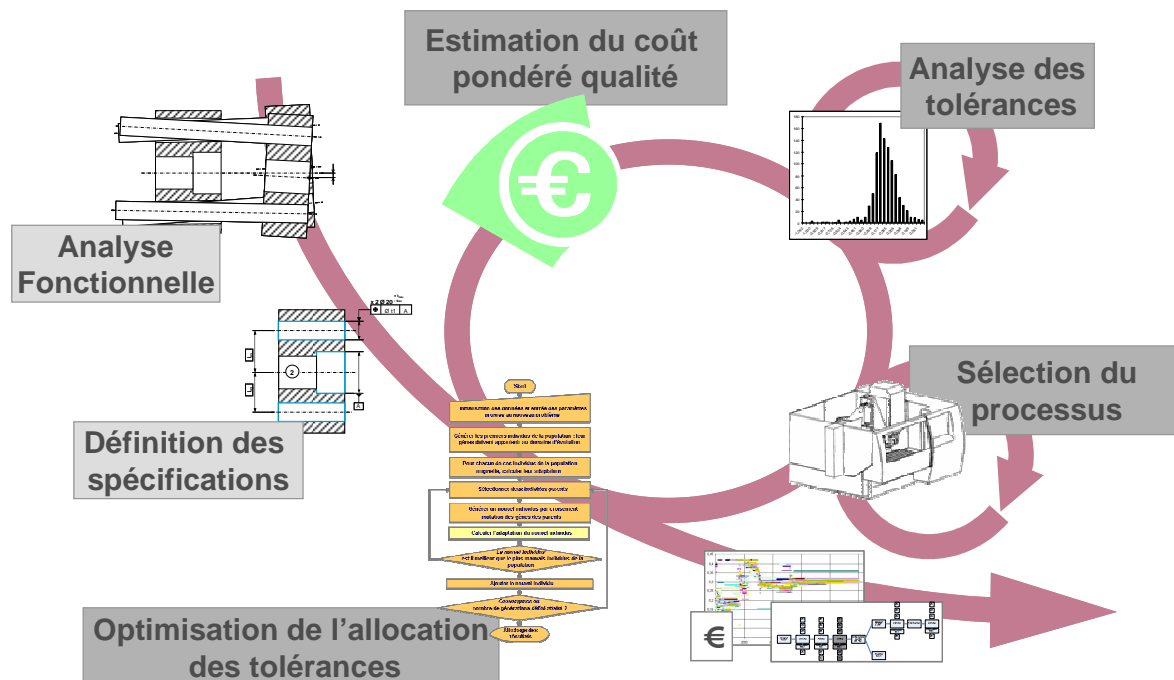


Figure 75 : Démarche ABTA - Résumé

Ainsi pour l'activité de sélection de processus de fabrication, la première étape de la quantification de la performance d'une allocation de tolérances, il existe à ce jour un grand nombre de méthodes et d'outils disponibles. Ces approches nécessitent bien souvent une grande quantité d'information et de connaissances qu'il faut formaliser et stocker.

Le chapitre suivant vise à proposer un état de l'art des approches réalisant la génération du processus, en illustrant chacune d'elles par des exemples. En plus de proposer une étude comparative de ces différentes approches, et d'exposer l'outil qui a été sélectionné et implémenté, les modèles supports à la formalisation des connaissances sont proposés dans la seconde partie de ce chapitre.

Chapitre III

Modèles et outils pour la sélection de processus de fabrication

Ce chapitre est consacré à la sélection de processus et la modélisation des données nécessaires à cette activité. La difficulté inhérente à cet objectif est de pouvoir trouver une solution à la fois cohérente avec les habitudes des experts gammistes, les ressources disponibles dans l'entreprise et les exigences exprimées par les concepteurs. La solution proposée est basée sur l'analyse des avantages et défauts de deux approches émergentes dans le domaine de la génération de processus : la propagation de contraintes et le système expert. Bien que peu optimisée (temps de calcul), cette solution est fonctionnelle et donne de bons résultats sur plusieurs cas industriels dont le guide de bras de robot. Tout au long de ce chapitre, cet exemple illustre les procédures constituant l'algorithme. Par rapport à l'approche ABTA, il a été validé l'intégrabilité ou l'interopérabilité de certaines approches de sélection de processus (par système expert, par propagation de contraintes, algorithmique). De plus, ce chapitre propose également une modélisation des connaissances et une structuration des données permettant cette sélection de processus. Basée sur les concepts d'entités d'usinage et de carte de visite, elle reste totalement compatible avec le modèle d'information de plus haut niveau, supportant le concept de Key Characteristics.

Table des matières :

1	Génération de processus	104
1.1.	Génération par système expert	105
1.1.1	Principe de fonctionnement	106
1.1.2	Développements sur CLIPS	108
1.2.	Sélection par programmation par contraintes	111
1.2.1	Principe	111
1.2.2	Développement effectué	113
1.3.	Bilan et remarques	115
1.4.	L'approche développée par algorithme	115
1.4.1	Critères de sélection du processus :	116
1.4.2	Algorithme – Détails	118
1.4.2.1	Etape préparatoire	118
1.4.2.2	Génération des gammes d'usinage	122
1.4.2.3	Génération des gammes de fabrication	128
1.5.	Implémentation et résultats	129
2	Formalisation et capitalisation des connaissances	130
2.1.	Formalisation des connaissances	130
2.1.1	Les règles de production	131
2.1.2	Le concept d'entités	131
2.1.2.1	Définition(s)	131
2.1.2.2	Les entités d'usinage - Attributs	133
2.2.	Capitalisation des connaissances	136

2.2.1 Carte de visite.....	136
2.2.2 Outil Séquence Entité : OSE.....	137
2.3. Modélisation support de la sélection du processus dans l'environnement ABTA/Activités	137
2.3.1 La vue activités (processus)	138
2.3.2 La vue fabrication (dédié usinage).....	138
2.3.3 La vue ressources	140
2.3.4 La vue description du produit.....	140
2.3.5 Compatibilité et utilisation dans l'environnement KC.....	140
2.4. Implémentation des interfaces de capitalisation.....	141
3 Conclusion.....	144

Table des Tableaux :

Tableau 1 : Règles de compatibilité géométrique implémentées	117
Tableau 2 : Liste des outils stockés - exemple	120
Tableau 3 : Liste des machines stockées - exemple	120
Tableau 4 : Liste des opérations et des couples proposés - exemple	121

Table des Figures :

Figure 76 : Etape 1 - Génération du processus de fabrication.....	103
Figure 77 : Les approches de génération de gamme	104
Figure 78 : Architecture d'un système expert.....	106
Figure 79 : Interface de CLIPS – Impression écran	108
Figure 80 : Exemple de règle CLIPS.....	108
Figure 81 : Les critères de sélection pour les entités géométriques	109
Figure 82 : Interface de proposition/sélection des procédés compatibles	110
Figure 83 : Affichage de l'enchaînement des règles activées.....	110
Figure 84 : Base des faits après activations	111
Figure 85 : Procédure « générer et tester » - Exemple.....	112
Figure 86 : (à gauche) Exemple d'un arbre d'énumération (à droite) Sens du parcours de l'arbre [Yannou 1998].....	113
Figure 87 : Dassault Aviation Constraint Explorer - Impression d'écran.....	114
Figure 88 : Arbre des ressources capables - Exemple général.....	116
Figure 89 : Etapes préparatoires – Algorithme	119
Figure 90 : Bras - Définition des entités géométriques.....	119
Figure 91 : Pré-Gamme - Exemple	122
Figure 92 : Pré-Gamme - vue par entités - Exemple	122
Figure 93 : Génération de gammes d'usinage - Algorithme	123
Figure 94 : Sélection de processus - Exemple sur deux entités.....	124
Figure 95 : Exemple de deux arrangements.....	126
Figure 96 : Gamme d'usinage - Extrait de deux solutions	126
Figure 97 : Passage aux activités de production - Extrait de la phase20.....	127
Figure 98 : Gamme d'usinage enrichie des activités "préparatoires" - Exemple	127
Figure 99 : Génération de gammes d'assemblage - Algorithme	128
Figure 100 : Processus d'assemblage - Exemple	129
Figure 101 : Résultat de la génération de processus - Exportation Visio	130
Figure 102 : Différents points de vue d'un alésage [GAMA 1990].....	132
Figure 103 : Taxinomie des entités - Extrait.....	132
Figure 104 : Structuration des données technologiques [Anwer 2000]	134
Figure 105: Interaction topologique - exemple [Villeneuve 1990]	134
Figure 106 : Accessibilité - Exemple.....	135
Figure 107 : Sphère de Gauss - Exemple	135
Figure 108 : Carte de Visite [Villeneuve 1990].....	136
Figure 109 : Interface Carte de Visite [Etienne 2003].....	137
Figure 110 : Formalisation des connaissances - Support de notre application	139
Figure 111 : Implémentation du modèle de connaissances dans le modèle KC	141
Figure 112 : Interfaces de gestion des cartes de visites - Extrait	141
Figure 113 : Interface d'expression des pré-gammes	142
Figure 114 : Interface de CETIM DEVIS- Exemple.....	143

Le chapitre précédent a présenté la méthode ABTA, le concept d'activités et les approches d'optimisation nécessaires à la génération de la meilleure allocation de tolérances. Il se conclut par ailleurs par la formalisation de l'approche ABTA sous la forme d'un actigramme A0, et par le détail des activités participant à l'analyse de la performance d'une allocation des tolérances.

La première étape, cette démarche de quantification consiste à générer le processus de fabrication capable de réaliser ces tolérances en prenant en considération aussi bien les conditions de conception que les contraintes de fabrication. Cette étape est modélisée par la *Figure 76*.

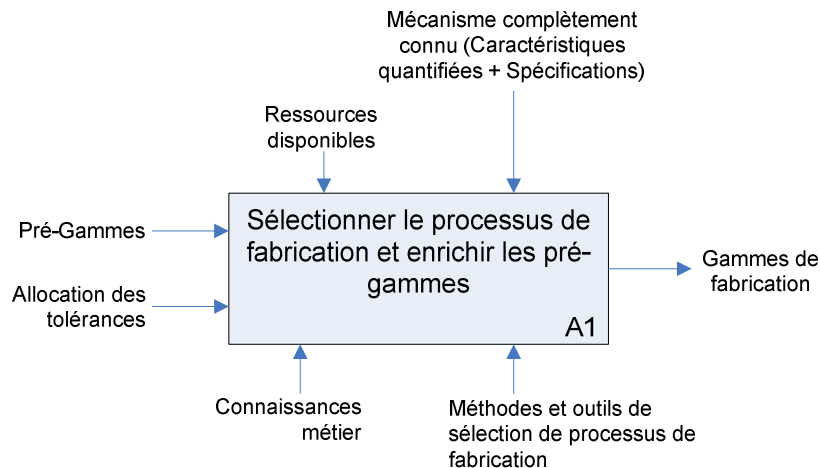


Figure 76 : Etape 1 - Génération du processus de fabrication

Cette activité résume à elle seule l'objectif de ce chapitre : proposer un outil et son environnement permettant la sélection des ressources capables afin de générer les gammes de fabrication compatibles à partir des connaissances, des habitudes et des ressources disponibles dans l'entreprise.

Cette génération est basée sur l'exploration des solutions de gammes de fabrication guidée par une ou plusieurs pré-gammes. Ces pré-gammes, nommées également « gammes conceptuelles », peuvent être vues comme un squelette de gamme de fabrication supportant essentiellement les contraintes d'antériorités entre les différentes phases de fabrication.

Dans le cadre de ces travaux, volontairement limité au procédé de l'usinage, une pré-gamme est composée des sous-phases d'usinage ordonnées mais non instanciées : elles ne se composent alors que du posage géométrique, du type de machine à employer et des entités géométriques à usiner.

De nombreuses recherches proposent de générer cette étape essentielle dans la conception d'une gamme de fabrication. Néanmoins nous avons pris le parti, de ne pas générer les pré-gammes, mais de les considérer comme une entrée de notre approche. Elle peut alors tout aussi bien être proposée par un expert ou être le résultat d'un de ces systèmes de génération.

Ce sont les enrichissements successifs (association à chaque phase d'une machine, de séquence d'usinage et d'outils) d'une pré-gamme qui aboutissent à la génération d'une gamme de fabrication complète.

Pour ce faire, ce chapitre débute par la description des approches actuelles permettant de générer ou sélectionner un processus, en proposant une synthèse de ces dernières. Cette bibliographie se focalise plus particulièrement sur deux outils de l'intelligence artificielle : le système expert et la programmation par contraintes. Afin de vérifier que ces outils sont compatibles avec notre démarche, des prototypes, basés sur ces approches ont été réalisés. Fort des limites de ces deux approches, la première partie de ce chapitre dédiée aux outils et méthodes de sélection de processus se conclut par la description de notre approche, dont chaque étape est détaillée et illustrée d'un exemple.

La seconde partie de ce chapitre s'intéresse plus particulièrement aux connaissances, informations et données nécessaires à cette sélection de processus. En effet, pour cette activité une grande quantité de connaissance doit être formalisée puis capitalisée afin d'être manipulable par notre approche automatisée. Cette partie se concentre alors sur le concept d'entité et celui de carte de visite, dont est inspiré le modèle de données que nous proposons comme support de l'implémentation de l'ABTA. Ce dernier est alors entièrement détaillé en soulignant son intégration dans le modèle haut niveau des caractéristiques clés vu dans le premier chapitre.

1 Génération de processus

Les approches de génération de processus reposent sur les deux principaux raisonnements qu'emprunte un expert gammiste lors de la création d'une gamme d'usinage : le raisonnement par analogie et le raisonnement purement génératif. La Figure 77, basée en partie sur les travaux de [GAMA 1990] propose une synthèse de ces approches et outils.

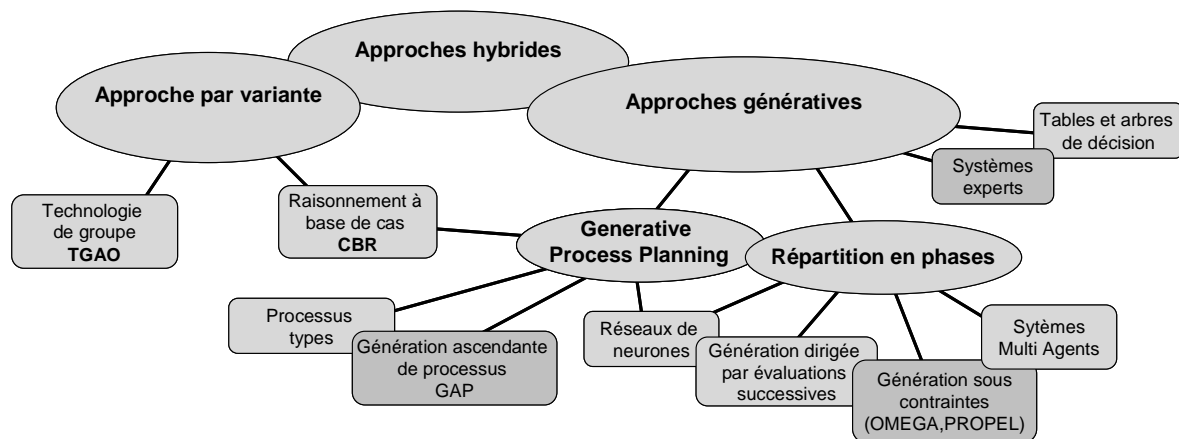


Figure 77 : Les approches de génération de gamme

L'approche par variante (vue dans le cas de l'estimation du coût dans le chapitre I) repose sur ce premier type de raisonnement de l'expert. L'ensemble des pièces déjà réalisées dans l'entreprise sont classées selon leur morphologie, leur gamme d'usinage (gamme type ou enveloppe) et d'autres caractéristiques intrinsèques jugées pertinentes et discriminantes. Lors de la réalisation d'une nouvelle pièce, il est alors possible de retrouver l'ensemble des cas semblables et donc de sélectionner les gammes correspondantes [Anselmetti 1994] [Chang 1990]. Cependant l'emploi d'une telle méthode nécessite une capitalisation très importante de l'ensemble des savoir faire de l'entreprise qui s'accompagne de son lot de difficultés : pérennité des gammes et solutions techniques utilisées, manque de flexibilité (en effet, il est impossible d'ajuster une gamme si la pièce à

traiter diffère localement des références codées). Cette approche, bien que nécessitant une durée de capitalisation de connaissance importante, est efficace dans le traitement des gammes types.

A cette approche par variante s'oppose l'approche générative. Cette dernière consiste non pas à modifier ou retrouver une gamme déjà créée mais plutôt à en concevoir une nouvelle dès qu'une pièce est à réaliser. Ce ne sont plus le problème et sa solution qui sont capitalisés (la pièce à réaliser et sa gamme) mais la démarche permettant de passer de l'un à l'autre. Certaines solutions de génération de processus peuvent être citées comme exemple :

- La génération reposant sur des outils de l'intelligence artificielle, comme par exemple PROPEL [Brissaud 1992] ou PART [Van Houten 1989].
- La génération par processus type qui associe à une entité d'usinage donnée plusieurs processus entièrement décrits. Puis l'ensemble des processus sélectionnés est ordonné [Park 2003] [Elmaraghy 1993].
- Les approches basées sur le concept de la Génération Ascendante de Processus (GAP), qui proposent de générer la gamme d'usinage en générant les différents états de la pièce allant de son état final à son état brut, au fil des opérations d'usinage [Villeneuve 1990] [Etienne 2006].

Parmi cette diversité d'approches génératives, nous avons choisi de nous focaliser sur deux approches : la génération de gamme par systèmes experts et l'approche par propagation de contraintes. Les paragraphes suivants proposent une analyse détaillée de ces approches et des développements que nous avons réalisés afin d'en évaluer l'intérêt pour la génération de gammes de fabrication. Ils permettent également de vérifier la compatibilité de ces outils avec notre approche par activités et son intégration dans la méthode ABTA.

Ces paragraphes se concluent par la description de l'application que nous proposons comme support de l'ABTA, en détaillant plusieurs procédures de cette solution en l'illustrant d'un exemple tiré de notre mécanisme test.

1.1. Génération par système expert

Résultat des travaux de l'interprétation informatique de données des spectrographes de masse initiés par J. Lederberg [Kindsay 1967], le premier système expert, DENDRAL, est apparu durant les années 1960. Ces outils forment la première pierre de l'Intelligence Artificielle, et s'accompagnent de l'apparition de la Cognitique, science s'évertuant à représenter les savoirs d'un expert et à mettre en lumière ses raisonnements implicites. Ces ensembles de méthodes permettent alors, dans des domaines très limités voir circonscrits, de modéliser les compétences et les raisonnements d'experts.

Ces outils sont généralement employés pour régler les problèmes de type classification ou prise de décisions (diagnostique, prescription thérapeutique, par exemple). Le premier système expert dédié à la génération de gamme, GARI, a été développé dans les années 80 par l'ITMI de Grenoble [Descotte 1981]. Dès lors de nombreux prototypes sont apparus dans le domaine de la recherche mais très peu sont actuellement utilisés dans le monde industriel : PROPEL créé pour Giat Industrie et PART utilisé par Bosch et Philips en sont deux exemples.

Les paragraphes suivant proposent, dans un premier temps, de s'intéresser aux mécanismes des systèmes experts en détaillant les organes constituant ces outils afin d'en comprendre le fonctionnement. Puis, dans le but de valider leur emploi au sein de notre démarche d'optimisation, nous avons développé deux applications de sélection de processus. Basé sur l'analyse de ces deux développements, cette partie se conclut par le bilan de cette approche et son intérêt pour la sélection de processus dans une démarche d'optimisation des tolérances.

1.1.1 Principe de fonctionnement

Pour comprendre le fonctionnement d'un tel outil, il est nécessaire d'en détailler les composants et leurs rôles. Les systèmes experts sont constitués de deux principaux éléments, comme le montre la *Figure 78*.

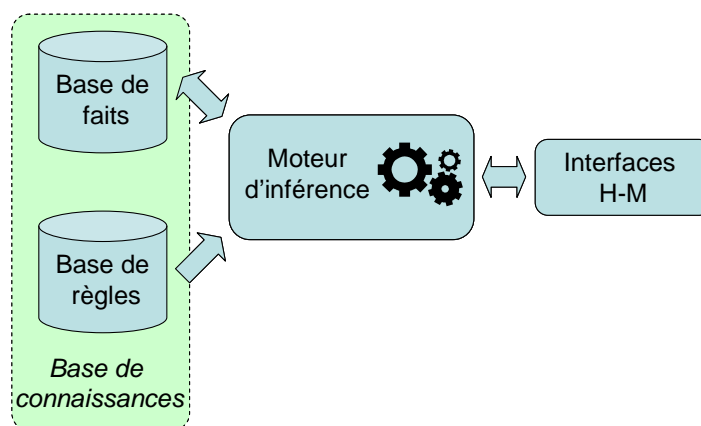


Figure 78 : Architecture d'un système expert

- **Une base de connaissances**, qui est elle-même constituée de deux sous ensembles :
 - **La base de faits** : Cette base de faits est la mémoire de travail du système expert. Elle contient l'ensemble des variables utilisées, les réponses de l'utilisateur aux questions posées par l'outil et les faits déduits par le moteur d'inférence.

Le format d'un fait peut être aussi bien un simple booléen, une valeur symbolique (comme par exemple l'identification d'une machine) ou un réel (le diamètre ou la longueur d'un outil). L'ordre d'un système expert est alors fonction de la complexité de ces faits manipulés. Ainsi, un ordre 0 ne sait compiler que des entités booléennes, un système d'ordre 0+ utilise les booléens et les symboliques et l'ordre 1 sait raisonner, en plus de ces deux types de faits, sur les nombres réels. Dans le cas de la génération de gammes d'usinage, il est préférable de disposer d'un système d'ordre 1.
 - **La base de règles** : C'est elle qui capitalise le savoir faire et les connaissances de l'expert. Ces règles sont formalisées de la sorte : Si $\langle condition(s) \rangle$ Alors $\langle conclusion(s) \rangle$ où la conclusion devient un nouveau fait qui est ajouté à la base de faits. Il est possible d'ajouter à ces règles un degré de certitude : dans ce cas, si plusieurs règles sont

simultanément activables, le système choisira celle dont le coefficient de certitude est le plus élevé.

Par exemple une règle permettant la sélection d'un outil d'usinage a pour forme : « Si le type de l'entité géométrique est un trou ET si la longueur est supérieur à 65mm, ALORS choisir l'outil *ForetCoupeAuCentre* ET l'opération de *Forage* ».

- **Les Méta faits, méta valeurs et méta règles** : Pour pouvoir fonctionner, un système expert doit contenir un ensemble de méta règles indiquant au système comment utiliser les règles expertes. Ces règles de haut niveau définissent principalement la stratégie à adopter dans l'ordre d'activation des règles expertes.
- **Moteur d'inférence** : Le moteur d'inférence est avant tout un dispositif permettant d'inférer de nouvelles connaissances à partir de sa propre base de faits. C'est cette partie qui réalise concrètement le raisonnement.

Ce moteur d'inférence reste néanmoins totalement autonome et indépendant du domaine dans lequel il est employé. Ainsi le même moteur d'inférence peut réaliser aussi bien l'analyse des maladies bactériennes du sang (MYCIN développé en 1974 est toujours d'actualité et contient aujourd'hui près de 500 règles) que la démonstration de théorèmes mathématiques (MUSCADET [Pastre, 1984]). L'ordre dans lequel les règles sont activées par les faits initiaux ou le but à atteindre, s'appelle le chaînage. Il existe trois types de chaînages :

- Le **chaînage avant** : Le mécanisme du chaînage avant est le plus simple : pour déduire un fait particulier, l'outil déclenche les règles dont les prémisses sont connues jusqu'à ce que le fait à déduire soit également connu ou qu'aucune règle ne soit plus déclenchable.
- Le **chaînage arrière** : Le mécanisme de chaînage arrière consiste à partir du fait que l'utilisateur souhaite établir, à rechercher toutes les règles qui concluent ce fait. Puis, il cherche à établir la liste des faits qu'il suffit de prouver pour que les règles puissent se déclencher puis à appliquer récursivement le même mécanisme aux faits contenus dans ces listes.
- Le **chaînage mixte** : comme son nom l'indique il combine les algorithmes du chaînage avant et du chaînage arrière. L'algorithme simplifié est donné ci-dessous :

ENTREE : F (à déduire)

DEBUT

TANT QUE F n'est pas déduit mais peut encore l'être FAIRE

Saturer la base de faits par chaînage AVANT

(c'est-à-dire, déduire tout ce qui peut être déduit)

Chercher quels sont les faits encore éventuellement déductibles

Déterminer une question pertinente à poser à l'utilisateur et

Ajouter sa réponse à la base de faits

FIN DU TANT QUE

FIN

Afin d'exprimer ces règles et le mécanisme du moteur d'inférence, de nombreux langages de programmation spécialisés ont été développés. Lisp et Prolog en sont les deux représentants les plus couramment employés.

1.1.2 Développements sur CLIPS

Afin de valider la génération de gamme par l'emploi d'un système expert, notre choix s'est porté sur le logiciel CLIPS (C Language Integrated Production System), outil réalisé dès 1984 par le laboratoire d'intelligence artificielle de la NASA. Depuis, de nombreuses extensions et améliorations ont vu le jour et ce, grâce au dynamisme de la communauté CLIPS [Riley 2007]. En effet, sa portabilité, la puissance de ses fonctions et surtout sa gratuité en font un outil très employé par le monde universitaire qui en a démontré la puissance par de nombreux projets.

Comme le montre la Figure 79, l'outil se présente sous la forme d'un éditeur de texte peu ergonomique et plutôt austère, dans lequel l'utilisateur peut éditer ses règles et les faits initiaux de son problème.

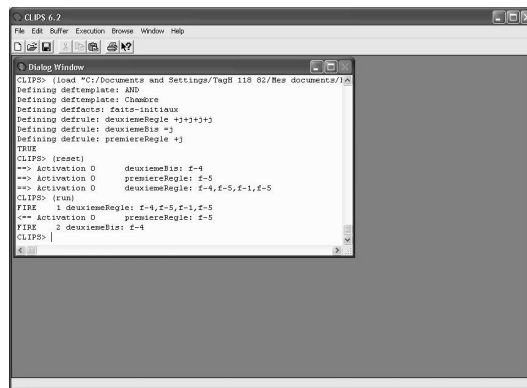


Figure 79 : Interface de CLIPS – Impression écran

La définition des faits et des règles s'écrit dans un langage proche de LISP, dont la syntaxe demande une certaine expertise comme le montre l'exemple Figure 80. Cette règle peut se traduire en langage naturel : « Si il existe un objet en alliage d'aluminium alors instancier les différents procédés compatibles c'est-à-dire la fonderie par gravité, par centrifugation ».

```
(defrule materiau_aluminium (declare(salience 100))
?o<- (object(is-a ALLIAGE_D_ALUMINIUM))
=>
(make-instance lente_a_froid of PROCEDE_MATERIAU (nom lente_a_froid))
(make-instance lente_a_chaud of PROCEDE_MATERIAU (nom lente_a_chaud))
(make-instance par_gravite of PROCEDE_MATERIAU (nom par_gravite))
(make-instance centrifugation of PROCEDE_MATERIAU (nom centrifugation))ENTREE : F (à déduire)
```

Figure 80 : Exemple de règle CLIPS

Afin de découvrir les possibilités de cet outil et ainsi valider l'emploi de cette approche, nous avons développé deux maquettes logicielles de génération de processus basées sur CLIPS.

- La première implémentation sous CLIPS, est un assistant de génération de pré-programmes, dans le cadre de la conception préliminaire voire conceptuelle du produit. Réalisée par [Houin 2005] [Martin 2006], elle consiste à sélectionner parmi les procédés disponibles, ceux qui sont compatibles avec plusieurs critères à la fois du produit et de ses composants géométriques. La quantité produite, le matériau, la forme générale de la pièce, les tolérances, les formes géométriques et les compatibilités entre procédés sont des exemples des huit critères principaux gérés par cette application. La *Figure 81* synthétise les critères de sélection des procédés associés aux caractéristiques des entités géométriques composant le produit. Sur cette figure les rectangles aux coins arrondis sont des procédures de sélection.

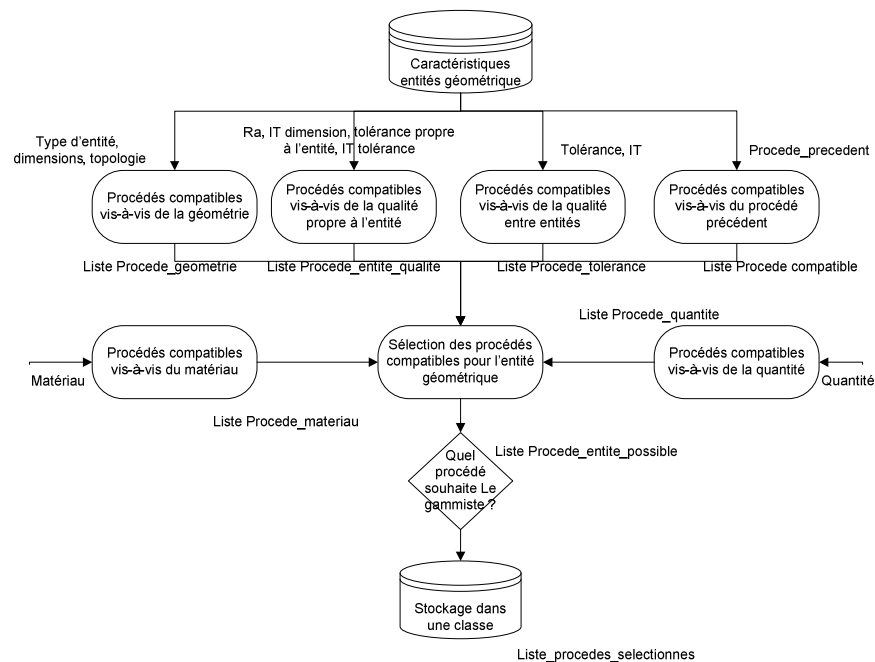


Figure 81 : Les critères de sélection pour les entités géométriques

Ces critères sont alors traduits en un ensemble de règles métiers (une cinquantaine de règles), codées et stockées dans la base de règles du système expert.

Afin de décrire le domaine d'évolution de l'outil, une taxinomie des entités (géométriques, administratives, techniques et de coût), des opérations (de fabrication, de logistique, de traitements de surface) et des ressources est proposée puis intégrée dans CLIPS par la mise en forme de la base de faits.

L'application ainsi enrichie est alors fonctionnelle : l'utilisateur doit alors, dans un premier temps, décrire son produit à partir des classes d'entités disponibles dans la base de fait. Dès lors, l'outil va sélectionner en fonction des règles métiers enregistrées et des spécificités du produit, les procédés disponibles qu'il propose à l'utilisateur via une interface (illustrée *Figure 82*). Il permet alors de proposer des solutions alternatives, en laissant la décision finale à l'utilisateur.

```

----- liste des opérations possibles -----
pour l'entite forme_principale, est possible l'opération lente_a_froid
pour l'entite forme_principale, est possible l'opération lente_a_chaud
pour l'entite forme_principale, est possible l'opération par_gravite
pour l'entite forme_principale, est possible l'opération sous_pression

----- quel operation choisissez vous : -----

pour l'entite forme_principale ?
par_gravite
    
```

Figure 82 : Interface de proposition/sélection des procédés compatibles

Le résultat (instantané) de cette application est alors la pré-gamme (la liste ordonnée des procédés) compatible avec l'ensemble des règles métiers et la définition du produit. Seuls les problèmes d'assemblage, la prise en compte des entités réalisées par plusieurs procédés et l'estimation du coût n'ont pas été implémentés dans cette approche.

- La seconde implémentation propose une estimation du coût des entités d'usinage (principalement les perçages et alésages) de pièces prismatiques [Bourdon 2005] [Litzler 2005]. Elle s'inscrit donc en aval du système expert précédent en se basant sur les pré-gammes qu'il génère, afin d'en estimer plus précisément le coût et enrichir ce squelette de gamme de plusieurs opérations. A l'instar des précédents travaux, le domaine est modélisé par une ontologie puis implémenté dans CLIPS par le biais des métarègles et des règles expertes.

Avant de pouvoir utiliser le système ainsi enrichi, il est nécessaire de saisir sous forme d'entités géométriques la description de la pièce à analyser. Nous nous sommes limités dans ce cas d'étude à l'analyse des seules entités axiales.

De la même manière, doivent être instanciés (enregistrés dans la base des faits) les différents outils et opérations disponibles. Une fois l'ensemble des données enregistrées, l'outil peut, par chaînage avant trouver la gamme solution permettant de réaliser la pièce ainsi que son coût associé.

```

CLIPS> (run)
Génération des opérations { FIRE 1 operation_de_pointage: [trou01]
                          ==> instance [Pointage_trou01] of OPERATION_DE_POINTAGE
                          FIRE 1 operation_d_alesage: [trou01]
                          ==> instance [Alesage_trou01] of OPERATION_D_ALESAGE
Génération des changements d'outils { FIRE 1 chgt_outil: [Alesage_trou01],[Changement_Outil]
                          ==> instance [1_Chgt_outil] of OPERATION_DE_CHANGEMENT_D_OUTIL
                          <== instance [Changement_Outil] of OPERATION_DE_CHANGEMENT_D_OUTIL
                          FIRE 1 chgt_outil: [Pointage_trou01],[1_Chgt_outil]
                          ==> instance [2_Chgt_outil] of OPERATION_DE_CHANGEMENT_D_OUTIL
                          <== instance [1_Chgt_outil] of OPERATION_DE_CHANGEMENT_D_OUTIL
Génération des entités coûts { FIRE 1 chgt_outil=>EC_chgt_outil: [2_Chgt_outil]
                          ==> instance [EC_chgt_outil] of ENTITE_COUT_CHANGEMENT_D_OUTIL
                          FIRE 1 alesage=>EC_alesage: [Alesage_trou01]
                          ==> instance [EC_1_alesages_20_sur_A] of ENTITE_COUT_ALESAGE
                          FIRE 1 pointage=>EC_pointage: [Pointage_trou01]
                          ==> instance [EC_1_pointages_sur_A] of ENTITE_COUT_DE_POINTAGE
                          FIRE 1 preparation_machine=>EC_Preparation_machine:
                          [Preparation_perceuse]
                          ==> instance [EC_preparation_perceuse] of
                          ENTITE_COUT_DE_PREPARATION_MACHINE
    
```

Figure 83 : Affichage de l'enchaînement des règles activées

Pour illustrer cette application, est donnée une impression d'écran de CLIPS *Figure 83* sur laquelle apparaissent l'enchaînement des règles activées et la prémisse de cette activation (fait succédant le mot clef "FIRE"). Sur cette figure est également illustrée la génération de deux opérations d'usinage et des opérations de changement d'outils associées. Puis, sont générées les entités coûts engendrées par ces postes de coûts.

Le résultat final, après activation de toutes les règles possibles, est la base de faits illustrée *Figure 84*. Y sont précisés : les entités géométriques décrivant la pièce à analyser, les entités coûts, des opérations d'usinage et des opérations de changements d'outils, et coût estimé de la fabrication de ce produit.

```

CLIPS> (instances)
[initial-object] of INITIAL-OBJECT
Entités produit { [cube] of PIECE_BRUTE
                  [trou01] of TROU
Opérations      { [Preparation_perceuse] of OPERATION_DE_PREPARATION_MACHINE
                  [Pointage_trou01] of OPERATION_DE_POINTAGE
                  [Alesage_trou01] of OPERATION_D_ALESAGE
                  [2_Chgt_outil] of OPERATION_DE_CHANGEMENT_D_OUTIL
                  [EC_chgt_outil] of ENTITE_COUT_CHANGEMENT_D_OUTIL
Entités coûts   { [EC_1_alesages_20_sur_A] of ENTITE_COUT_ALESAGE
                  [EC_1_pointages_sur_A] of ENTITE_COUT_DE_POINTAGE
                  [EC_preparation_perceuse] of ENTITE_COUT_DE_PREPARATION_MACHINE
                  [EC_Finale_JUSTE_PRIX_33.5_EUROS] of ENTITE_COUT_PIECE_FINIE
For a total of 12 instances.
CLIPS>

```

Figure 84 : Base des faits après activations

Ces deux applications ont prouvé que les systèmes experts sont des solutions viables et intéressantes pour réaliser la génération de gammes à la fois préliminaires et détaillées. Néanmoins, certaines difficultés limitent l'utilisation de cette solution dans notre processus d'optimisation. Le chapitre suivant propose de les décrire plus précisément.

1.2. Sélection par programmation par contraintes

L'approche par programmation par contraintes est la seconde approche analysée pour la génération de processus. Elle est intéressante car elle est proche du travail des concepteurs, qui doivent trouver une solution respectant un nombre important de contraintes, exigences et normes. Nous nous sommes logiquement intéressés à cette approche pour la génération de processus ou plutôt pour la sélection de processus viables considérant un ensemble de contraintes.

Ce paragraphe a pour objectif de présenter le principe de fonctionnement de cette approche, en l'illustrant d'un développement que nous avons réalisé afin de valider son intérêt pour la sélection de processus.

1.2.1 Principe

La Programmation Par Contrainte (ou PPC), bien qu'apparue dans les années 70 [Waltz 1972], n'a réellement émergée qu'à partir des années 90. A la différence du calcul formel qui propose de transformer les contraintes (usuellement sous la forme d'inéquations et équations) afin d'obtenir formellement les valeurs des variables, la PPC agit non pas sur les contraintes mais opère une réduction du domaine de définition des variables.

Cette réduction du domaine de définition en fait un atout très intéressant pour les problèmes fortement combinatoires comme par exemple l'allocation ou la planification de ressources, la logistique et depuis peu la conception et la fabrication. Elle est également employée dans des outils de génération de gammes tels que PROPEL [Brissaud 1992] ou OMEGA [Sabourin 1995], principalement pour résoudre les problèmes d'ordonnancement et d'allocation des ressources d'usinage.

Un problème de satisfaction de contraintes fait correspondre à un ensemble de variables appartenant à un domaine de définition, un ensemble de contraintes qui relient les variables entre elles. Une méthode de programmation par contraintes se définit par trois vues :

- Le **domaine des variables**. Celles-ci sont typées, elles peuvent être : réelles, symboliques, booléennes, rationnelles ou ensemblistes.
- Le **type de contraintes**, qui peut être comme par exemple numérique (équation + inéquations), booléen, ensembliste ou de typage. Les contraintes peuvent également être symboliques, algorithmiques ou formalisées sous la forme de tableaux ou d'abaques.
- Il existe plusieurs **méthodes de résolution** qui dépendent fortement du type de variables manipulées. La méthode du simplexe, la méthode de cohérence par arcs ou de l'algèbre des intervalles en sont les principaux exemples.

[Yannou 1998] propose une vue d'ensemble des méthodes de résolution, parmi ces dernières : il est intéressant de décrire le mécanisme d'énumération des solutions dans le cadre de la propagation de contraintes. En effet c'est un des principaux avantages de cette approche dans le cas des problèmes fortement combinatoires comme l'est la sélection de processus.

Dans le cas classique (donné *Figure 85*), l'énumération revient à générer toutes les solutions, puis d'en estimer la validité. Dans le cas contraire, la branche est supprimée. Cette approche appelée « générer et tester » est certes facile à réaliser mais ses temps de calcul sont très longs et dépendent à la fois du domaine des variables et du nombre de variables manipulées.

