

**In compliance with the
Canadian Privacy Legislation
some supporting forms
may have been removed from
this dissertation.**

**While these forms may be included
in the document page count,
their removal does not represent
any loss of content from the dissertation.**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DES LIENS TECHNOLOGIQUES
POUR L'ANALYSE DE FABRICATION VIRTUELLE

ANDREI VYGOVSKI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

JUNE 2003



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-86434-0

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-86434-0

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE DES LIENS TECHNOLOGIQUES
POUR L'ANALYSE DE FABRICATION VIRTUELLE

présenté par: VYGOVSKI Andrei

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., président

M. FORTIN Clément, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MASCLE Christian, Doctorat ès Sciences, membre et codirecteur de recherche

M. MAYER René, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mes parents pour leur soutien continuél tout au long de mes études. Merci de votre support moral tout au long de ce parcours.

Mes remerciements vont naturellement aux membres de mon comité de mémoire qui m'ont prodigué des conseils afin que je puisse instaurer une démarche rigoureuse. Monsieur Clément Fortin et Monsieur Christian Mascle ont assumé respectivement les tâches de directeur et codirecteur de ce mémoire. Tout au long de mon cheminement, ils m'ont supporté non seulement par leurs conseils scientifiques, mais aussi par leur contribution financière.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Christian Mascle pour son expertise scientifique et linguistique permettant d'améliorer considérablement la qualité du manuscrit.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à Monsieur Luc Baron pour les discussions scientifiques et pédagogiques qui ont rendu possible l'utilisation de la méthodologie exposée dans le mémoire par un complément de notes du cours MEC3500, Fabrication et métaux.

En terminant, j'ajouterai un mot pour les gens du département de génie mécanique, pour leur soutien au cours de mes études à POLY.

RÉSUMÉ

Les objectifs fondamentaux pour une entreprise sont non seulement la réduction du coût de développement de nouveaux produits, mais aussi d'augmenter la vitesse avec laquelle les nouveaux produits peuvent être apportés dans les marchés existants. Des progrès significatifs ont été réalisés dans la réduction des dépenses de développement de produits. L'utilisation de la conception assistée par ordinateur (CAO) et des outils modernes a permis aux ingénieurs de conception de créer plus efficacement une définition de produit détaillée. Avec des technologies de maquettes numériques, les produits peuvent être validés avant la fabrication du prototype.

Les concepteurs ne sont pas souvent capables de voir les contraintes industrielles et l'impact de ces contraintes sur leurs efforts de conception. Ainsi, les parties du processus peuvent être automatisées et soutenues par des données numériques. Les processus de développement consistent en plusieurs étapes séquentielles. Le but de l'approche proposée est l'intégration de l'analyse de fabrication et d'assemblage dans le processus de la conception d'un produit en ingénierie simultanée.

Afin de résoudre les objectifs mentionnés ci-dessus, on utilise divers outils parmi lesquels il y a un outil méthodologique nommé « lien technologique ». Dans ce mémoire, on va présenter certains « liens technologiques » et leur application dans l'analyse de la fabrication et de l'assemblage. Le lien technologique va être abordé sous la forme de tolérancement pour les cas pratiques.

Le travail aborde le changement dimensionnel dû aux déformations élastiques des joints lors du procédé d'assemblage sous l'effet de la force de serrage. Le modèle mathématique générique du tolérancement est amélioré dans le contexte de l'ingénierie simultanée. Nous y introduisons l'analyse de l'assemblage présenté par la méthode du calcul de la déformation d'un joint due à la force de serrage, puis de sa propagation solutionnée par la

méthode DLM (Direct Linearization Method). Quant à l'analyse de la fabrication, la méthodologie de la charte de tolérance est utilisée.

Pour illustrer les concepts proposés, un prototype a été développé. Ce prototype permet de calculer les effets de la force de serrage sur les cotes et les tolérances d'un produit et ainsi de mieux ajuster ces dernières.

L'utilisation du prototype nous permettra de justifier les ajustements apportés dans le modèle mathématique générique du tolérancement. En même temps, nous y avons ajouté un algorithme de fermeture d'une boucle pour la méthode de la charte de tolérance. Ceci nous a permis de tenir compte de la correction de la cote nominale provoquée durant l'opération de l'assemblage tel que le serrage.

ABSTRACT

Core objectives for a corporation include not only reducing the cost of developing new products, but also increasing the speed with which new products can be brought into existing markets. Significant progress has been made in reducing product development costs. Use of modern computer-aided design (CAD) tools has allowed design engineers to more efficiently create a detailed product definition. With digital mock-up technologies, product designs can be validated before cutting any metal.

Designers often are not able to view manufacturing constraints and the impact of these constraints on their design efforts. Thus, the parts of the process can be automated and supported by digital data. Serial development processes consist of several sequential stages, each of which uses information from the previous stage, and generates information to be used in subsequent stages. This these discusses an approach of the integrated analysis of manufacturing and assembly in a concurrent engineering context.

In order to make that analysis, several techniques can be used, among which there is « technological link ». In this these, we will present some « technological link » and its application in the analysis of manufacture and assembly. The « technological link » will be described by the practical cases.