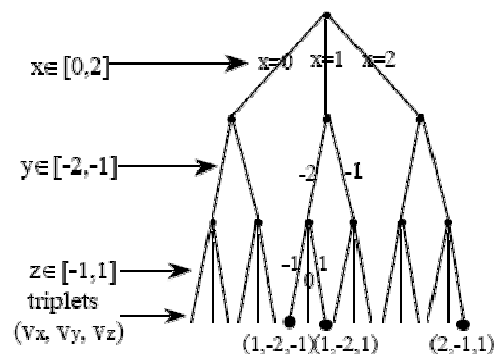


Figure 85 : Procédure « générer et tester » - Exemple

Dans le cas de la PPC (*Figure 86*), l'énumération consiste à prendre en compte au plus tôt des incohérences lors de la génération de l'arbre. Ainsi lorsqu'une instantiation est faite (une variable est quantifiée avec une valeur de son domaine) cela s'accompagne de l'ajout d'une nouvelle contrainte qui peut réduire les domaines des variables qui ne sont pas

encore instanciées (situées en dessous dans l'arbre). Ces contraintes sont nommées contraintes dynamiques car elles se défont lorsque l'algorithme remonte l'arbre pour tester d'autres valeurs.

Cette propagation de contraintes permet alors d'« élaguer » au plus tôt les branches inutiles ou incohérentes et permet de ce fait d'augmenter la rapidité de la sélection. Qui plus est, la stratégie du choix des variables lors de la construction de l'arbre a une importance capitale sur l'efficacité de l'énumération et donc sur le temps de traitement.

Il est ainsi préférable d'énumérer les variables qui ont le domaine le plus étroit le plus tôt possible. Cela permet, si une incohérence est détectée à ce niveau d'« élaguer » un grand nombre de branches. Par exemple soit deux variable entières $x \in [0,2]$ et $y \in [0,10000]$, il est plus intéressant d'énumérer x car il est possible de détecter une incohérence et donc de supprimer 10000 branches d'un coup. Si l'énumération commence par y , celle-ci ne pourrait au mieux supprimer que deux branches.

De même il est préférable d'énumérer dans un premier temps les variables les plus contraignantes, car appartenant à un grand nombre de contraintes. L'instanciation de cette variable permet alors un filtrage plus efficace.

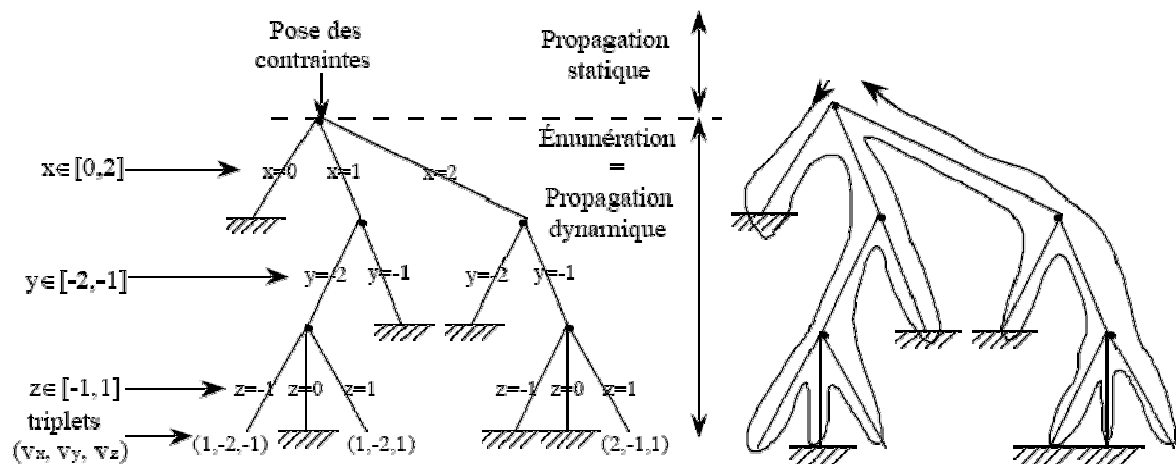


Figure 86 : (à gauche) Exemple d'un arbre d'énumération (à droite) Sens du parcours de l'arbre [Yannou 1998]

Puisque la problématique de sélection de processus revient à une énumération d'arbre, l'emploi de programmation par contraintes semble être une solution rapide et efficace dans le cadre de la génération de processus. C'est pourquoi nous avons développé une application afin d'en valider l'emploi : elle est présentée dans le paragraphe suivant.

1.2.2 Développement effectué

Une maquette logicielle de sélection de processus a été développée sous le logiciel Constraint Explorer (CE) de Dassault Aviation [Zimmer 2004]. Il se présente sous la forme d'un éditeur de texte (illustré Figure 87) disposant d'un « débogueur » qui permet à la demande de l'utilisateur, une vérification de la syntaxe du code entré.

Un programme sous CE se décompose en deux grandes parties :

- La définition des variables, leur type (un booléen, un énuméré, un réel ou une chaîne de caractères) et les valeurs (ou domaines) qu'elles peuvent prendre (zone ❶ sur l'illustration).

- La définition des contraintes et conditions reliant l'ensemble de ces variables. Ces contraintes peuvent être mathématiques (inéquations, comparaisons), conditionnées ou exprimées à l'aide de « catalogues », qui correspondent à des tableaux (dont le nombre de colonnes est limité à 4 dans sa version 3).

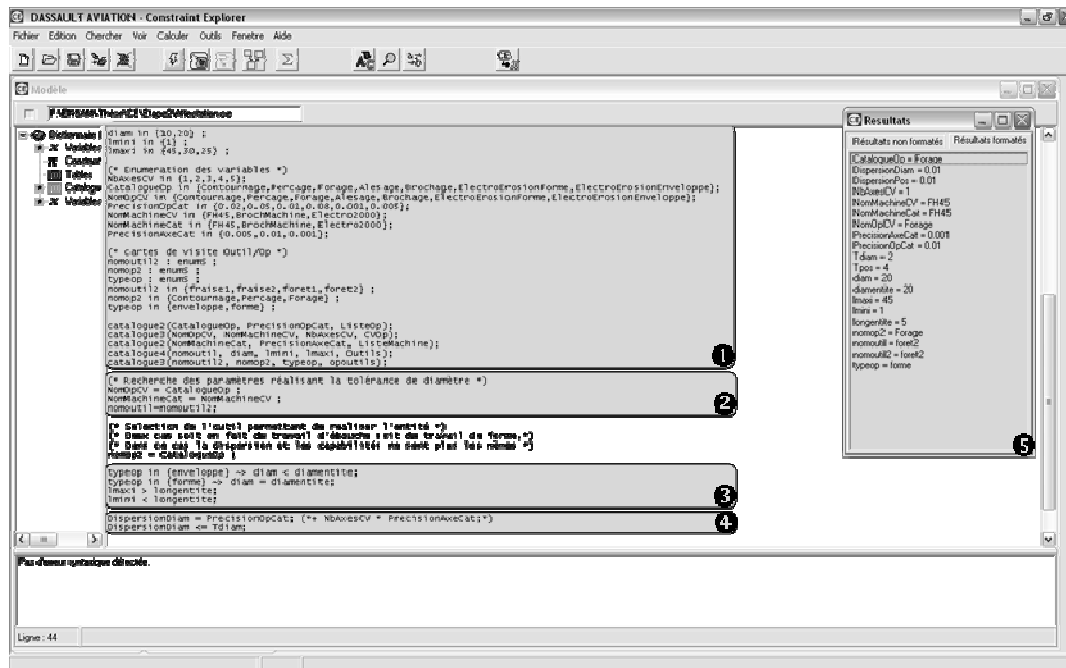


Figure 87 : Dassault Aviation Constraint Explorer - Impression d'écran

Le prototype développé consiste à sélectionner les opérations et séquences d'usinage permettant de réaliser des entités géométriques (trois dans l'exemple test). Les contraintes codées sont :

- D'ordre géométrique (partie ③) : l'outil a-t-il les dimensions appropriées pour réaliser géométriquement l'entité géométrique ? Ces contraintes sont uniquement exprimées avec des inéquations, elles dépendent également du type de travail de l'opération.
- Liées à la compatibilité entre les ressources (partie ②). Elles sont exclusivement réalisées par le biais des catalogues, qui contiennent les données descriptives des outils, machines et opérations d'usinage.
- Liées à la qualité (partie ④) : la dispersion globale de la solution doit être inférieure à un seuil défini par l'utilisateur, afin de limiter la non-qualité.

La compilation est la génération de solutions, elle est immédiate dans le cas testé avec les catalogues contenant une dizaine d'outils, de machine et d'opérations. Les résultats obtenus (dans l'exemple donné Figure 87, ce résultat est unique et situé dans la fenêtre « Résultats » à droite, notée ⑤) sont donnés sous forme de liste de variables quantifiées exportables sous Excel.

A l'instar de CLIPS décrit précédemment, bien que fonctionnel, cet outil reste difficile à intégrer à d'autres programmes : il n'existe pas encore à l'heure actuelle de bibliothèque dynamique permettant de relier l'outil de propagation de contraintes à celui d'optimisation. Cette difficulté n'est pas exclusive à l'outil CE, puisque que des difficultés identiques ont été rencontrées en utilisant d'autres solution telles que GNU PROLOG [Diaz 2007].

1.3. Bilan et remarques

L'approche par système expert et par propagation de contraintes sont deux solutions intéressantes, et par leur manipulation par le biais de plusieurs prototypes, leur efficacité dans le cadre de la sélection de processus est démontrée. Néanmoins, les outils associés à ces approches, n'ont pas été retenus pour les intégrer à l'approche ABTA complète. En effet, ces deux outils (CLIPS et Dassault CE) ne sont intégrables à la démarche globale d'optimisation qu'au prix de manipulations hasardeuses de type *parsing* (conversion de formats des données) ou emploi de bibliothèques logicielles dont les fonctionnalités sont limitées ou excessivement coûteuses.

En effet, la principale difficulté technique à surmonter pour le néophyte, reste le langage de programmation employé dans ces logiciels, qui ne sont pas dédiés au domaine de la fabrication. Comme le montre la *Figure 80* (dans le cas du système expert), le format des règles est en rupture avec les langages de programmation classiques proches du langage naturel. Qui plus est, l'absence de débogueur en temps réel dans CLIPS, ou l'opacité des messages d'erreur de Dassault CE ne facilitent pas la saisie des connaissances et des raisonnements que suivent les experts.

Certains travaux ont été développés afin de limiter ces difficultés et rendre ces outils plus adaptés au domaine de la conception préliminaire du processus. Par exemple, une interface permettant la traduction du langage naturel vers le format CLIPS a été développée dans le cadre du projet USIQUICK [Etienne 2003].

Qui plus est, ces outils du domaine de l'intelligence artificielle sont difficiles à faire accepter des experts gammistes qui pensent ne plus avoir la maîtrise du raisonnement suivi et des causes de ce raisonnement. Ce manque de confiance est certainement le facteur qui explique que ce type d'outils soit peu employé dans le monde industriel.

A l'ensemble de ces problèmes s'ajoute la difficulté de maintenir à jour une base de règles/contraintes à jour, en veillant à garder, au fil des différentes modifications et ajouts, la cohérence de cette dernière.

Fort de ces remarques, nous proposons de recourir à une approche, certes plus simple, mais intégrable à la démarche d'optimisation que nous proposons dans le chapitre II. Cette application se veut lisible et modifiable de tous, en se basant sur des interfaces permettant aux experts de modifier à la fois : les données manipulées par l'algorithme (comme par exemple les tolérances ou les ressources capables) mais aussi les heuristiques et le fonctionnement interne de l'outil (changement des règles et algorithme de sélection des activités).

Les paragraphes suivants proposent de décrire cette approche purement déterministe et algorithmique en détaillant précisément chacune de ses étapes. L'accent est mis sur la flexibilité de l'application et sur les méthodes mises en place pour formaliser et capitaliser la connaissance nécessaire à son fonctionnement.

1.4. L'approche développée par algorithme

De part les remarques énoncées dans le paragraphe précédent, les systèmes experts ou la programmation par contraintes répondent parfaitement aux besoins de l'ABTA en termes de sélection de processus, mais répondent peu aux attentes des utilisateurs (visibilité du cheminement suivi par l'outil de génération de processus).

Afin d'offrir une maîtrise du cheminement suivi par les utilisateurs, nous avons décidé de baser notre application de génération de processus sur une approche plus algorithmique et déterministe. Le projet LURPA-TOUR [Anselmetti 1994] en est un exemple : il fut développé afin de générer le processus de tournage de pièces de révolution.

Fort de l'expertise des approches par systèmes expert et par propagation de contraintes, nous avons également pu développer notre solution autour des points clef de ces approches en se dédouanant des limites des outils. Ainsi, comme le montre les paragraphes suivants cette approche s'inspire du mécanisme d'énumération contrôlée de la propagation de contraintes en se basant sur les règles de production typique des systèmes experts.

Ainsi, cette partie propose de présenter notre approche de génération de processus en se focalisant tout d'abord sur les critères et la démarche de sélection de processus. L'intégralité de l'algorithme est alors détaillée en illustrant chacune des étapes exécutées à l'aide d'un exemple industriel. Ce paragraphe se conclut par un bilan de notre approche accompagnée de quelques résultats obtenus.

1.4.1 Critères de sélection du processus :

Bien que nous ayons écarté les deux logiciels précédemment analysés, cette approche s'appuie néanmoins sur les mécanismes de la propagation de contraintes, décrits dans les paragraphes précédents. En effet nous **avons développé un algorithme qui se base sur le mécanisme d'énumération des outils de propagation de contraintes**, afin de réaliser un module informatique **dédié à la sélection des processus**.

Appliqué au cas de la sélection de processus, la *Figure 88* donne l'arbre des processus capables pour une entité géométrique donnée. Le même type d'arbre est généré pour chaque entité géométrique constituant les composants du produit. Le mécanisme de sélection s'opère en deux grandes phases :

- Dans un premier temps sont générées les différentes branches de l'arbre à un niveau donné. Cette génération se base sur les connaissances de l'expert capitalisées dans les cartes de visites.
- Puis chaque nouvelle branche est contrôlée afin de vérifier qu'elle respecte les contraintes définies par l'expert et celles spécifiques au cas traité. Dès que les ressources inadaptées ont été supprimées, l'algorithme génère les branches du niveau inférieur. Cette boucle stoppe lorsque les branches du niveau outil sont atteintes.

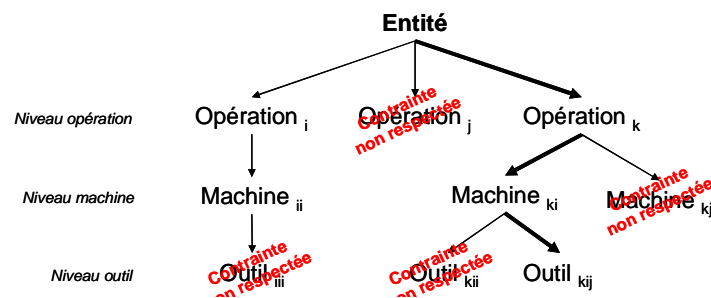


Figure 88 : Arbre des ressources capables - Exemple général

Ainsi dans le cas illustré sur la *Figure 88*, l'algorithme affecte à l'entité géométrique toutes les opérations et les séquences d'usinage. Puis, avant même de continuer la génération des branches de niveau inférieur, il supprime les opérations non compatibles avec les contraintes exprimées par l'expert gammiste. Dès que cette opération de suppression est effectuée, il génère pour chaque opération valable l'ensemble des machines qui lui est associé dans les cartes de visite.

L'ordre dans lequel apparaissent ces variables (opérations, outils, machine) dans l'arbre d'énumération suit une des règles de la construction d'arbre en programmation par contraintes : énumérer en priorité les variables dont le domaine est le plus restreint. Ainsi l'ordre d'énumération dans notre application est : opération, machine puis outil. Contrairement aux outils de programmation par contraintes, l'ordonnancement n'est pas dynamique dans notre application.

Ces contraintes qui s'appliquent aux différents niveaux de l'arbre des solutions sont de plusieurs types :

- **Contraintes de fabricabilité - géométriques :** Elles regroupent les contraintes dûes principalement aux compatibilités géométriques entre les entités géométriques à réaliser, et les formes et dimensions que sont capables d'usiner les combinaisons de ressources. Ces compatibilités de fabricabilité sont synthétisées dans le *Tableau 1*. Les contraintes suivantes en sont quelques exemples :
 - Compatibilité entre le type de formes réalisables par les opérations et le type de forme de l'entité à usiner,
 - Compatibilité entre les dimensions des ressources (dimensions de l'outil ou le volume de travail de la machine) et les dimensions de l'entité.

	Entité Trou	Entité Plan	Entité Cylindre
Fraiseuse ET Rectifieuse plane	$L_{\text{outil}} > L_{\text{entité}}$ ET (Travail de Forme ET $D_{\text{outil}} = D_{\text{entité}}$) OU (Travail Enveloppe ET $D_{\text{outil}} < D_{\text{entité}}$)	$\text{Dimensions}_{\text{Table}} >$ $\text{Dimensions}_{\text{Plan}}$ ET Travail de Forme ou Combiné	Travail d'enveloppe seulement ET $L_{\text{outil}} > L_{\text{entité}}$
Tour ET Rectifieuse cylindrique	Travail enveloppe seulement ET Dimension machine > $\max(\text{Diamètre},$ Longueur de l'entité)	Travail enveloppe seulement ET Dimension machine > $\max(\text{Diamètre},$ Longueur de l'entité)	Travail enveloppe ou combiné ET Dimension machine > $\max(\text{Diamètre},$ Longueur de l'entité)

Tableau 1 : Règles de compatibilité géométrique implémentées

- **Contraintes de fabricabilité – qualité :** Ce type de contrainte représente principalement les problèmes de compatibilité entre la capacité du processus sélectionné et les tolérances spécifiées par le concepteur. Dans le cas de capacité trop faible les triplets sont éliminés.

- **Contraintes de respect des pré-gammes.** Ces contraintes vérifient que les solutions générées sont bien compatibles avec les pré-gammes définies par l'utilisateur. Ces contraintes s'appliquent principalement au choix des machines (nombre d'axes et type de machine).
- **Contraintes économiques :** ces contraintes permettent de supprimer en amont les solutions trop coûteuses.

Il est intéressant de souligner **qu'il est possible de rajouter d'autres types de contraintes ou d'enrichir les contraintes proposées dans cette section.** Ainsi les contraintes liées aux interactions topologiques qui ont un impact important sur les choix des experts gammistes sont un exemple de contrainte qu'il est intéressant d'ajouter à la base déjà implémentée.

Le résultat de cette génération est l'ensemble des triplets (machine + outil + opération) ou séquences de triplets qui sont capables de réaliser l'entité géométrique analysée en prenant en compte le contexte défini par le concepteur et les contraintes exprimées par l'expert gammiste.

Cette solution, qui supprime au plus tôt les solutions inadaptées, permet d'éviter les problèmes d'explosion combinatoire usuellement rencontrés par les outils de recherche de solutions par explorations et combinaisons de ressources. Bien qu'étant moins puissante qu'un véritable outil de propagation de contrainte, tout en étant exclusivement dédié à la recherche de processus d'usinage, cette approche reste intéressante car elle est simple à implémenter (ce ne sont que des suppressions conditionnées) puis à modifier par les utilisateurs. Néanmoins, cette approche ne dispose d'aucun mécanisme de vérification de la cohérence des règles, qui peuvent aboutir à un problème sur-contraint.

1.4.2 Algorithme – Détails

L'objectif de ce paragraphe est de décrire l'algorithme qui a été **implémenté** afin de réaliser la génération du processus de fabrication à partir des tolérances quantifiées soit par l'outil d'optimisation soit par le concepteur.

Cette section est structurée sur les trois grandes étapes constituant cet algorithme : l'étape préparatoire, la génération de gammes d'usinage et la génération de gammes d'assemblage.

En préambule de chaque partie est donné le logigramme de l'algorithme où sont précisés, les flux d'informations, les opérations effectuées et les acteurs y participant. Qui plus est, certaines opérations de cet extrait d'algorithme sont plus amplement détaillées. Les données d'entrée et de sortie de chaque étape sont également précisées.

Afin d'illustrer les différentes étapes de la démarche, une pièce du guide de bras de robot (donné dans la partie introductive de ce mémoire) est proposée comme support simple.

I - Etape préparatoire

Cette première étape effectue la préparation et la mise en forme des informations nécessaires aux étapes suivantes de génération de processus. Lorsque l'algorithme complet est utilisé au sein d'une démarche d'optimisation, cette partie ne s'exécute qu'une unique fois : lors de son initialisation.

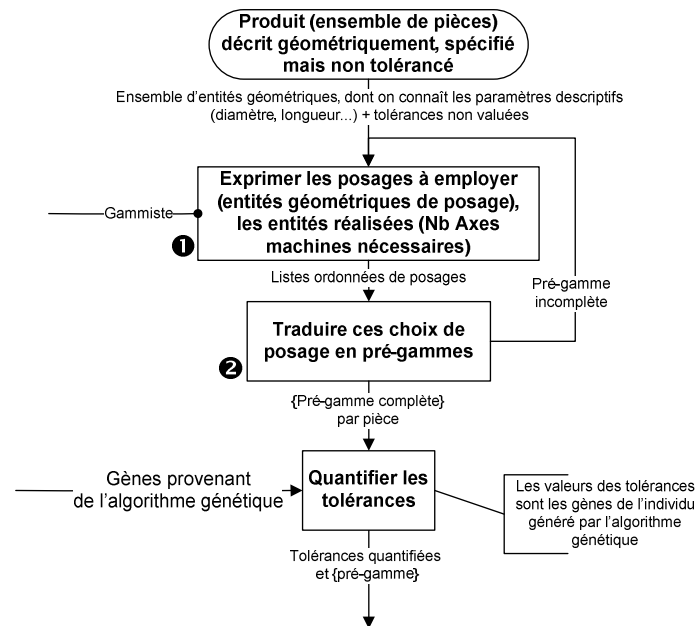


Figure 89 : Etapes préparatoires – Algorithme

Cette première étape s’initialise par la définition des données et connaissances nécessaires aux traitements de la génération de processus de fabrication :

- Définition géométrique du produit** : Afin d’être manipulable par l’outil informatique les pièces sont décomposées et formalisées par plusieurs entités géométriques. Dans notre implémentation, nous nous sommes limités à une définition simple de ces dernières : une entité ne peut appartenir qu’à une de ces quatre classes : plan, trou, cylindre ou surface gauche. D’autres types d’entités peuvent être considérées (poches, rainures, épaulement, par exemple). Un ensemble de paramètres descriptifs lui sont associés, comme par exemple : ses dimensions principales et son orientation. La reconnaissance des entités n’est pas réalisée par cette application, mais ce domaine de recherche est très dynamique comme le souligne le paragraphe 2.1.2.

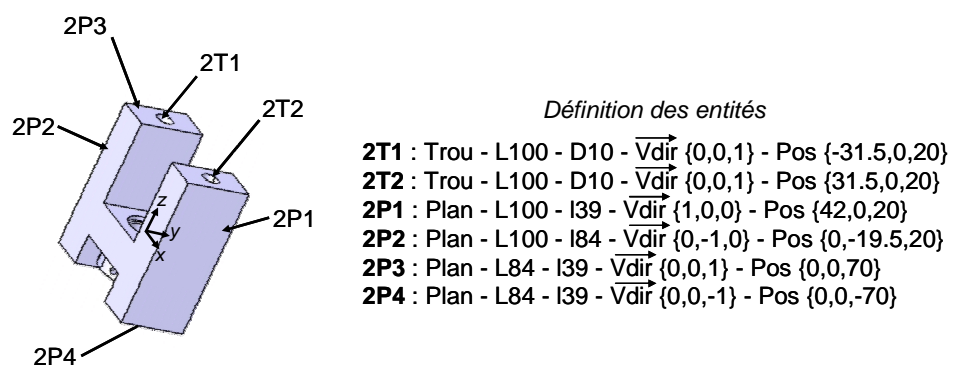


Figure 90 : Bras - Définition des entités géométriques

Afin de faciliter la lecture, les entités géométriques constituant la pièce exemple sont rappelées Figure 90 avec la nomenclature suivante : P pour les surfaces de type Plan et T pour les surfaces de type Trou. Ainsi, l’entité géométrique nommée 2T2 composant le bras du guide est une entité trou de

diamètre 10mm, de longueur 100mm dont le vecteur directeur est, dans un repère lié à la pièce : {0,0,1}.

- **Définition des ressources et connaissances expertes :** Le second type d'informations à saisir correspond aux connaissances et données liées au domaine de la sélection de processus d'usinage. Ainsi pour son fonctionnement l'outil informatique nécessite de connaître les ressources d'usinage disponibles (les outils, machines) et dans quelles conditions les employer (par les opérations d'usinage).

Les tableaux ci-dessous (*Tableau 2*, *Tableau 3*, *Tableau 4*) représentent les outils, les machines et les opérations disponibles au sein de l'entreprise et stockés dans la base de données de l'application. Pour chaque ressource sont saisies les données pertinentes et discriminantes participant à leur sélection.

Ainsi, l'outil *Foret 1* a pour diamètre 10 mm et une longueur active de 130mm, une dispersion estimée de 0.06mm et un coût de 18. Il nécessite d'employer préalablement l'outil *ForetApointer 1*.

ID Outil	Dim1	Dim2	Dispersions	Coût	Antécédent
Fraise 1	20	20	0.03	10	-
Fraise 2	10	130	0.04	12	-
Foret 1	10	130	0.06	18	ForetApointer 1
OutilTour 1	2	10	0.01	10	-
ForetApointer 1	3	15	0.004	8	-

Tableau 2 : Liste des outils stockés - exemple

De la même façon sont enregistrées les machines. Une machine est décrite essentiellement par : son nom, son type, le nombre d'axes de travail disponibles, ses dimensions (comme hypothèse simplificatrice dans le cas de l'implémentation, nous supposons que le volume de travail est un cube), les dispersions moyennes d'un axe et son coût.

Dans le cas de l'exemple (*Tableau 3*) trois machines sont stockées : deux de type fraiseuse et une de type tour. Ainsi la machine nommée *Fraiseuse 1* est une fraiseuse 3 Axes ayant un volume de travail cubique de 400mm de côté et dont chaque axe à une dispersion de 0.005mm.

ID Machine	Type	Axe(s)	Dimension	Dispersion	Coût
Fraiseuse 1	Fraiseuse	3	400	0.005	345
Perceuse 1	Fraiseuse	1	200	0.03	150
Tour 1	Tour	2	200	0.002	240

Tableau 3 : Liste des machines stockées - exemple

Les connaissances de l'expert extraites à l'aide de cartes de visites simplifiées (décrites plus amplement dans le paragraphe 2.2), sont également mémorisées dans la base de données de l'application. Une représentation sous forme de tableau illustre comment ces informations sont stockées (*Tableau 4*). Ainsi pour une opération d'usinage sont associés : le nombre d'axes minimum

nécessaire, le type d'entités géométriques réalisables (trou, cylindre, plan, surface gauche), le type de travail (forme, enveloppe ou combiné), et les couples outils/machines proposés par l'expert gammiste.

Nom OP	Axes	Type de Forme	Type de Travail	Couples proposés
Pointage	1	Trou	Forme	Fraiseuse 1 + ForetApointer 1
				Perceuse 1 + ForetAPointer 1
Surfaçage	1,5	Plan	Enveloppe	Machine 1 +Fraise 1
CyclePoche	3	Trou	Enveloppe	Machine 1+ Fraise 2
Forage	1	Trou	Combiné	Machine 1+ Fraise 2
				Perceuse 1 + Foret 1
Chariotage	2	Cylindre	Enveloppe	Tour 1 + OutilTour 1

Tableau 4 : Liste des opérations et des couples proposés - exemple

Ainsi l'opération dite de *Forage* nécessite un axe, ce qui signifie que toutes les machines ayant au moins un axe continu sont compatibles avec cette opération. Cette opération peut réaliser les entités géométriques de type *Trou* en effectuant un travail *Combiné*. Selon l'expert gammiste ayant saisi ces informations, cette opération peut être réalisée à l'aide de deux couples outils/machines : le couples *Machine 1 + Fraise 2* et le couple *Perceuse 1 + Foret 1*.

A la fin de cette étape, l'ensemble des ressources d'usinage et la définition des pièces du produit (enrichies des données minimales nécessaires) sont connues. Il est possible à partir de ces informations et connaissances de générer totalement les pré-gammes : c'est d'ailleurs l'objectif des travaux actuels du 3S/G-Scop de Grenoble [Paris 1995]. Comme annoncé dans l'introduction de ce chapitre, les pré-gammes sont des entrées de notre système, proposées essentiellement par les experts gammistes.

- **Définition des pré-gammes (étape ① de la Figure 89) :** Comme précisé dans le point précédent, le choix de ne pas générer la pré-gamme nécessite qu'elle soit proposée par un gammiste. Ce squelette de gamme devient alors une entrée de l'application, saisie par l'utilisateur.

Dans notre cas d'étude, nous définissons une pré-gamme comme la suite ordonnée de plusieurs phases, chacune étant l'association d'un type de machine et d'un posage géométrique. A ce couple est alors associé la liste des entités usinées dans cette phase ainsi que les intervalles de tolérances intrinsèques aux entités.

Afin d'illustrer cette définition, une pré-gamme proposée par un gammiste pour la pièce exemple est donnée Figure 91. Sur cette dernière, les trois sous-phases nécessaires à la réalisation de la pièce sont précisées. La *SousPhase20* par exemple, nécessite l'emploi d'une fraiseuse dotée au minimum d'un axe continu et du posage géométrique réalisé par les entités géométriques *2P1*, *2P2* et *2P4*. Dans cette phase, les entités géométriques *2P3*, *2T1* et *2T2* sont alors usinées avec un intervalle de tolérance respectif de : 0.2, 0.05 et 0.05mm.

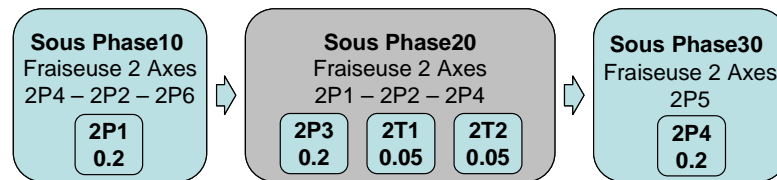


Figure 91 : Pré-Gamme - Exemple

La suite de l'algorithme consiste alors à explorer l'espace de solutions à partir de ces pré-gammes en les analysant et les enrichissant jusqu'à obtenir les processus de fabrication réalisant le produit.

- **Changement de formalisme des pré-gammes (étape 2 de la Figure 89) :** Dans un premier temps, la pré-gamme est analysée afin de vérifier certaines incohérences. L'ensemble des tests de cohérence des pré-gammes proposées par l'utilisateur n'ont pas été implémentés dans notre maquette logicielle. C'est donc à l'utilisateur de s'assurer de la cohérence des pré-gammes qu'il entre dans l'application.

Afin de les rendre manipulables par les étapes suivantes de l'algorithme, le formalisme des pré-gammes est modifié afin de représenter ces mêmes pré-gammes avec une vue entité. Dans cette vue, une pré-gamme est une succession de triplets entité géométrique usinée + type de machine + Posage géométrique. Il est important de préciser qu'à ce niveau aucune machine, outil ou opération n'est instanciée.

Le changement de formalisme résultant du traitement de la pré-gamme précédente est donné Figure 92. Cet exemple illustre la succession des entités usinées associées à l'environnement dans lequel elles sont réalisées. Ainsi le trou 2T1 (grisé sur la figure) est, selon la gamme type, usiné dans le posage géométrique composé des trois entités 2P1, 2P2 et 2P4, en employant une machine de type fraiseuse possédant au minimum deux axes continus.

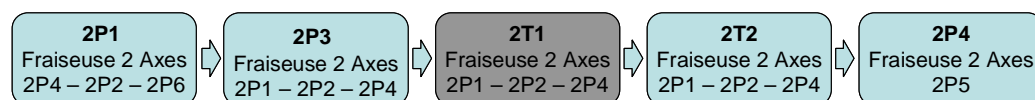


Figure 92 : Pré-Gamme - vue par entités - Exemple

Le résultat final de cette étape préparatoire est donc la mise en forme des pré-gammes, proposées par les experts et contenant les entités géométriques à réaliser ainsi que des paramètres d'usinage de haut niveau tels que le type de machine et le posage géométrique.

II - Génération des gammes d'usinage

Cette seconde étape de l'algorithme de génération du processus de fabrication (dont le logigramme est donné Figure 93) a pour objectif de sélectionner le processus d'usinage des composants du produit. Pour ce faire, elle dispose en entrée des pré-gammes mises en forme précédemment, ainsi que de l'ensemble des données et informations formalisées et capitalisées dans les bases de données de l'application.

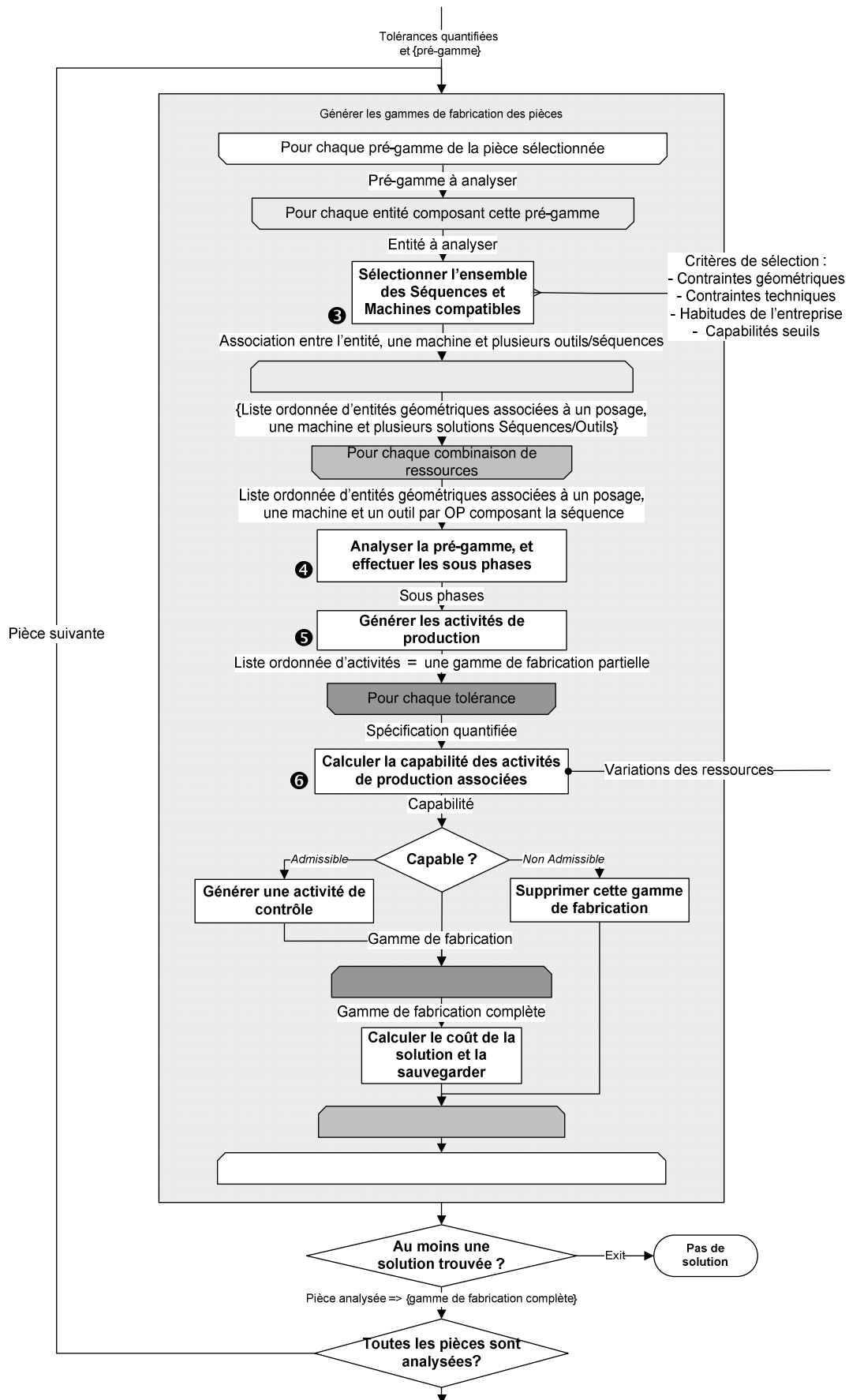


Figure 93 : Génération de gammes d'usinage - Algorithme

A l'instar de l'étape préparatoire ce logigramme se décompose de quatre grands jalons : la sélection de séquences d'usinage compatibles, la génération de gamme d'usinage, la génération du processus puis son enrichissement.

- **Sélection des séquences d'usinage (étape ③ de la Figure 93) :** Une fois la pré-gamme mise en forme, pour chaque entité géométrique sont sélectionnées les séquences d'usinages compatibles à la fois avec la géométrie de celle-ci (type de forme et dimensions), son environnement (posage + type de machine) et l'intervalle de tolérance requis par le concepteur. La procédure suivie pour effectuer cette sélection et son implémentation sont explicitées au paragraphe 1.4.1.

Le résultat de l'application de cette démarche aux entités 2T1 et 2T2 est donné Figure 94. Sur cette figure les flèches représentent les associations proposées par l'application et les textes obliques précisent la contrainte responsable de la suppression de la ressource.

Sur cette figure peuvent être distinguées, pour le premier niveau de nœuds de l'arbre (noté ①), les opérations supprimées car elles ne permettent pas de réaliser le type de forme de l'entité : c'est le cas des deux opérations *Surfaçage* et *Chariotage* (elles peuvent réaliser soit des plans soit des cylindres). Ces deux branches sont supprimées et ne seront donc pas analysées plus en détail.

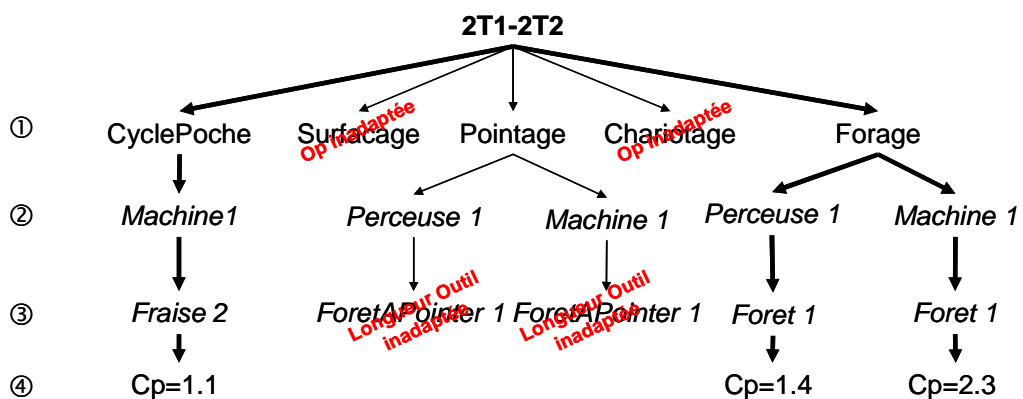


Figure 94 : Sélection de processus - Exemple sur deux entités

Pour les opérations valides, l'algorithme leur associe, en fonction des informations saisies dans les cartes de visites les machines compatibles. Ainsi l'opération *Forage* se voit associer (à partir des connaissances rappelées dans le Tableau 4) deux machines : *Perceuse 1* et *Fraiseuse 1*. Des contraintes à ce niveau sont également appliquées afin de supprimer les machines inadaptées : dans l'exemple aucune machine n'est incompatible avec la géométrie ou la pré-gamme proposée par le gammiste. Cette même procédure de génération / application de contraintes est alors appliquée aux outils, puis au triplet opération/machine/outil complet (aux niveaux ③ et ④).

Le résultat de cette sélection de processus est alors un ensemble de triplets opération/machine/outil qui permettent la réalisation de l'entité géométrique analysée tout en respectant l'ensemble des spécifications et contraintes à la fois géométriques et techniques.

Dans cet exemple, les deux entités *2T1* et *2T2* sont donc réalisables par trois triplets :

- *Cycle de poche + Machine 1 + Fraise 1*
- *Forage + Machine 1 + Foret 1*
- *Forage + Perceuse 1 + Foret 1*

L'**analyse des outils antécédents** permet de s'apercevoir que le *Foret 1* nécessite un travail préparatoire (défini par l'expert dans la saisie des ressources *Tableau 2*), une dernière étape doit être réalisée par l'application. Cette analyse est une version simplifiée de la sélection de processus : l'algorithme vérifie uniquement que l'outil antécédent peut être employé dans la même sous-phase que l'outil le nécessitant. Dans le cas contraire, ils sont tous deux supprimés de la liste des solutions. Il est également possible de mettre en place d'autres critères de sélection et de validation.

Dans le cas énoncé précédemment, l'outil antécédent nommé *ForetApointer 1* est employé uniquement sur la machine *Machine 1* : de ce fait, seul un des deux triplets sectionnés à l'étape précédente convient. Le résultat de cette analyse est alors le suivant :

- *Cycle de poche + Machine 1 + Fraise 2*
- *Machine 1 + {(Pointage + ForetApointer 1) + (Forage + Foret 1)}*

Cette procédure est également appliquée à l'entité *2P3*, apparentant à la même sous-phase que les deux entités précédemment analysées. Il en résulte que seul le triplet *{Surfaçage + Machine 1 + Fraise 1}* est adapté à l'usinage de ce plan.

- **Sélection des gammes d'usinage** : Cette troisième phase de l'algorithme propose d'enrichir les pré-gammes, en précisant désormais les ressources d'usinage sélectionnées lors de l'étape précédente. Cette génération s'opère en trois jalons :
 - La première phase est l'**enrichissement des phases de la pré-gamme**, par l'affectation de machine. A la fin de l'étape précédente l'algorithme a généré un ensemble d'associations entre des entités géométriques et des triplets opération/machine/outil. Puisque l'expert a exprimé, au sein de sa pré-gamme, que ces entités devaient être réalisées dans une même sous-phase, l'application va rechercher les solutions possédant une machine commune. Elle effectue donc le regroupement des solutions en vérifiant que toutes les entités sont au moins associée à une solution du regroupement. Dans le cas contraire, cela signifie qu'il est impossible d'usiner dans une même phase ces entités, le regroupement est alors supprimé.

Dans le cas précédent, les entités *2P3*, *2T1* et *2T2* doivent, selon la pré-gamme être réalisées dans la même phase. L'analyse rapide des triplets associés à ces trois entités permet de conclure qu'un regroupement est possible. La seule machine qui est alors employée dans ce cas est la *Machine 1*. Ainsi à partir d'une pré-gamme dans

laquelle seul le type de machine est précisé, cette étape permet d’instancier précisément la ou les machines réellement employées.

- La seconde étape est l’**arrangement** des triplets solutions au sein d’une sous-phase. En effet, afin de proposer des gammes d’usinages inhabituelles pour l’entreprise, nous proposons de générer toutes les combinaisons de solutions possibles dans une sous-phase. L’algorithme génère alors pour une phase tous les arrangements possibles, en respectant les contraintes d’antériorité imposée par les séquences d’usinage (antécédence entre outils).

Dans l’exemple développé précédemment, trois entités sont usinées dans la phase nommée *Sous-Phase20*. Deux d’entre elles peuvent être réalisées par deux solutions. Il existe alors 24 arrangements possibles, deux sont données en tant qu’exemple dans la *Figure 95*.

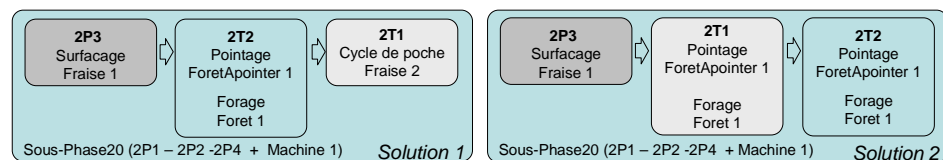


Figure 95 : Exemple de deux arrangements

- La dernière étape correspond au **regroupement** (étape ④ en *Figure 93*) des entités par opérations. Les regroupements ne sont alors plus réalisés en fonction des entités géométriques mais des opérations. Ceci afin de pouvoir, dans le cas où plusieurs entités sont réalisées par le même couple opération/outil, les regrouper.

De ce fait, les deux solutions précédentes deviennent deux extraits de gammes d’usinage :

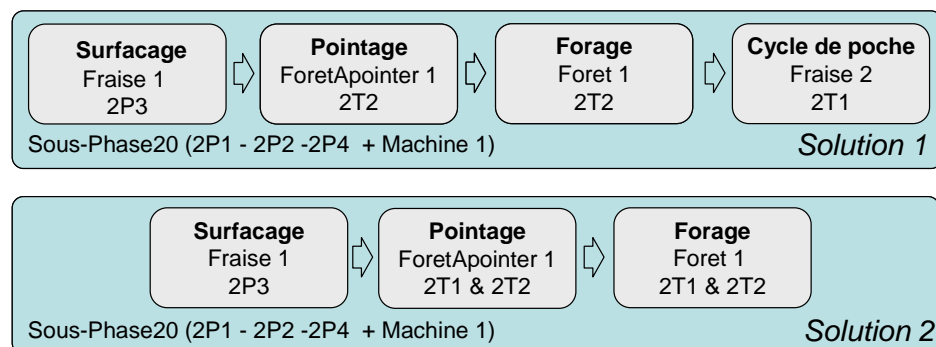


Figure 96 : Gamme d'usinage - Extrait de deux solutions

- **Transcription en activités** (étape ⑤ de la *Figure 93*) : Cette étape a pour objectif de traduire les gammes d’usinage précédemment obtenues en plusieurs processus d’usinage des composants du produit. Dans le chapitre II est précisé ce qu’est une activité de production : une activité consommant comme ressources un mode opératoire, un outil, une machine et un posage afin de modifier la morphologie d’une pièce. De ce fait, cette opération revient à

encapsuler les regroupements mode opératoire + outil + machine + posage composant les gammes d'usinage au sein d'une activité de production.

Le résultat de ce changement de formalisme est appliqué à la *Solution 2* de la *Figure 96*.

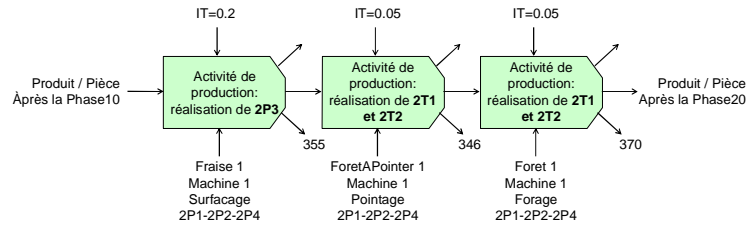


Figure 97 : Passage aux activités de production - Extrait de la phase20

Le résultat de cette traduction est donné *Figure 97*. Les trois opérations de la Phase20 sont chacune encapsulée dans une activité de production. Les modes opératoires, outils, machines et posages deviennent alors les ressources de ces activités. Dès ce niveau, ces activités sont capables de déterminer leur coût direct.

- Enrichissement des processus d'usinage de la pièce (étape 6 de la Figure 93) :** L'étape précédente se conclut par la transcription des gammes d'usinage en activités de production. Or dans l'approche ABTA ce ne sont pas les seules activités intéressantes (car impactant à la fois sur le coût et la qualité du produit). Cette étape a alors pour but d'enrichir les processus de production des activités préparatoires et d'analyse.

Ainsi en s'appuyant sur les mécanismes énoncés dans le chapitre précédent, les activités de production génèrent les activités de contrôle de conformité. De même l'algorithme, par analyse des processus d'usinage, insère les activités de changement de posage, de changement d'outil, de rotation de table (lorsque les vecteurs directeurs des entités réalisées dans une même phase ne sont pas colinéaires).

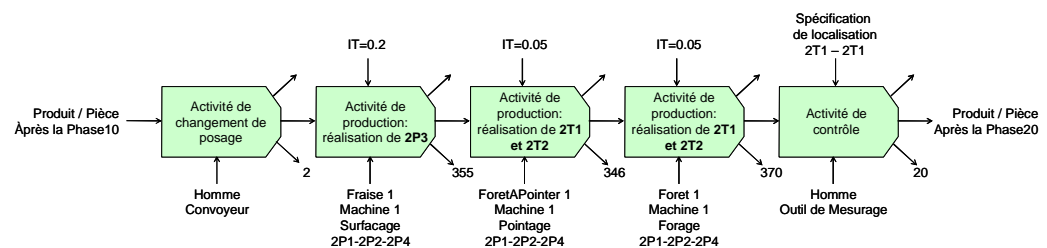


Figure 98 : Gamme d'usinage enrichie des activités "préparatoires" - Exemple

Dans le cas de la Sous-Phase20 (illustrée *Figure 98*), cette gamme s'enrichit d'une activité de changement de posage (en début de phase), de trois activités de changement d'outils (non affichées pour des raisons de lisibilité) et d'une activité de contrôle de conformité. Cette dernière est générée après une analyse des tolérances qui évalue que la performance de l'activité de production, réalisant le forage des entités géométriques *2T1* et *2T2*, est trop faible pour respecter la condition de localisation reliant ces deux entités.

Ainsi à la fin de cette seconde étape, l'ensemble des processus enrichis de chacun des composants du produit est disponible. Ces processus sont, à cette étape, des listes ordonnées d'activités de production, de contrôle, de préparation et de transport.

III - Génération des gammes de fabrication

La dernière étape est la génération des gammes de fabrication réalisant le produit. Elle revient, dans un premier temps à combiner les processus de chaque composant, puis de les enrichir d'activités d'assemblage et de contrôle.

En effet, l'étape notée 7 dans le logigramme (proposé dans la Figure 99) précise bien que toutes les combinaisons sont effectuées et non pas seulement l'arrangement du meilleur processus de chaque composant. Concevoir la gamme d'assemblage de cette manière élitiste est une erreur car elle revient à effectuer une optimisation locale, qui ne prend pas en compte les difficultés (et leurs coûts engendrés) d'assemblage en aval.

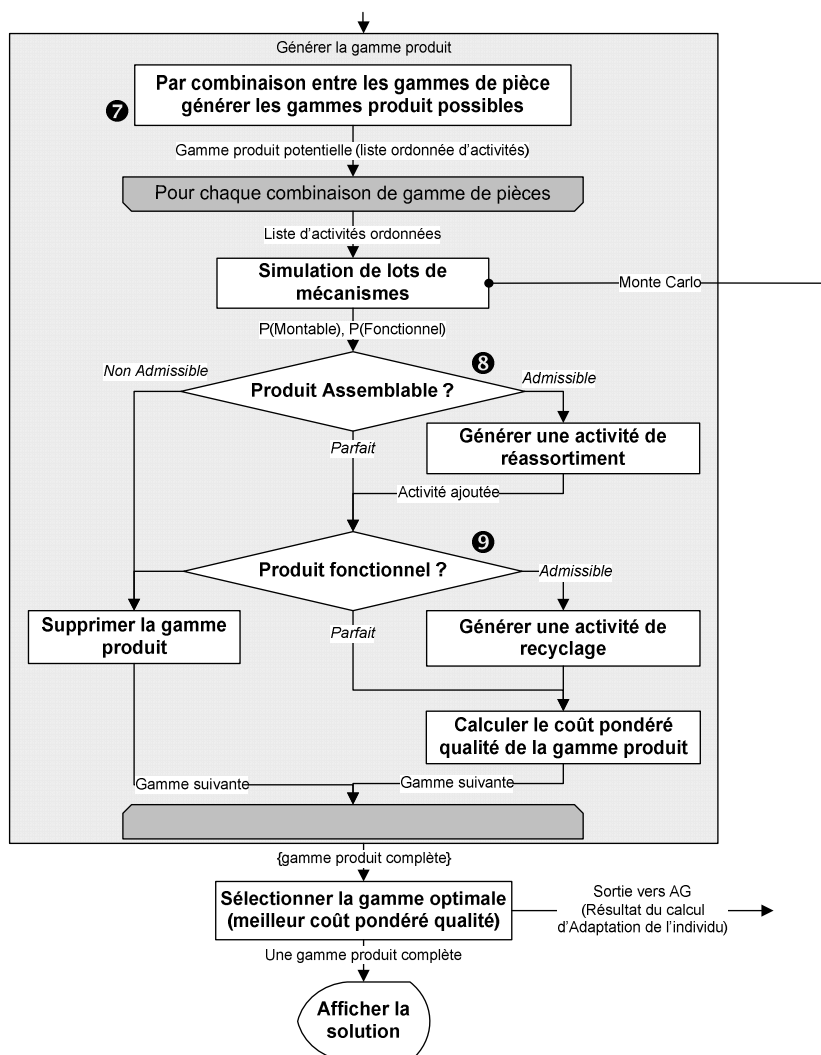


Figure 99 : Génération de gammes d'assemblage - Algorithme

Puis, chaque combinaison ainsi générée est analysée puis enrichie selon le même mécanisme que l'enrichissement des processus d'usinage (étape 3 de la Figure 99). Ainsi les activités d'assemblage, de contrôle de conformité, de recyclage et de réassortiment

peuvent être ajoutées aux processus analysés (par une analyse des tolérances) s'ils ne respectent pas les exigences fonctionnelles et d'assemblage.

Ainsi, pour chaque gamme de fabrication est vérifié que le produit est tout d'abord assemblable (*Figure 100*). Dans le cas contraire, une activité de retraitement est ajoutée à la gamme afin de modéliser les manipulations des opérateurs pour trouver des combinaisons de pièces assemblables.

De même, l'algorithme analyse les produits assemblés afin de vérifier qu'ils respectent les exigences fonctionnelles. Dans le cas de l'exemple précédent, il existe une seule condition fonctionnelle : le battement angulaire de la liaison glissière. Ainsi est calculé le taux de produits ne respectant pas cette condition : ils seront retirés de la ligne de conditionnement puis recyclés.

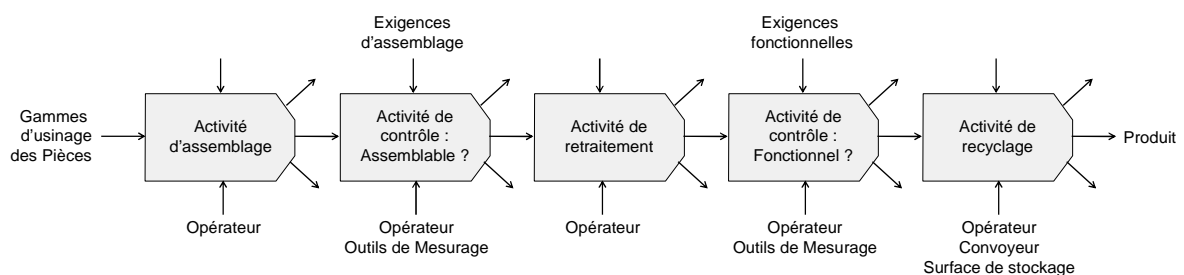


Figure 100 : Processus d'assemblage - Exemple

Le résultat de cette étape, et donc le résultat final de l'algorithme, est une liste de plusieurs gammes de fabrication composées uniquement d'activités. La meilleure d'entre elles est alors sélectionnée à partir de son coût pondéré qualité. Elle est finalement transmise à la fois à l'outil d'optimisation comme quantification de la fonction objectif et à l'utilisateur pour le contrôle des solutions proposées.

1.5. Implémentation et résultats

L'ensemble de cet algorithme a été implémenté en Visual Basic dans l'environnement Visual Studio de Microsoft. Basé sur une approche objets, les bases de données sont mémorisées sous format XML afin de maximiser l'interopérabilité avec de futures applications. Les résultats sont générés automatiquement sous Visio, pour une lecture plus aisée des processus de fabrication. Qui plus est, dans un souci de transparence, l'ensemble des choix opérés par l'algorithme sont annotés des causes de ces choix puis stockés dans plusieurs fichiers textes accessibles par l'utilisateur.

Dans le cas du guide de bras de robot, et avec une dizaine d'outils, cinq machines et une vingtaine d'opérations d'usinages, le temps de génération de toutes les gammes viables ainsi que la sélection de la gamme optimum (considérant son coût pondéré qualité) est inférieur à une vingtaine de secondes. Ce temps de traitement, qui peut sembler long, est essentiellement dû à la mise en forme des résultats et à leur affichage. Il est donc possible, lorsque ce module de génération de gammes de fabrication est employé au sein d'un outil d'optimisation, de désactiver ces opérations optionnelles afin d'en accélérer le traitement. Qui plus est, cette application n'est absolument pas optimisée et je pense que du temps peut être aisément gagné en modifiant certaines parties du code.

Le résultat du processus réalisant la pièce exemple proposée à l'utilisateur sous l'outil Visio, est illustré *Figure 101*. Il est à noter que cette représentation à une vocation uniquement d'affichage : il est cependant envisageable que l'application retourne ce résultat en utilisant le formalisme des graphes de phases proposé par [Tichadou 2005].

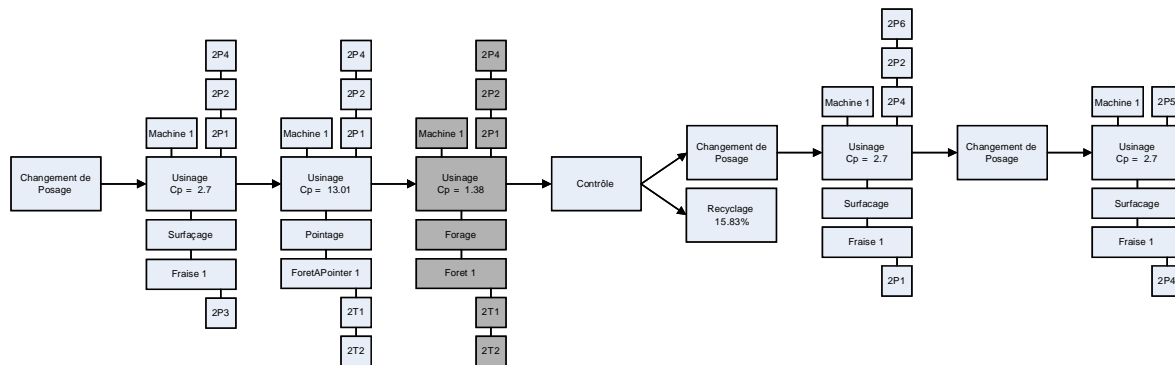


Figure 101 : Résultat de la génération de processus - Exportation Visio

Sur cet exemple, l'opération de forage (grisée sur la figure) est entièrement décrite : l'activité de production (usinage) est ainsi reliée verticalement aux différentes ressources qu'elle consomme et horizontalement aux autres activités du processus. Cette activité de production réalise alors, par opération de forage, les deux trous 2T1 et 2T2 à l'aide de l'outil *Foret 1*, de la *Machine 1* et du posage géométrique réalisé par les entités 2P1, 2P2 et 2P4.

L'ensemble du code documenté, le programme compilé et la base de données complétée de quelques exemples sont disponibles en GPL sur le site communautaire de développement SourceForge [Etienne 2007]. Il est alors possible de l'employer et de le modifier afin de l'adapter à d'autres cas. Attention, cet outil nécessite la présence d'Excel, du Framework .net et de Visio sur la machine, sans quoi il ne fonctionne pas. Le mode d'emploi de cette application est donné en annexe.

2 Formalisation et capitalisation des connaissances

Comme démontré au paragraphe précédent, les différents outils et méthodes réalisant la sélection ou la génération de processus nécessitent une grande quantité de connaissances expertes et d'informations. Dans l'optique de pouvoir capitaliser cette connaissance métier, il est nécessaire, dans un premier temps, de la formaliser.

Cette section décrit tout d'abord les approches actuelles de formalisation et de capitalisation des connaissances pour la génération de processus. Puis elle propose une modélisation des connaissances nécessaires à la sélection de processus d'usinage dans le cadre de notre démarche d'allocation de tolérances sous la forme d'un diagramme de classes UML. Cette section se conclut par la description des interfaces développées afin de faciliter la capitalisation de l'expertise des gammistes.

2.1. Formalisation des connaissances

L'automatisation des procédures de génération de processus par l'emploi de l'informatique sous entend que les informations capitalisées et saisies dans le système informatique doivent être formalisées. Cette formalisation s'applique ainsi aux connaissances expertes ainsi qu'à leur domaine.

Ce paragraphe propose de s'intéresser à la méthode la plus couramment employée pour la formalisation des connaissances expertes nécessaires à la sélection de processus : les règles de production. Le concept d'entités est également détaillé car il permet à la fois une formalisation et la description du domaine dans lequel s'appliquent ces connaissances expertes.

2.1.1 Les règles de production

La solution la plus couramment employée pour la formalisation des connaissances dans le domaine de la génération de processus est la règle de production. Elle est reconnaissable par sa syntaxe de la forme :

Si <ensemble de conditions de validité>

Alors <ensemble des actions à effectuer>

Sinon <ensemble d'action à effectuer>

Plusieurs améliorations de cette approche sont apparues comme par exemple l'utilisation de la pondération permettant de quantifier les préférences de solutions dans le cas où deux règles pourraient être utilisées simultanément, ou l'implémentation d'arbres de décisions qui reste un enchaînement de règles.

Ce type d'expression est très simple d'emploi et la concrétisation tout aussi facile : par l'utilisation d'algorithmes ou de systèmes experts. Cependant subsistent les problèmes de cohérence des règles et l'effet de frontière : il est parfois difficile d'exprimer les valeurs limites d'un paramètre caractéristique (Comment exprimer la notion de « petit », « faible », très employé des experts gammistes.) [Derras 1998].

2.1.2 Le concept d'entités

I - Définition(s)

Le terme "Entité" correspond au terme anglais "Feature". Ce concept apparaît initialement dans les années 80 comme l'objet de rapprochement entre les modèles de description des pièces (métier de concepteur) et les modèles de préparation à la fabrication (métier de gammiste). Pour l'automatisation des gammes d'usinage, le concept d'entité est pertinent dans la mesure où il supporte la complexité du problème qui est intimement lié au modèle produit, aux bases de données technologiques et à la formalisation de l'expertise en fabrication.

Cependant, puisque ce concept d'entité est employé par les intervenants de différents métiers, à différentes étapes du cycle de vie du produit, une même entité géométrique est perçue de façon différente par chacun de ces intervenants. Ainsi, comme l'illustre la *Figure 102*, à un simple trou alésé sont associées trois vues : la vue géométrique qui identifie un cylindre, la vue fabrication qui reconnaît un perçage et la vue conception qui associe à cette entité une fonction de passage de vis.

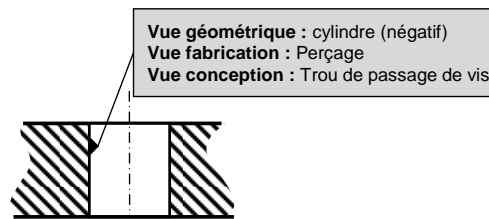


Figure 102 : Différents points de vue d'un alésage [GAMA 1990]

Il est de ce fait, impossible d'avoir une définition unique de ce concept, mais plusieurs définitions locales. Ainsi une entité est vue comme :

- Le volume enlevé par les opérations d'usinage,
- Un atome de modélisation traduisant un objet indécomposable, nécessaire à la définition d'un produit, et qui est caractérisée par un ensemble de paramètres,
- Un groupement sémantique utilisé pour décrire une pièce et son assemblage. Elle groupe de manière pertinente les informations fonctionnelles, de conception, et de fabrication [Giacometti 1990],
- Une forme ou une entité géométrique de haut niveau d'abstraction, utilisée dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités de conception ou de fabrication, au niveau de la géométrie et de la topologie des pièces [Cunningham 1988],
- Un ensemble de surfaces ayant une sémantique pour une utilisation donnée [Mony 1991],
- Un ensemble d'informations se référant à des aspects de forme ou d'autres attributs d'une pièce, de telle manière que cet ensemble puisse être utilisé dans la démarche de raisonnement en conception, en qualité ou en fabrication des pièces ou des assemblages qu'elles constituent [Salomons 1993].

Non seulement le nombre de définitions existantes est élevé, mais qui plus est, même s'il existe un certain consensus quant à la définition de l'Entité, la terminologie n'est pas très claire (ensemble de surfaces, ou ensemble de surfaces avec des attributs et des traitements...).

Appliqué au domaine de la génération de processus d'usinage, le groupe GAMA [GAMA 1990] propose la définition d'une entité d'usinage comme étant : « Une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. Ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités. »

Afin d'illustrer le nombre d'entités définies au fil de la littérature, la Figure 103 propose de synthétiser une partie de la bibliographie, assez conséquente, dans une taxinomie.

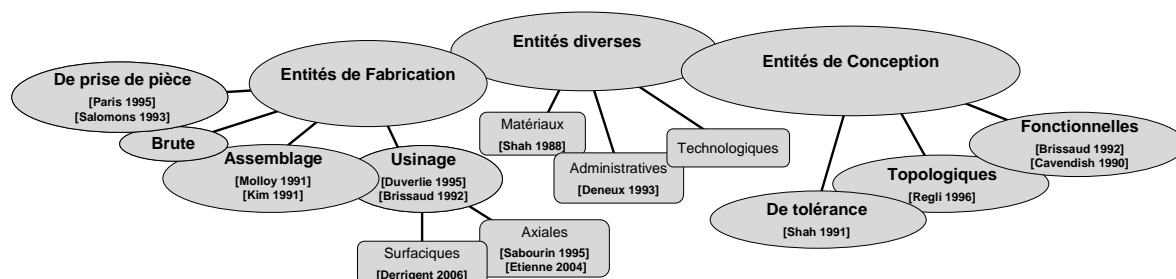


Figure 103 : Taxinomie des entités - Extrait

Parmi l'ensemble de ces définitions et type d'entité, la suite de ce paragraphe propose de focaliser cette étude bibliographique sur les entités d'usinage et plus particulièrement sur les attributs qu'elles supportent, nécessaires à la génération de gammes d'usinage.

II - Les entités d'usinage - Attributs

Une entité d'usinage prise indépendamment est définie comme une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un ou plusieurs processus sont connus. Elle comporte, de ce fait, un ensemble d'informations :

- des informations géométriques, pouvant correspondre à ce qui est manipulé aujourd'hui dans les modèles de solides (B-Rep, CSG),
- des informations technologiques (filetage, rainure, poche, taraudage, état de surface...), qui donnent une information plus complète sur tout ou partie d'une forme géométrique.
- des informations de précision, qui explicitent les tolérances de fabrication par rapport à la forme idéale.
- des informations matérielles, qui donnent le type de matériau et donc ses propriétés.
- des informations liées aux processus d'usinage,
- des informations liées à son obtention,
- des informations liées à sa fonction.

Quatre types de données, d'informations ou de caractéristiques peuvent être distingués :

- **les caractéristiques intrinsèques d'une entité d'usinage** : Une entité d'usinage est définie comme une forme géométrique dont l'ensemble des caractéristiques géométriques et technologiques doivent permettre :
 - de transformer en entités d'usinage les informations de description des pièces conçues par des systèmes de CAO classiques. Cette approche est complexe, dans la mesure où les modèles d'information CAO sont de type purement géométrique, que ce soit des modèles surfaciques, ou volumiques (type CSG ou B-Rep). Or la géométrie d'une entité d'usinage est dépendante d'une expertise « fabrication ». Ainsi, diverses méthodes ont été proposées afin d'effectuer cette reconnaissance et cette extraction d'entités d'usinage dans des outils et des bases de données de CAO [Derigent 2005] [Harik 2007]. L'état de l'art qu'en fait [Lu 1991] est assez exhaustif pour appréhender les travaux du domaine.
 - d'associer à cette forme géométrique un ou plusieurs processus d'usinage. A la forme géométrique doit être associé l'ensemble des informations dont dépend l'élaboration du ou des processus.

Ces caractéristiques intrinsèques d'une entité d'usinage sont liées au modèle produit, aux bases de données technologiques et à la formalisation de l'expertise en fabrication. Un certain nombre de travaux se sont articulés autour de la définition et de la structuration de ces caractéristiques.

La *Figure 104* est un exemple de l'ensemble des modèles hétérogènes disponibles.

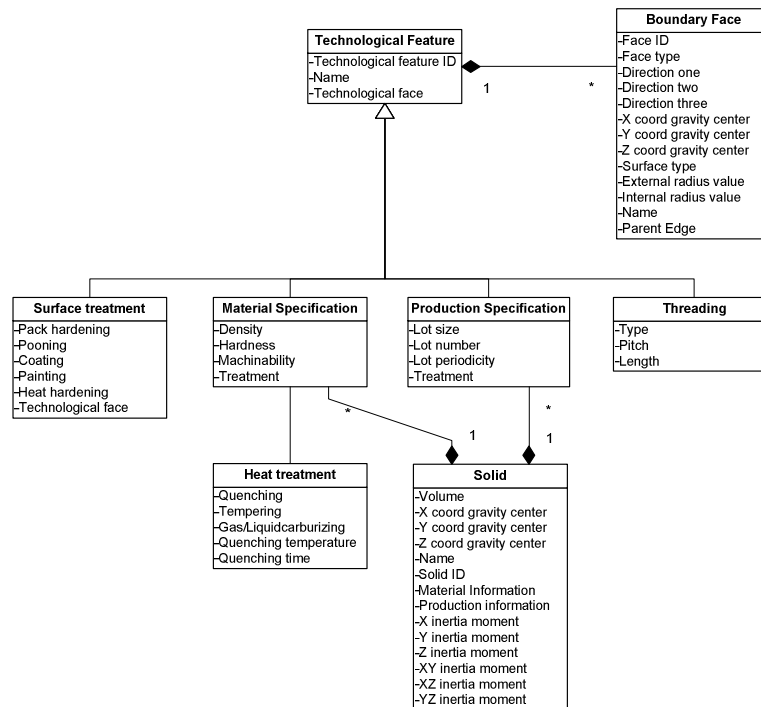


Figure 104 : Structuration des données technologiques [Anwer 2000]

- les caractéristiques de situation d'une entité d'usinage définies par rapport à son environnement pièce :** Durant le processus de raisonnement pour la génération des gammes d'usinage d'une pièce, l'expert gammiste applique différentes règles que l'on peut qualifier de générales, car communément admises par l'ensemble de la profession. Or, les problèmes rencontrés sont tellement différents, et spécialement le contexte dans lequel ils doivent être résolus, que ces règles générales sont plus ou moins importantes. Dans la mesure où les importances des règles dépendent du contexte du problème à résoudre, il est donc important de modéliser ce contexte dont l'appréhension par un expert est fortement liée à son savoir-faire « métier » et à l'entreprise.

La notion de contexte englobe un ensemble d'informations : les interactions topologiques entre entités, le tolérancement, la position et l'orientation par rapport au repère général pièce, l'accessibilité de l'entité, etc. Dans le cas des interactions topologiques, l'analyse de la pièce n'est pas que géométrique, la Figure 105 propose un exemple de modèle des interactions entre entités axiales [Villeneuve 1990] :

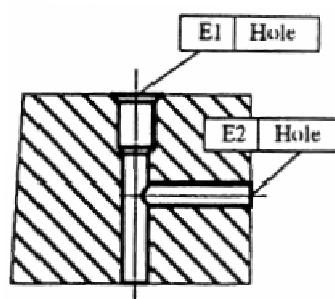


Figure 105: Interaction topologique - exemple [Villeneuve 1990]

La structuration des données relatives aux spécifications géométriques n'intègre généralement que le type et la valeur de la tolérance. [Feng 1998]

propose un modèle global qui permet de décrire la désignation des spécifications au même niveau que le langage graphique actuel. Aucun modèle proposé n'intègre la sémantique des spécifications.

- **les caractéristiques liant une entité d'usinage à son environnement d'obtention** : L'élaboration du processus de fabrication d'une entité dépend largement de son environnement, celui-ci est pris en compte par l'expert gammiste à partir de son expérience et de sa vue globale de la pièce.

L'usinage produit des efforts qui limitent les qualités dimensionnelles des surfaces obtenues et qui dépendent de la rigidité de la pièce (globale, locale ou suivant le posage choisi) et de la position relative de l'entité. Ce ne sont que quelques exemples de caractéristiques de contexte d'obtention qui faut intégrer.

Les contraintes géométriques liées à l'accessibilité de l'entité ou un risque de collision de l'outil ou du porte outil sont également à prendre en compte [Risacher 1997]. Elles dépendent essentiellement de la géométrie de l'outil utilisé (fraise hémisphérique, torique, 2 tailles) et des directions d'outils disponibles.

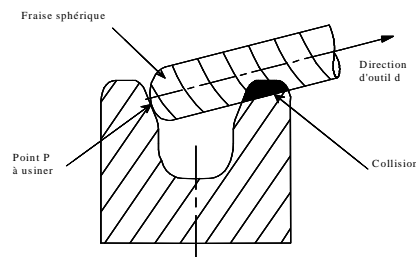


Figure 106 : Accessibilité - Exemple

- **les caractéristiques de son environnement d'obtention : le moyen de fabrication (machines, outils)** : Associé à la prise en compte des contraintes précédentes (efforts, accessibilité ...), les processus possibles pour réaliser une entité d'usinage dépendent essentiellement de l'architecture de la machine (3 à 5 axes) et des différents mouvements qu'elle est capable de réaliser.

[Risacher 1997] définit ainsi la visibilité machine par le concept mathématique de la sphère de Gauss, qui représente sur une sphère unité l'ensemble des directions d'outils possibles. Ainsi suivant la position relative du bâti et des différents degrés de liberté cette sphère illustre les possibilités ou limitations du processus. Cette sphère est appliquée aux 360 types d'architecture de machines identifiés par [Bernard 2002] et [Bohez 2002].

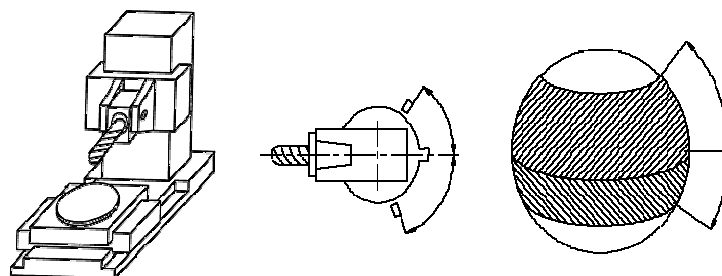


Figure 107 : Sphère de Gauss - Exemple

La réalisation des entités d'usinage est donc contrainte par ces caractéristiques liées aux moyens de fabrication, certaines qualités dimensionnelles ne peuvent être réalisées qu'avec certaines configurations de machines. La précision, la capacité des machines en termes de dimensions, puissances, efforts, vitesses, ou les dimensions d'outils en sont quelques exemples.

2.2. Capitalisation des connaissances

Les besoins en données des approches de génération ou de sélection de gamme et donc de notre approche nécessitent une saisie et un enrichissement des bases de connaissances par l'expert : c'est l'étape de **capitalisation**.

Un grand choix de méthodes de capitalisation est disponible. A l'interview d'expert gammiste par un cognicien s'oppose l'approche, plus technique et donc plus proche des utilisateurs, de A. Lefebvre [Lefebvre 2001] : la connaissance est extraite de plans d'expériences. Cependant la totalité des démarches de capitalisation se heurtent à la même difficulté : les experts ne peuvent pas exprimer ex nihilo des règles de production toutes faites, et quand bien même une connaissance est explicitée, est-elle universelle ? Qui plus est, la crainte et l'aspect contextuel de la réalisation de gammes sont d'autant plus de freins à la capitalisation des connaissances.

Fort de ces difficultés, les paragraphes suivants décrivent deux approches assez semblables de capitalisation de connaissance par l'emploi de cartes de visites.

2.2.1 Carte de visite

Ce concept de capitalisation et de formalisation des connaissances, dans sa définition originelle [Villeneuve 1990] se présente sous la forme d'un tableau (Figure 108) dans lequel l'expert peut expliciter quels sont les domaines de validité d'un processus de fabrication : c'est la solution utilisée qui porte son domaine d'utilisation. Cette approche, facile à mettre en œuvre et assez naturelle à enrichir, reste cependant limitée : l'expert ne peut agir que sur un ensemble de paramètres caractéristiques figés.

Rd		Note : we wrote the Rd medium value in these lists. The authorized variation percentage on both sides is $\pm 10\%$			
Part material : 3F, 4F, 4G		min. ctD - max. ctD			
Cutting tool	Dt	6 - 8		10 - 12	
CAST STELLITE	IT 6	0,05		0,1	
BORING BAR	IT 7	0,05		0,1	
	IT 8	0,1		0,2	
		min. ctD - max. ctD			
Cutting tool	Dt	12 - 20	25 - 32	40 - 50	63 - 80
CARBIDE TIP	IT 6	0,2	0,25	0,3	nothing
BORING-BAR	IT 7	0,2	0,3	0,4	0,45
	IT 8	0,25	0,3	0,4	0,5
	IT 9	0,35	0,4	0,6	0,8

Figure 108 : Carte de Visite [Villeneuve 1990]

Plusieurs extensions de ce concept ont été proposées. Ainsi F. Langlet [Etienne 2003] propose une implémentation du concept de cartes de visite afin de rendre ce dernier plus

flexible (en permettant la modification et la gestion des paramètres de description) et plus interactif (en ayant recours à l'utilisation d'une base de données interfacée avec Access, dont une interface est illustrée *Figure 109*).

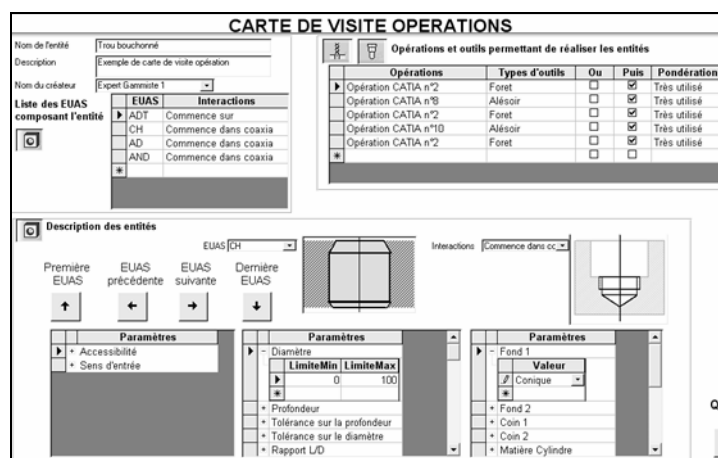


Figure 109 : Interface Carte de Visite [Etienne 2003]

2.2.2 Outil Séquence Entité : OSE

Le concept d'OSE [Ben Younes 1994], une évolution des cartes de visite, se décompose en deux étapes :

- Description du contexte d'usinage à l'aide de trois modèles : les entités (les formes à réaliser), les séquences (qui peut être une succession de processus) et les classes d'outils (regroupement fonctionnel d'outils par famille)
- Association de ces trois concepts afin de retranscrire dans un environnement objet les choix d'un expert gammiste. Ces relations et les domaines de validité des paramètres descriptifs des entités sont retranscrits dans une table d'OSE.

Cette approche permet grâce à cette formalisation des connaissances propres à une entreprise, la sélection des outils pour une entité d'usinage donnée.