This work described approaches of the dimensional change due to the elastic deformation of the joints under the assembly force. In order to take it in consideration, the generic mathematical model of tolerance was improved in a concurrent engineering context.

The proposed mathematical model of tolerance takes into account dimensional changes in assembly process, then of its propagation solved by DLM method (Direct Linearization Method). As for manufacturing analysis, the tolerance charting methodology is used.

A prototype was developed to illustrate the proposed concepts. This prototype makes possible to calculate the effects of assembly force during tolerance analysis at a concurrent engineering context.

The use of the prototype will enable us to justify the adjustments brought into the generic mathematical model of tolerance. At the same time, we have there an algorithm, which closes a machining loop during tolerance charting. That will enable us to hold account the correction of dimension and tolerance which can be changed during assembly operation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES FIGURES.....	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES.....	xix
INTRODUCTION	1
 CHAPITRE 1	 3
1.1 Lien dans l'assemblage	15
1.2 Lien par l'analyse de fabrication à travers l'utilisation de la charte de tolérance.	23
1.2.1 Détermination de la surépaisseur en tenant compte des erreurs primaires ...	25
1.2.2 Allocation de dispersions de fabrication.....	27
1.2.3 Fermeture de la boucle.....	30
1.3 Conclusion à l'analyse bibliographique.....	33
 CHAPITRE 2	 35
2.1 Exemples d'utilisation du lien technologique dans l'analyse de l'assemblage et dans l'analyse de fabrication.....	47
2.2 Ajustement effectué dans l'analyse de l'assemblage.....	50
2.3 Ajustement effectué dans la charte de tolérance - outil d'analyse de fabrication.	67
2.3.1 Détermination de la dispersion d'usinage (« Machine to $\pm$ TOL »)	67
2.3.2 Fermeture de la boucle avec les cotes opérationnelles (« Balance Dimension »).....	68
2.3.3 Calcul du copeau minimal (« Stock removal »).....	70
2.4 Conclusion	71

CHAPITRE 3	73
3.1 Entité comme un moyen de présenter les informations dans le prototype.....	74
3.2 Logique du prototype	76
CHAPITRE 4	83
4.1 Exemple simplifié pour la pompe d'engrenage	83
4.1.1 Préparation des données d'entrées du prototype.....	85
4.1.2 Fonctionnement du prototype	91
CONCLUSION	98
RÉFÉRENCES	101
ANNEXE	110

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Relation entre la tolérance et les activités de fabrication et de conception [DORF-94]	5
Figure 1.2 - Optimisation de la tolérance selon l'approche conventionnelle [ZHANG-96]	6
Figure 1.3 - Optimisation de la tolérance dans l'approche en ingénierie simultanée [ZHANG-96]	9
Figure 1.4 - Schéma conceptuel de tolérancement [ZHANG-96]	10
Figure 1.5 - Broche EPFL/LMO [ZHANG-96]	11
Figure 1.6 - Partie de la broche [ZHANG-96]	12
Figure 1.7 - Chaîne des cotes pour « L ₃ » [ZHANG-96]	12
Figure 1.8 - Extrait (pour la pièce 4) des dimensions fonctionnelles des pièces (composants) [ZHANG-96]	13
Figure 1.9 - Charte de tolérance pour la pièce 4 – douille [ZHANG96]	14
Figure 1.10 - Exemple de produit [JABB-97]	16
Figure 1.11 - Sous-ensemble de glissière. 1 – corps, 2a et 2b – glissières rapportées, 3 – trainard [CHEV-88]	16
Figure 1.12 - Ajustement cinématique dû aux variations dimensionnelles [CHASE-96]	17
Figure 1.13 - Simulation du DLM pour les blocs 1,2,3 et 4 [MERR-99]	19
Figure 1.14 - Charte de tolérance [DROZ-83]	24
Figure 1.15 - Dispersion de fabrication ($\pm 3\sigma$ de la tolérance de production) [DROZ-83]	28
Figure 1.16 - Approche de fermeture de la boucle [DORF-94]	31
Figure 1.17 - Approche de la fermeture de la boucle par [DROZ-83]	31
Figure 1.18 - Charte de tolérance pour la fabrication [ZHANG-94]	32
Figure 2.1 - Élément de liaison	36
Figure 2.2 - Lien entre les processus d'assemblage et de fabrication par le tolérancement	38