2.3. Modélisation support de la sélection du processus dans l'environnement ABTA/Activités

Les paragraphes précédents ont souligné la nécessité de formaliser les connaissances afin de les rendre manipulables par un outil informatique. De ce fait, ce chapitre a pour objectif de présenter notre modélisation de l'environnement des connaissances nécessaires à la sélection de processus dans le cadre de l'optimisation de tolérances.

En préambule de ce chapitre il est important de préciser qu'un modèle n'est qu'une approximation du réel et qu'il n'est en aucun cas exhaustif. Cette remarque est d'autant plus valable pour le modèle proposé ci-après car il est dédié uniquement au cas de l'usinage de pièces prismatiques.

Néanmoins il est à noter que ce modèle est transposable avec quelques modifications à d'autres procédés comme la forge par exemple. En effet, bien que la description du produit par entités ne soit pas transposable à ce domaine [Thibault 2007], les concepts d'activités, de ressources, de connaissance métier ainsi que leur modélisation restent quant à eux

valables. De ce fait, bien que non universel, ce modèle propose par sa flexibilité une solution transposable à d'autres procédés.

Ainsi, la *Figure 110* présente le modèle de classes support de l'ABTA et de l'approche par activités. Les entrées et sorties de l'application sont représentées sur ce modèle. La classe *Spécification* est l'entrée du processus de sélection de processus, c'est elle qui contient les tolérances dont l'utilisateur veut analyser les impacts. Le résultat de cette sélection est contenu dans la classe *Gamme* : c'est elle qui contient l'ensemble des processus capables de réaliser le produit avec les tolérances données en entrée et qui retourne le coût pondéré qualité, fonction objectif de la démarche d'optimisation.

Ce modèle UML illustre les cinq grands domaines qui participent à la conception des gammes de fabrication dans l'environnement ABTA qui ont été définis dans le chapitre II : les activités (classes colorées en gris clair), les ressources (classes colorées en gris foncé), les connaissances métiers (classes colorées en blanc), le produit et sa description (classes colorées de gris foncé et cerclées en pointillé) et la gestion des variations (classes hachurées en gris clair).

Les paragraphes suivant proposent de détailler ces quatre grands composants de notre modélisation.

2.3.1 La vue activités (processus)

Le premier composant (classes colorées en gris clair) modélise les activités, dont le comportement est décrit dans le chapitre II.

La classe principale de ce diagramme est la classe « activité » qui résume à elle seule le concept d'activité. En effet, cette classe a comme attributs l'indicateur de performance et la probabilité d'apparition, qui sont les deux paramètres que nous avons ajoutés à la démarche ABC. Qui plus est, l'habilité à générer une activité (comme par exemple la génération d'une activité de contrôle par une activité de production) est modélisée par l'agrégation réflexive. Il est à noter que la consommation de ressources est également modélisée et supportée par cette classe mère.

Toutes les autres activités héritent alors de cette classe, de ses attributs, relations et capacités. Ces activités sont alors enrichies et particularisées principalement par l'ajout de relations privilégiées avec d'autres classes du modèle. Ainsi les activités de production sont associées à certaines ressources spécifiques (posage d'usinage) et aux entités géométriques qu'elles réalisent. Il en est de même par exemple avec l'activité de retraitement ou recyclage qui sont directement reliées aux pièces incriminées.

Au final, la notion d'ordonnement des activités est réalisé par l'agrégation ordonnée des activités au sein de l'objet « *Gamme* ».

2.3.2 La vue fabrication (dédié usinage)

La vue connaissances métiers, qui contient les classes colorées en blanc, modélise essentiellement comment les ressources peuvent être combinées et employées pour usiner les entités géométriques constituant les pièces. Cette vue est essentielle dans notre modèle car c'est elle qui relie les ressources (du domaine de la fabrication) aux entités

montages d'usinage. Elle permet également de supporter les compatibilités entre ressources : cette classe est donc le support informatique de la capitalisation des connaissances métiers.

2.3.3 La vue ressources

Cette partie concerne les classes (classes colorées en gris foncé) modélisant les ressources consommées par les activités. Parmi l'ensemble des attributs de ces classes deux sont essentiels : le coût horaire et leur dispersion.

Dans ce catalogue de ressources, toutes les classes héritent de la classe « *Ressource* », ce qui confère à ce modèle un maximum de flexibilité. En effet, pour l'enrichir de nouvelles ressources, l'utilisateur n'a qu'à faire hériter ces nouvelles ressources sur cette classe mère.

2.3.4 La vue description du produit

Cette partie du modèle UML, constitué des classes colorées de gris foncé et cerclées en pointillé, représentent le modèle produit. Ce dernier est basé sur le concept d'entité énoncé dans le paragraphe 2.1.2, mais avec un niveau de description moins fin que ce qui est décrit dans la bibliographie de ce chapitre. En effet ces entités ne supportent que des caractéristiques géométriques spécifiées par le concepteur.

De ce fait, la classe principale de ce regroupement est la classe « *Entité géométrique* ». C'est la brique élémentaire qui permet de décrire le produit et ses composants. Les caractéristiques qu'elle supporte sont : des dimensions (comme par exemple une longueur ou un diamètre), le type de surface (cylindre, plan,...) et d'autres paramètres intrinsèques (position, direction).

Les classes « *Entre entités* » et « *Intrinsèque* » modélisent et quantifient les variations des entités géométriques. Sur ces variations sont appliquées les conditions (exigences et spécifications) comme par exemple une perpendicularité ou une rugosité.

2.3.5 Compatibilité et utilisation dans l'environnement KC

Il est important de souligner que ce modèle que nous proposons est entièrement intégrable dans le modèle des caractéristiques clés vu dans le premier chapitre de ce mémoire. Il est en effet capital, pour des raisons de cohérence et de flexibilité, que cette compatibilité soit respectée. Ainsi l'intégration de notre modèle de connaissance dans le modèle purement informationnel des KC est illustré *Figure 111*.

Ce modèle souligne que les principales classes du modèle KC sont évaluées ou intégrées dans le modèle de connaissances. En effet, les caractéristiques process sont évaluées par le biais des méthodes des classes « *Activité* » et « *Ressource* » et les caractéristiques produits sont quant à elles partiellement intégrées par la classe « *Variation* » du modèle d'implémentation de la sélection de processus.

Seules les caractéristiques fonctionnelles ne sont pas intégrées à ce modèle car elles ne sont pas manipulées par l'outil de sélection de processus mais par le module d'analyse des tolérances.

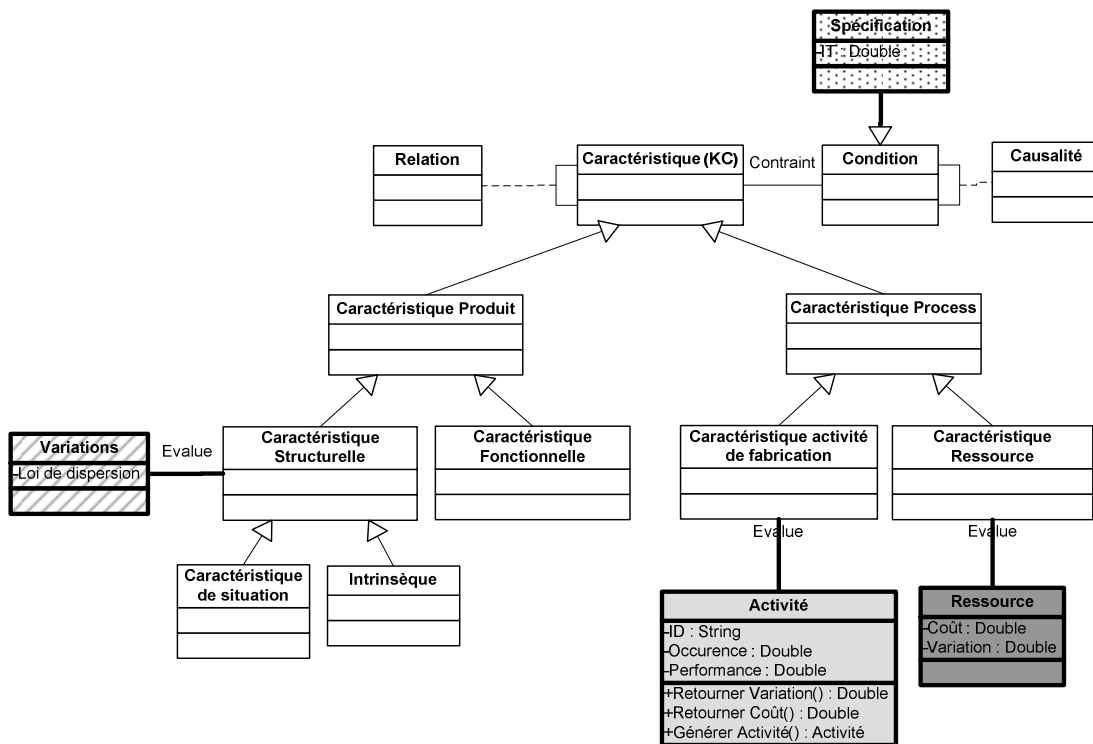


Figure 111 : Implémentation du modèle de connaissances dans le modèle KC

Les conditions sont quant à elles intégrées par la classe « *Spécification* » qui représente essentiellement des tolérances.

2.4. Implémentation des interfaces de capitalisation

L’objectif de cette implémentation est de valider la modélisation proposée ci-dessus ainsi que la méthode de capitalisation des connaissances par le concept de cartes de visite. Elle a également pour but de proposer une interface simple d’emploi permettant une expression rapide des pré-gammes. Un mode d’emploi plus conséquent est disponible en annexe.

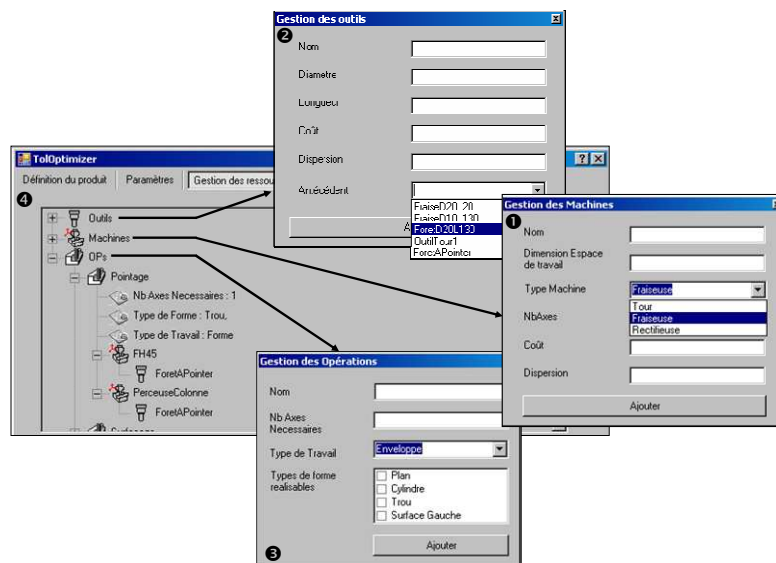


Figure 112 : Interfaces de gestion des cartes de visites - Extrait

La Figure 112 illustre les interfaces développées pour la gestion des ressources et la capitalisation des habitudes et connaissances des experts gammistes. Elles consistent en une implémentation du concept de carte de visite de F. Villeneuve (décrit au paragraphe 2.2.1). Elle s'appuie sur quatre fenêtres principales, qui permettent la saisie des informations nécessaires à la génération automatique de gammes :

❶ **Gestion des machines :** Dans notre maquette logicielle, une machine a comme paramètres essentiels : les dimensions de son espace de travail (qui permettent de déterminer la taille maximale des pièces réalisables), le type de machine à laquelle elle appartient (tour, fraiseuse ou rectification), le nombre d'axes disponibles, ainsi que son coût et les dispersions moyennes d'un axe de travail.

❷ **Gestion des outils :** En plus des données d'identification, un outil est caractérisé par son couple longueur/diamètre utile, son coût et sa dispersion. Qui plus est, la notion d'antécédence est supportée par les outils et non pas par les opérations. En effet, si pour utiliser un outil, un travail préparatoire est nécessaire, c'est dans cette interface que cette contrainte d'ordonnancement doit être saisie. Par exemple, *ForetAPointer* est saisi comme l'antécédent de l'outil *ForetD20* dans notre base outils.

❸ **Gestion des opérations :** Une opération est décrite par : le nombre minimum d'axes machines nécessaires, le type de travail (enveloppe, forme ou combiné) et le type d'entité géométrique qu'elle est capable de réaliser (plan, cylindre, trou, surface gauche).

❹ **Gestion des associations de ressources :** C'est cette fenêtre qui permet, comme le suggère le concept de carte de visite, d'exprimer les combinaisons de ressources disponible dans l'entreprise. Ainsi par de simples glisser-déposer, l'utilisateur peut associer plusieurs couples outils/machines à une opération. Prenons l'exemple de l'opération *Pointage*, qui est illustrée Figure 112. A cette opération sont associés les deux couples : *PerceuseColonne/ForetAPointer* et *FH45/ForetAPointer*.

Ainsi par cette interface, l'utilisateur peut facilement saisir l'ensemble de son parc machine, les outils dont il dispose et les opérations d'usinage qu'il maîtrise. Certes cette implémentation est une version allégée du concept de cartes de visite car elle ne permet pas d'effectuer une association précise entre les opérations d'usinage et les entités géométriques. De ce fait, il nous est impossible dans cette implémentation de générer les états antérieurs des entités géométriques.

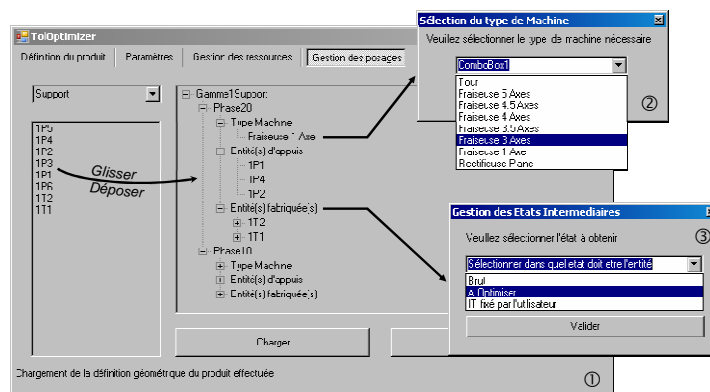


Figure 113 : Interface d'expression des pré-gammes

La maquette informatique réalisée lors de ces travaux de thèse propose également un scénario d'expression des pré-gammes par les experts gammistes. Une impression d'écran est donnée *Figure 113*.

Comme le montre cette figure (et plus particulièrement le formulaire ①), une pré-gamme est composée de plusieurs phases qui sont elles aussi constituées : du type de machine jugé nécessaire par l'expert gammiste (via le formulaire ②), des entités géométriques participant à la mise en position de la pièce et des entités géométriques réalisées dans cette phase, ainsi que leurs intervalles de tolérance spécifiés.

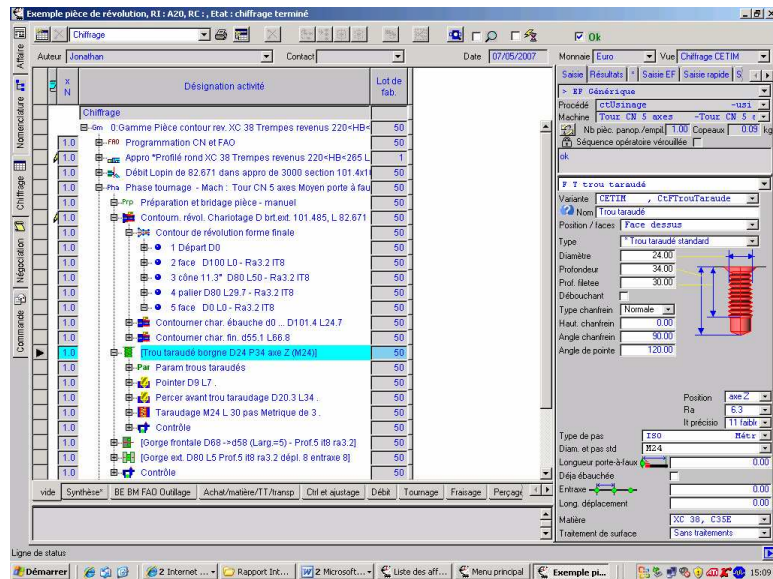


Figure 114 : Interface de CETIM DEVIS- Exemple

Il est à noter que ces intervalles de tolérance peuvent appartenir à trois classes dans notre application : *brut*, *quantifié* et *optimisé*. Dans le premier cas, l'entité est réalisée avec un intervalle de tolérance large (et spécifié par l'utilisateur en tant que paramètre) qui définit usuellement un travail d'ébauche ou la réalisation d'une entité non fonctionnelle. Dans le cas *optimisé*, c'est la solution d'optimisation retenue (dans notre cas l'algorithme génétique) qui quantifie cette spécification : elle est dans ce cas un gène à optimiser. Dans le dernier cas, c'est l'expert qui détermine la spécification.

La quantité d'informations nécessaire à saisir peut sembler importante et assez fastidieuse d'emploi, mais il peut être intéressant de mettre en parallèle les interfaces de notre application avec une application professionnelle (*Figure 114*). Cette dernière illustre parfaitement la complexité de certaines interfaces dûe principalement à la quantité d'information nécessaire à un traitement intelligent et adapté à l'entreprise utilisatrice (dans ce cas estimation du coût).

Ainsi par de simples glisser/déposer, l'utilisateur peut aisément décrire le squelette de gamme réalisant chacune des pièces composant le produit à analyser

3 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, il est intéressant d'en rappeler les points clés. Tout d'abord l'objectif de ce dernier est de proposer une démarche ou une implémentation permettant la sélection des gammes de fabrication en explorant l'espace de solutions défini par l'allocation des tolérances, la description du produit ainsi que les habitudes, connaissances et ressources propres à l'entreprise utilisatrice.

Les différents développements effectués sur CLIPS ou CE, ont permis de valider l'emploi des approches par systèmes experts et par propagation de contraintes pour la sélection de processus (détaillé ou conceptuel). Néanmoins pour des raisons de facilité d'intégration à la démarche d'optimisation par algorithme génétique, à ces solutions a été préféré un outil totalement algorithmique, plus simple d'emploi et de modification. L'ensemble de cette application a été détaillée, en précisant chacune de ses étapes. Il est également intéressant de souligner que cette solution a été implémentée et validée sur un cas industriel : le guide de bras de robot.

En plus de proposer une analyse des approches de sélection de processus, une grande partie de ce chapitre est consacrée à la formalisation et la capitalisation des connaissances, nécessaires à bon fonctionnement des outils de génération de gammes. Ainsi aux approches par entités et par cartes visites, nous avons proposé notre modèle de connaissances, support de notre démarche. Il a été précisé, l'intégration de ce modèle avec l'approche par caractéristiques, afin d'en souligner la flexibilité et sa modularité.

Le résultat de ce chapitre, et plus particulièrement de l'application, est alors un ensemble de gammes contenant plusieurs activités ordonnées, où sont connues à la fois les ressources consommées et les entités géométriques réalisées.

Néanmoins il reste une étape importante à effectuer pour que la démarche ABTA soit complète : l'analyse des variations engendrées par ces activités et la vérification qu'elles restent compatibles avec les exigences ou conditions définies par les concepteurs. C'est l'objectif du chapitre suivant dédié à l'analyse de tolérances dans le cadre de l'ABTA.

Chapitre IV

Analyse des tolérances par l'approche ABTA

Ce chapitre traite de l'analyse des tolérances et de la modélisation du comportement géométrique avec défauts du produit et de ses composants, dans le cadre de notre approche. Il propose une étude et une synthèse des approches proposées dans la littérature pour effectuer cette modélisation, en mettant l'accent sur les solutions de paramétrage disponibles ainsi que sur les méthodes permettant de trouver les relations entre les jeux, les écarts et les conditions fonctionnelles et d'assemblage. Il propose également d'effectuer un parallèle avec la structuration des caractéristiques, en étudiant les différentes approches permettant une analyse des variations et de leurs relations au niveau Processus / Pièce puis au niveau Pièce / Produit. Les choix effectués pour l'implémentation des outils d'analyse des tolérances et du comportement géométrique au sein de l'ABTA sont précisés et illustrés d'exemples à chacune de ces étapes, en prenant soin de montrer sa modularité et sa compatibilité avec d'autres solutions.

Table des matières :

1 Modélisation du comportement géométrique avec défauts et techniques d'analyse des tolérances	148
1.1. Paramétrage	149
1.1.1 Paramétrage 1D	149
1.1.2 Paramétrage 3D	150
1.1.3 Les espaces de description.....	152
1.2. Modélisation du comportement géométrique	152
1.2.1 Composition des déplacements	153
1.2.2 Comportement des interfaces	155
1.2.3 Représentation mathématique des spécifications géométriques.....	156
1.2.4 Représentation mathématique des incertitudes de fabrication	156
1.2.5 Modélisation par les graphes de phases d'usinage	157
1.3. Techniques d'analyse des tolérances.....	158
1.3.1 Analyse à partir d'une fonction explicite	159
1.3.2 Analyse à partir d'une fonction implicite	160
2 Analyse des tolérances dans le cadre de l'ABTA.....	161
2.1. Evaluation des écarts par Monte Carlo.....	162
2.2. Etape 1 : Analyse au niveau Processus / Pièce.....	163
2.2.1 Support de cette analyse – L'approche par Δl	164
2.2.2 Identification et caractérisations des écarts intrinsèques.....	165
2.2.3 Identification et caractérisation des écarts entre entités	167
2.2.4 Compatibilité avec l'approche par analyse des phases d'usinage [Tichadou 2005].....	169
2.2.5 Bilan de l'analyse au niveau Processus / Pièce	169
2.3. Etape 2 : Analyse au niveau Pièce / Produit.....	170
2.3.1 Support cette analyse – Formalisation explicite du comportement.....	171
2.3.2 Compatibilité de l'ABTA avec une modélisation implicite.....	173
2.3.3 Bilan de l'analyse au niveau Pièce / Produit	175
3 Conclusion	175

Figure 115 : Activité d'analyse des tolérances	147
Figure 116 : Etape 2 de l'ABTA : Analyse	148
Figure 117 : Les différents types de géométrie rencontrés	149
Figure 118 : Représentation des éléments sur la droite de projection (extrait de [Bourdet 2007])	150
Figure 119 : Ecart - Exemple	151
Figure 120 : Torseur Ecart - Cas du plan	151
Figure 121 : Les trois aspects de modélisation du comportement géométrique.....	153
Figure 122 : Exemple de deux cycles (extrait de [Ballu 1999]) : un fonctionnel et le second de montabilité (hachuré)	153
Figure 123 : Domaine jeu - Exemple de la liaison plane (extrait de [Giordano 2007])...	155
Figure 124 : Domaine Ecart - Exemple d'une localisation d'un plan	156
Figure 125 : Graphe de simulation - Exemple extrait de [Bourdet 2007]	157
Figure 126 : Types de torseurs dans une phase d'usinage	158
Figure 127 : Fermeture de torseurs - Exemple	158
Figure 128 : Les différentes approches de modélisation du comportement géométrique avec défauts	159
Figure 129 : L'analyse des tolérances dans l'ABTA - Principe	161
Figure 130 : Simulation de Monte Carlo - Principe	162
Figure 131 : Nombre de tirages en fonction de l'évolution de l'algorithme génétique.....	163
Figure 132 : Graphe de simulation (extrait de [Bourdet 2007])	165
Figure 133 : Extrait de la gamme de fabrication - Formalisme ABTA	165
Figure 134 : Une activité dans le formalisme ABTA	166
Figure 135 : Analyse des tolérances – Parallèle entre Δl et activités sur un exemple	168
Figure 136 : Comparatif entre : (a) l'affichage d'une gamme dans l'ABTA et (b) la modélisation d'une phase d'usinage dans le formalisme proposé par S. Tichadou	169
Figure 137 : Synthèse de l'analyse au niveau Processus / Pièce	170
Figure 138 : Ecart intrinsèques et de position - Identification	171
Figure 139 : Simulation de Monte Carlo au niveau Pièce / Produit - Algorithme	173
Figure 140 : Algorithme réalisé par [Qureshi 2007]	174
Figure 141 : Synthèse de l'analyse au niveau Pièce / Produit	175
Équation 12 : Torseur de petits déplacements – Notation	150
Équation 13 : Torseurs de liaison d'une liaison pivot glissant	152
Équation 14 : Relation de Chasles	153
Équation 15 : Ecriture formelle de la composition des Δl - Exemple	157
Équation 16 : Mise en équation du torseur écart entre les entités 2T1/2P3.....	158
Équation 17 : Exigence d'assemblage dans le cas de l'approche par domaines	160
Équation 18 : Exigence fonctionnelle de position dans le cas de l'approche par domaines	161
Équation 19 : Relation Dispersions / Ecart.....	164
Équation 20 : Expression de la performance d'une activité de production	166
Équation 21 : Dispersions d'une activité de production.....	166
Équation 22 : Expression de la performance d'une activité de fabrication.....	166
Équation 23 : Caractérisation des écarts intrinsèques	167
Équation 24 : Cas des écarts entre entités	167
Équation 25 : Expression de l'écart en fonction des dispersions des activités	168
Équation 26 : Contraintes d'assemblage - Partie 1	172
Équation 27 : Contraintes d'assemblage - Partie 2	172
Équation 28 : Contrainte fonctionnelle - 4 configurations extrême = 4 inéquations	172

Le chapitre précédent se conclut par le bilan des méthodes et outils, disponibles et compatibles avec notre approche par activités, pour la sélection des processus de fabrication, en soulignant le besoin d'une analyse des tolérances détaillée afin de quantifier la performance des gammes de fabrication générées. Cette analyse de tolérances est nécessaire à plusieurs niveaux de l'approche : lors de la sélection des ressources, de l'analyse du respect des exigences géométriques intrinsèques ou entre entités, de l'analyse du caractère assemblable des mécanismes produits et lors de l'analyse du respect des conditions fonctionnelles définies par les concepteurs.

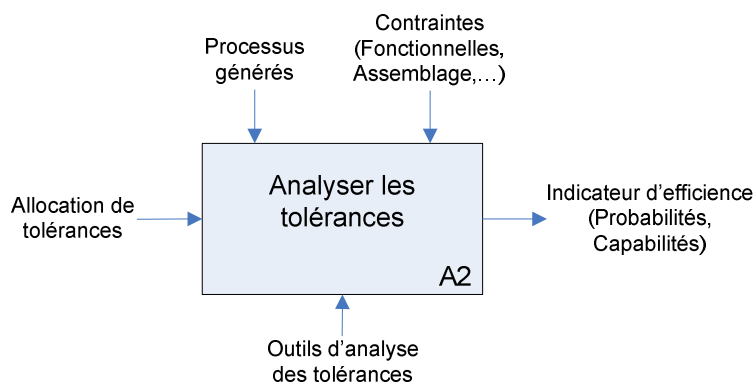


Figure 115 : Activité d'analyse des tolérances

La *Figure 115* résume l'objectif de l'analyse des tolérances et, de ce fait, l'objectif de ce chapitre : Comment quantifier les écarts du produit et de ses composants à partir des dispersions du processus, afin de vérifier que ce qui est fabriqué respecte les conditions (tolérances et exigences) définies par les concepteurs ? Ce chapitre se focalise donc sur l'étude des méthodes et outils disponibles pour l'analyse des tolérances, en soulignant la compatibilité de l'approche par activités avec ces méthodes. L'ensemble des choix opérés a été validé par la réalisation de plusieurs maquettes logicielles.

Ce chapitre propose de distinguer cette analyse en deux grandes parties, qui suivent la hiérarchie définie dans le *KC Flowdown* : l'analyse des tolérances au niveau Process / Pièces et l'analyse des tolérances au niveau Pièce / Produit. La *Figure 116*, donnée dans le chapitre II (en tant que support de la seconde étape de l'ABTA) illustre parfaitement ces deux niveaux d'analyse.

En effet, le premier niveau s'intéresse à l'analyse des tolérances liées aux pièces dont le respect est essentiellement dû aux variations des ressources employées pour la réalisation des entités géométriques. Les tolérances analysées portent sur des variations propres à une pièce et vérifient alors des spécifications dimensionnelles, d'orientation ou de position. Cette analyse s'opère alors par les activités notées ①②③ sur cette figure.

Le second niveau correspond à l'analyse des tolérances et des spécifications liées aux problèmes d'assemblage. Dans ce cas, ce ne sont plus des variations propres à une pièce qui sont analysées pour vérifier qu'elles respectent les bornes définies par les concepteurs, mais des variations entre les entités géométriques de plusieurs composants. Ce sont par exemple des conditions fonctionnelles ou d'assemblage qui sont alors vérifiées à ce niveau. L'activité notée ⑤ dans le *KC* et *Condition Flowdown* réalise cette analyse.

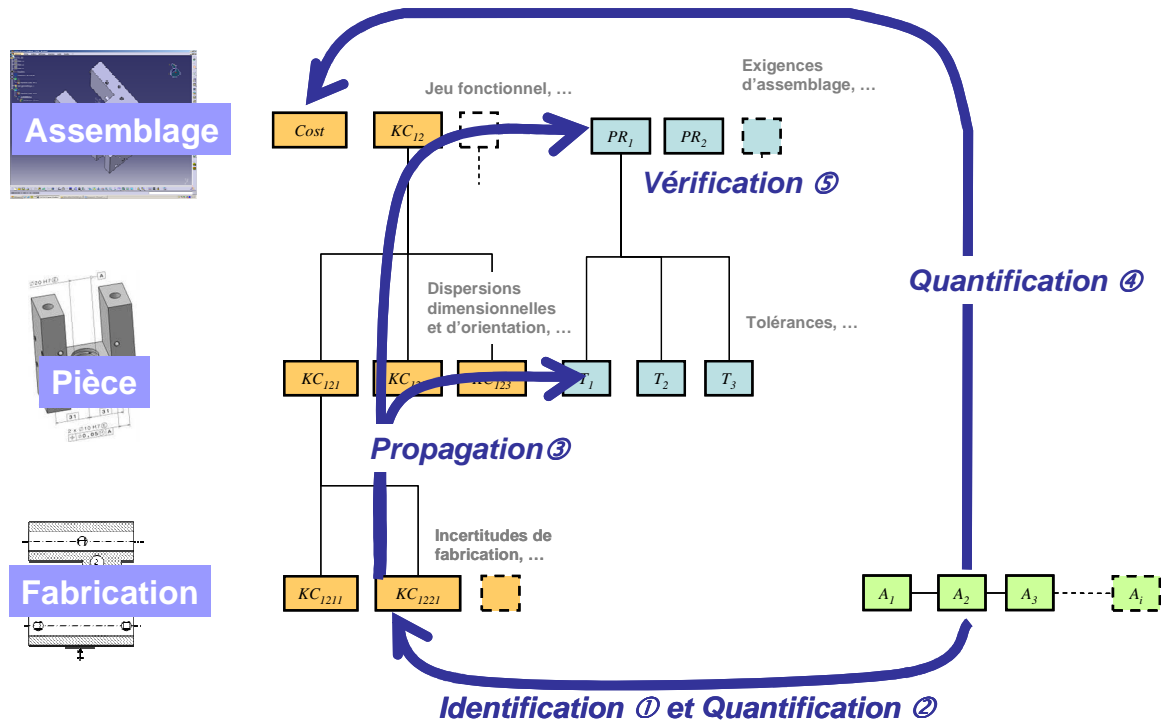


Figure 116 : Etape 2 de l'ABTA : Analyse

Pour répondre à cet objectif, ce chapitre se décompose en trois grandes parties. La première propose une analyse bibliographique des solutions et approches de modélisation du comportement géométrique avec défauts du produit, en décrivant à la fois : les méthodes de paramétrage existantes pour décrire les systèmes étudiés et les méthodes de modélisation du comportement géométrique.

Les deux autres parties de ce chapitre se focalisent sur les méthodes disponibles pour effectuer les deux niveaux d'analyse décrits précédemment : l'analyse Processus / Pièce et l'analyse Pièce / Produit. Pour chacun de ces niveaux, sont explicitées les solutions qui ont été retenues, implémentées puis validées par notre maquette logicielle.

1 Modélisation du comportement géométrique avec défauts et techniques d'analyse des tolérances

Tout comme dans tous types d'analyses, il est nécessaire de modéliser le problème afin de pouvoir mieux l'identifier, le structurer, puis le résoudre. Le modèle constitue de plus un support de dialogue et de partage de connaissances. Ce chapitre propose une analyse détaillée des approches actuelles permettant cette modélisation, en précisant en préambule quels sont les paramétrages disponibles.

Avant de décrire comment s'opère ce paramétrage, il est intéressant de préciser ce qui est paramétré. En effet, comme le souligne la Figure 117, trois grands types de géométrie peuvent être distingués :

- La géométrie nominale, considérée comme parfaite, est définie par le concepteur,
- La géométrie réelle, qui est le résultat de la fabrication, n'est que partiellement connue car son analyse est limitée par les outils de métrologie,
- La géométrie de substitution approche mathématiquement la géométrie réelle par des éléments idéaux afin de la rendre appréhendable. Cette substitution permet

d'assurer un compromis entre le niveau de détail, la difficulté de calcul et la validité des résultats [Ballot 1995] [Roy 1999]. C'est ce dernier type de géométrie qui est paramétré.

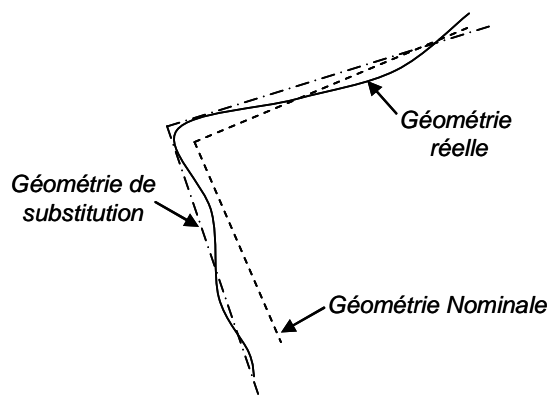


Figure 117 : Les différents types de géométrie rencontrés

Le fait que la géométrie réelle ne se confonde pas avec la géométrie nominale est la traduction de la présence de différents défauts dans les pièces ainsi que de défauts de positionnement entre les pièces. Ils sont principalement dûs :

- ❶ Aux déformations sous charge,
- ❷ Aux écarts sur les surfaces lors de la fabrication,
- ❸ Aux déplacements des pièces entre elles selon les jeux.

Les paragraphes suivants, à l'image de ces travaux de thèse, se focalisent sur les méthodes d'analyse des écarts sur les surfaces ❷ et des déplacements des pièces ❸.

1.1. Paramétrage

La première étape de l'analyse des écarts, définis précédemment, consiste à les identifier puis à les paramétrer, afin d'établir les relations modélisant le comportement géométrique.

Cette étape de paramétrage, usuellement en trois dimensions, peut toutefois se ramener dans certains cas (essentiellement dûs aux symétries des pièces analysées) à une analyse uni ou bidimensionnelle, ce qui en facilite l'analyse. Deux cas sont évoqués dans les paragraphes suivants : le paramétrage 1D et le paramétrage 3D.

1.1.1 Paramétrage 1D

Dans le cas du paramétrage 1D, le mécanisme est observé suivant les directions principales de sa géométrie qui correspondent, en général, aux différentes vues et coupes du dessin de définition.

A une pièce est associé (suivant les besoins) un ensemble de directions. Chaque direction est ensuite traitée indépendamment. Une direction est une droite de projection sur laquelle chaque surface, ligne ou point est représenté par un point. Le point est représentatif de la géométrie réelle de la pièce, sa construction est obtenue par des hypothèses propres à chaque cas de figure.

La Figure 118 illustre cette projection sur deux directions : six points projetés sont alors obtenus.

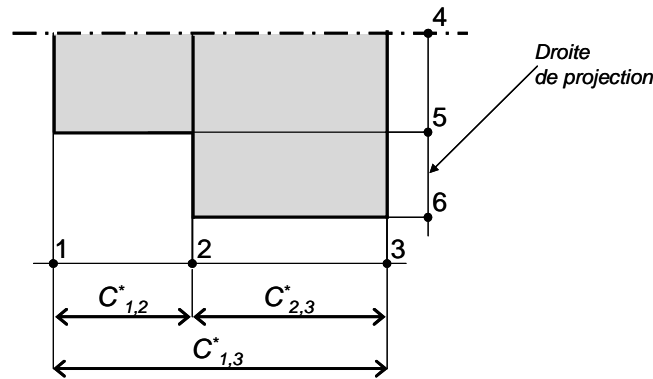


Figure 118 : Représentation des éléments sur la droite de projection
(extrait de [Bourdet 2007])

Dans cette description de la pièce sont décrites les dimensions mesurées (notées $d_{i,j}^k$) de l'ensemble des distances entre les bipoints i,j appartenant à la pièce mesurée k .

Afin de représenter le réel et le confronter au nominal, l'ensemble des dimensions mesurées et ordonnées sont synthétisées dans une cote mesurée notée $C_{i,j}^*$ ($d_{i,j}^1, d_{i,j}^2, \dots, d_{i,j}^n$). Il est à noter qu'usuellement, se sont des images de ces cotes mesurées qui sont employées afin d'en faciliter la manipulation (elles peuvent être par exemple des moyennes ou des extrema).

L'écart mesuré, calculé entre la dimension mesurée et sa cote mesurée associée, est donc la représentation des défauts notés ② et ③ au paragraphe 1. Il est important de préciser que ces cotes mesurées s'appliquent également aux jeux et ne se limitent pas aux cotes de pièces.

1.1.2 Paramétrage 3D

Puisque les défauts modélisés sont considérés comme petits, faces aux déplacements permis par les liaisons cinématiques et aux dimensions du mécanisme, le paramétrage 3D des défauts des produits est essentiellement basé sur la linéarisation de ces déplacements. Cette linéarisation est usuellement exprimée sous la forme de torseurs de petits déplacements, contenant les déplacements à la fois en translation \vec{t}_A et en rotations \vec{r} [Bourdet 1976]. D'autres outils mathématiques de modélisation sont utilisés afin de représenter ces déplacements (vecteurs, matrices, matrices de transformation homogène, ...).

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} \vec{r} \\ \vec{t}_A \end{Bmatrix}$$

Équation 12 : Torseur de petits déplacements – Notation

La littérature distingue deux grands types de torseurs de petits déplacements :

- Les **torseurs écarts** qui modélisent les écarts sur les surfaces lors de la fabrication (notée ② au paragraphe 1).

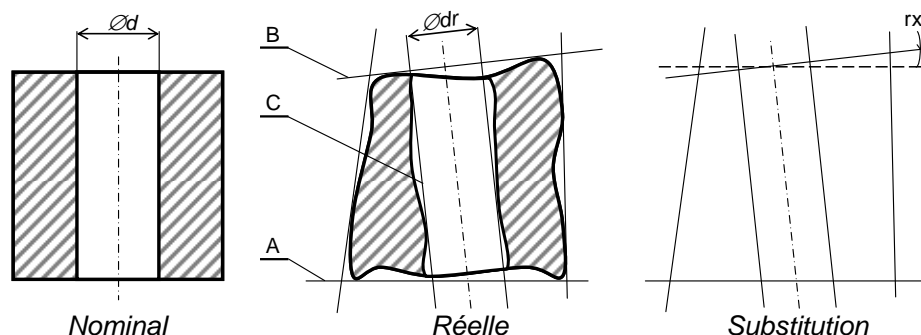


Figure 119 : Ecart - Exemple

Ces torseurs sont associés à chaque surface de substitution et représente alors les petits déplacements permettant de passer du repère lié à la surface de substitution à celui lié à la surface nominale.

La Figure 119 illustre ces écarts qui peuvent être : dimensionnels ($e_C=d-dr$), de position et d'orientation (rx_b). Cette solution permet donc de paramétrer en 3D les écarts des surfaces, en obtenant un ensemble de petites translations ou petites rotations.

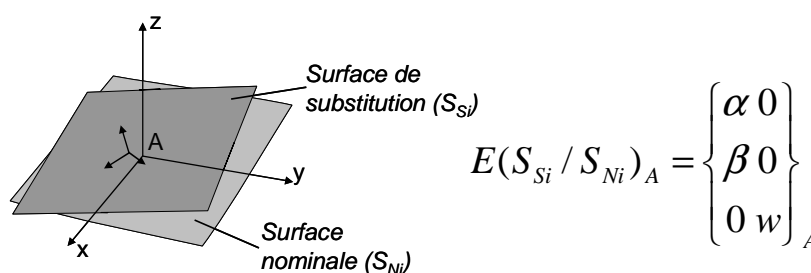


Figure 120 : Torseur Ecart - Cas du plan

Les classes de surfaces (plan, sphère, cylindre, par exemple) ont des degrés d'invariance dont les paramètres dans les torseurs écarts sont, par convention, réduits à 0 [Gaunet 1993] [Clément 1995].

Dans le cas d'un plan, le torseur des écarts est donné Figure 120. Ce torseur dispose de trois degrés d'invariance, et modélise l'écart de position et d'orientation du plan réel par rapport au nominal par trois paramètres (α, β, w).

Il est à noter que M. Giordano (rappelé dans [Giordano 2007]) propose de se dédouaner des surfaces nominales en proposant de modéliser les torseurs écarts directement entre les surfaces de substitution.

- Les **torseurs jeux** qui représentent mathématiquement les déplacements des pièces entre elles selon les jeux (notée \mathfrak{E} au paragraphe 1). De la même manière que les écarts sont transcrits dans des torseurs, les jeux et déplacements autorisés par les jeux dans les liaisons sont également modélisés par des torseurs.

Ainsi les liaisons entre pièces sont composées de deux types de déplacements : ceux désirés du torseur cinématique et ceux qui proviennent des jeux dans la liaison et permettant des déplacements non désirés. Le torseur jeux modélise ce dernier type de déplacements.

L'ensemble des torseurs des liaisons cinématiques et des torseurs de jeux sont synthétisés dans la classification SATT [Fouet 1979]. La forme du torseur jeu dans le cas d'une liaison pivot glissant d'axe x entre une pièce i et j est donnée par l'Équation 13. Les déplacements autorisés par la liaison cinématique sont notés $Ind\alpha$ et $Indu$. Les petits déplacements dus aux jeux dans cette liaison, notés $J\beta, J\gamma, Jv$ et Jw , sont deux rotations et deux translations.

$$J(SR_i / SR_j)_A = \begin{Bmatrix} Ind\alpha & Indu \\ J\beta & Jv \\ J\gamma & Jw \end{Bmatrix}_A$$

Équation 13 : Torseurs de liaison d'une liaison pivot glissant

L'emploi de ces torseurs de petits déplacements permet de modéliser le mécanisme en trois dimensions en paramétrant l'ensemble des déplacements dus aux jeux dans les liaisons cinématiques ou aux écarts des pièces fabriquées.

1.1.3 Les espaces de description

Dans le cas de l'approche par domaines, la caractérisation des défauts (écarts et jeux) repose sur une description des déplacements par des torseurs de petits déplacements ou des variations dimensionnelles. Le comportement géométrique est modélisé dans des espaces affines où chaque axe correspond à un paramètre. [Dantan 2000] distingue donc quatre espaces, dans lesquels sont définis des vecteurs, supports des différents paramètres décrivant le produit :

- l'espace des **écarts de situation** décrit les déviations angulaires et linéaires des éléments de la géométrie de substitution, par rapport à la géométrie nominale. Le vecteur s , exprimé dans l'espace « Situation », est défini par tous les paramètres des écarts de situation : un composant de s est donc un écart de situation.
- l'espace des **écarts intrinsèques** caractérise les variations de forme des éléments géométriques. Ils représentent les variations des paramètres intrinsèques des éléments de substitution, comme la variation du diamètre d'un cylindre, par exemple. Le vecteur i , exprimé dans l'espace « Intrinsèque », est défini par l'ensemble des écarts intrinsèques.
- l'espace des **jeux** décrit les déplacements relatifs entre les éléments de situation des surfaces de substitution qui sont nominalelement en contact. Le vecteur j , exprimé dans l'espace « Jeu », est défini par l'ensemble des jeux.
- l'espace des **jeux fonctionnels** caractérise les déplacements relatifs entre les éléments de situation des surfaces de substitution fonctionnellement en relation. Le vecteur jf , exprimé dans l'espace « Jeu Fonctionnel », est défini par l'ensemble des jeux fonctionnels.

1.2. Modélisation du comportement géométrique

L'objectif de la modélisation du comportement géométrique est de relier les différents paramètres qui ont été identifiés dans l'étape précédente, afin d'en quantifier l'impact sur les conditions fonctionnelles ou de montage. Il est ainsi possible de définir les écarts géométriques à spécifier de manière théorique.

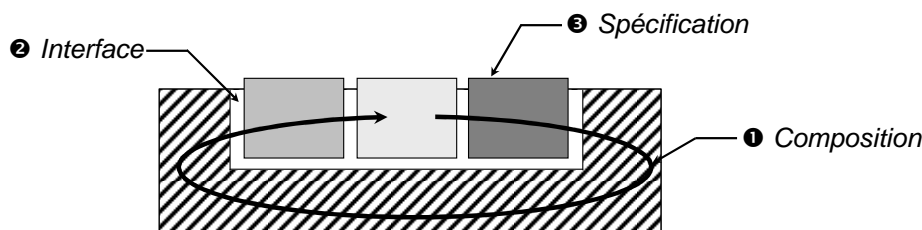


Figure 121 : Les trois aspects de modélisation du comportement géométrique

Comme le présente la Figure 121, il existe trois grands aspects **complémentaires** permettant de modéliser le comportement géométrique avec défauts du produit : la composition des déplacements (notée ❶), l'analyse des interfaces entre pièces (notée ❷) et la modélisation des spécifications géométriques appliquées à chaque pièce (notée ❸). Le paragraphe suivant propose de détailler plus précisément chacune de ces approches.

1.2.1 Composition des déplacements

Le premier modèle, permettant de modéliser le comportement géométrique, est basé sur la composition des déplacements. Elle repose mathématiquement sur la relation vectorielle de Chasles, selon laquelle :

$$\vec{AB} = \vec{AC} + \vec{CB}$$

Équation 14 : Relation de Chasles

- Dans le cas de l'analyse unidimensionnelle, cela se concrétise par la définition de plusieurs chaînes de cotes reliant les cotes entre elles (suivant les différentes directions retenues). Il est alors possible d'écrire les relations qui relient chacune des cotes.

Dans le cas illustré Figure 118, cette relation s'écrit : $C_{2,3}^* = C_{2,1}^* + C_{1,3}^*$

- Dans le cas de l'analyse en 3D, cette composition de déplacements permet de déterminer les relations mathématiques entre les écarts et les jeux, paramétrés dans les torseurs jeux et écarts précédemment détaillés.

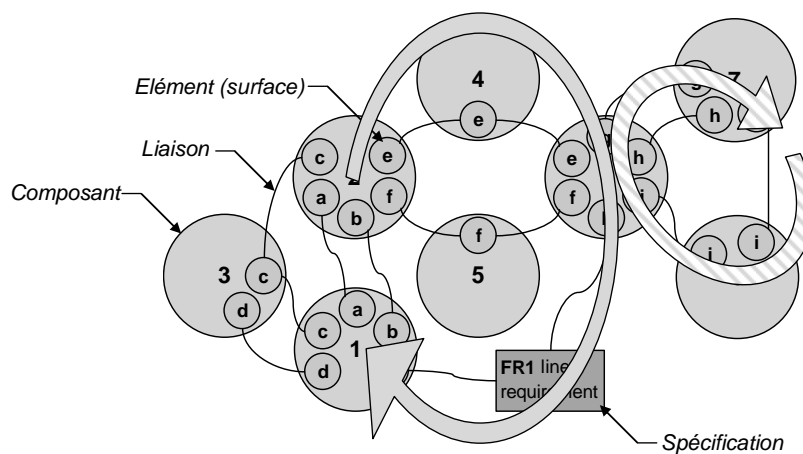


Figure 122 : Exemple de deux cycles (extrait de [Ballu 1999]) : un fonctionnel et le second de montabilité (hachuré)

Pour cela, l'ensemble du mécanisme est décrit en employant la technique d'analyse des graphes expliquée dans le premier chapitre de ce mémoire (paragraphe 3.2.1). Un exemple de ces graphes est rappelé *Figure 122*.

A partir de ce graphe, et plus particulièrement des cycles entre pièces, sont tirées les relations mathématiques reliant jeux et écarts. On peut distinguer deux grands types de cycles :

- Les **cycles de montage**, qui sont les cycles du graphe des liaisons élémentaires passant par différentes pièces sans passer par une condition. L'écriture de la loi de composition sur ces cycles permet la détermination des écarts influençant le montage du mécanisme.

Dans le cas illustré *Figure 122*, le cycle de montage (flèche hachurée) permet d'établir la relation suivante :

$$\{d_{7/7}\} = \{d_{7/6}\} + \{d_{6/8}\} + \{d_{8/7}\} = \begin{Bmatrix} \vec{0} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}$$

Puisque les déplacements sont à la fois des écarts (E) et des jeux dans les liaisons cinématiques désirés (C) ou non (J), le cycle de montage s'écrit :

$$J_{78} + C_{78} + E_8 + J_{86} + C_{86} + E_6 + J_{67} + C_{67} + E_7 = 0$$

D'autres lois de composition doivent être écrites de cette même manière pour un nombre minimal de cycles indépendants, ce nombre de cycles dépend du nombre de pièces dans le mécanisme et du nombre de liaisons cinématiques.

- Les **cycles fonctionnels**, qui sont les cycles du graphe des liaisons élémentaires passant par un sommet condition. L'écriture de la loi de composition sur les cycles fonctionnels associés à une condition particulière permet la détermination des écarts influençant cette condition.

Dans l'exemple donné *Figure 122*, il existe une condition fonctionnelle (notée *FRI*) s'appliquant aux pièces 1 et 6. La flèche grisée sur cette figure propose un cycle fonctionnel participant à cette condition.

A l'instar des cycles de montage, un nombre (dépendant du nombre de pièces participant à cette condition) de cycles indépendants doivent être analysés pour chaque condition afin d'établir de nouvelles relations entre les jeux et les écarts.

Le résultat de l'analyse de ces cycles est un ensemble de relations implicites reliant les écarts, les jeux et caractéristiques fonctionnelles, qui prennent usuellement la forme d'un système d'équations linéaires. Les méthodes de résolution de ces systèmes d'équations ne sont pas abordées dans ce mémoire.

Dans le cas de l'approche par domaine, cette composition de déplacements se concrétise par la formation du domaine de composition (noté $D_{composition}$). En effet, selon [Ballot 1995] et [Bourdet 1995], l'ensemble des équations de composition, obtenues par l'application de la composition des déplacements dans les différents cycles du mécanisme,

forme un système linéaire. Ces équations définissent des hyperplans dans l'espace « Situation » x « Jeu » x « Jeu fonctionnel » qui forment le domaine de composition $D_{composition}$.

1.2.2 Comportement des interfaces

Contrairement à la composition des déplacements qui, à partir des défauts géométriques des composants du produit, arrive à modéliser le comportement géométrique global, l'analyse du comportement des interfaces propose de modéliser le comportement souhaité (et spécifié) du produit, afin de vérifier que la latitude offerte par les tolérances n'engendre pas des incompatibilités avec les exigences du produit.

Ce comportement aux interfaces se décline en plusieurs contraintes, qui permettent de déterminer les relations entre les différents paramètres descriptifs du produit :

- les contraintes de **non-interpénétration** entre les différents composants se traduisent par l'expression d'inégalités entre les déplacements des surfaces de substitution en contact.
- les contraintes d'**association**, qui modélisent le comportement attendu par une liaison cinématique (fixe ou glissante par exemple), se traduisent par des relations de dépendance entre les déplacements des surfaces de substitution.
- les contraintes de **jeux fonctionnels**, qui sont usuellement limitées aux conditions de position, proposent de contraindre la position d'élément géométrique (par rapport à d'autres éléments) afin qu'il se situe dans une zone dite de tolérance.

Parmi l'ensemble de la littérature traitant du comportement des interfaces [Gauet 1993], [Roy 1999] et [Teissandier 1999b] [Bhide 2001], ce paragraphe propose d'illustrer cette analyse par le concept des domaines jeux de M. Giordano [Giordano 1993].

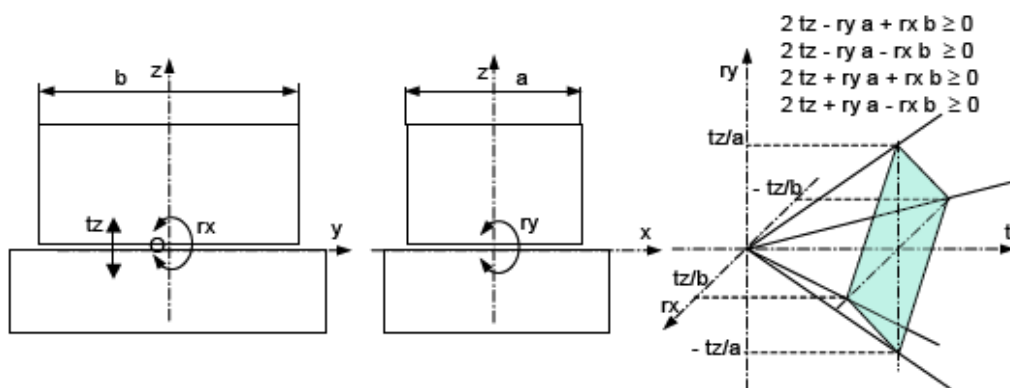


Figure 123 : Domaine jeu - Exemple de la liaison plane (extrait de [Giordano 2007])

La Figure 123 illustre ce concept de domaine jeu, en proposant comme exemple une liaison plane. Le déplacement du parallélépipède suivant l'axe z engendre un déplacement tz ainsi que deux petites rotations rx et ry . Ces rotations sont limitées par la contrainte de non-interpénétration. Le domaine jeu est alors défini par 4 inéquations linéaires (dans l'hypothèse des petits déplacements). Il est donc constitué dans l'espace rx, ry, tz par 4 plans formant une pyramide de sommet O et de hauteur infinie (Figure 123).

Cette pyramide souligne que ce jeu est illimité suivant les directions qui correspondent aux degrés de liberté de la liaison, mais qu'il reste borné suivants les directions qui sont limitées par les conditions de non-interpénétration.

1.2.3 Représentation mathématique des spécifications géométriques

De la même façon que les domaines jeux modélisent le comportement attendu des interfaces, plusieurs approches proposent de formaliser mathématiquement les comportements géométriques attendus (car spécifiés) des surfaces de substitution. Ce paragraphe se focalise plus précisément sur le concept de domaine écart.

Un domaine écart, défini par M. Giordano [Giordano 1993], correspond à l'ensemble des petits déplacements permis par la tolérance, c'est donc l'ensemble des instances des torseurs écarts associés à la tolérance. La Figure 124 illustre ce concept en proposant l'exemple d'une localisation d'un plan ia , par rapport à un second plan ib .

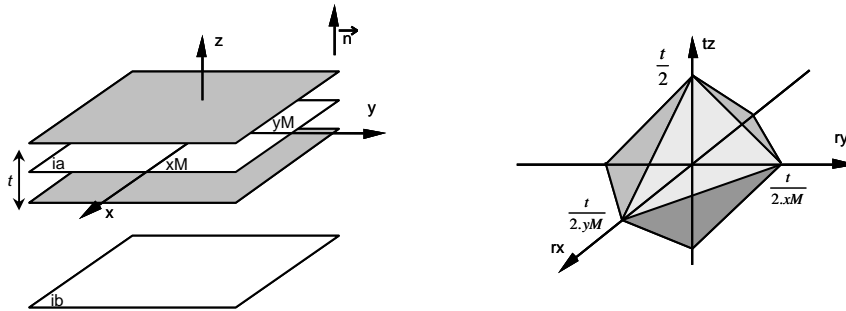


Figure 124 : Domaine Ecart - Exemple d'une localisation d'un plan

Dans le cas de cet exemple, les petits déplacements sont bornés par la zone de tolérance, représentée sur la Figure 124 par deux plans grisés, distants de l'intervalle de tolérance t . Les petits déplacements impactés par cette spécifications sont : la translation suivant l'axe z , et deux petites rotations suivant les axes x et y . Il en résulte un système d'inéquations décrivant le comportement attendu de cet écart, et sa représentation graphique (donnée dans la partie droite de la Figure 124).

1.2.4 Représentation mathématique des incertitudes de fabrication

Une approche, permettant de formaliser mathématiquement les spécifications et les incertitudes de fabrication, et d'exprimer le comportement géométrique attendu est l'approche par Δl développée par P. Bourdet [Bourdet 1975]. Cette approche propose de quantifier les cotes fabriquées (Cf) à partir des cotes fonctionnelles (CF), considérées comme connues. Cette approche se compose de deux étapes majeures :

- La première consiste à **établir le graphe de simulation**, qui est une modélisation du processus de fabrication. Sur ce modèle (illustré Figure 125), chaque surface est représentée par une colonne, et chaque repère correspond à une étape du processus de fabrication. Les croix désignent les surfaces créées et les triangles les surfaces participant à la mise en position de la pièce. Les intervalles de tolérance des cotes de simulation sont notés Δl_i pour les surfaces créées et Δl_i^j pour les surfaces de contact. L'indice i est le numéro de la surface concernée, l'exposant j est le numéro de la phase ou du repère.

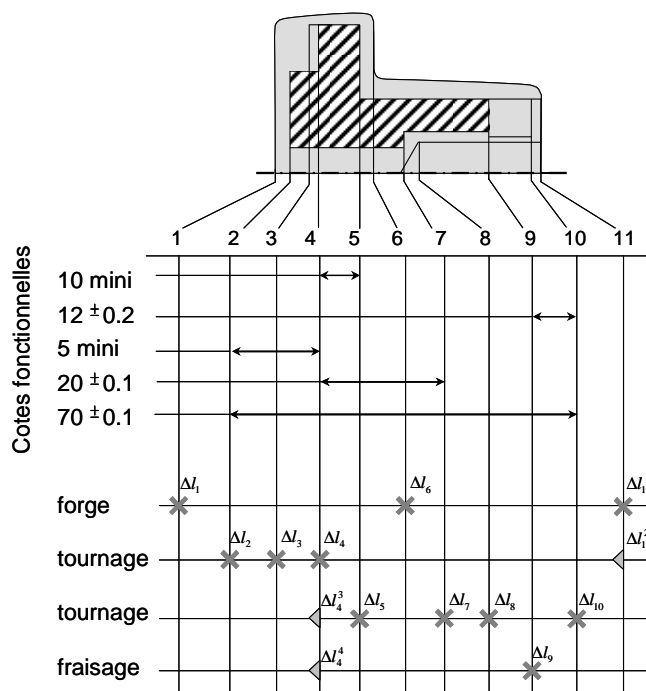


Figure 125 : Graphe de simulation - Exemple extrait de [Bourdet 2007]

Il est ainsi possible d'analyser la gamme de fabrication de la pièce, en soulignant les impacts des variations de la fabrication, des écarts de reprise et des écarts de mise en position.

- A partir de ce graphe, l'approche propose d'établir les relations formelles entre les cotes fabriquées (et leurs intervalles de tolérances ΔI_i associés) pour chaque cote fonctionnelle. Puisque l'approche est basée sur une modélisation unidimensionnelle (projection sur un axe), le trajet minimal est unique. L'écriture de ces relations est alors univoque et rapide. Ainsi pour la cote fonctionnelle $12^{\pm 0.2}$, l'intervalle de tolérance liée à la cote de fabrication associée est exprimé dans l'Équation 15.

$$\Delta Cf_{9,10} = \Delta I_9 + \Delta I_4^4 + \Delta I_4^3 + \Delta I_{10} = \Delta Cf_{9,10}^4 + \Delta Cf_{4,10}^3 \leq 0.4$$

Équation 15 : Écriture formelle de la composition des ΔI - Exemple

La répartition des intervalles de tolérances ΔI_i est alors optimisée en considérant à la fois la capabilité du processus de fabrication employé et les contraintes formalisées.

1.2.5 Modélisation par les graphes de phases d'usinage

Dans sa thèse, S. Tichadou [Tichadou 2005] propose une méthode permettant l'analyse des écarts du produit dûs aux dispersions du processus. Appliquée au cas de l'usinage, cette approche repose sur la modélisation du processus de fabrication, en mettant en évidence les relations (de contact, d'usinage et de positionnement principalement) entre les entités géométriques de la pièce et les ressources d'usinage (machine, porte pièce, et l'opération d'usinage employée). Cette modélisation permet alors l'identification des jeux et des écarts qu'il est nécessaire de formaliser sous la forme de torseurs. La Figure 126 illustre les torseurs rencontrés (jeux, écart et global) dans une phase d'usinage en respectant le formalisme de la méthode.

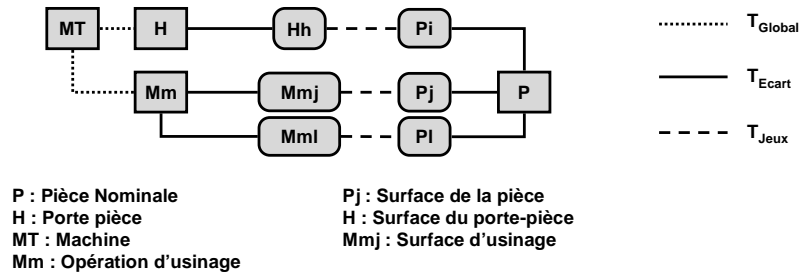


Figure 126 : Types de torseurs dans une phase d'usinage

Le cas de l'usinage des deux trous 2T1 et 2T2 ainsi que le surfacage du plan 2P3, réalisé dans la même sous-phase, est donné en tant qu'exemple sur le graphe de phase illustré par la Figure 127.

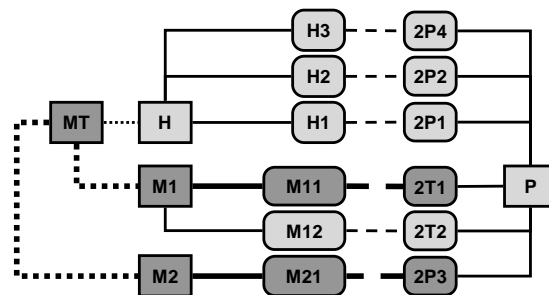


Figure 127 : Fermeture de torseurs - Exemple

L'analyse de ce graphique permet de mettre en évidence les impacts des dispersions sur les écarts et de les modéliser par le biais des torseurs.

Dans le cas d'une spécification de perpendicularité entre le plan 2P3 et le trou 2T1, réalisé dans une même sous-phase, la fermeture des torseurs (en gras sur la Figure 127) permet d'identifier et de modéliser les déplacements géométriques influant sur le respect de cette spécification. Cette mise en équation est donnée par l'Équation 16. Ainsi les écarts sont techniquement dûs : aux deux usinages effectués avec deux outils différents (les chaînes ouvertes 2T1-M11-M1 et 2P3-M21-M2) et la mise en œuvre sur la machine outil (les chaînes ouvertes M1-MT et MT-M2).

$$E_{2T1/2P3} = -J_{2T1/M11} - E_{M11/M1} - G_{M1/MT} + G_{MT/M2} + E_{M2/M21} + J_{M21/2P3}$$

Équation 16 : Mise en équation du torseur écart entre les entités 2T1/2P3

Cette analyse ne se limite pas à l'étude et la mise en équations des écarts entre entités réalisées dans la même phase. L'approche de S. Tichadou permet également, par analyse des chemins possibles reliant deux entités réalisées dans des phases différentes, d'en obtenir le torseur écart. Cette analyse, décrite sur un exemple industriel dans son mémoire de thèse [Tichadou 2005] ne sera pas abordée ici.

1.3. Techniques d'analyse des tolérances

Ce paragraphe s'intéresse aux différentes techniques d'analyse des tolérances en ne proposant pas une description détaillée de chacune d'entre elles mais en en proposant une

synthèse sous la forme d'une taxinomie (donnée *Figure 128*). En effet une étude assez exhaustive de l'ensemble de ces approches est clairement explicitée dans l'article d'Y.S. Hong [Hong 2002].

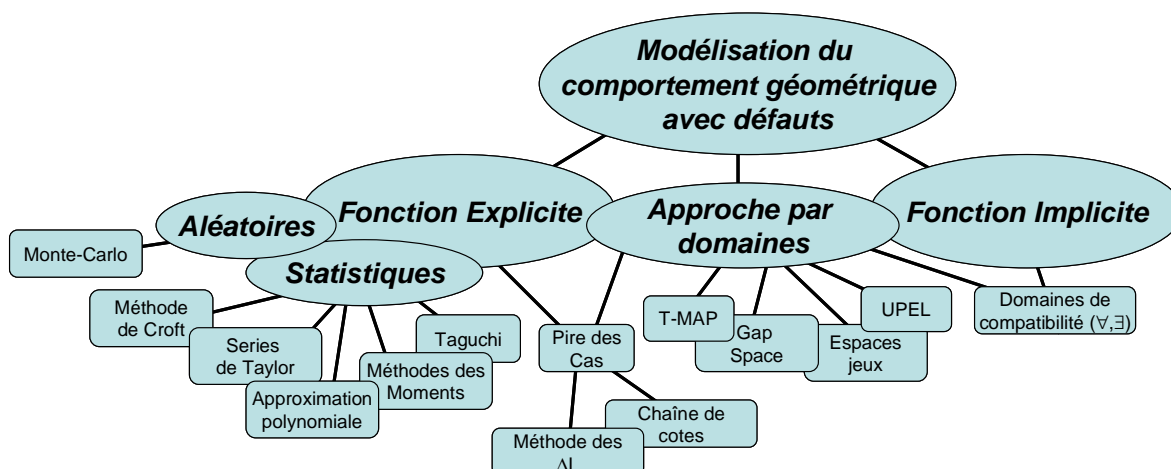


Figure 128 : Les différentes approches de modélisation du comportement géométrique avec défauts

Ce schéma synthétique met en évidence les trois approches majeures de la modélisation du comportement géométrique avec défauts du produit : les approches basées sur une modélisation implicite du comportement du produit, celles basées sur une formalisation explicite, et les approches par domaine. Les paragraphes suivants s'articulent autour de ces approches se focalisant plus particulièrement sur les approches explicites et implicites.

1.3.1 Analyse à partir d'une fonction explicite

Les approches d'analyse statistiques reposent usuellement sur une formulation mathématique explicite de la forme : $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ où y est une caractéristique fonctionnelle ou un jeu, x_i est une variation géométrique d'une pièce et f est la fonction réponse de l'assemblage ou de la pièce. L'objectif de l'analyse est donc de vérifier que cette caractéristique y respecte bien les exigences et spécifications définies lors de la conception du produit.

Deux cas se présentent lors de la modélisation sous forme explicite du comportement géométrique du produit :

- Dans le cas des **mécanismes isostatiques**, la variation d'un jeu fonctionnel résulte de la somme des jeux dans les liaisons et des défauts géométriques des pièces. De ce fait, la définition de la fonction f est directe.
- Dans le cas des **mécanismes hyperstatiques**, la définition de la fonction explicite f n'est pas directe, il est nécessaire de considérer l'ensemble des configurations extrêmes du mécanisme pour chaque condition fonctionnelle. Puis, pour chaque configuration, il faut expliciter la relation liant la variation géométrique de cette condition aux défauts géométriques des pièces.

Comme le précise la taxinomie proposée *Figure 128*, il existe deux approches majeures d'analyse des tolérances, dans le cas d'une formalisation explicite des relations entre variations et caractéristiques :

- L'analyse dite « **Au pire des cas** » (analyse déterministe) qui considère les plus mauvaises combinaisons possibles des différentes valeurs de tolérances et évalue

les jeux et les caractéristiques géométriques fonctionnelles afin d'assurer la montabilité, le respect des exigences géométriques et l'interchangeabilité de 100% des mécanismes (la probabilité que les exigences géométriques soient respectées soit égale à 1). Cette condition de 100% a généralement tendance à réduire les intervalles de tolérances et à augmenter le coût de fabrication.

- L'analyse **statistique** est une approche plus pratique et économique d'analyser les tolérances car un petit pourcentage de non-conformité est toléré. En conséquence, une part importante de la recherche est consacrée à l'analyse statistique ([Nigham 1995], [Ballu 2000] et [Skowronski 1997]) et au développement de logiciels permettant d'effectuer ces analyses : MecaMaster®, Mechanical Advantage®, CAT 3DCS®, e_Tolmate®,...

1.3.2 Analyse à partir d'une fonction implicite

La notion de fonction implicite réside dans le fait que les relations de composition sont implicites. Elles sont notées $f(x,y)$, où y est l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles et des jeux, et x est l'ensemble des écarts des pièces. Cette fonction est représentée par le domaine de composition et est manipulée sous sa forme implicite.

Dans cette étude bibliographique, nous limitons l'analyse des tolérances à partir d'une fonction implicite au cas de l'approche par domaines, proposée par [Dantan 2000]. Dans le cadre de cette approche, l'objectif de l'analyse des tolérances est de caractériser les écarts permis des pièces. Ces écarts sont limités par le « domaine spécifié », noté $D_{spécif}$. Ce dernier est défini de la sorte : $D_{spécif} \subset Situation \times Intrinsèque$

La formulation des relations entre les différents espaces définis dans le paragraphe 1.1.3, dépend alors de la nature des exigences étudiées. Deux cas peuvent être distingués :

- Dans le cas d'une **exigence d'assemblage**, l'appartenance des écarts géométriques au domaine spécifié est équivalente à la formulation suivante : « *le mécanisme doit s'assembler dans au moins une configuration admissible des jeux telle que les contraintes de composition et d'interface soient respectées* ». Ce qui se traduit mathématiquement par l'Équation 17.

$$\begin{aligned} (s,i) \in D_{spécif} \\ \Leftrightarrow \exists j \in \{j \in Jeu : (s,j,i) \in D_{compatibilité} \cap D_{interface}\} \\ : (s,j,i) \in D_{compatibilité} \cap D_{interface} \end{aligned}$$

Équation 17 : Exigence d'assemblage dans le cas de l'approche par domaines

- Dans le cas d'une **exigence fonctionnelle** (par exemple de position), l'appartenance des écarts au domaine spécifié est équivalente à la formulation suivante : « *la condition fonctionnelle de position doit être respectée dans toutes les configurations acceptables des jeux telles que les contraintes de composition et d'interface soient respectées* ». Ce qui se traduit mathématiquement par l'Équation 18.

$$\begin{aligned}
& (s, i) \in D_{\text{specif}} \\
& \Leftrightarrow \forall j \in \{j \in \text{Jeu} : (s, j, i) \in D_{\text{compatibilité}} \cap D_{\text{interface}}\}, \\
& \quad \exists jf \in \text{Jeu Fonctionnel}, \\
& \quad : (s, j, i, jf) \in D_{\text{compatibilité}} \cap D_{\text{interface}} \cap D_{\text{fonctionnel}}
\end{aligned}$$

Équation 18 : Exigence fonctionnelle de position dans le cas de l'approche par domaines

Cette étude bibliographique a permis de souligner le nombre important d'approches, de méthodes et d'outils permettant la modélisation du comportement géométrique du produit et l'analyse des tolérances de ce dernier. Loin d'avoir été exhaustive, cette étude a pour objectif principal l'introduction des outils et méthodes qui ont été implémentés dans notre maquette informatique afin de réaliser l'analyse des tolérances nécessaire au déroulement de la méthode ABTA.

Les paragraphes suivants décrivent l'automatisation de cette activité d'analyse des tolérances, en l'illustrant de plusieurs exemples tirés du guide de bras de robot. Ils soulignent également l'aspect modulaire de l'application implémentée en démontrant sa compatibilité avec plusieurs approches d'analyse des tolérances et de modélisation du comportement géométrique du produit.

2 Analyse des tolérances dans le cadre de l'ABTA

Comme le rappelle la *Figure 129*, la méthode ABTA manipule trois niveaux de caractéristiques : les variations liées au processus, celles liées aux pièces et celles liées au produit. Seules les caractéristiques pièces et produit sont identifiées (mais non quantifiées) et sont considérées comme une entrée de notre approche. L'objectif est donc d'identifier les caractéristiques du processus et de quantifier les caractéristiques des pièces et du produit, en estimant les relations reliant l'ensemble de ces variations.

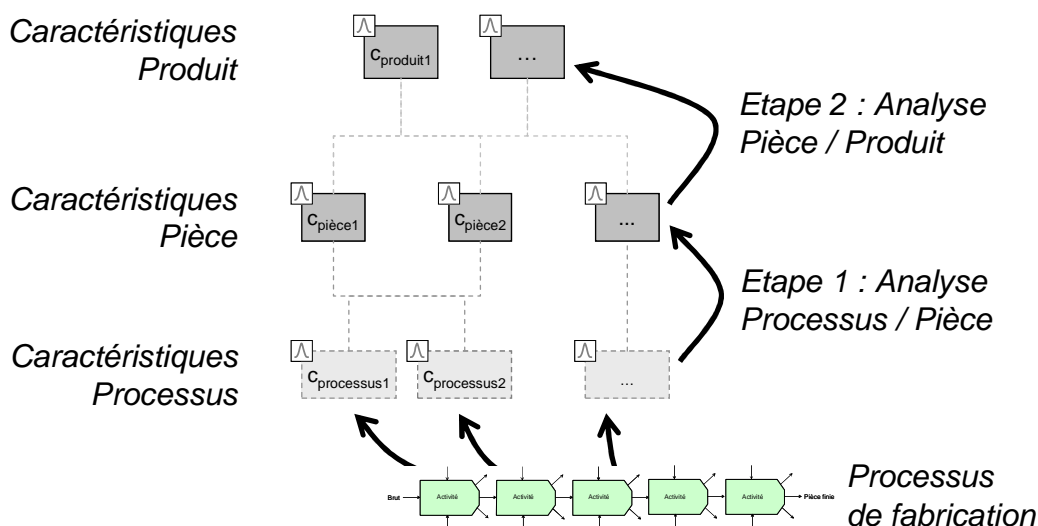


Figure 129 : L'analyse des tolérances dans l'ABTA - Principe

Le résultat de l'étape de sélection de processus, décrite dans le chapitre III de ce mémoire, aboutit à la sélection de plusieurs processus de fabrication (contenant uniquement des activités de production) dont il faut vérifier la validité. Pour ce faire,

l'analyse de tolérances est nécessaire afin de vérifier le respect des exigences géométriques intrinsèques ou entre entités, des exigences d'assemblage et des conditions fonctionnelles définies par les concepteurs.

Afin de quantifier l'ensemble des caractéristiques contenues dans le *KC Flowdown* et ainsi vérifier qu'elles appartiennent aux domaines définis à partir des intervalles de tolérance, l'ABTA propose d'effectuer l'analyse des tolérances en deux étapes. La première étape concerne l'analyse des tolérances au niveau Processus / Pièce afin de déterminer les relations entre les dispersions du processus et les écarts des pièces. La seconde étape consiste à estimer les caractéristiques du produit, à l'aide d'une formalisation explicite des relations entre les écarts des pièces et des jeux.

Les paragraphes suivants s'articulent autour de ces deux étapes d'analyse, en présentant préalablement la méthode que nous avons retenue pour l'estimation des probabilités : la simulation de Monte Carlo.

2.1. Evaluation des écarts par Monte Carlo

Les analyses effectuées au niveau Processus / Pièce et au niveau Pièce / Produit permettent d'obtenir la définition mathématique de chaque variation. Puisque les lois statistiques de chaque ressource diffèrent, et ne peuvent pas être réduites à de simples lois normales (plus faciles à manipuler), il est impossible d'évaluer directement ces variations.

Pour ce faire, nous avons eu recours à la simulation de Monte Carlo. Cette approche vise à estimer une valeur numérique en employant des procédés aléatoires. Employée historiquement pour l'estimation d'aire de surfaces, cette approche, désormais assistée par la puissance de calcul des ordinateurs modernes, est grandement employée dans le monde de la finance pour l'estimation du risque financier. Cette approche est également utilisée dans le domaine du tolérancement [Nigham 1995].

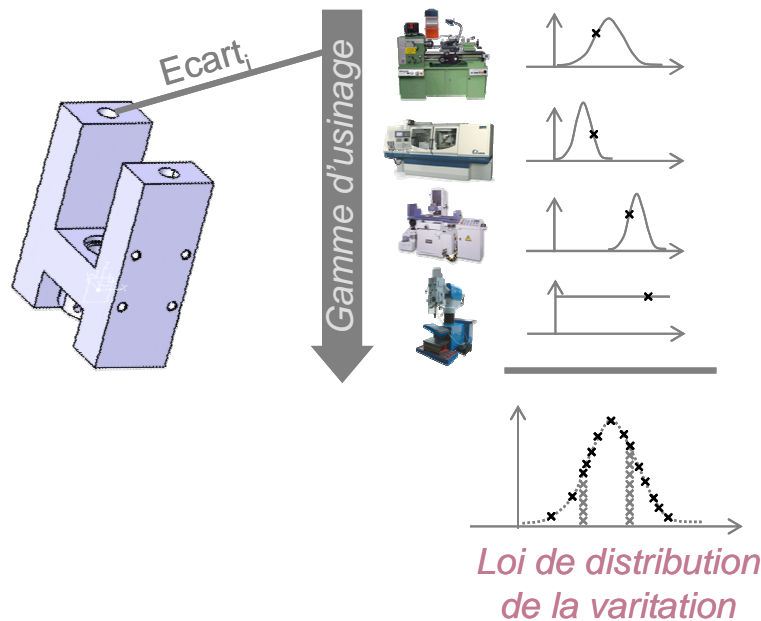


Figure 130 : Simulation de Monte Carlo - Principe

Dans le cas de l'estimation de la loi de distribution statistique de chaque écart (intrinsèque ou entre plusieurs entités), cette solution consiste à tirer aléatoirement pour chaque activité responsable de cette variation, un échantillon en respectant les lois de distribution de ses ressources : cela revient à générer aléatoirement une configuration des dispersions des ressources ou des pièces afin d'en quantifier l'impact sur les pièces ou le produit. Plusieurs tirages sont alors générés afin d'estimer un échantillon représentatif de la loi de distribution de la variation. Cette simulation est illustrée sur la *Figure 130*.

Cette approche est intéressante car elle est compatible avec toutes les lois de distribution : quelles soient continues ou discrètes. Employer cette méthode dans notre application est donc un gage de flexibilité de la modélisation des dispersions des ressources ou des activités.

Cette approche est simple à implémenter et à appréhender. Néanmoins puisqu'elle repose sur une méthode stochastique, il est nécessaire, pour obtenir une estimation précise, d'effectuer un grand nombre de simulations (la précision croît linéairement en suivant une loi racine du nombre d'itérations). Dans le cas de l'évaluation des variations près de 100000 tirages sont nécessaires pour obtenir une précision acceptable. Quelques mécanismes d'optimisation du nombre de tirages existent afin d'accélérer le traitement, comme par exemple celui employé par J. Bruyère [Bruyère 2006] pour la simulation d'engrènement où l'analyse du comportement géométrique est basée sur une fonction issue de simulations numériques.