Figure 2.3 - Liaison par la cote	38
Figure 2.4 - Pompe d'alimentation	40
Figure 2.5 - Zone de contact : 1- vilebrequin, 2 – hélice	41
Figure 2.6 - Zone de contact estimé par SolidWorks.....	41
Figure 2.7 - Interprétation graphique de l'influence de la force d'assemblage sur la cote résultante	42
Figure 2.8 - Schéma de liaison dans CAO/GAMME/FAO	43
Figure 2.9 - Caractéristique élargie en technologie	43
Figure 2.10 - Idée directrice du lien technologique	46
Figure 2.11 - Entité représentative en CFAO	47
Figure 2.12 - Exemple d'utilisation de LT en CAO	48
Figure 2.13 - Exemple d'utilisation de LT entre CAO et FAO	49
Figure 2.14 - Chaîne des cotes	53
Figure 2.15 - Analyse graphique de la chaîne de cote linéaire	54
Figure 2.16 - Chaîne des cotes : (a) pour la cote augmentant et (b) pour la cote diminuant	55
Figure 2.17 - Lien technologique exerçant une influence sur la modification de la cote [KOR-87]	60
Figure 2.18 - Conception d'un assemblage en bloc sous l'action d'une force - F	60
Figure 2.19 - Déplacement du joint sous l'influence multiple de « R_t » et « F »	66
Figure 2.20 - Visualisation générique des éléments de la charte de tolérance.....	69
Figure 2.21 - Exploration de l'algorithme - fermeture d'une boucle.....	70
Figure 2.22 - Élément ajouté dans la méthodologie de la charte de tolérance.....	71
Figure 3.1 - Niveau A0 du SADT	74
Figure 3.2 - Modèle du prototype sous la forme de SADT - A1	74
Figure 3.3 - Modèle du prototype sous la forme de SADT - A2	75
Figure 3.4 - Modèle du prototype sous la forme de SADT – A3.....	77
Figure 3.5 - Réglage à l'assemblage [KOR-87].....	79

Figure 3.6 - Intégration des contraintes de fabrication et d'assemblage dans le tolérancement simultané	81
Figure 3.7 - Algorithme de fermeture d'une boucle	82
Figure 4.1 - Pompe à engrenage.....	84
Figure 4.2 - Simulation graphique de la pompe à engrenage.....	85
Figure 4.3 - Éléments d'assemblage à acheter.....	86
Figure 4.4 - Simplification généralisée d'une pompe (conception d'un bloc).....	87
Figure 4.5 - Design Table de SolidWorks pour une pièce	88
Figure 4.6 - Design Table de SolidWorks pour un assemblage.....	89
Figure 4.7 - Information d'assemblage (fichier Ass_Info)	90
Figure 4.8 - Gamme d'usinage en se basant sur la charte de tolérance	90
Figure 4.9 - Exemple du calcul	92
Figure 4.10 - Valeurs de correction dues au fraisage de précision	94
Figure 4.11 - Valeurs de correction dues à la rectification de précision.....	95
Figure 4.12 - Valeurs de correction dues à la rectification de précision.....	96

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A	Aire nominale du contact, [mm ²]
A-A	Position après l'application de la force – F (processus d'assemblage)
AFMC	Assemblage – fabrication – méthodes – conception
A _w	Pas moyen d'ondulation, [μm]
b _Σ	Paramètre adimensionnel de la surface portante du profil
B-B	Position au prépositionnement défini en CAO
BE	Bureaux études
BM	Bureaux méthodes
CAO	Conception assistée par ordinateur (CAD)
CAPP	Computer aided process planning
CFAO	Conception et fabrication assistées par ordinateur
C _{min}	Copeau minimal
D	Coefficient adimensionnel qui caractérise le durcissement de la couche superficielle des surfaces en contact
DFA	Design for assembly
DFM	Design for manufacturing
DLM	Direct linearization method
DMU	Modèle-maître électronique 3D (Digital Mock-Up)
E	Module d'élasticité, [GPa]
EG	Entité générique
F	Force normale agissant sur le joint de contact (force de serrage), [N]
FAO	Fabrication assistée par ordinateur (CAM)
FMC	Fabrication – méthodes – conception
G _b	Poids de pièce finie
G _p	Poids du brut
i	Nombre des pièces dans l'assemblage
IT	Intervalle de la qualité ISO

j	Nombre d'opérations d'usinage nécessaire afin d'obtenir la pièce i
k et b	Paramètres adimensionnels de la longueur portante du profil et qui dépendent du procédé d'usinage
K_r	Coefficient de réduction de l'écart sommaire de brut
L	Valeur nominale de la cote
L_i	Cotes composantes (définies par le processus de fabrication)
L_{LT}	Déplacement linéaire dans le joint ($L_{LT} = \Delta_{ass}$) dû à la force de serrage
LT	Lien technologique (technological link)
$(L_n)_m$	Valeur moyenne de la cote composante « m »
L_Σ	Valeur nominale de la cote résultante
$(L_\Sigma)^*$	Cote résultante en tenant compte de la variation maximale de la cote résultante due à l'assemblage
$(L_\Sigma)_m$	Valeur moyenne de la cote résultante
MA	Surépaisseur
MAPLE	Language for symbolic mathematical calculation
MFTW	Machine-outil, montage d'usinage, outil de coupe, pièce-brute (machine, fixture, tool, work-piece)
MO	Machine-outil
P	Nombre de facteurs qui changent la cote résultante
R_a	Écart moyen arithmétique du profil
R_t	Hauteur maximale du profil de rugosité
R_z	Hauteur des irrégularités de rugosité
SADT	Structuration des activités et des données (Structured analysis and design technique)
SRF	Surface de référence spécifiée
STEP	Standard for the exchange of product model data
SU	Surface usinée
S_Y	Limite d'écoulement, [MPa]
ST	Système technologique