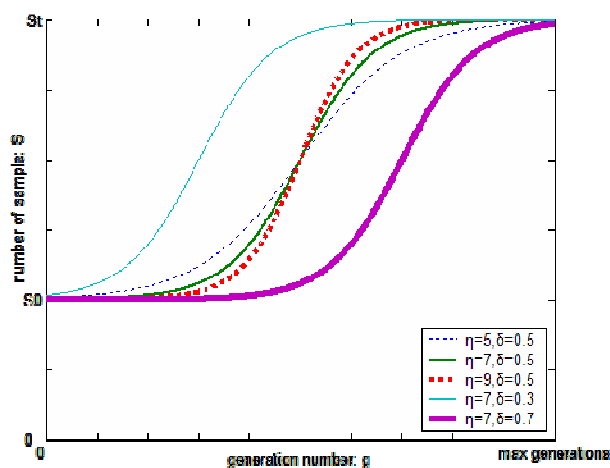


Figure 131 : Nombre de tirages en fonction de l'évolution de l'algorithme génétique

Ces mécanismes sont d'autant plus nécessaires pour l'approche ABTA dans laquelle cette activité d'analyse de tolérances est contenue dans le processus itératif de l'outil d'optimisation retenu (l'algorithme génétique). [Bruyère 2006] propose ainsi d'adapter la précision de la simulation de Monte Carlo, et donc le nombre de tirages effectués, en fonction de la convergence de l'algorithme génétique. Différentes lois d'évolution paramétriques ont d'ailleurs été testées dans ces travaux comme l'illustre la *Figure 131*. En conséquence de ces mécanismes, les temps de calcul sont considérablement diminués.

2.2. Etape 1 : Analyse au niveau Processus / Pièce

Ce niveau d'analyse consiste comme le rappelle la *Figure 116* à analyser les tolérances liées aux pièces dont le respect est essentiellement dû aux dispersions des ressources

employées par les activités pour la fabrication de composants et de leurs entités géométriques. Les tolérances analysées portent sur les écarts propres à une pièce et vérifient alors des spécifications dimensionnelles, d'orientation ou de position. Cette analyse s'opère alors par les activités notées ①②③ sur la *Figure 116*.

Une précision sémantique doit être apportée. Il existe deux grandes déclinaisons du terme variation, en effet : une variation au niveau du produit est appelée écart alors qu'au niveau du processus les experts parlent de dispersion. L'objectif de cette analyse est de trouver la fonction f_i qui relie ces deux variations tel que :

$$\boxed{Ecart_j = f_i(Dispersions)}$$

Équation 19 : Relation Dispersions / Ecart

Cette section propose d'illustrer comment cette analyse au niveau Process / Pièce est réalisée dans le cadre de l'ABTA. Bien que l'application implémentée soit basée sur l'approche de P. Bourdet (par l'approche des Δ), l'objectif est de démontrer que l'ABTA n'est pas dépendante d'une unique méthode d'analyse et qu'elle reste compatible avec d'autres solutions comme l'approche de S. Tichadou par exemple ou l'approche par matrice en coordonnées homogènes [Martin 2005].

Cette analyse des tolérances au niveau Processus / Pièce peut se décomposer en deux grands cas d'utilisation. Les paragraphes suivant proposent d'analyser chacun de ces deux cas en l'illustrant d'exemples fictifs mais représentatifs des mécanismes employés.

- le premier consiste à analyser les tolérances bornant **les variations intrinsèques** des entités géométriques. Cette dernière s'effectue au plus tôt dans le processus de sélection des ressources lors de la génération des gammes d'usinage.
- la seconde se focalise sur les exigences spécifiant **les variations entre entités** géométriques. Elle ne s'applique plus à une unique activité mais aux relations et enchaînements entre celles-ci. Cette analyse s'opère lors de la phase d'enrichissement des gammes d'usinages.

Les paragraphes suivants s'articulent autour de ces deux cas d'analyse de tolérances.

2.2.1 Support de cette analyse – L'approche par Δ

En préambule de la description des mécanismes d'analyse des tolérances implémentés dans l'outil informatique, il est intéressant de montrer que les informations contenues dans le modèle ABTA sont identiques à celles manipulées par l'approche par Δ . Seul le formalisme diffère. Sur le graphe *Figure 132* sont visibles les entités géométriques réalisées dans la phase, les entités participant à la mise en position de la pièce et l'opération ou le procédé employé.

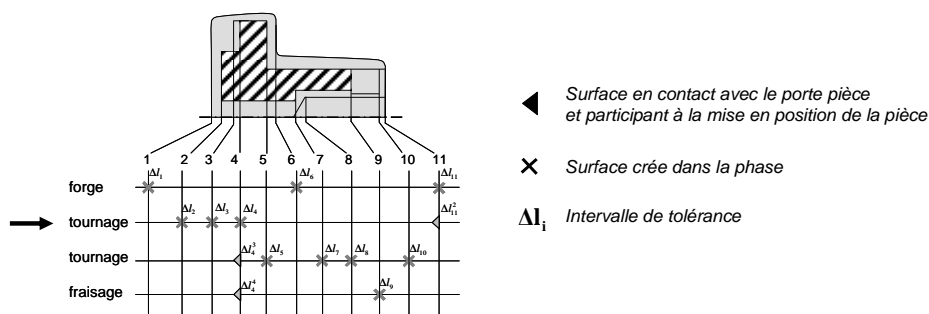


Figure 132 : Graphe de simulation (extrait de [Bourdet 2007])

En effet, dans ce graphe de simulation proposé par P. Bourdet, support de l'analyse des ΔI , les lignes représentent les sous-phases et les colonnes, modélisent les entités géométriques réalisées. Il est ainsi possible d'analyser la gamme de fabrication de la pièce en soulignant les impacts des variations de la fabrication, des écarts de reprise et des écarts de mise en position.

Ainsi pour la phase marquée d'une flèche sur la Figure 132, les entités géométriques *plan1*, *plan4* et le *cylindre3*, sont réalisées par tournage. Le plan brut noté *plan11* participe à la mise en position de la pièce.

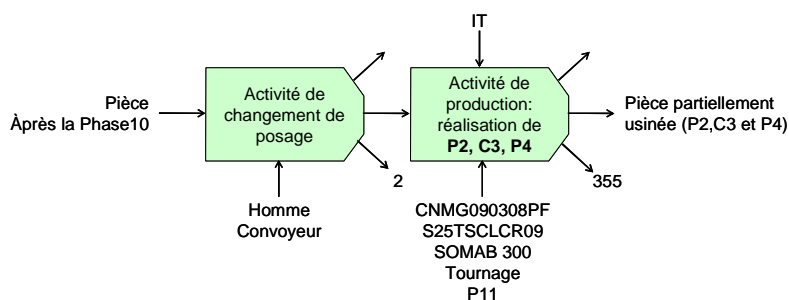


Figure 133 : Extrait de la gamme de fabrication - Formalisme ABTA

La formalisation de cette même phase dans le cadre de l'ABTA, est donnée Figure 133. De cette figure, un constat peut être fait : les mêmes informations que celles nécessaires à l'analyse des tolérances par l'approche des ΔI sont contenues dans cette représentation. Le mode opératoire employé, les ressources consommées (machine, outil, et posage) et les entités réalisées sont accessibles dans le formalisme de l'ABTA (et dans le modèle de connaissance associé). C'est principalement pour cette raison que c'est cette approche qui a été développée dans la validation informatique de l'ABTA.

2.2.2 Identification et caractérisations des écarts intrinsèques

La Figure 134 rappelle le formalisme d'une activité dans le cadre de l'ABTA en soulignant les flux et supports nécessaires à cette analyse des tolérances (en noir). L'adaptation de la méthode ABC aux besoins de la démarche ABTA s'est accompagnée de la définition d'un indicateur de performance, qui quantifie la capacité d'une activité à réaliser des surfaces en respectant les exigences ou spécifications. Le calcul de cet indicateur de performance revient à effectuer une analyse des tolérances au niveau Processus / Pièce.

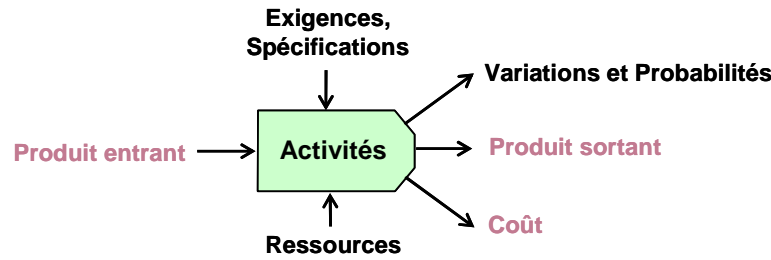


Figure 134 : Une activité dans le formalisme ABTA

L'évaluation de la performance d'une activité de production peut être basée sur l'indice de capabilité, comme par exemple le Cp. Pour calculer cet indicateur, il est nécessaire de connaître à la fois l'intervalle de tolérance objectif et les dispersions de l'activité.

$$Performance_{Activité} = \frac{IT}{Dispersion_{Activité}}$$

Équation 20 : Expression de la performance d'une activité de production

Le calcul de cette dispersion est basé sur l'approche par ΔI . En effet dans ce cas, cela revient à s'intéresser à une unique croix du graphe de simulation. Cette dispersion de l'activité est due à la fois aux ressources qu'elle utilise et à la façon de les combiner (le mode opératoire). Dans ce cas, la dispersion d'une activité de production peut s'écrire :

$$Dispersion_{Activité} = g(Dispersion_{ressources}) \\ = g(h(Dispersion_{outil}, Dispersion_{machine}))$$

Équation 21 : Dispersion d'une activité de production

Où la fonction h modélise le mode opératoire, c'est-à-dire la façon dont le couple outil/machine est employé. La fonction g modélise quant à elle, la méthode de composition des dispersions des ressources employées par l'activité.

Cette approche nécessite de connaître les distributions statistiques des dispersions de chaque ressource ($Dispersion_{outil}, Dispersion_{machine}$). Une méthode d'obtention de ces dispersions est proposée par S. Tichadou dans son mémoire de thèse [Tichadou 2005].

Dans le cas où plusieurs tolérances sont réalisées par une seule activité d'usinage, sa performance sera calculée avec la tolérance dont l'intervalle est le plus restrictif et donc le plus faible (on se place ainsi dans le pire des cas). Au final, l'indice de performance d'une activité de fabrication s'exprime ainsi :

$$Performance_{Activité} = \frac{Min(IT)}{g(Dispersion_{Ressources})}$$

Équation 22 : Expression de la performance d'une activité de fabrication

Cette estimation permet alors de supprimer au plus tôt les activités de production dont l'indice de performance est trop faible ou de générer une activité de contrôle de conformité.

Avoir recours à l'approche par ΔI , permet également de quantifier les écarts intrinsèques ainsi que les écarts entre entités réalisées par une même phase. En effet, à partir de l'Équation 21, il est possible de particulariser l'Équation 19 au cas des écarts intrinsèques. Ces derniers sont considérés comme ne dépendant uniquement de la dispersion de l'activité de finition.

$$\begin{aligned} \text{Ecart}_{\text{Intrinsèque}} &= f_1(\text{Dispersion}_{\text{Activité}}) \\ &= f_1(g(h(\text{Dispersion}_{\text{outil}}, \text{Dispersion}_{\text{machine}})) \end{aligned}$$

Équation 23 : Caractérisation des écarts intrinsèques

Dans la maquette informatique développée, les fonctions g et h ont été simplifiées en posant l'hypothèse que les dispersions des ressources suivent une loi normale. La composition des dispersions est alors réalisée par la composition des moyennes et des variances. L'outil reste néanmoins indépendant de la solution retenue et peut très bien utiliser des lois de composition bien plus complexes.

Puisque l'application implémentée et la pièce analysée permettent une analyse de ces écarts unidirectionnels, il est également possible de simplifier cette équation. En effet dans le cas 1D, la fonction f_1 est une équivalence.

2.2.3 Identification et caractérisation des écarts entre entités

Dans le cas d'entités réalisées dans des phases différentes, les écarts entre ces dernières ne dépendent plus de la dispersion d'une unique activité (comme dans le cas précédent), mais de plusieurs. L'Équation 19 peut alors se particulariser :

$$\text{Ecart}_{\text{Entre Entités}} = f_2(\text{Dispersion}_{\text{Activités}})$$

Équation 24 : Cas des écarts entre entités

Pour expliquer comment est réalisée l'analyse des tolérances entre plusieurs entités géométriques usinées dans des phases différentes, la Figure 135 propose une transcription d'une gamme de production enrichie dans le formalisme du graphe de simulation proposé par l'approche ΔI , en illustrant le parallèle qui peut être fait avec la formalisation proposée dans l'ABTA.

Soit le cas de la spécification de localisation (notée (1) sur la Figure 135) entre le plan 2P4 et le trou 2T1. Contrairement au cas précédent, la variation spécifiée ne dépend plus d'une unique activité de production (et des ressources qu'elle utilise) mais de plusieurs.

La lecture du graphe de simulation permet d'identifier les sources de dispersions (elles apparaissent sur la Figure 135 avec une couleur plus sombre) :

- l'activité de production AP2 réalisant 2T1 et 2T2 introduit des variations de positionnement et d'orientation,
- de nouvelles variations de positionnement sont introduites lors du changement de posage modélisé par l'activité CP2,
- la rotation de table TR1 introduit également d'autres variations,
- l'activité de production AP4 qui usine le plan 2P4 introduit également de des variations dues aux dispersions des ressources qu'elle consomme.

Ainsi la variation entre les entités 2P4 et 2T1 dépend d'un ensemble de ressources et d'activités dont l'impact peut mathématiquement s'écrire :

$$Ecart_{Localisation} = f(d_{CP1}, d_{CP2}, d_{AP2}, d_{AP4}, d_{RT1})$$

Équation 25 : Expression de l'écart en fonction des dispersions des activités

Cette approche est intéressante car elle permet d'illustrer l'importance de l'ordonnancement dans une gamme d'usinage. En effet dans le cas de la spécification de localisation, si l'activité de production AP4 était programmée avant AP3, les dispersions dues à l'activité de rotation de table RT1 n'impacteraient pas la variation liée à cette spécification. C'est l'analyse de l'ensemble des spécifications qui permet d'évaluer quel arrangement est l'optimum.

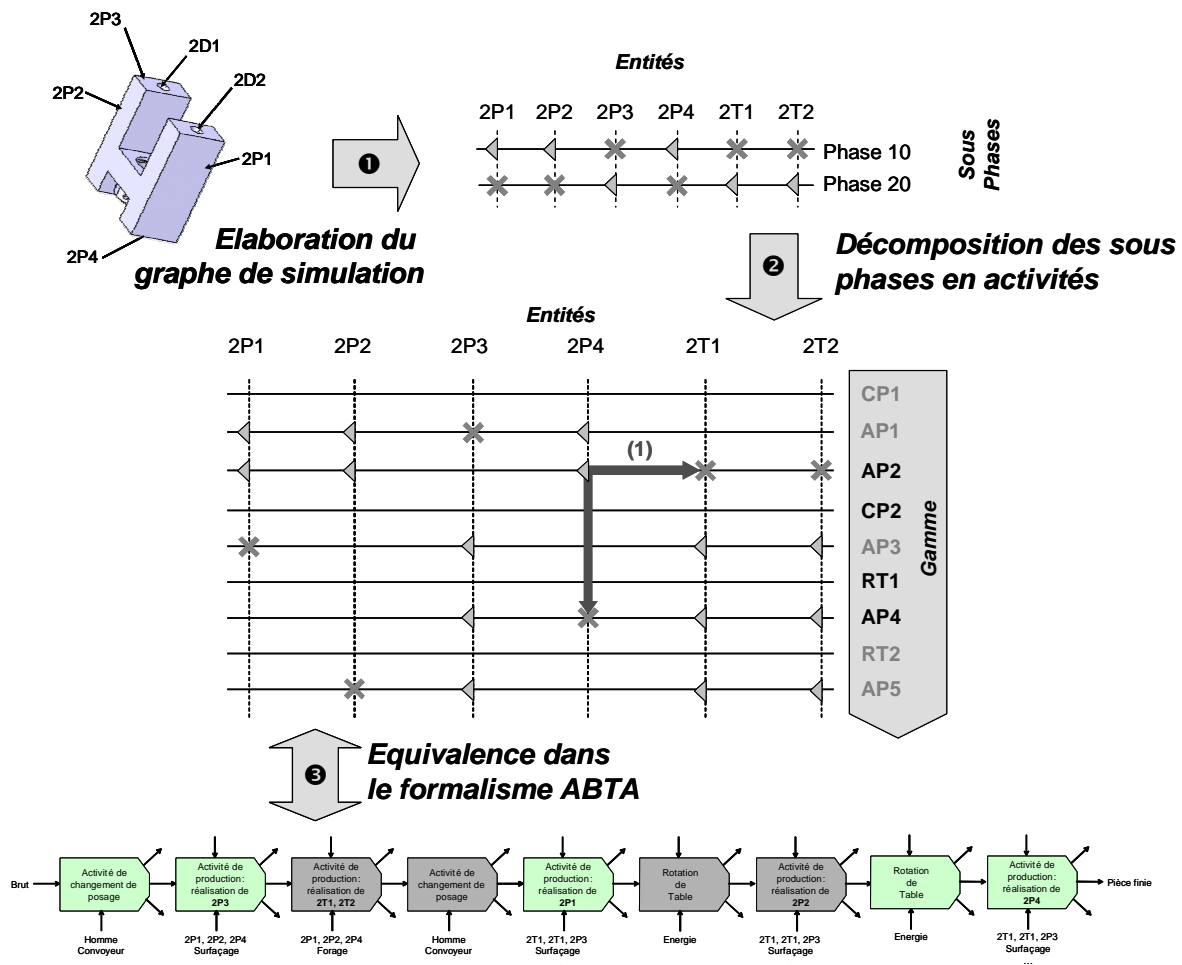


Figure 135 : Analyse des tolérances – Parallèle entre Δl et activités sur un exemple

Une fois ces relations obtenues, l'application estime les lois statistiques de distribution des écarts des pièces à l'aide de simulations de Monte Carlo décrites dans le paragraphe 2.1. Le résultat est donc l'estimation des lois statistiques des caractéristiques du processus et des pièces.

2.2.4 Compatibilité avec l'approche par analyse des phases d'usinage [Tichadou 2005]

L'objectif de ce paragraphe est de souligner que notre méthode n'est pas dédiée à une unique solution d'analyse (l'approche par ΔI), mais qu'elle peut être combinée avec d'autres solutions, comme par exemple l'analyse des phases d'usinage, proposée par S. Tichadou [Tichadou 2005].

Les informations nécessaires à l'élaboration de ces graphes, et donc à l'identification et la modélisation des écarts, sont disponibles dans les modèles de données et de connaissance manipulés par l'ABTA. Par ailleurs, ces informations sont affichées par l'application. En effet, la *Figure 136* (a) illustre le résultat généré pour l'usinage des mêmes entités que celles analysées dans la *Figure 135*.

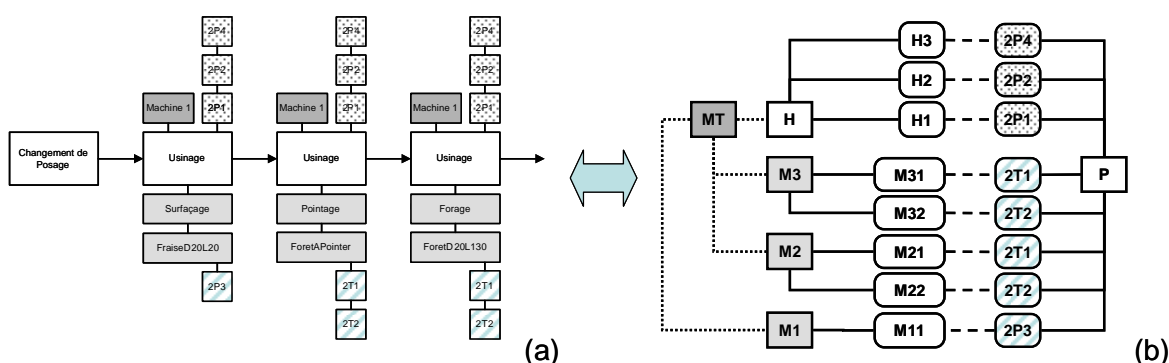


Figure 136 : Comparatif entre : (a) l'affichage d'une gamme dans l'ABTA et (b) la modélisation d'une phase d'usinage dans le formalisme proposé par S. Tichadou

Cette figure illustre les données communes entre ce qui est actuellement proposé par la version implémentée de l'ABTA et les informations nécessaires à l'élaboration des graphes de phase de S. Tichadou : seul le formalisme et la prise en compte des défauts dus au porte-pièce sont différents. En effet, les défauts de mise en œuvre de la machine outil (en gris sombre sur la *Figure 136*), les dispersions dues au couple outil/opération (en gris clair), les surfaces participant à la mise en position de la pièce (en pointillé) et les surfaces réalisées (hachurées) sont communs aux deux modèles.

Ainsi, cette étude de deux méthodes d'identification des écarts et d'analyse de leurs dépendances aux dispersions du processus, met en évidence la flexibilité de l'approche par activités. Bien que l'outil implémenté soit basé sur une approche par ΔI , la solution retenue pour l'identification et la quantification des écarts n'est pas pour autant limitée à cette méthode. D'autres approches comme celle proposée par S. Tichadou peuvent également être employée ce qui souligne la modularité de l'ABTA.

2.2.5 Bilan de l'analyse au niveau Processus / Pièce

La *Figure 137* propose une synthèse des méthodes employées pour effectuer cette analyse des tolérances au niveau Processus / Pièce, en précisant comment sont réalisées les activités notées ①②③ dans la *Figure 116*.

Il est important de souligner que l'application réalisée ne manipule pas les valeurs des variations mais uniquement leur loi statistique de distribution (illustrée par une icône en forme de gaussienne sur le *KC Flowdown*).

L'activité d'identification des caractéristiques processus (① de la Figure 116) est obtenue par l'analyse du processus de fabrication sélectionné dans le chapitre III. Chaque ressource employée par les activités dites de production (d'usinage ou de préparation) est alors consignée en tant que variation dans l'arborescence des caractéristiques. L'aspect quantification de ces variations est effectué simultanément : pour chaque ressource l'application dispose de sa loi statistique de distribution.

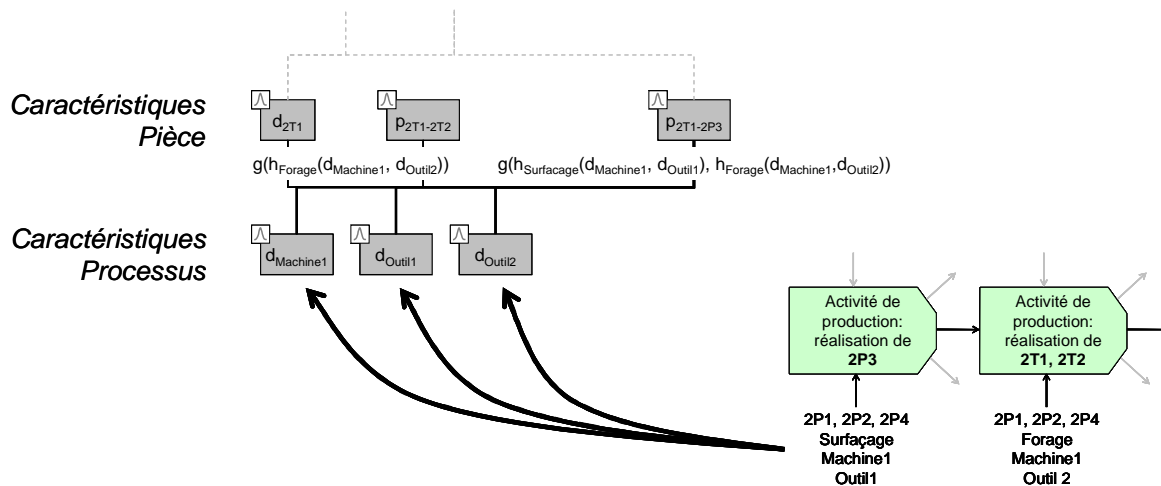


Figure 137 : Synthèse de l'analyse au niveau Processus / Pièce

Connaissant le processus de fabrication et les activités de production qui le composent, il est possible, en employant l'approche par ΔI , de déterminer les relations entre les caractéristiques liées au processus et celles liées aux pièces (③ de la Figure 116). Cette détermination s'accompagne d'une estimation des lois statistiques des caractéristiques pièces par l'emploi de simulations de Monte Carlo.

A cette étape, puisque les lois statistiques des variations des pièces sont connues, certaines tolérances dimensionnelles, de position ou d'orientation peuvent déjà être analysées afin de vérifier que le processus de fabrication sélectionné respecte les spécifications définies par les concepteurs. Cette vérification est quantifiée par la probabilité du respect de ces contraintes. L'étape suivante consiste à remonter au niveau supérieur dans l'arborescence des variations en proposant une méthode permettant de quantifier les caractéristiques du produit. C'est le thème de la section suivante.

2.3. Etape 2 : Analyse au niveau Pièce / Produit

Le niveau d'analyse Pièce / Produit (rappelé dans le modèle *KC Flowdown* à la Figure 116) correspond à l'analyse des tolérances liées aux problèmes d'assemblage et au respect des conditions fonctionnelles du produit. Dans ce cas, ce ne sont plus des variations propres à une pièce qui sont analysées, mais des variations entre les entités géométriques de plusieurs composants. L'activité notée ⑤ dans le *KC* et *Condition Flowdown* de la Figure 116, réalise cette analyse.

L'étude bibliographique, proposée dans le paragraphe 1.3.1, souligne les trois approches permettant l'analyse des tolérances au niveau Pièce / Produit. Dans le cadre de

ces travaux nous nous sommes limités à l'étude de deux d'entre elles : l'analyse à partir d'une fonction explicite et l'analyse à partir d'une fonction implicite du comportement géométrique du produit. Les paragraphes suivants proposent de décrire ces deux méthodes d'analyse.

Puisque ces travaux n'ont pas pour objectif de développer une nouvelle technique d'analyse des tolérances, le premier paragraphe traite de l'approche classique et simple, qui est la base de la plupart des logiciels du commerce : l'analyse des tolérances à partir d'une **fonction explicite** du comportement géométrique du mécanisme.

Le second paragraphe décrit l'analyse des tolérances à partir d'une fonction **implicite** et de la formalisation par les quantificateurs \forall et \exists . Cette approche, qui a été développée par [Dantan 2000], a été implémentée dans le laboratoire par [Qureshi 2007] afin d'en valider l'intégration à la démarche ABTA globale.

Pour ces deux approches, nous n'avons pas retenu l'analyse des tolérances au pire des cas. En effet, l'approche ABTA est basée sur la quantification de plusieurs probabilités comme par exemple $P(Ok)$ ou $P(Non\ Conforme)$. Une approche statistique est donc employée pour évaluer ces probabilités nécessaires à l'estimation du coût pondéré qualité.

2.3.1 Support cette analyse – Formalisation explicite du comportement

Dans le cas du bras de robot, la Figure 138 propose une identification des écarts (intrinsèques et de situation) afin d'établir les lois de compatibilité permettant le montage du mécanisme et le respect de la condition fonctionnelle de battement angulaire (modélisée par le déplacement du point K).

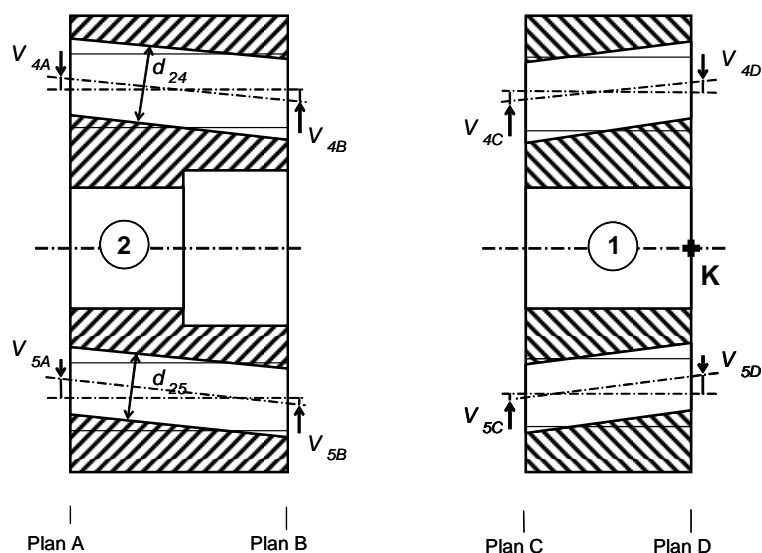


Figure 138 : Ecart intrinsèques et de position - Identification

A partir de cette définition des paramètres descriptifs du produit, [Ballu 1999] a identifié et formalisé les inéquations formalisant le comportement géométrique du guide de bras de robot. Le caractère assemblable du mécanisme (supposé parfaitement rigide) se modélise alors par six contraintes exprimées sous la forme d'inéquations. Ces dernières sont essentiellement obtenues par l'analyse de la non-interférence entre les différentes surfaces.

- Une fois les deux barres encastrées dans la pièce ①, les inéquations suivantes expriment la montabilité des deux guides de translation dans la pièce notée ② :

$$\begin{aligned}
 & -2v_{4A} + 7v_{4C} - 5v_{4D} + d_{24} - d_4 + 2v_{5A} - 7v_{5C} + 5v_{5D} + d_{25} - d_5 \geq 0 \\
 & -2v_{4A} + 7v_{4C} - 5v_{4D} - d_{24} + d_4 + 2v_{5A} - 7v_{5C} + 5v_{5D} - d_{25} + d_5 \leq 0 \\
 & -2v_{4B} + 4v_{4C} - 2v_{4D} + d_{24} - d_4 + 2v_{5B} - 4v_{5C} + 2v_{5D} + d_{25} - d_5 \geq 0 \\
 & -2v_{4B} + 4v_{4C} - 2v_{4D} - d_{24} + d_4 + 2v_{5B} - 4v_{5C} + 2v_{5D} - d_{25} + d_5 \leq 0
 \end{aligned}$$

Équation 26 : Contraintes d'assemblage - Partie 1

- Les deux inéquations suivantes expriment la contrainte de non interférence entre les barres et les trous réalisés dans la pièce ② :

$$\begin{aligned}
 d_{25} - d_5 & \geq 0 \\
 d_{24} - d_4 & \geq 0
 \end{aligned}$$

Équation 27 : Contraintes d'assemblage - Partie 2

Puisque ce mécanisme est hyperstatique, la définition de la fonction f n'est pas directe. C'est par l'analyse des configurations extrêmes du mécanisme (suivant les contacts entre les barres, la glissière et le bâti) que l'on obtient quatre définitions conditionnées de cette fonction :

$$\begin{aligned}
 pk_1 &= \frac{1}{3}(-4v_{4A} + 7v_{4B}) - \frac{11}{6}(d_{24} - d_4) - v_{4D} \\
 pk_2 &= \frac{1}{3}(-4v_{4A} + 14v_{4C} - 10v_{4D}) - \frac{2}{3}(d_{24} - d_4) + \frac{7}{3}(v_{5B} - 2v_{5C} - v_{5D}) - \frac{7}{6}(d_{25} - d_5) \\
 pk_3 &= \frac{1}{3}(-4v_{5A} + 14v_{5C} - 10v_{5D}) - \frac{2}{3}(d_{25} - d_5) + \frac{7}{3}(v_{4B} - 2v_{4C} - v_{4D}) - \frac{7}{6}(d_{24} - d_4) \\
 pk_4 &= \frac{1}{3}(-4v_{5A} + 7v_{5B}) - \frac{11}{6}(d_{25} - d_5) - v_{5D}
 \end{aligned}$$

Équation 28 : Contrainte fonctionnelle - 4 configurations extrême = 4 inéquations

Il est important de noter que la définition de la fonction f sous forme explicite n'est pas automatique et n'est nullement évidente pour une analyse 3D dont le degré d'hyperstaticité du mécanisme est important.

Nous avons retenu, pour estimation des lois statistique de distribution des caractéristiques du produit à partir des caractéristiques des pièces et des définitions explicites des fonctions f , une approche identique à celle employée pour l'analyse des tolérances au niveau Processus / Pièce : la simulation de Monte Carlo. Appliqué à ce niveau, le principe de la simulation de Monte Carlo reste semblable. Il est illustré *Figure 139*).

Dans un premier temps, l'outil génère une configuration du mécanisme en quantifiant aléatoirement toutes les caractéristiques des pièces en considérant leur loi statistique de distribution. Une fois cette configuration connue, l'outil vérifie le caractère assemblable du mécanisme à partir des six inéquations exprimées dans les *Équation 26* et *Équation 27*. Il

vérifie également dans quelle configuration extrême se situe le mécanisme et s'il respecte les exigences fonctionnelles. Ces opérations sont répétées de nombreuses fois (environ 10 000 itérations) afin d'obtenir une évaluation des probabilités descriptives de la qualité des produits fabriqués : $P(Ok)$, $P(NonConforme)$ et $P(NonMontable)$.

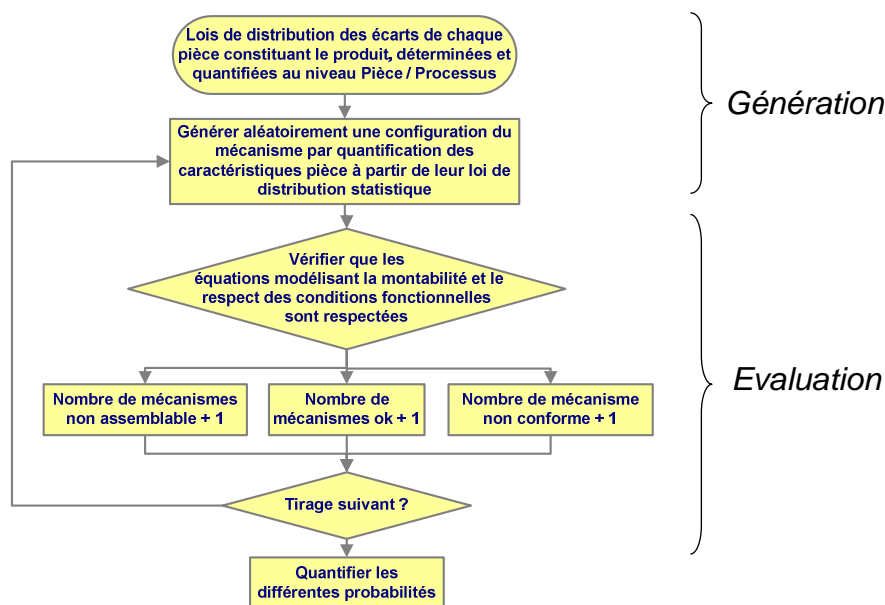


Figure 139 : Simulation de Monte Carlo au niveau Pièce / Produit - Algorithme

2.3.2 Compatibilité de l'ABTA avec une modélisation implicite

Afin de valider d'autres approches que celle implémentée dans l'ABTA, un module informatique a été réalisé dans l'équipe par [Qureshi 2007], afin d'opérationnaliser l'analyse des tolérances à l'aide d'une fonction implicite. Cette analyse est basée sur les relations obtenues avec les quantificateurs \forall et \exists , décrites dans le paragraphe 1.3.2. Ces relations ont dû être adaptées.

Ainsi les relations relatives aux contraintes d'assemblage et aux conditions fonctionnelles ont été modifiées de manière suivante :

Contrainte d'assemblage : Pour tous les écarts admissibles (dans le domaine spécifié), il doit exister une configuration acceptable des jeux, telles que les contraintes de composition et d'interface soient respectées.

Conditions Fonctionnelles : Pour tous les écarts admissibles (dans le domaine spécifié) et pour toutes les configurations acceptables des jeux, il doit exister une configuration acceptable des caractéristiques telles que les contraintes de composition, d'interface et fonctionnelles soient respectées.

A partir de ces nouvelles expressions, l'algorithme développé (Figure 140) repose sur l'approche suivante :

- Une simulation de Monte Carlo sur les écarts de situation et intrinsèques afin d'explorer par tirage le domaine spécifié,
- Pour chaque tirage, la vérification de l'existence d'une solution du vecteur jeu de l'ensemble des contraintes (contraintes de composition – domaine de compatibilité et contraintes d'interface – domaine interface).

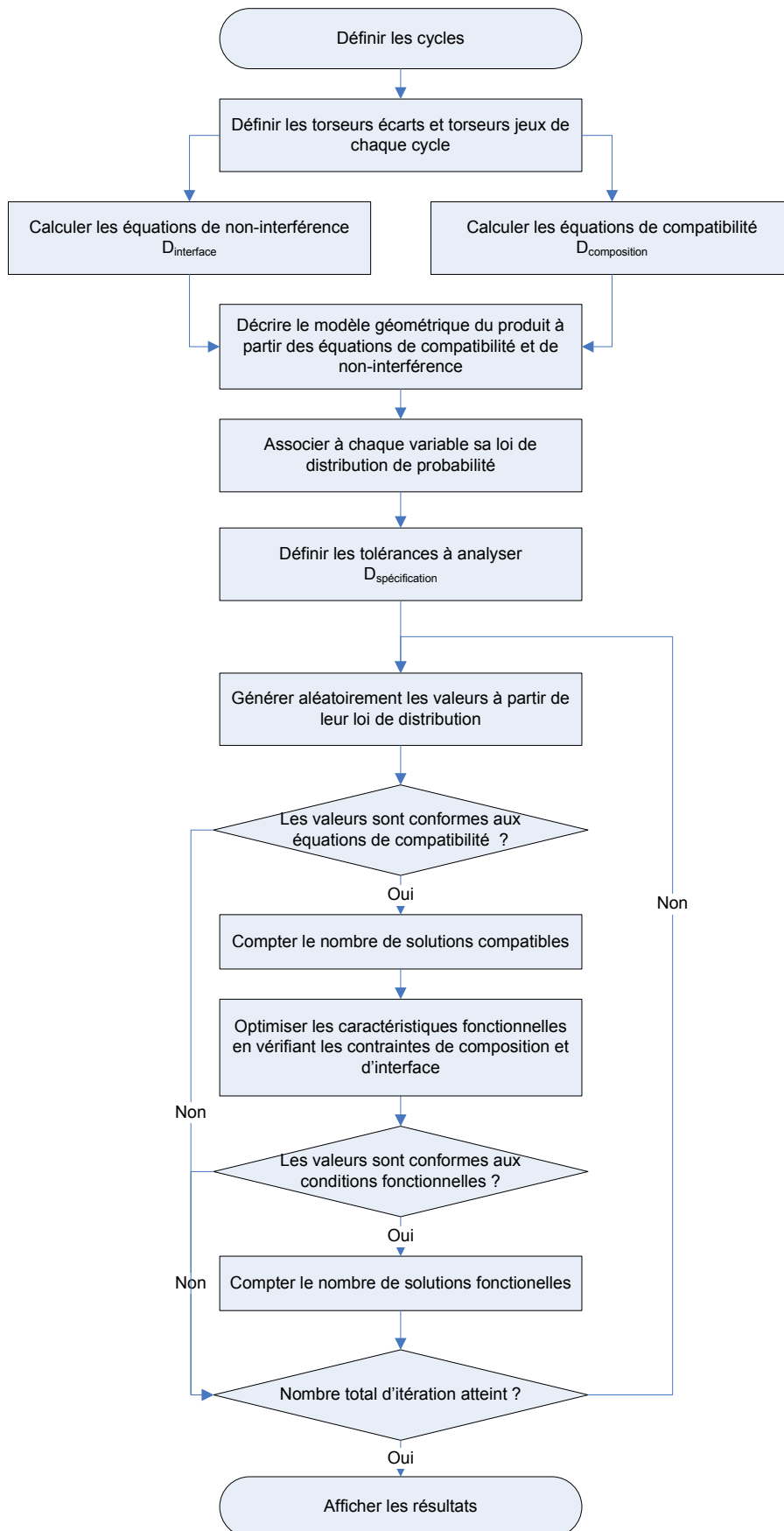


Figure 140 : Algorithme réalisé par [Qureshi 2007]

- Pour chaque tirage, l'optimisation sous contraintes : minimisant ou maximisant les caractéristiques fonctionnelles et vérifiant les contraintes de composition et d'interface afin d'évaluer la valeur de chaque caractéristique fonctionnelle au pire de cas des jeux,
- Pour chaque tirage, la vérification que les caractéristiques fonctionnelles vérifient les contraintes fonctionnelles

2.3.3 Bilan de l'analyse au niveau Pièce / Produit

La Figure 141 propose une synthèse des méthodes employées pour effectuer cette analyse des tolérances au niveau Pièce / Produit, en précisant comment est réalisée l'activité notée ⑤ dans la Figure 116 (à la page 148).