T	Profondeur de la couche défectueuse
TOL	Tolérance dimensionnelle
TOL_{SRP}	Tolérance de la surépaisseur
W	Profondeur moyenne d'ondulation, [μm]
X_i	Tolérance fonctionnelle de la pièce i
y	Écart de la spécification du produit sous la forme de la dispersion de la cote résultante
Y	Tolérance d'une spécification du produit (tolérance de la cote résultante)
y_{djf}	Fonction empirique tenant compte des changements de la cote résultante provoqués par l'influence des jeux défavorables due à une force de serrage
y_r	Fonction empirique tenant compte l'influence de la rugosité
y_{on}	Fonction empirique tenant compte l'influence d'ondulation
$\Delta\Phi_{ASS}$	Dispersion de la fonction non linéaire d'assemblage
$\Delta\Phi_{FABR}$	Dispersion de la fonction non linéaire de fabrication
$\Delta\Phi_l$	Dispersion de la fonction non linéaire d'assemblage [CHASE-96]
$(\Delta_{us})_i$	Fonction de tolérance opérationnelle (usinage) et elle représente la totalité de la dispersion d'usinage pour la pièce i
ΔE	Dispersion du module d'élasticité
ΔF	Dispersion de la force normale agissant sur le joint de contact (force de serrage)
ΔR_t	Dispersion de la profondeur maximale R_t de rugosité
$(\Delta_{us})_{ij}$	Dispersion d'usinage associée avec l'opération d'usinage « j » de la pièce « i », $(\Delta_{us})_{ij} = (\Delta_{FABR})_{ij}$
Δ_{ass}	Dispersion due au procédé d'assemblage
ΔL	Dispersion de la cote nominale
ΔL_Σ	Tolérance fonctionnelle de la cote résultante ($\Delta L_\Sigma = Y$)
Δ_r	Dispersion d'usinage due au réglage d'outil
Δ_T	Dispersion d'usinage due aux déformations thermiques de S.T.

Δ_u	Dispersion d'usinage due à l'usure dimensionnelle d'outil
Δ_{us}	Dispersion totale d'usinage
Δ_y	Dispersion d'usinage due aux déformations élastiques d'un système technologique (ST)
$\Sigma\Delta_F$	Erreur de forme géométrique due à une imprécision de machine-outil
Φ_I	Fonction non linéaire d'assemblage [CHASE-96]
Φ_{ASS}	Fonction non linéaire d'assemblage
Φ_{FABR}	Fonction non linéaire de fabrication
δ_{ass}	Tolérance d'assemblage
δE	Tolérance du module d'élasticité
δF	Tolérance de la force de serrage du joint
δ_{fabr}	Tolérance de fabrication (production tolerance)
δ_{ij}	Tolérance opérationnelle (usinage) de la pièce i pour chacune des opérations d'usinage j
δR	Tolérance de la profondeur maximale R_t de rugosité des surfaces en contact
δL_{LT}	Tolérance de la cote L_{LT} due à l'assemblage
ξ_{1i}	Coefficient de sensibilité de la tolérance (pour la pièce i) dans l'étape de conception
ξ_{2ij}	Coefficient de sensibilité de la pièce i pour chacune des opérations d'usinage j
ξ_{ass}	Coefficient de sensibilité du procédé d'assemblage
ϵ_p	Dispersion d'usinage due au positionnement
θ	Constante élastique des matériaux en contact, [1/GPa]
μ	Coefficient de Poisson
ρ	Courbure résiduelle de la pièce
ρ_b	Écart sommaire de brut
γ_m	Coefficient d'utilisation du matériau

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I – CONTENU DU FICHIER « MAPLE CALCUL ».....	110
ANNEXE II – CONTENU DU FICHIER ASSFAB.JAVA.....	119
ANNEXE III – CONTENU DU FICHIER COTEFAB.JAVA	123
ANNEXE IV – CONTENU DU FICHIER CHARTITEM.JAVA	130
ANNEXE VI – CONTENU DU FICHIER READINFO.JAVA	131
ANNEXE VII – CONTENU DU FICHIER ASSEMBLAGEDEFINITION.JAVA.....	136
ANNEXE VIII – CONTENU DU FICHIER COTE.JAVA	139
ANNEXE IX – FICHIERS D'ENTRÉE DANS LE PROTOTYPE.....	140
ANNEXE X – VALEURS DE RA RECOMMANDÉES	141
ANNEXE XI – RELATIONS ENTRE R_A ET R_T	142
ANNEXE XII – RELATIONS ENTRE « IT » ET « L »	143

INTRODUCTION

Le bon fonctionnement d'un produit fini dépend de la réalisation d'une précision requise des paramètres fonctionnels, par exemple jeu, serrage, entraxe. Ces paramètres sont appelés les cotes résultantes et plusieurs pièces avec leurs tolérances participent à leur obtention.

Lors de certains procédés d'assemblage (le serrage des joints, le soudage, le brasage), on peut observer un changement de cote résultante dû aux déformations élastiques ou thermiques. Ce changement peut provoquer une correction du dimensionnement, du tolérancement des pièces conjuguées et après influencer non seulement l'assemblage, mais aussi la fabrication (gamme d'usinage).