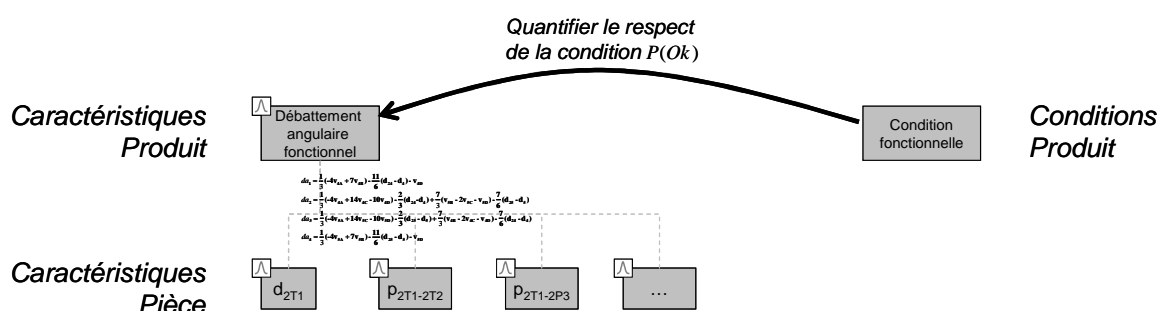


Figure 141 : Synthèse de l'analyse au niveau Pièce / Produit

Cette activité ⑤ consiste à vérifier que les caractéristiques du produit respectent les conditions (fonctionnelles ou d'assemblages) définies par les concepteurs et quantifiées par l'algorithme d'optimisation.

Pour ce faire, les paragraphes précédents précisent la méthode que nous avons employée pour trouver les relations liant les caractéristiques des pièces à celles du produit. A partir de ces équations explicites, l'approche ABTA estime les caractéristiques du produit en les simulant par Monte Carlo. Cette activité de vérification se conclut par la quantification du respect de l'ensemble des contraintes en estimant les trois probabilités $P(Ok)$, $P(NonConforme)$ et $P(NonMontable)$ qui représentent la qualité des produits réalisés dans notre indicateur de performance d'une allocation des tolérances : le coût pondéré qualité.

3 Conclusion

A l'instar du chapitre précédent traitant de la sélection du processus, ce chapitre propose un bilan des approches permettant la modélisation du comportement géométrique du produit avec défaut et une analyse des tolérances au niveau Pièce / Processus puis au niveau Pièce / Produit. Cette analyse se focalise sur les méthodes de paramétrage et sur les approches disponibles dans la littérature pour modéliser ce comportement.

Bien que certains choix dans les méthodes employées dans notre implémentation aient dû être opérés afin de valider l'approche ABTA dans sa globalité, l'accent est mis dans ce chapitre sur la modularité de notre outil en soulignant sa compatibilité avec d'autres approches ou méthodes.

En effet, dans le cadre de l'analyse des tolérances au niveau Process / Pièce, qui permet l'identification des variations et une caractérisation des écarts des pièce en fonction des dispersions du processus, il est montré que notre outil est basé sur l'approche des ΔI . Néanmoins il est également démontré que l'approche par activités, de part les informations manipulées, reste compatible avec d'autres approches comme les graphes de phases de S. Tichadou.

Pour l'analyse au niveau Pièce / Produit, l'objectif est de vérifier que le produit fabriqué et dont on connaît les différents écarts, respecte les contraintes d'assemblage et les conditions fonctionnelles. Bien que notre approche repose sur une modélisation explicite du comportement géométrique du produit, ce chapitre s'applique à démontrer, par une opérationnalisation de la méthode, qu'il reste compatible avec une approche basée sur une formalisation implicite.

La réalisation de la maquette informatique permet de valider les choix qui ont été opérés pour la définition de l'approche ABTA pour l'analyse des tolérances de cette dernière sur le cas, certes simple mais complet, du guide de bras de robot.

Conclusions

La problématique de ces travaux de thèse, qui s'inscrivent dans le cadre de la conception intégrée, a été synthétisée en une question, mettant en exergue les points clés qu'elle soulève :

« Comment, de façon **optimale**, **quantifier les bornes des domaines de validité des variations des paramètres géométriques clés Pièce/Produit afin de respecter les exigences définies par l'utilisateur tout en sélectionnant les process de fabrication et les ressources associées dont les variations sont inhérentes** ? »

En conclusion de ce mémoire, il est intéressant de proposer un bilan de nos travaux en détaillant nos contributions en réponse à cette problématique.

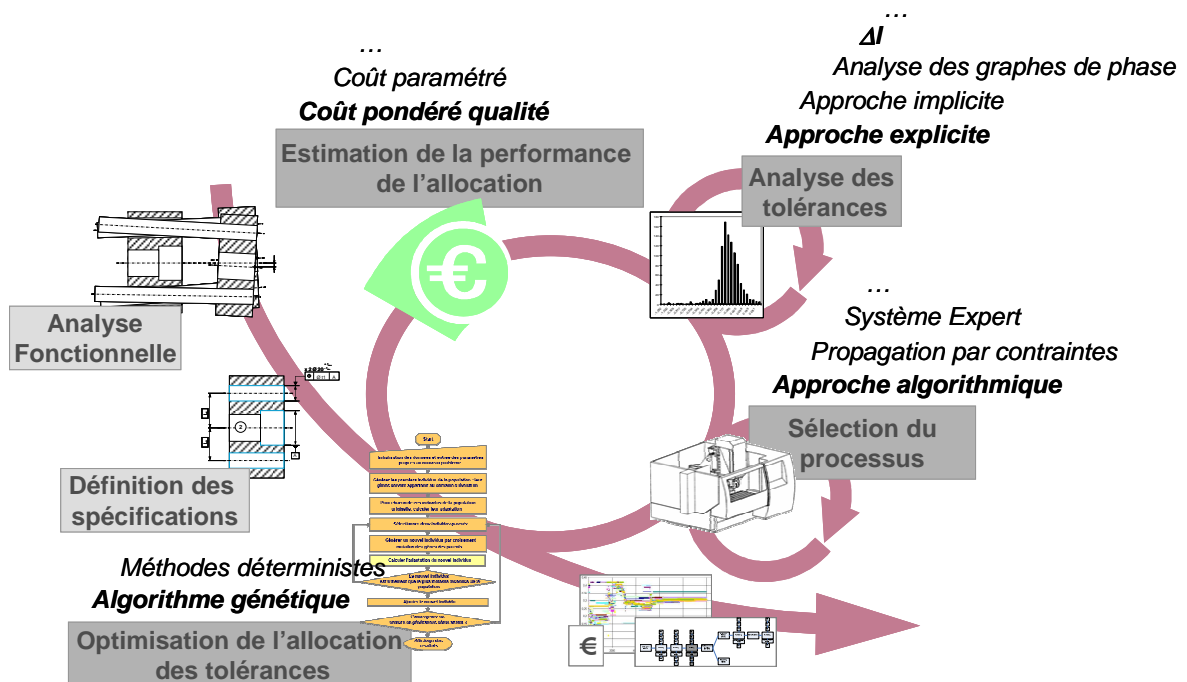


Figure 142 : La démarche ABTA - Bilan des approches et outils

La démarche **Activity Based Tolerance Allocation** (synthétisé dans la figure ci-dessus), que nous avons proposée et validée permet d'optimiser les bornes des domaines d'évolution des variations (autrement dit les tolérances) en identifiant et en analysant les impacts des variations du processus généré. Cette démarche s'appuie sur deux concepts majeurs que nous avons enrichis et développés :

- **L'approche par caractéristiques (Key Characteristic)**. La démarche ABTA s'appuie sur le concept des caractéristiques clés afin de modéliser les variations du produit, de ses composants et de son processus de fabrication qui impactent le coût, la fiabilité et la qualité du produit lorsque celles-ci varient par rapport à leur cible. Nous avons mis en évidence que l'activité de tolérancement, qui a pour objectif de quantifier les bornes d'évolution des variations du produit, peut être supportée par le *Condition Flowdown*. Ce dernier, par sa structure identique au *KC Flowdown*, facilite l'intégration de l'activité de tolérancement en offrant un environnement de

modélisation et d'expression des liens de causalité et de dépendance entre les conditions.

- **L'approche par activités.** Notre approche se base sur la méthode ABC et propose quelques enrichissements pour que celle-ci puisse, en plus de l'estimation des coûts, retourner une évaluation de la qualité et de la fiabilité du produit.

Ainsi aux liens de consommation des ressources et de leurs inducteurs associés, nous proposons d'enrichir la méthode ABC par l'ajout, par exemple, de l'occurrence des activités ou de leur ordre dans le processus d'usinage. Le processus de fabrication est alors modélisé par une liste ordonnée d'activités capables de retourner aussi bien leur coût que les dispersions qu'elles introduisent.

La définition de la méthode ABTA s'accompagne de la définition d'un indicateur de performance d'une allocation de tolérances : le coût pondéré qualité. La définition de cet indicateur se veut non exhaustive et encourage même son enrichissement ou son adaptation au domaine dans lequel il est utilisé. Cet indicateur permet de quantifier une allocation de tolérance en pondérant le coût du produit par sa fiabilité et sa qualité. Il permet alors de comparer deux allocations afin de sélectionner celle proposant le meilleur compromis entre le coût de la fabrication et la fiabilité du produit.

Cette évaluation est importante pour la conception car les tolérances impactent énormément la conception du processus de fabrication, la fabrication et le contrôle du produit. Elle permet alors :

- d'identifier le produit qui satisfait le mieux les objectifs de conception,
- d'aider à la décision et argumenter des choix,
- et de confronter les points de vue métier.

L'ensemble des connaissances et des informations nécessaires au fonctionnement de la démarche ABTA a été modélisé dans plusieurs diagrammes de classes UML. Néanmoins cette modélisation n'a pas été réalisée dans un environnement logiciel permettant de vérifier la cohérence des modèles proposés, et la navigation entre ceux-ci. Qui plus est, ces modèles ne proposent qu'une vision du problème et ne se veulent en aucun cas exhaustifs. Néanmoins la validité de ces derniers a pu être vérifiée lors de la réalisation des diverses maquettes logicielles (base de données objets, outils de sélection de processus ou d'analyse des tolérances programmés en langage objet) basées sur ces modèles.

Afin d'opérationnaliser et de valider cette approche, des maquettes logicielles ont été développées validant ainsi l'emploi de l'approche ABTA pour l'optimisation des tolérances géométriques dans le cadre d'une production de pièces uniquement usinées. Au fil de ce mémoire un accent particulier a été mis sur le soin apporté à la compatibilité de l'approche et des maquettes logicielles avec un maximum de méthodes et d'outils.

Ainsi bien que la sélection de processus s'opère par une approche algorithmique basée sur la propagation de contraintes, d'autres approches telles que le système expert ont été analysées et validées. De même d'autres approches que celle retenue pour l'analyse des tolérances ont été à la fois étudiées et implémentées.

Ce n'est pas toujours la meilleure solution qui a été retenue. En effet c'est la contrainte d'intégration de l'outil à l'approche globale qui fut notre critère principal de sélection parmi l'ensemble des solutions validées.

L'emploi de ce type d'approche assez complexe et gourmande en connaissance, informations et développements, soulève une nouvelle interrogation. Ce n'est plus un

unique équilibre entre la performance fonctionnelle du produit et le coût de production qu'il faut trouver ou quantifier mais bel et bien un double équilibre entre :

- le compromis qualité du produit / coût de production d'un côté,
- le compromis qualité de l'optimum trouvé / coût de calcul des indicateurs.

Bien que notre approche propose une solution pour trouver le premier compromis entre le coût et la qualité du produit, le second type de compromis n'a pas vraiment été pris en considération. Ce ne sont que des convictions et non pas des données quantifiées qui nous permettent d'affirmer que l'approche ABTA, malgré le temps de travail préparatoire important, reste une solution efficace qui permet de proposer des produits de qualité au moins équivalente à des coûts moindres.

Ce reproche de temps préparatoire est inhérent à l'approche analytique, et n'est pas limité à ce type d'approche ; par exemple les outils actuels dits de costing (d'estimation des coûts) nécessitent le même type de traitements et de besoins. Néanmoins dans le cas d'une utilisation par une entreprise « classique » (car travaillent dans un ou plusieurs domaines d'expertises bien ciblés, avec des habitudes dans l'emploi de certaines méthodes et ressources) ce temps de formalisation des connaissances expertes, des ressources et moyen, doit être vu comme un investissement car il ne doit être effectué une unique fois ! Seule la définition géométrique du produit et la description explicite du comportement géométrique de ce dernier doit être réalisée à chaque nouveau cas traité, les connaissances formalisées sont quant à elles réutilisées.

Des travaux effectués au sein du laboratoire sur une version simplifiée du coût pondéré qualité ont évalué, que pour une qualité identique, la différence de coût entre une allocation des tolérances basées sur un algorithme d'optimisation reposant sur une analyse du comportement implicite et une allocation au pire des cas (restrictive) va du simple au double.

L'étape suivante reviendra alors à trouver un moyen de quantifier l'intérêt d'une approche d'optimisation en fonction des besoins qu'elle nécessite.

Qui plus est, notre indicateur de performance (le coût pondéré qualité) se base uniquement sur une analyse géométrique du produit. Le processus de conception n'est pas monocritère ; il doit prendre en compte beaucoup plus de paramètres, comme par exemple les matériaux, les sollicitations mécaniques, voir la qualité perçue. Il peut être intéressant dans de futures recherches de modifier notre approche purement monocritère en intégrant d'autres contraintes.

De même, l'unique activité effectuant le contrôle dans l'approche ABTA effectue un contrôle de conformité sur l'ensemble des pièces. Le volet mesure / contrôle doit en effet être étoffé en prenant en compte plus particulièrement les besoins et les connaissances liées au contrôle. Dans quel cas employer telle méthode de mesure ? Quelle est la précision de telle machine de contrôle ? Ce sont des exemples de questions et de connaissances qui doivent être intégrées à l'approche pour plus de précision. Il pourrait être ainsi envisagé des travaux sur l'optimisation du processus de suivi de fabrication et de contrôle de conformité.

Bibliographie

- [Abdel 1996] L. Abel-Maleck, N. Asadathorn, *An analytical approach to process planning with rework option*, International journal of production economics, 46-47, 1996, pp. 511-520.
- [Akao 2004] Y. Akao, *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*, Productivity Press, 2004, ISBN: 978-1-56327-313-1, disponible en accès limité sur <http://books.google.com>.
- [Anselmetti 1994] B. Anselmetti, *Génération automatique de gammes de tournage et contribution à la gestion d'une cellule de production*, Habilitation à Diriger la Recherche, Université Henri Poincaré, 1994.
- [Anselmetti 2005] B. Anselmetti and H. Louati, *Generation of manufacturing tolerancing with ISO standards*, International Journal of Machine tools and Manufacture, 45, 2005, pp. 1124-1131.
- [Anselmetti 2006] B. Anselmetti, *Generation of functional tolerancing on positioning features*, Computer-Aided Design, 38, 2006, pp.902-919.
- [Anselmetti 2007] B. Anselmetti, *CLIC : Une méthode pour la spécification géométrique des produits*, chapitre du livre *Tolérancement géométrique des produits*, éditions Lavoisier, 2007, pp.221-246.
- [Antoniadis 1992] A. Antoniadis, J. Berruyer et R. Carmora, *Régression non linéaire et applications*, Economica, 1992.
- [Anwer 2000] N. Anwer, *Méthodologie d'analyse de raisonnement pour la génération automatique des gammes d'usinage en fraisage, Contribution à la caractérisation des entités par analyse des contraintes d'usinabilité*, ENS de Cachan, 2000.
- [Ballot 1995] E. Ballot, *Lois de comportement géométrique des mécanismes pour le tolérancement*, Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 1995.
- [Ballu 1999] A. Ballu and L. Mathieu, *Choice of functional specifications using graphs within the framework of education*, Proceeding of the 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 22-24 March 1999, pp. 197-206.
- [Ballu 2000] A. Ballu, L. Mathieu, *Statistical tolerancing of hyperstatic mechanisms using FORM SORM method*, Proceeding of MMR2000, Mathematical methods in reliability, France , 2000.
- [Ballu 2001] A. Ballu, L. Mathieu, J.Y. Dantan, *Global view of geometrical specifications*, 7th CIRP International seminar on computer aided tolerancing, ENS de Cachan, France, 24-25 April, 2001, pp. 19-30.
- [Ballu 2005] A. Ballu, D. Teissandier et L. Mathieu, *Cotation à l'aide des graphes le long du cycle de conception*, Journée thématique AIP-

- PRIMECA, Tolérancement le long du cycle de vie du produit, organisé le 23 septembre 2005 à l'ENS de Cachan.
- [Ben Younes 1994] J. Ben Younes, *Modélisation des ressources en fabrication mécanique application au choix des outils coupants dans un environnement orienté objet*, Ecole Centrale Paris, 1994
- [Berliner 1988] C. Berliner, J.A. Brimson, *Cost management for today's advanced manufacturing*, Chapitre du livre : The CAM.I. Conceptual Design, Harvard Business School Press, 1988.
- [Bernard 2002] A. Bernard (sous la direction de), *FAO, IC2 Productique - Information - Commande - Communication*, Hermès Science Publications, 2002, ISBN : 2-7462-0618-8.
- [Bescos 1994] P.-L. Bescos, C. Mendoza, *Le management de la performance*, Editions comptables Malesherbes, Paris, 1994.
- [Bescos 2001] P.-L. Bescos, E. Cauvin, M. Gosselin, T. Yoshikawa, *La mise en oeuvre de la méthode ABC/ABM au Canada, en France et au Japon. Etude comparative*, Communication au congrès annuel de l'Association Française de Comptabilité, Metz, 2001
- [Bhide 2001] S. Bhide, J.K. Davidson, J.J. Shah, *A real Coordinates: The basis of a Mathematical Model for Geometric Tolerances*, Proceeding of the 7th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, 24-25 April 2001, ENS de Cachan, France, pp. 83-92.
- [Boeing 1992] Boeing commercial airplane group, *Key characteristics: the first step to advance quality*, Report #D6-55596 TN, USA, 1992.
- [Bohez 2002] E. Bohez, *Five axis milling machine tool cinematic chain design and analysis*, International Journal of Machine Tool and Manufacture, 42 (4), 2002, pp. 505-520.
- [Boothroyd 1994] G. Boothroyd, P. Dewhurst, W. Knight, *Production Design for Manufacture and Assembly*, Marcel Dekker Inc., 1994, ISBN : 0-8247-9176-2
- [Bourdet 1975] P. Bourdet, *Chaîne de cotes de fabrication : deuxième partie, le mode opératoire*, L'ingénieur et le technicien de l'enseignement, Mai 1975.
- [Bourdet 1976] P. Bourdet, A. Clément, *Controlling a complex surface with a 3 axis Measuring Machine*, Annals of the CIRP, Manufacturing Technology, 25, 1976.
- [Bourdet 1995] P. Bourdet, E. Ballot, *Geometrical behavior laws for computer aided tolerancing*, proceeding of the 4th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Tokyo, Japan, 1995.
- [Bourdet 2007] P. Bourdet, F. Thiébaud, G. Cid, *Ecriture formelle des « chaînes de cotes 3D »*, chapitre du livre *Tolérancement géométrique des produits*, éditions Lavoisier, 2007, pp.137-159.
- [Bourdichon 1994] P. Bourdichon, *L'ingénierie simultanée et la gestion d'informations*, Hermès, 1994, ISBN : 2-86601-404-9.

-
- [Bourdon 2005] M. Bourdon, *Opérationnalisation de l'entité coût par connexion d'une ontologie avec un système expert*, rapport interne, ENSAM de Metz.
- [Brissaud 1992] D. Brissaud, *Système de génération automatique de gammes d'usinage pour les industries manufacturières*, Université J. Fourier - Grenoble I, 1992.
- [Brissaud 1998] D. Brissaud, P. Martin, *Process planning from automation to integration*, 9th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 24-26 Juin 1998, Nancy, France.
- [Bruyère 2006] J. Bruyère, *Contribution à l'optimisation de la conception des engrenages coniques à denture droite. Analyse et synthèse de la géométrie et des tolérances*, thèse de doctorat ENSAM, Décembre 2006.
- [Caulier 1994] P. Caulier and B. Houriez, *Knowledge acquisition and case based reasoning for a case base incident diagnosis and solving system*, Pergamon, Baden Baden, Germany, 27-29 September 1994, pp 149-154.
- [Cavalieri 2004] S. Cavalieri, P. Maccarrone, R. Pinto, *Parametric vs. neural network models for the estimation of production costs: A case of study in the automotive industry*, international journal of production economics, 91, 2004, pp.165-177.
- [Cerny 1985] V. Cerny, *Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm*, Journal of Optimization Theory and Applications, 45, 1985, pp.41-51.
- [Chang 1990] T.C. Chang, *Expert process planning for manufacturing*, edition Addison-Wesley, ISBN 0-201-18297-1, USA, 1990.
- [Charpentier 2005] F. Charpentier et L. Mathieu, *L'analyse fonctionnelle technique, une solution pour la recherche des conditions fonctionnelles géométriques*, Journée thématique AIP-PRIMECA, Tolérancement le long du cycle de vie du produit, 23 septembre 2005, ENS de Cachan.
- [Chelouah 1999] R. Chelouah, *Adaptation aux problèmes à variables continues de plusieurs métaheuristiques d'optimisation combinatoire : la méthode tabou, les algorithmes génétiques et les méthodes hybrides - Application en contrôle non destructif*, thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, 1999.
- [Chen 2001] J.A. Chen and J.O. Chen, *QFD-Based Technical Textbook: Evaluation procedure and case study*, 18 (1), 2002, <http://www.nait.com>.
- [Chase 1989] K.W. Chase, W.H. Greenwood, *Design issue in mechanical tolerance design*, ASME, 1(1), 1988, pp.50-59.
- [Clément 1995] A. Clément, A. Riviere, P. Serre, *A declarative Information Model for Functional Requirements*, Proceeding of the 4th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Tokyo, Japan, 1995, pp. 1-25.

- [Clozel 2007] P. Clozel et P.A. Rance, *MECAmaster : un outil de simulation des assemblages dès la conception préliminaire, approche industrielle*, chapitre du livre *Tolérance géométrique des produits*, éditions Lavoisier, 2007, pp.247-278.
- [Cunningham 1988] J.J. Cunningham, J.R. Dixon, *Designing with Features: the Origin of Features*, Proceedings of the ASME Symposium on Computers in Engineering (CIE), July 1988, San Francisco, California, pp. 237-243.
- [Dantan 1999] J.Y. Dantan, A Ballu, *Functional and product specification by gauge with Internal Mobilities*, Proceeding of the CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, University of Twente, Netherlands, March 1999.
- [Dantan 2000] J.Y. Dantan, *Synthèse des spécifications géométriques, modélisation par Calibre à Mobilités Internes*, thèse de l'ENS de Cachan, 2000.
- [Dantan 2005] J.Y. Dantan, T. Landmann, A. Siadat, P. Martin, *Information modelling to manage tolerances during the product and process design*, 9th CIRP seminar on Computer Aided Tolerancing, Arizona, USA, 2005.
- [Dantan 2005b] J.Y. Dantan, L. Mathieu, A. Ballu and P. Martin, *Tolerance synthesis : quantifier notion and virtual boundary*, Computer Aided Design, 37, 2005, pp. 231-240.
- [Dantan 2006a] J.Y. Dantan, A. Ballu et L. Mathieu, *Modelling and Management of geometrical specifications*, soumis à Computer Aided Design, oct 2006.
- [Dantan 2006b] J.Y. Dantan, F. Wu, A. Etienne, J. Bruyère, A. Siadat, P. Martin, *Tolérance et conception intégrée*, chapitre du livre : *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*, sous la direction de L. Roucoules, B. Yanou, B. Eynard, Lavoisier, ISBN : 2-7462-1214-5, février 2006.
- [Darwin 1859] C. Darwin, *L'Origine des espèces*, Londres, 1859.
- [Descotte 1981] Y. Descotte, J.C. Latombe, *GARI : A problem solver that plans how to machine mechanical parts*, Proceeding of the 7th International Joint Conference on AI, Vancouver, Canada.
- [Desrochers 2001] A. Descrochers et L. Laperrière, *Framework proposal for a modular approach to tolerancing*, 7th CIRP International seminar on computer aided tolerancing, ENS de Cachan, France, 24-25 April, 2001, pp. 93-102.
- [Diaz 2007] D. Diaz, *Site officiel de ressources GNU-PROLOG*, Accessible à l'adresse : <http://www.gprolog.org/>, Dernière consultation : 2 Juillet 2007.
- [Diplaris 2000] S.C. Diplaris, M.M. Sfantsikopoulos, *Cost-Tolerance Function. A New Approach for Cost Optimum Machining Accuracy*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16, 2000, pp. 32-38.

-
- [Dufaure 2004] J. Dufaure, D. Teissandier and G. Debarbouille, *Product Model dedicated to collaborative design: A geometric tolerancing point of view*, Proceeding of IDMME, Bath, UK, 2004.
- [Duverlie 1999] P. Duverlie and M. Castelain, *Cost estimation during design step: Parametric method versus case based reasoning*, International journal of advanced manufacturing technology, 15, 1999, pp. 895-906.
- [Edleman 1998] J. Edleman, *Key Characteristics: Strategic, Business and Supplier Issues*, 2nd MIT Key Characteristics Symposium, Kennedy Space Center, Florida, 1998.
- [Elmaraghy 1993] H.A. Elmaraghy, W.H. Elmaraghy, *A system for modelling geometric tolerances for mechanical design*, Proceeding of the Third CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Cachan, France, pp.11-24.
- [Etienne 2003] A. Etienne, F. Langlet, *Formalisation et traitement des données et des connaissances dans la perspective d'automatiser la conception des processus d'usinage des entités axiales.*, rapport interne, ENSAM de Metz, 2003.
- [Etienne 2004] A. Etienne, J.Y. Dantan, A. Siadat, A. D'Acunto, P. Martin, *Data model for CAPP systems to manage Key Characteristics variations*, Machine engineering, 4(1 & 2), 2004, pp. 107-115.
- [Etienne 2006] A. Etienne, J.Y. Dantan, A. Siadat, P. Martin, *An improved approach for automatic process plan generation of complex boring*, Computers in industry, 57 (7), 2006, pp. 663-675.
- [Etienne 2007] A. Etienne, *Espace SourceForge pour l'outil TolOptimizer*, Accessible à l'adresse : <http://sourceforge.net/projects/toloptimizer/>, Dernière consultation : 26 juin 2007.
- [Fang 2003] S.C. Fang, S. Ilker Birbil, *An Electromagnetism-like Mechanism for Global Optimization*, Journal of Global Optimization, 25, 2003, pp.263-282.
- [Farineau 2001] T. Farineau, B. Rabenasolo, J.M. Castelain, Y. Meyer and P. Duverlie, *Use of parametric models in an economic evaluation step during the design phase*, International journal of advanced manufacturing technology, 17, 2001, pp. 79-86.
- [Feng 1996] C.X. Feng, A. Kusiak, C.C. Huang, *Cost evaluation in design with form features*, Computer aided design, Elsevier science ldt., 28(11), 1996, pp. 879-885.
- [Feng 1999] S.C. Feng, W.W. Nederbragt, S. Kaing, R.D. Sriram, *Incorporating process planning into conceptual design*, The 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, 12-15 September, Las Vegas, Nevada, 1999.
- [Feng 2000] S.C. Feng and E.Y. Song, *Information modelling of conceptual design integrated with process planning*, proceedings of Symposia on design for manufacturability, the 2000 international mechanical
-

- engineering congress and exposition, 5-10 November 2000, Orlando, Florida.
- [FMEA 2007] <http://www.fmeainfocentre.com/>, dernière visite le 3 Avril 2007.
- [Fouet 1979] J.M. Fouet, *Conception par ordinateur de mécanismes à une boucle*, Thèse de 3^{ème} cycle, Paris Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 6 juin 1979.
- [Freyd 1996] D. Freyd, K. Otto, *The Process Capability Matrix: A Tool for Manufacturing Variation Analysis at the System Level*, Proceedings of ASME Design Theory and Methodology Conference, USA, 1996.
- [GAMA 1990] Groupe GAMA, *La gamme automatique en usinage*, recueil de textes du séminaire GAMA réunis par P. Bourdet et F. Villeneuve, Editions Hermès, 1990, ISBN 2-86601-255-0.
- [Gao 2000] J.X. Gao, Y.S. Tang and R. Sharma, *A feature model editor and process planning system for sheet metal products*, Journal of Materials Processing Technology n°107, 2000, pp. 88-95.
- [Gaudemer 2006] G. Gaudemer, *Comparaison des Algorithmes Génétiques pour l'Allocation de tolérances*, rapport interne, ENSAM Metz.
- [Gaunet 1993] D. Gaunet, *Vectorial tolerancing model*, Proceeding of the 3rd CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, 27-28 Avril, Cachan, France, 1993.
- [Gilson 1999] J.F. Gilson, *Globalization of the Design for Manufacturability / Assembly Process within the Automotive Wiring Assembly Business*, International Congress and Exposition, March 1-4, Detroit, Michigan, 1999.
- [Giacometti 1990] F. Giacometti, T.C. Chang, *Object-Oriented Design for Modelling Parts, Assemblies and Tolerances*, Proceeding of the Technology of Object-Oriented Languages and Systems (TOOLS), Paris, France, 1990, pp. 243-255.
- [Giordano 1993] M. Giordano, D. Duret, *Clearance space and deviation space, application to the three dimensional chain of dimensions and positions*, Proceeding of the CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, ENS de Cachan, France, 1993.
- [Giordano 2005] M. Giordano, *Analyse et synthèse de tolérances par le modèle des domaines jeux et écarts*, Journée Thématique AIP PRIMECA : Tolérancement le long du cycle de vie du produit, ENS de Cachan, France, le 23 Septembre 2005.
- [Giordano 2007] M. Giordano, E. Pairel, S. Samper, *Analyse et synthèse de tolérances : méthode des domaines*, Chapitre du livre *Tolérancement géométrique des produits*, Editions Lavoisier, 2007, pp. 161-192.
- [Glover 1986] F. Glover, *Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence*, Computers and Operations Research, 13 (5), 1986, pp.533-549.
- [GM 1996] General Motors Corporation, *Key characteristics Designation System: Reference Manual*, GM 1805 QN, 1996.

-
- [Goldberg 1989] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [Guo 1999] T. Guo, *A new evolutionary algorithm for function optimization*, Communication on Applied Mathematics and Computation, Wuhan University, 4 (4), 1999, pp.409-414.
- [Gupta 2003] M. Gupta and K. Galloway, *Activity based costing and management and its implications on operations management*, Technovation, Elsevier science ltd., 23(3), 2003, pp. 131-138.
- [Hansen 1986] P. Hansen, *The Steepest Ascent Mildest Descent Heuristic for Combinatorial Programming*, Communication at the Congress on Numerical Methods in Combinatorial Programming, Capri, Italy, 1986.
- [Hassan 2007] A. Hassan, J.Y. Dantan, A. Siadat, *Information modelling for variation risk management during product and process design*, International Journal of Productivity and Quality Management, 2 (2), 2007, pp. 221-240.
- [H'Mida 2002] F. H'Mida, *Contribution à l'estimation des coûts de production mécanique : approche entité coût appliquée à un contexte d'ingénierie intégrée*, Thèse de doctorat de l'Université de Metz, 2002.
- [H'Mida 2006] F. H'Mida, P. Martin, F. Vernadat, *Cost estimation in mechanical production: The Cost Entity approach applied to integrated product engineering*, International Journal of Production Economics, 103, 2006, pp. 17-35.
- [Holland 1975] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
- [Hong 2002] Y.S. Hong and T.C. Chang, *A comprehensive review of tolerancing research*, International Journal of Production Research, 40(11), 2002, pp. 2425-2459
- [Hooke 1961] R. Hooke, T. Jeeves, *Direct search solution of numerical and statistical problems*, J.A.C.M, 8, 1961, pp.212-229.
- [Houin 2005] X. Houin, *Estimation du coût et Conceptual Process Planning*, rapport interne, ENSAM de Metz.
- [Humienny 2007] Z. Humienny, *State of art in standardization in GPS area*, Proceeding of 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, March 21st - 23rd 2007, Erlangen, Germany, on CD-Rom.
- [ISO/TC213 2007] <http://www.iso.org>, dernière visite le 28 Mars 2007.
- [Jiménez 1995] A. Jiménez, *Les devis en fabrication mécanique, méthodes et outils informatiques pour la détermination des temps*, Travail et méthodes, 521, 1995, pp.15-25.
- [Johnson 1987] H.T. Johnson and R.S. Kaplan, *Relevance cost: the rise and fall of management accounting*, Harvard business school press, 1987.

- [Joskowicz 1997] L. Joskowicz, E Sacks, V. Srinivasan, *Kinematic tolerance analysis*, Computer Aided Design, 29 (2), 1997, pp. 147-157.
- [Kirkpatrick 1983] S. Kirkpatrick, C.D. Gellat, M.P. Vecchi, *Optimization by simulated annealing*, Science, 220 (4598), 1983, pp. 671-680.
- [Kim 2004] G.H. Kim, S.H. An and K.I. Kang, *Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning.* Building and environment, 39, 2004, pp.1235-1242.
- [Kindsay 1967] R.K. Kindsay, B.G. Buchanan, E.A Feigenbaum, J. Lederberg, *DENDRAL: a case study of the first expert system for scientific hypothesis formation*, Artificial intelligence, 61 (2), 1967, pp.209-261.
- [Labrousse 2004] M. Labrousse, *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise*, Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004.
- [Lefebvre 2001] A. Lefebvre, *Méthodologie et outils de capitalisation des connaissances métier pour l'élaboration de gammes d'usinage : application à l'usinage de culasses automobiles*, IFMA et l'Université Blaise Pascal, 2001.
- [Lignon 2002] D. Lignon, F. Mazat-Gastarriet, *Méthodes numériques et Géométrie*, 2002.
- [Liorzou 1976] A. Liourzou, *Initiation pratique à la statistique*, Editions Eyrolles, 1976.
- [Löf 2005] J. Löf, T. Hermansson, R. Söderberg, *An efficient solution to discrete least-cost tolerance allocation with general loss functions*, Proceeding of 9th CIRP seminar on Computer Aided Tolerancing, Arizona, USA, 2005.
- [Marguet 2001] B. Marguet, *Contribution à l'analyse des variations géométriques dans les ensembles structuraux en aéronautique : Démarche et Outils*, thèse de doctorat de l'ENS de Cachan, 2001.
- [Martin 2005] P. Martin, *Some aspects of integrated product and manufacturing process*, Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Springer, 2005, ISBN 1-4020-3481-4, Editors: Bramley A., Brissaud D., Coutellier D., McMahon C., pp. 215-226.
- [Martin 2006] P. Martin, J.Y. Dantan, A. Siadat, X. Houin, Q. Daniel, *Cost estimation and conceptual process planning*, CIRP Digital Enterprise Technology, 18-20 September, Setubal, Portugal.
- [Mejbri 2005] H. Mejbri, B. Anselmetti, K. Mawussi, *Functional tolerancing of complex mechanisms - Identification and specification of key parts*, Computer and Industrial Engineering, 49,2005, pp.241-265.
- [Mellichamp 1993] A.R. Venkatachalam, J.M. Mellichamp, D.M. Miller, *Automating design for manufacturability through expert systems approaches*, Chapitre du livre Handbook on Concurrent Engineering, Chapman and Hall,1993.

- [Mévellec 1993] P. Mévellec, *Plaidoyer pour une vision française de l'ABC*, Revue Française de Comptabilité, décembre 1993.
- [Mille 1996] A. Mille, *Invitation au débat : un cadre unifié pour l'adaptation dans le raisonnement à base de cas*, Actes pour le 5^{ème} séminaire français du raisonnement à partir de cas, Lyon, Avril 1996.
- [Minkowski 1896] H. Minkowski, *Geometrie der Zahlen*, Leibnig, Teubner, 1896.
- [Mony 1991] C. Mony, E. Dupinet, A. Bernard, *Un modèle intégré de définition de produit mécanique pour l'usinage et l'obtention des brut préformés*, Actes du 23^{ème} CIRP, Séminaire international sur les systèmes de production, CIM - Conception intégrée en production automatisée, aspects ingénierie, Juin 1991, Nancy, France.
- [Mutel 1988] B. Mutel, *Computer-aided group technology integrated systems*, Annals of the CIRP, 37(1), 1988.
- [Nadeau 2006] J.P. Nadeau, J. Pailhes, *Intégration de l'innovation et des sensations de l'utilisateur en conception préliminaire par le biais de l'analyse fonctionnelle*, Chapitre du livre : *Ingénierie des la conception et cycle de vie des produits*, Lavoisier, 2006, ISBN : 2-7462-1214-5.
- [Nederbragt 1998] W.W. Nederbragt, R. Allen, S.C. Feng, S. Kaing, R.D. Sriram, Y. Zhang, *The NIST Design/Process Planning Integration Project*, Proceeding of AI and Manufacturing Research Planning Workshop, Albuquerque, New Mexico, USA, 1998, pp. 135-139.
- [Nelder 1965] J.A. Nelder, R. Mead, *A simplex method for function minimization*, The Computer Journal, 7, 1965, pp.308-313.
- [Nigham 1995] S.D. Nigham, J.U. Turner, *Review of statistical approaches to tolerance analysis*, Computer Aided Design, 27 (1), 1995, pp. 6-15.
- [Noel 1990] G. Noel, S. Brzakowski, *A la recherche du temps à gagner, Pourquoi la technologie de groupe ?*, La gamme automatique en usinage, GAMA, édition Hermès, Novembre 1990.
- [Palmer 1999] K. Palmer and K.L. Tsui, *A review and interpretations of process capability indices*, Annals of Operations Research, 87, 1999, pp. 31-47.
- [Paris 1995] H. Paris, *Contribution à la conception automatique des gammes d'usinage : le problème du posage et du bridage des pièces*, thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, 1995.
- [Park 2003] S.G. Park, *Knowledge capturing methodology in process planning*, Computer Aided Design, 35, 2003, pp.1109-1117.
- [Pastre. 1984] D. Pastre, *MUSCADET: un système de démonstration automatique de théorèmes utilisant connaissances et méta connaissances en mathématiques*, thèse de l'Université de Paris VI, 1984.
- [Pillay 2003] A. Pillay and J. Wang, *Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning*, Reliability Engineering and System Safety, 79, pp. 69-85.
- [Pillet 1994] M. Pillet, *Appliquer la maîtrise statistique des procédés : (MSP-SPC)*, 4eme édition, Paris, les éditions d'organisation, 1994.