En examinant l'analyse d'assemblage et de fabrication, on doit envisager la possibilité de les rendre dépendant et de les lier l'un avec l'autre, car la liaison rend possible la recherche de points communs. En les prenant en considération, nous pourrions établir des liens que nous appellerons liens technologiques.

Nous savons que la tolérance est un paramètre qui touche la fabrication et l'assemblage. Donc, nous pourrions considérer la tolérance comme un point commun dans l'analyse de la fabrication et de l'assemblage. C'est pourquoi nous allons aborder des recherches touchant le tolérancement, qui représentent les liaisons entre l'analyse de l'assemblage et de la fabrication. Cette analyse donnera la possibilité d'envisager des paramètres pertinents, qui leur appartiennent. Elle permettra de répondre aux questions : quoi et comment ?

Quoi, signifie quel élément il faut prendre en considération afin d'établir les liens. Par exemple, ça pourrait être l'élément géométrique (cote, surface). Comment, veut dire quel outil peut-on utiliser afin de réaliser des liens établis.

Aussi, nous allons aborder les travaux réalisés dans le domaine de l'analyse de précision liée à la fabrication et à l'assemblage, car la précision est une caractéristique commune aux deux. C'est celle-ci que nous étudierons dans le processus de définition de la notion de lien technologique.

CHAPITRE 1

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

La tolérance indique un intervalle de précision prévue des cotes du produit qui peut être assurée d'après Hammet [HAM-99] par les trois analyses possibles décrites ci-dessous.

Approche par l'allocation de tolérance - de haut en bas. Les tolérances de l'assemblage sont assignées en fonction des besoins du client (ou fonctionnement). Dans ce cas, l'analyse de tolérance est réalisée à partir de la synthèse de tolérance de l'assemblage vers les pièces.

Approche par l'allocation de tolérance - ascendant. Les tolérances assignées aux pièces composantes sont basées sur la capacité de processus. Cette analyse se réalise à partir des pièces vers l'assemblage.

Approche hybride – elle reflète l'ingénierie simultanée. On alloue initialement la tolérance ascendante, si la tolérance finale dans l'assemblage est trop grande. On réalise l'analyse de haut en bas jusqu'à ce que la tolérance des pièces composantes assure le tolérancement pour l'assemblage.

D'après l'analyse du tolérancement réalisée par le groupe GAMMA [GAMMA-98], nous pouvons voir que le redimensionnement du produit et la répartition des tolérances peuvent se reproduire après les modifications : soit des formes des pièces, des conditions fonctionnelles ou des changements apportés aux processus de fabrication ou d'assemblage.

Les membres du groupe GAMMA ont remarqué qu'au cours du cycle de conception, une première analyse fonctionnelle de l'ensemble du mécanisme permet d'avoir une première répartition des tolérances et le calcul des cotes. Ensuite, les gammistes peuvent proposer

les méthodes d'usinage en décomposant chaque cote fonctionnelle du dessin de définition en une chaîne de cotes de fabrication.

Une telle approche de la répartition des tolérances ne dépend que des aspects fonctionnels du produit et doit donc être totalement réalisée par le concepteur qui maîtrise l'ensemble des pièces et la gamme d'usinage. Par contre, les valeurs des tolérances et les dimensions moyennes peuvent être optimisées en prenant en compte des conditions fonctionnelles du mécanisme et aussi des conditions imposées par le procédé.

Ça veut dire qu'il faut prendre en compte différentes dispersions de fabrication et d'assemblage dans la répartition des tolérances dès les étapes de conception. Cela est représenté par une approche ascendante dans l'analyse de tolérance.

L'étude du tolérancement exige aussi une recherche dans l'assemblage des pièces. Par exemple, Ceglarek et al [CEG-97] ont présenté une méthodologie de l'analyse de la tolérance pour l'assemblage des pièces, qui est basée sur une modélisation des erreurs de fabrication. La méthode considérée inclut des principes de découpage de la pièce en parties, l'établissement de la géométrie commune et l'identification des points de mise en position. L'analyse de la tolérance est conduite en trois étapes:

1. l'examen des pièces et d'outillage de l'assemblage qui est basé sur la distribution statistique;
2. le calcul de tolérances accumulées pour les processus sélectionnés utilisant des modèles statistiques;
3. l'établissement de tolérances résultantes.

Cette approche est plus proche de l'allocation de tolérance en mode ascendant.

Avant de comparer les deux approches mentionnées ci-dessous, on peut noter les remarques suivantes.

La première approche doit prendre en considération divers procédés d'assemblage. La tolérance fixée selon le fonctionnement doit être assurée par la fabrication, ce qui peut entraîner une tolérance très serrée et peut augmenter le coût du produit. Dans l'approche de haut en bas, on ne peut pas transférer les informations vers l'assemblage pour réaliser une optimisation de tolérance.

La deuxième approche se réalise lors de la construction de la gamme d'usinage et ne tient pas compte de l'influence du procédé d'assemblage.

En analysant une troisième approche, on voit que la tolérance peut être considérée comme l'élément principal, qui représente non seulement une influence de la performance fonctionnelle du produit, mais aussi peut jouer le rôle de liaison (voir la figure 1.1) entre le processus de conception, d'assemblage et de fabrication d'un produit.

Cela a été mentionné par Dong [DONG-98] et Dorf et al [DORF-94] et mise en évidence en gras sur la figure 1.1 comme les zones de nos intérêts.

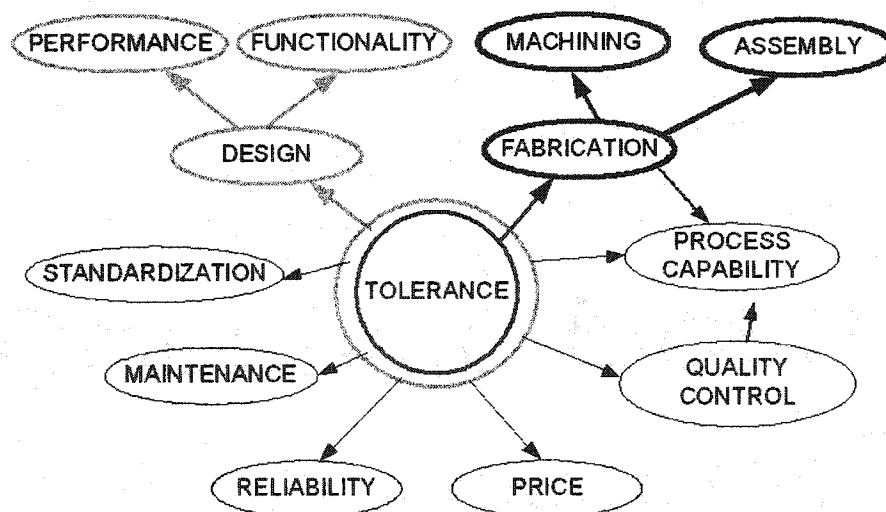


Figure 1.1 - Relation entre la tolérance et les activités de fabrication et de conception
[DORF-94]

Du point de vue de l'analyse et de l'optimisation des tolérances, nous pensons que l'approche hybride est plus adaptée à ce besoin. Elle permet non seulement d'analyser les

tolérances à chaque étape (conception, assemblage et fabrication), mais aussi de les optimiser par les échanges entre ces étapes.

L'idée d'utiliser la tolérance comme un élément de liaison entre l'assemblage et la fabrication peut être rencontrée dans plusieurs travaux scientifiques parmi lesquels le travail de Zhang [ZHANG-96] est particulièrement intéressant.

Zhang a développé un modèle mathématique générique afin d'optimiser la tolérance dans le contexte de l'ingénierie simultanée. L'idée principale de ce modèle consiste à apporter les informations de la FAO vers la CAO en tenant compte des réalités manufacturières. Ceci permettra également de montrer l'inconvénient de l'approche conventionnelle. L'approche conventionnelle d'après Zhang consiste en ce que le tolérancement se réalise séparément pour les étapes de conception et de fabrication (voir la figure 1.2).

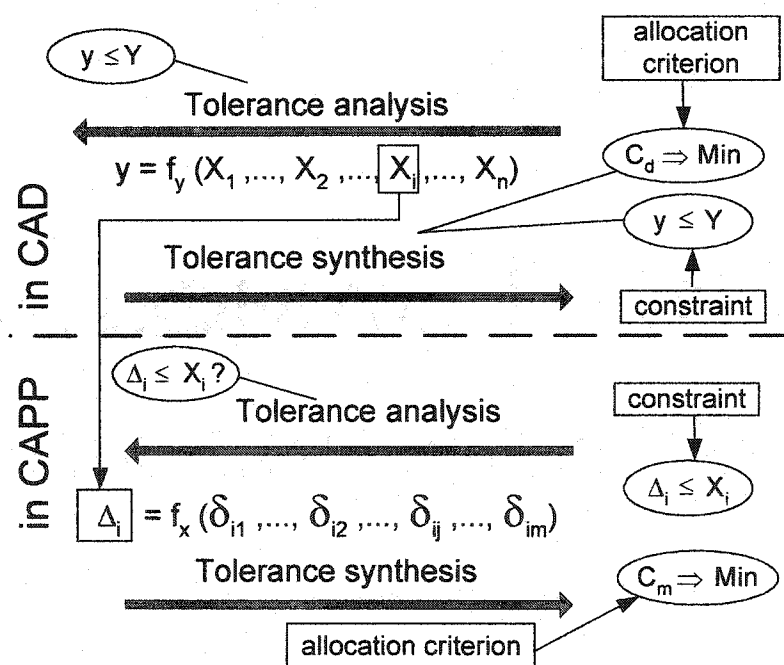


Figure 1.2 - Optimisation de la tolérance selon l'approche conventionnelle [ZHANG-96]
On trouve sur la figure 1.2 que l'analyse de tolérances par l'approche conventionnelle est représentée par les contraintes à respecter.