- [Pillet 2005] M. Pillet, P.A. Adragna, *Monographie sur le tolérancement inertiel*, Monographie rédigée dans le cadre d'un projet de recherche INTERREG III « Tolérancement des systèmes assemblés » de l'Union Européenne, 2005.
- [Press 1988] W.H. Press, B.P. Flanery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, *Numerical Recipes in C, The Art of Science Computing*, Cambridge University Press, 1988.
- [Qureshi 2007] J.A. Qureshi, *Quantifier notion integration with 'Tolerance design'*, rapport interne, ENSAM de Metz.
- [Ramaswamy 2005] S. Ramaswamy, *A survey of DFM methods*, Accessible à l'adresse : <http://asudesign.eas.asu.edu/education/MAE540/sanjayweb.htm>, Dernière consultation : 21 Novembre 2006.
- [Riley 2007] G. Riley, *Site de téléchargement et de ressources de CLIPS*, Accessible à l'adresse : <http://www.ghg.net/clips/CLIPS.html>, Dernière consultation : 4 Juin 2007.
- [Risacher 1997] P. Risacher, *Choix de configurations de machines outils pour l'usinage de surfaces complexes*, thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 1997.
- [Roucoules 2006] L. Roucoules, B. Eynard, P. Nowak, A. Skander, *Une approche "au juste nécessaire" de l'intégration métier en conception vers des solutions alternatives innovantes*, Chapitre du livre *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*, Lavoisier, 2006, ISBN : 2-7462-1214-5.
- [Roy 1999] U. Roy and B. Li, *Representation and interpretation of geometric tolerances for polyhedral objects. Size, Orientation and Position tolerances*, *Computer Aided Design*, 31, 1999, pp. 273-285.
- [Sabourin 1995] L. Sabourin, *L'expertise en conception de gammes d'usinage : approche par entités et propagation de contraintes*, thèse de l'ENS de Cachan, 1995.
- [Salomons 1993] O. Salomons, F.J.A.M. Van Houten, H. Kals, *Review of Research in Feature-Based Design*, *Journal of Manufacturing Systems*, 12 (2), 1993, pp. 113-132.
- [Saporta 1978] G. Saporta, *Théories et méthodes de la statistique*, Editions Technip, 1978.
- [Scaravetti 2004] D. Scaravetti, *Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire*, Thèse de l'ENSAM ? 3 décembre 2004.
- [Schmitt 2007] R. Schmitt, C. Behrens, *A statistical method for analyses of Cost - and Risk Optimal Tolerance Allocations based on Assured Input Data*, 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 21st - 23rd March 2007, Erlangen, Germany
- [Skander 2006] A. Skander, *Méthode et modèle DFM pour le choix des procédés et l'intégration des contraintes de fabrication vers l'émergence de la solution produit*, Thèse de l'Université Technologique de Troyes et Compiègne, janvier 2006.

-
- [Skowronski 1997] V.J. Skowronski, J.U. Turner, *Using Monte Carlo variance reduction in statistical tolerance synthesis*, Computer Aided Design, 29 (1), 1997, pp. 63-69.
- [Speckhart 1972] F.H. Speckhart, *Calculation of tolerance based on a minimum cost approach*, Journal of Engineering for Industry, ASME, 94, Mai 1972, pp. 447-453.
- [Spotts 1973] M.F. Spotts, *Allocation of tolerances to minimize cost of assembly*, Journal of Engineering for Industry, ASME, 95, August 1973, pp. 762-764.
- [Srinivasan 1999] V. Srinivasan, *On interpreting Key Characteristics*, Proceeding of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences, September 12-15th, 1999, Las Vegas, Nevada.
- [Lu 1991] S. Subramaniam, S.C. Lu, *the Impact of an AI Based Design Environment for Simultaneous Engineering on Process Planning*, International Journal of Computers in Manufacturing, 4 (2), 1991, pp. 71-82.
- [Suh 1990] N.P. Suh, *The principles of design*, Oxford University Press, New York, 1990.
- [Sun 1995] S.H. Sun and J. L. Chen, *A modular fixture design system based on case based reasoning*, International journal of advanced manufacturing technology, 10, 1995, pp.389-395.
- [Sutherland 1975] G.H. Sutherland and B. Routh, *Mechanism design: Accounting for manufacturing tolerances and costs in function generating problems*, Journal of Engineering for Industry, 97, February 1975, pp. 283-286.
- [Taguchi 1992] G. Taguchi, *Taguchi on robust technology development: bringing quality engineering upstream*, ASME Press, New York, 1992.
- [Teissandier 1999] D. Teissandier, V. Delos, Y. Couetard, *Operations on polytopes: Application to tolerance analysis*, Global Consistency of Tolerances, Proceeding of the 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, 22-24 March 1999, University of Twente, Enschede, The Netherlands, pp. 425-434.
- [Teissandier 1999b] D. Teissandier, Y. Couetard, A. Gérard, *A computer aided tolerancing model: proportioned assembly clearance volume*, Computer Aided Design, 31, 1999, pp.805-817.
- [Thibault 2007] A. Thibault, A. Siadat, R. Bigot, P. Martin, *Proposal for Product Process Integration using Classification and Rules*, EuroCon 2007 (International Conference on Computer as a Tool), 9-12 September 2007, Warsaw, Poland.
- [Thornton 1999] A.C. Thornton, *A mathematical framework for the key characteristic process*, Research in engineering design, 11, 1999, pp.145-157.
- [Thornton 2001] A.C. Thornton, *Optimism versus pessimism: design decisions in the face of process capability uncertainty*, ASME journal of mechanical design, 123 (3), 2001, pp.313-321.
-

- [Thornton 2004] A.C. Thornton, *Variation risk management*, John Wiley and sons editions, Hoboken, New Jersey, 2004.
- [Tichadou 2004] S. Tichadou, O. Legoff and J.Y. Hascoët, *Process planning geometrical simulation: compare approaches between integrated CAD/CAM system and small displacement torsor model*, Proceeding of the IDMME, 5-7th April 2004, Bath, UK.
- [Tichadou 2005] S. Tichadou, *Modélisation et quantification tridimensionnelles des écarts de fabrication pour la simulation d'usinage*, thèse de l'Ecole centrale de Nantes et Université de Nantes, 2005.
- [Tichadou 2007] S. Tichadou, O. Legoff, *Simulation géométrique de fabrication*, chapitre du livre *Tolérancement géométrique des produits*, Editions Lavoisier, 2007.
- [Troussier 2006] N. Troussier, A. Guénand, Z. Cherfi, C. Lemarchand, N. Boudaoud, *Conception robuste : d'une évaluation objective à la maîtrise d'une évaluation subjective de l'idée et du produit dans l'usage*, Chapitre du livre *Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits*, Lavoisier, 2006, ISBN : 2 - 7462-1214-5.
- [Van Houten 1989] F.J.A.M. Van Houten, A.H. Van't Erve, F.J.C.M Jonkers, H. Kals, *PART, a CAPP System with a Flexible Architecture*, Proceeding of the 1st International CIRP Workshop on CAPP, University of Hanover, 1989.
- [Villeneuve 1990] F. Villeneuve, *Génération ascendante d'un processus d'usinage. Proposition d'une formalisation de l'expertise. Application aux entités d'alésages*, thèse de l'Ecole Centrale de Paris, 1990.
- [Villeneuve 2001] F.Villeneuve, O. Legoff and Y. Landon, *Tolerancing for Manufacturing*, A three dimensional model, International Journal of Production Research, 39(8), 2001, pp. 1625-1648.
- [Villeneuve 2005] F. Villeneuve, *Tolérancement de fabrication : de l'approche ΔI à l'analyse et la synthèse 3D*, Journée thématique AIP-PRIMECA, Tolérancement le long du cycle de vie du produit, ENS de Cachan, France, le 23 septembre 2005.
- [Vliet 1999] V.J. Vliet, C. Luffervelt, H. Kals, *State of the art report on design for manufacturing*, Proceedings of ASME design engineering technical conference, DETC99/DFM-8970, Las Vegas, 1999.
- [Waltz 1972] D. Waltz, *Generating semantic descriptions from drawings of scenes with shadows*, MIT Libraries, AITR-271, <http://hdl.handle.net/1721.1/6911>, 1972.
- [Whitney 2004] D. Whitney, *Mechanical Assemblies. Their design, Manufacture and role in Product Development*, Oxford University Press, ISBN: 0195157826, 2004
- [Yannou 1998] B. Yannou, *Les apports de la programmation par contraintes en conception*, Chapitre du livre *Conception de produits mécaniques: méthodes, modèles et outils*, Editions Hermès, 1998, ISBN : 2-86601-694-7.

- [Zimmer 2004]** L. Zimmer, A. Anglada, M. Christie, L. Granvilliers, *Constraint Explorer, A modelling and sizing tool for Engineering Design*, in the 8th World Multi-conference on Systemic, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, USA, 2004.

Annexe - Mode d'emploi de l'application TolOptimizer

Cette partie est un guide simplifié de la maquette logicielle TolOptimizer qui a été développée dans le cadre de ces travaux de thèse afin de valider la démarche ABTA. Cette application ne concrétise pas la totalité de cette démarche car elle est vouée à l'analyse de la performance d'une allocation de tolérance et non pas à son optimisation. Elle valide néanmoins notre approche de sélection de processus de fabrication, l'analyse des tolérances et l'estimation du coût pondéré qualité d'une gamme solution pour une allocation des tolérances donnée. D'autres maquettes ont été réalisées afin de valider l'optimisation des tolérances par l'emploi d'un algorithme génétique. Elles ne sont pas évoquées dans cette annexe.

Cette application est disponible sur le site communautaire de développement SourceForge [Etienne 2007], libre de toutes modifications ou adaptations. L'ensemble du code est documenté ; l'objectif de cette partie n'est donc pas de faire une étude du code développé mais simplement d'expliquer comment utiliser l'application.

En préambule de ce mode d'emploi il est important de préciser que le but de ces travaux de thèse n'est pas le développement d'un logiciel, ce qui peut expliquer que le code de cette maquette informatique ne soit pas optimisé, que certaines fonctionnalités soient limitées ou que certaines parties du code sont inutilisées dans la version détaillée dans ces paragraphes.

1.1. Pré-requis

L'application, codée en VB.net dans l'environnement de développement VisualStudio.net et compilée pour processeur x86 (soit la totalité des postes bureautiques), nécessite pour son fonctionnement que les logiciels suivant soient installés sur la machine :

- Le **framework .net 2.0** ou supérieur, disponible à l'adresse suivante : <http://www.microsoft.com/downloads/details.aspx?FamilyID=0856eacb-4362-4b0d-8edd-aab15c5e04f5&displaylang=fr> est obligatoire pour que le programme compilé puisse s'exécuter.
- Microsoft **Excel**, est nécessaire pour les traitements statistiques,
- Microsoft **Visio** est nécessaire pour l'affichage graphique de la gamme résultante. Cette sortie est facultative car elle s'accompagne d'une sortie sous la forme de fichiers texte.

1.2. Enrichissement des bases de données et de connaissances

1.2.1 Définition du produit

Il est important de préciser que la définition du produit ne peut être effectuée actuellement via l'interface du logiciel. Cette dernière, dont un extrait est donné dans la *Figure 143*, ne permet qu'une consultation des différentes entités constituant les composants du produit.

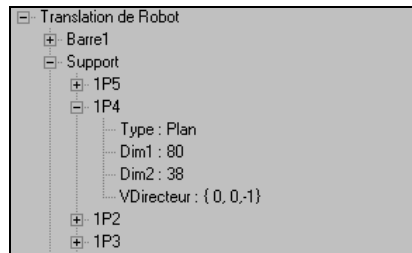


Figure 143 : Description du produit - Extrait de l'interface

En effet, cette maquette logicielle n'ayant comme objectif que la validation de la démarche ABTA, il ne nous a pas semblé nécessaire de proposer un environnement permettant la modification structurelle du produit, du comportement géométrique de ce dernier ou des relations cinématiques. Néanmoins l'application n'est pas dédiée à cet unique exemple et reste modulaire et généralisable : il est alors possible de modifier la pièce analysée en modifiant quelques parties du code.

Les zones à modifier dans le code sont au nombre de trois :

- La définition du produit est stockée dans le fichier XML nommé *DefinitionProduit.xml*. Pour créer un nouveau produit, deux procédures sont disponibles dans le formulaire principal : *ProduitTempo*, qui permet d'instancier les entités, les composants, le produit et leurs relations et *EnregistrerProduit* qui réalise l'enregistrement (la sérialisation) du modèle produit courant.
- Pour modifier l'association des écarts aux composants du produit, il faut modifier le code contenu dans la procédure *GenererGammesFabrications* de la classe *Produit*.
- Pour modifier le comportement géométrique du produit, il faut modifier les procédures *CalculProbaMontable*, *CalculProbaFonctionnel* de la classe *MonteCarlo*. L'ensemble des inéquations sont ainsi réalisées par des boucles conditionnées.

1.2.2 Gestion des ressources

La gestion des ressources permet à l'utilisateur de spécifier à l'application les ressources d'usinage disponibles dans l'entreprise. Ces interfaces sont basées sur la formalisation des connaissances et données exprimée dans le chapitre III de ce mémoire, et sur les concepts d'OSE et de cartes de visite. Ainsi, on peut distinguer trois scénarii de capitalisation.

Le premier scénario correspond à l'ajout ou la modification d'un outil. La *Figure 144* propose une illustration commentée sur la procédure à suivre pour enregistrer un nouvel outil.

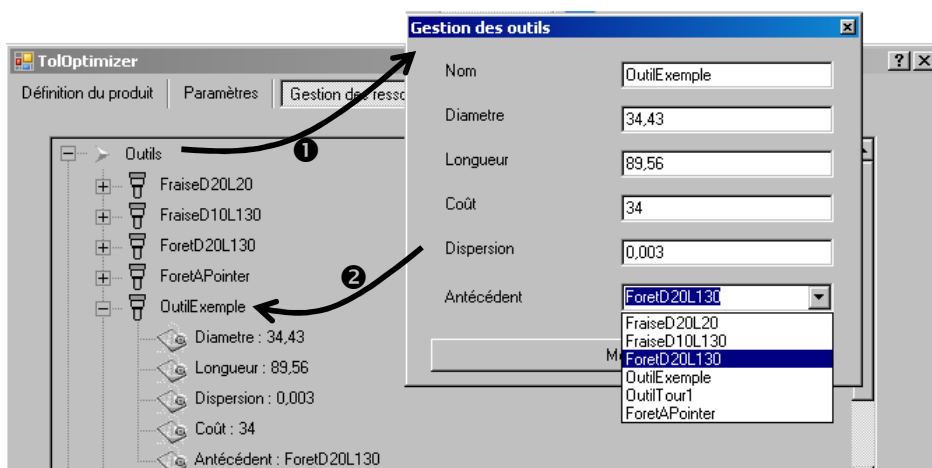


Figure 144 : Gestion des outils - Interface

Pour ce faire, il suffit d'effectuer un clic droit sur le nœud père nommé *Outils* (représenté par la flèche ①). Une nouvelle fenêtre apparaît et propose à l'utilisateur d'exprimer les paramètres jugés discriminants et nécessaires pour notre application. Il est également possible d'exprimer l'outil antécédent en le sélectionnant dans la liste de choix de l'ensemble des outils déjà enregistrés. Il est à noter qu'il n'est possible de désigner qu'un unique outil antécédent. Le résultat obtenu est souligné par la flèche ② : l'ensemble des paramètres sont alors aisément accessibles.

Il est également possible de modifier les paramètres liés à un outil en effectuant un clic droit sur l'outil que l'utilisateur veut modifier.

Le deuxième scénario correspond à l'ajout ou la modification des machines. La procédure à suivre est exactement la même que celle présentée précédemment.

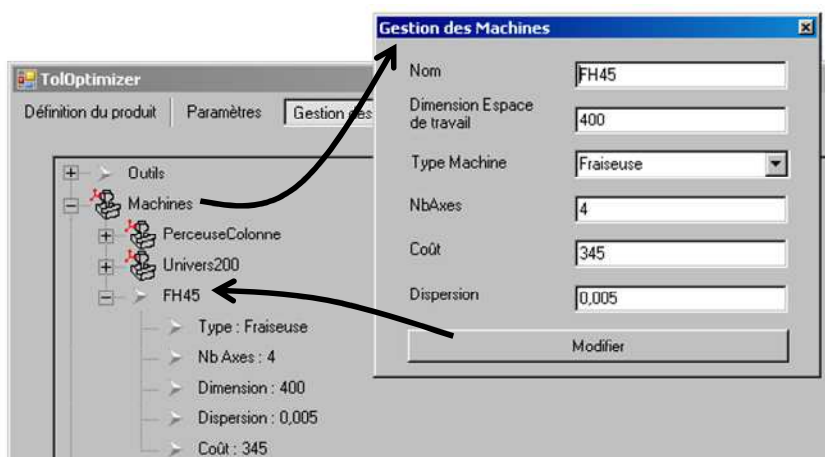


Figure 145 : Gestion des machines

Le dernier scénario correspond à l'ajout et la modification des opérations. Pour cela, l'utilisateur peut ajouter de la même façon que pour les outils ou les machine, une nouvelle opération en cliquant à l'aide du bouton droit de la souris sur le nœud père *OPs*. L'interface demande alors de compléter les informations relatives au nom de l'opération, du nombre d'axes machines nécessaires, le type de travail effectué et le type de surface obtenues.

Une fois cette opération ajoutée à la liste de celles déjà enregistrées, il est nécessaire de définir les couples outils/machine compatibles. Pour cela, il suffit de glisser la ou les machines que l'on juge capable de réaliser cette opération vers l'opération (comme symbolisée par la flèche③). Puis il faut glisser les outils compatibles vers les machines associées à l'opération (flèche④). On obtient ainsi, comme le montre la *Figure 146*, les différents couples outil/machine associés à l'opération.

La modification des règles expertes permettant la sélection du processus de fabrication sont codées directement dans l'application et ne peuvent pas être modifiées via une interface. Si d'autres critères de sélection doivent être employés, il est nécessaire de modifier directement la procédure *RetournerTripletPossible* de la classe d'objet *OP*.

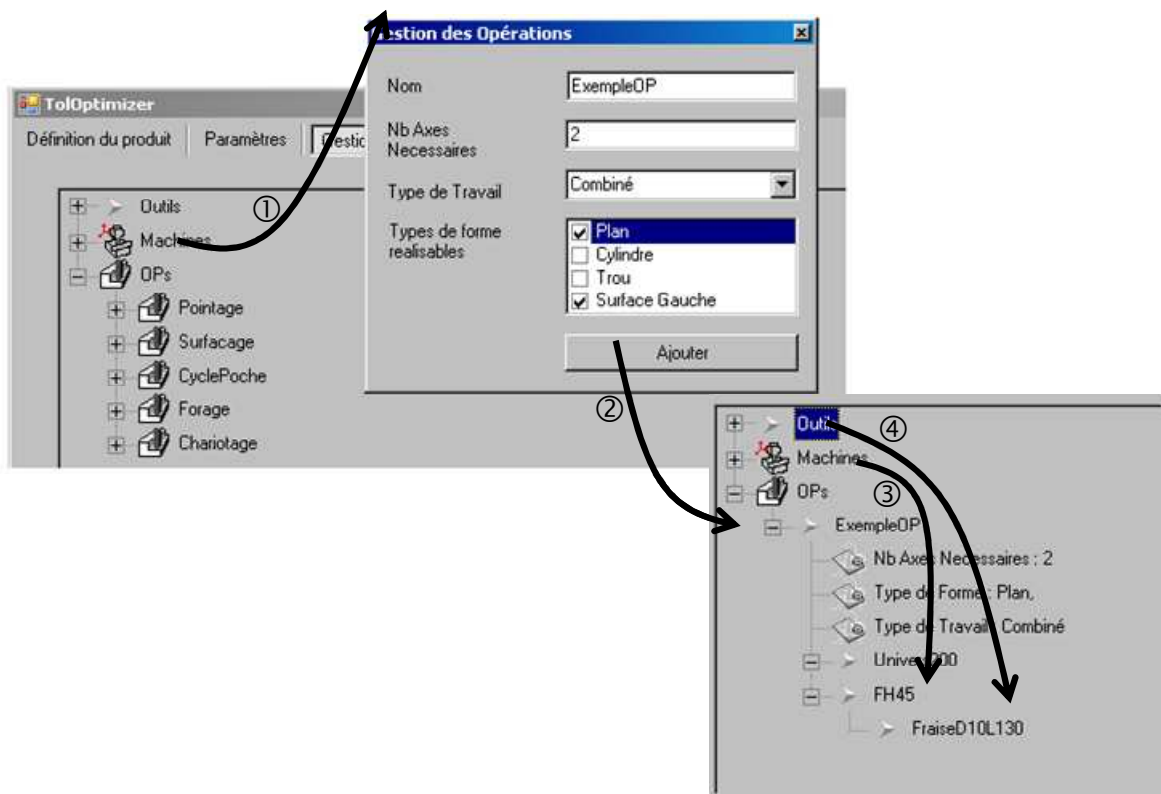


Figure 146 : Gestion des opérations

1.2.3 Gestion des posages – Expression des pré-gammes

Comme explicité dans le Chapitre III, le module de sélection de processus à comme objectif d'enrichir les pré-gammes proposées par les experts gammistes et non pas d'en générer ex-nihilo. Ce paragraphe explicite comment ces experts peuvent proposer leur pré-gammes à l'outil TolOptimizer, et ce, à partir d'un exemple simple.

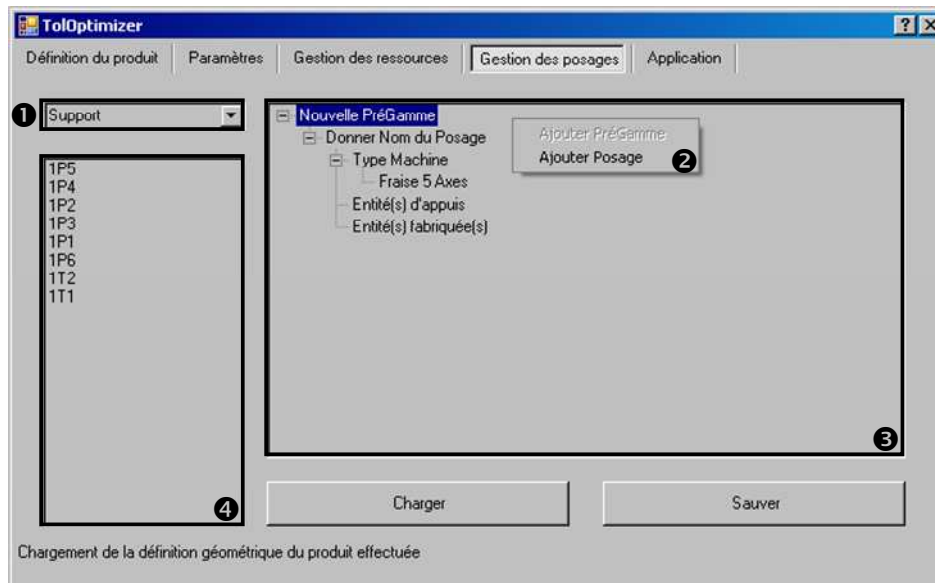


Figure 147 : Interface de proposition de pré-gamme - Etape 1

L'interface est constituée de deux grandes parties :

- à gauche se trouvent les données relatives à la description du produit (les composants sont accessibles dans la liste de choix notée ❶ et les entités géométriques de la pièce sélectionnée apparaissent dans la zone notée ❷ dans la Figure 147),
- à droite se trouve la zone d'expression des pré-gammes (notée ❸).

Le scénario à suivre pour créer une nouvelle pré-gamme est le suivant :

- Dans un premier temps, il suffit de sélectionner la pièce dont on veut proposer une ou plusieurs pré-gammes dans la liste de choix disposée à gauche de l'interface (notée ❶). Les entités géométriques liées à la pièce sélectionnée se mettent à jour dans le contrôle ❷.
- Par un clic droit dans la zone d'expression ❸, un menu flottant (noté ❹ dans la Figure 147) apparaît et propose l'ajout d'une pré-gamme. L'utilisateur peut la renommer comme bon vous semble, à la condition que ce nom ne soit pas déjà employé.
- A partir de ce moment, il est possible d'ajouter autant de phase que l'on désire. Pour ce faire, il suffit de sélectionner la pré-gamme à laquelle l'utilisateur veut ajouter une phase, et de faire apparaître la fenêtre flottante précédente par un clic droit. La phase s'ajoute en pressant la commande *Ajouter Posage*. La structure de la phase est alors ajoutée à la pré-gamme comme le montre la Figure 147.
- L'étape suivante revient à enrichir les informations liées à cette phase, en précisant le type de machine qui doit être employé (par défaut l'application propose une machine de type *Fraiseuse 5 Axes*), les entités participant au posage de la pièce et celles qui sont usinées.

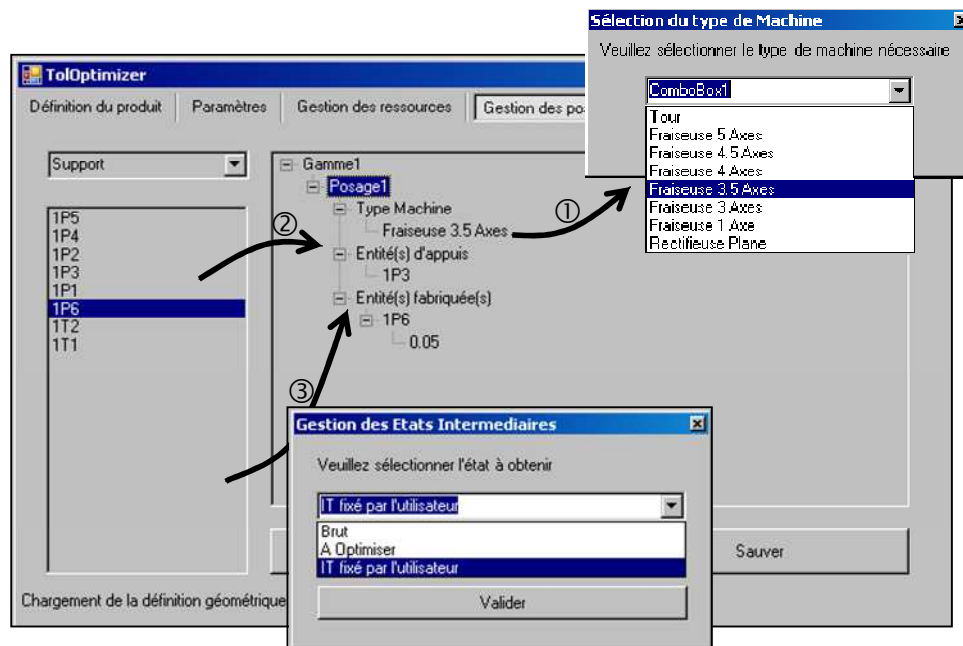


Figure 148 : Interfaces d'expression des pré-gammes - Description d'une phase

Ainsi pour déclarer le type de machine qui doit être employée pour cette phase, il suffit de cliquer sur le type actuel, une fenêtre apparaît (noté ① sur la Figure 148) et propose à l'utilisateur de faire son choix dans une liste prédéfinie.

Pour définir les entités géométriques participant à la mise en position géométrique de la pièce, il suffit de glisser déplacer les entités désirées comme le montre la flèche ②.

La définition des entités usinées dans la phase d'usinage suit le même procédé (comme le montre la flèche ③) à la différence près qu'il est possible de préciser quel est l'intervalle de tolérance que l'utilisateur veut appliquer aux variations intrinsèque de l'entité. L'état dit *Brut*, correspond à un intervalle de tolérance large qui est paramétrable dans l'application. L'option *A Optimiser* n'est pas encore implémentée dans l'outil, elle correspondra aux tolérances que l'application devra optimiser.

Il est à noter qu'il est possible de sauvegarder ou de charger les pré-gammes déjà réalisées. Les données sont ainsi sauvegardées dans le format XML facilitant leur exploitation par d'autres applications.

1.3. Réglages

L'onglet <Paramètres> contient l'ensemble des réglages sur lesquels l'utilisateur peut agir afin de modifier le comportement de l'application. L'ajustement de la sensibilité de l'application s'effectue sur quatre types de paramètres :

- les paramètres liés **aux activités** (dont l'interface est partiellement illustrée dans la Figure 149). Dans notre application, et comme expliqué dans le chapitre IV, la performance d'une activité de production correspond à sa capacité de produire un intervalle de tolérance donné. Afin de limiter le nombre de gammes sélectionnées, et d'éviter les problèmes liés à l'explosion combinatoire, il est possible de fixer un seuil en dessous duquel l'activité de production ne sera pas sélectionnée. De la même façon, il est possible de définir le seuil de performance en dessous duquel l'activité de production doit générer une activité de contrôle de conformité.

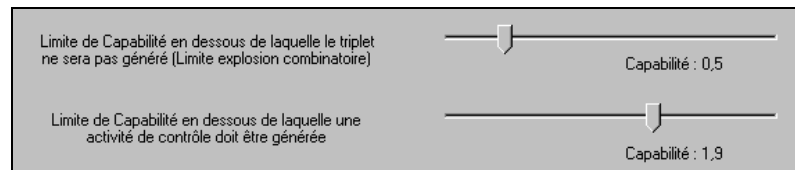


Figure 149 : Les paramètres liés aux activités - Interface

- les paramètres liés à la **simulation de comportement géométrique** (dont l'interface est donnée *Figure 150*). Le chapitre IV précise que l'analyse du comportement géométrique est basée sur l'estimation d'une fonction explicite du comportement à l'aide de simulations de Monte Carlo. Un paramètre essentiel de cette simulation est le nombre d'itérations effectuées : plus le nombre d'itérations est important plus l'estimation est précise. Néanmoins cette précision s'obtient au prix de longs traitements. Puisque nous n'avons pas implémentés d'outils permettant d'optimiser cette évaluation, comme c'est le cas dans la thèse de [Bruyère 2006] par exemple, ce paramètre permet d'adapter ce compromis temps de calcul / précision en fonction des besoins de l'utilisateur.

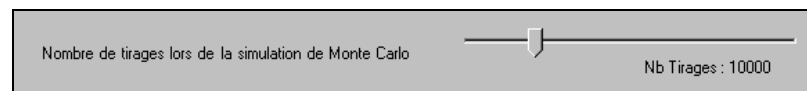


Figure 150 : Les paramètres liés à la simulation du comportement - Interface

- les paramètres liés à **l'identification des écarts** (l'interface est illustrée par la *Figure 151*). Comme expliqué dans le chapitre II et le chapitre IV, les activités dites de « préparation » peuvent introduire des variations de position ou d'orientation. Dans l'application implémentée, cet impact a été simplifié en supposant qu'il est indépendant de la structure du posage. Ainsi peu importe le nombre ou la qualité des entités géométriques participant au posage géométrique, les variations qu'il engendre sont fixées. L'objectif de cette interface est de laisser à l'utilisateur de quantifier ces variations. Deux cas sont ainsi dissociés : les variations introduites par l'activité de changement de posage et celles introduites par les rotations de table de machine outil.

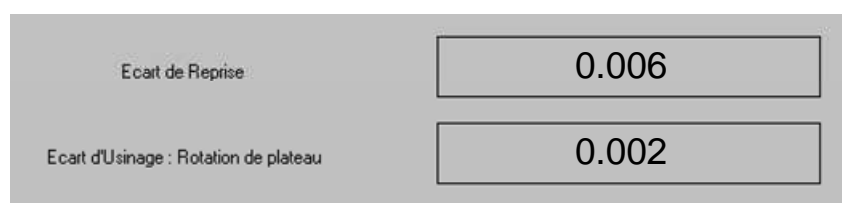


Figure 151 : Les paramètres liés à l'identification des écarts - Interface

- les paramètres liés aux **coûts fixes** (la *Figure 152* propose une illustration de l'interface). Dans la formalisation par activités, donnée dans le Chapitre II, il est clairement expliqué que le coût des activités dépend uniquement des ressources qu'elles consomment. Dans TolOptimizer, la méthode de calcul du coût des activités de changement de posage, de contrôle de conformité et de réassortiment a été simplifiée en considérant que ces coûts sont fixes. L'interface donnée *Figure 152* propose à l'utilisateur de quantifier ces coûts.

Coût d'un changement de pose :	2
Coût d'un contrôle :	5
Coût d'un reassortiment (\$/%) :	1

Figure 152 : Paramètres liés aux coûts fixes

Il est à noter que dans le cas de l'activité de réassortiment, ce coût n'est pas totalement fixe mais linéairement dépendant du rapport de pièces non assemblables.

1.4. Exécution et résultats

Une fois l'ensemble des bases de données complétées, il ne reste plus qu'à définir les conditions fonctionnelles via le dernier onglet de l'interface et de lancer le traitement via le bouton *GO* dans la *Figure 153*.

Condition Fonctionnelle :	-0,94
GO !!!	

Figure 153 : Onglet <Application> - Extrait de l'interface

Après quelques secondes ou plusieurs minutes, suivant les valeurs des paramètres de réglage de l'application et le contenu des bases de données de ressources, l'application génère 10 fichiers.

- Parmi ces fichiers 9 sont des documents textes, comme le montre la *Figure 154*, qui contiennent pour chaque pièce, un suivi des traitements effectués (choix des opérations, raison de l'élimination des ressources inadaptées, calcul du coût) et les gammes solution sélectionnées par l'application. Un fichier bilan est également proposé. Ce dernier contient la gamme de fabrication dont le coût pondéré qualité est le plus faible.

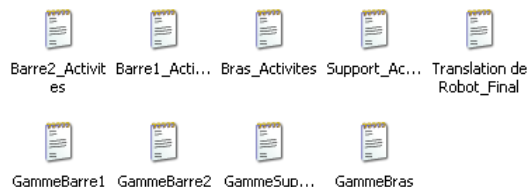


Figure 154 : Les fichiers générés

- Le dernier fichier est un document Microsoft Visio qui propose un affichage graphique de la solution. Comparé à la sortie par fichier texte, aucune information supplémentaire n'est proposée. Le résultat graphique de cette application est illustré dans la *Figure 155*. Les processus dont l'adaptation est la meilleure sont proposés et affichés sous Visio. Sur cette figure, seuls les processus de trois pièces sont visibles, un zoom sur l'un d'eux est effectué. Cette représentation affiche entre

autre : la chronologie entre les activités, les ressources qu'elles consomment, leur performance.

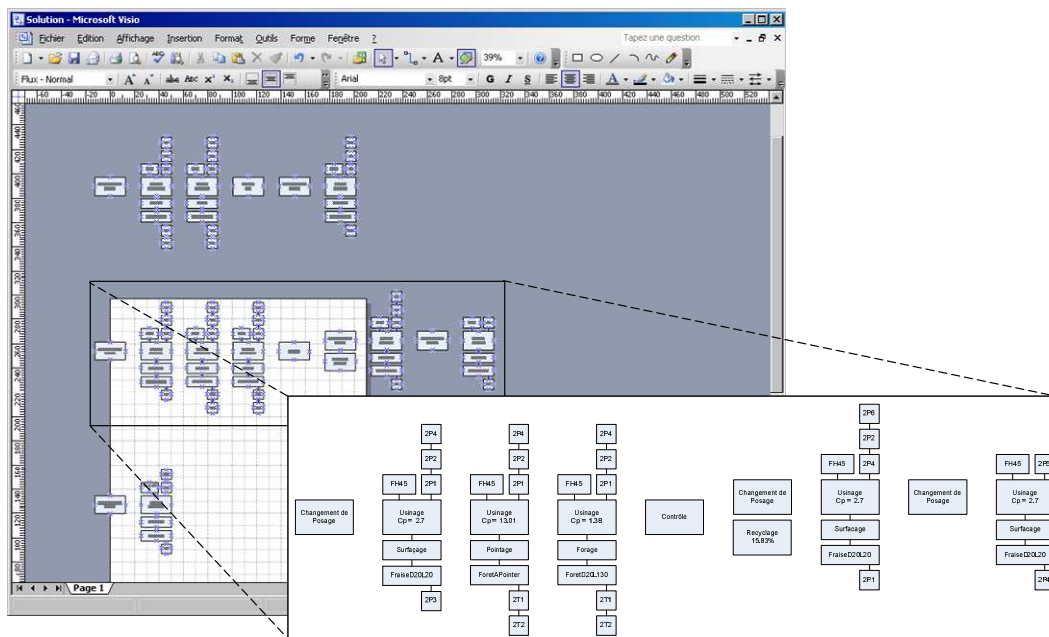


Figure 155 : Résultats graphiques affichés dans Microsoft Visio - Zoom sur le processus de fabrication de la pièce 2

Résumé : Les imperfections inhérentes aux processus et procédés de fabrication entraînent une dégradation des caractéristiques fonctionnelles, et donc de la qualité du produit. Afin d'assurer un certain niveau de qualité, la synthèse des tolérances vise à déterminer les limites acceptables des caractéristiques des pièces et des assemblages. L'allocation ou la synthèse des tolérances fonctionnelles est une importante étape du processus de conception qui se situe généralement durant la conception détaillée et impacte énormément la conception du processus de fabrication, la fabrication et le contrôle du produit. Il est donc important, lors de la détermination des tolérances fonctionnelles, de prendre en compte l'impact de celles-ci sur le coût de fabrication du produit et sur la qualité du produit. Ces deux notions (coût de fabrication et qualité du produit) sont généralement antinomiques. L'approche proposée vise à allouer les tolérances fonctionnelles qui offrent le meilleur équilibre performance fonctionnelle / coût de fabrication. Elle est basée sur l'approche par « Key Characteristics » développée par Boeing couplée avec une approche par activités inspirée de l'« Activity Based Costing » et adaptée aux besoins de la sélection et l'analyse de processus de fabrication. Afin de quantifier cet équilibre, ces travaux proposent la définition d'un indicateur de performance d'une allocation de tolérances : le coût pondéré qualité, et une solution d'optimisation discrète de l'allocation : la démarche ABTA (Activity Based Tolerance Allocation). Celle-ci a été implémentée dans plusieurs maquettes informatiques afin de valider les mécanismes et méthodes qui la constituent.

Mots Clefs : Estimation des coûts, Intégration Produit/Process, Sélection de processus d'usinage, Caractéristiques clef, Optimisation discrète, Modélisation de connaissances métier, Allocation des tolérances, Synthèse des tolérances.

Abstract: Imperfections due to the manufacturing process and in its resources are responsible for the deterioration of functional characteristics and as a consequence, the product quality. In order to ensure a certain quality level, the tolerance synthesis tries to determine admissible limits of workpiece and assembly characteristics. Tolerance synthesis or tolerance allocation, which belongs to the detailed product design phase, is an important step of the design process as it hugely impacts design of manufacturing process, product manufacturing and its control. Consequently it is important to take into account, during the quantification of functional tolerances, their impact on both cost and quality of the manufactured products. These two notions are considered as antinomic. The aim of the proposed approach is to find the tolerance allocation providing the best balance between functional performances and manufacturing cost. This solution is based on the concept of Key Characteristics, created by Boeing. It is associated with an activity approach inspired by the Activity Based Costing method and adapted to the needs of the manufacturing process selection and analysis. In order to quantify this balance, this work suggests the definition of a performance indicator evaluating an allocation: the cost weighted quality. Moreover, this thesis describes an original solution for the optimisation of tolerance allocations: the Activity Based Tolerance Allocation (ABTA). This solution was developed using several computer prototypes to validate the solutions, concepts and methods composing it.

Keywords: Cost Estimation, Design for Manufacturing, Milling Process Selection, Key Characteristics, Optimization, Expert Knowledge modelling, Tolerance Synthesis and Analysis.