Pour l'étape de conception (CAD), l'auteur a mis en évidence la contrainte à respecter, à savoir :

$$y \leq Y \quad (1.1)$$

où :

- Y est la tolérance d'une spécification du produit (tolérance de la cote résultante).
- y est l'écart de la spécification du produit sous la forme de la dispersion de la cote résultante ; il est défini comme une fonction de tolérances fonctionnelles « X_i » (voir l'équation 1.2).

$$y = f_y (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (1.2)$$

$$y = \sum_{i=1}^n |\xi_{1_i}| X_i \quad (1.3)$$

où :

- i – est le nombre de pièces dans l'assemblage;
- X_i est la tolérance fonctionnelle de la pièce i;
- ξ_{1_i} est le coefficient de sensibilité de la tolérance (pour la pièce i) dans l'étape de conception. L'importance du coefficient de sensibilité va être discutée dans le chapitre 2.

Pour optimiser la tolérance fonctionnelle « X_i » de l'équation (Eq. 1.2), Zhang l'a transformée sous la forme d'équation fonctionnelle. Dans le cas de « WORST-CASE », la fonction en question est présentée par l'équation (Eq. 1.3). Cette équation prévoit une distribution de « X_i » dans « y » en vue de minimiser les frais de fabrication.

Pour spécifier la valeur ajoutée d'une pièce à chaque phase (fabrication), Zhang a cherché à augmenter les tolérances de fabrication tout en respectant les contraintes que constituent les spécifications fonctionnelles. Pour la fabrication (FAO), la contrainte à respecter (Eq. 1.4) tient compte de la dispersion d'usinage $((\Delta_{us})_i)$.

$$(\Delta_{us})_i \leq X_i \quad (1.4)$$

où :

- (Δ_{us}) est une fonction qui représente la totalité de la dispersion d'usinage pour la pièce i.

Selon Zhang, la dispersion totale d'usinage est la fonction (Eq. 1.5) de la tolérance opérationnelle (usinage). Nous sous-entendons par tolérance opérationnelle une tolérance (δ_{ij}) attribuée à une opération d'usinage « j » de la pièce « i ».

Le problème de l'optimisation des tolérances d'usinage δ_{ij} est représenté par l'équation (Eq. 1.6).

$$(\Delta_{us})_i = f_x(\delta_{i1}, \delta_{i2}, \dots, \delta_{ij}, \delta_{im}) \quad (1.5)$$

$$(\Delta_{us})_i = \sum_{j=1}^m |\xi_{2ij}| \delta_{ij} \leq X_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.6)$$

où :

- ξ_{2ij} est le coefficient de sensibilité de la pièce i pour chacune des opérations d'usinage j;
- δ_{ij} est la tolérance opérationnelle (usinage) de la pièce i pour chacune des opérations d'usinage j;
- j est un nombre d'opérations nécessaire afin d'obtenir la pièce i.

D'après Zhang, l'approche conventionnelle a les inconvénients suivants :

1. l'obtention impossible de la tolérance optimale fonctionnelle dont la valeur dépend des frais de fabrication que nous ne connaissons pas à l'étape de la conception;
2. les relations entre la dispersion « y » et les tolérances opérationnelles « δ_{ij} » sont indirectes;
3. l'allongement de la durée du cycle d'élaboration d'un produit, car il existe deux calculs du tolérancement séparés, un pour la CAO et un pour la FAO.

Afin d'éviter ces inconvénients, Zhang a proposé de dépasser la synthèse pour la tolérance fonctionnelle « X_i » dans l'étape de conception et d'établir directement une

relation entre l'écart sur la spécification du produit « y » et la tolérance opérationnelle « δ_{ij} ». Dans le cas « WORST-CASE », la contrainte et l'équation fonctionnelle de son modèle mathématique du tolérancement prennent la forme suivante (Eq. 1.7) :

$$y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\xi_{1i}| |\xi_{2j}| \delta_{ij} \leq Y \quad (1.7)$$

Zhang appelle cela le tolérancement simultané intrinsèque à l'ingénierie simultanée. On peut trouver sur la figure 1.3 les éléments pertinents qui ont été envisagés par Zhang dans son modèle mathématique du tolérancement simultané. Par son application, on peut faire l'optimisation des tolérances par le choix du processus de fabrication approprié dès l'étape de conception d'un produit.

En faisant l'analyse de la formule (Eq. 1.7), on peut voir que l'influence du procédé choisi sur la dispersion « y » est définie par des sensibilités « ξ ». Nous allons présenter l'analyse et la discussion de ces coefficients de sensibilité dans le chapitre 2.

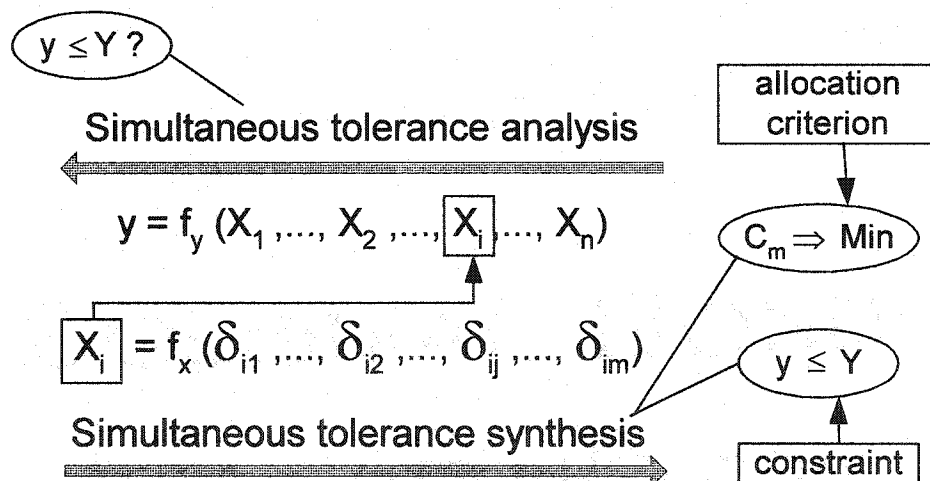


Figure 1.3 - Optimisation de la tolérance dans l'approche en ingénierie simultanée

[ZHANG-96]

Nous avons dans la figure 1.4 le schéma conceptuel du processus du tolérancement simultané de Zhang [ZHANG-96]. Nous avons aussi identifié sur la figure 1.4 la zone « A » de notre recherche.

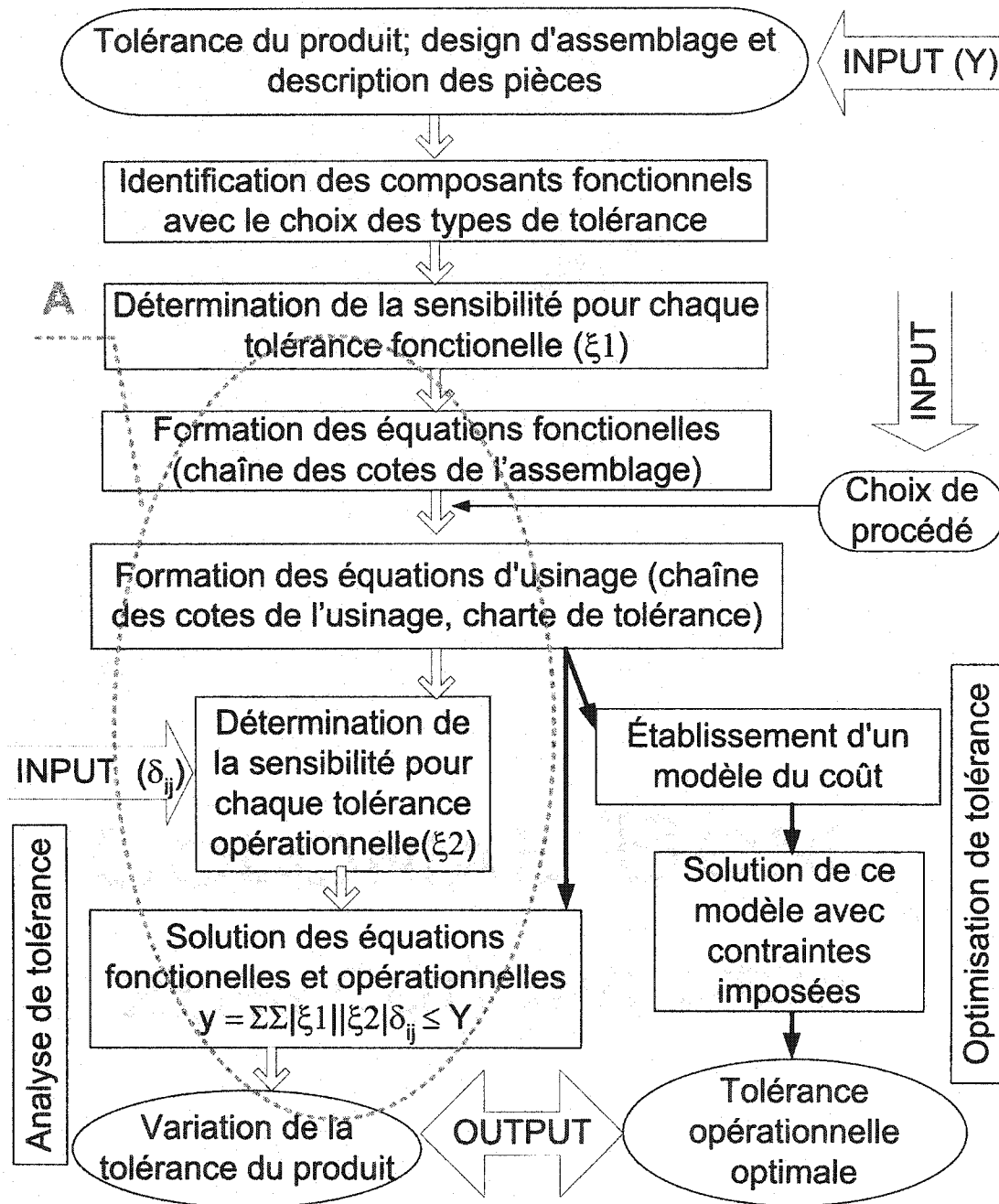


Figure 1.4 - Schéma conceptuel de tolérancement [ZHANG-96]

Zhang a explicité son algorithme de tolérancement simultané par l'exemple d'une broche (voir la figure 1.5). En présentant l'exemple retenu dans son article [ZHANG-96] nous numérotons seulement les pièces appartenant à l'ensemble étudié.

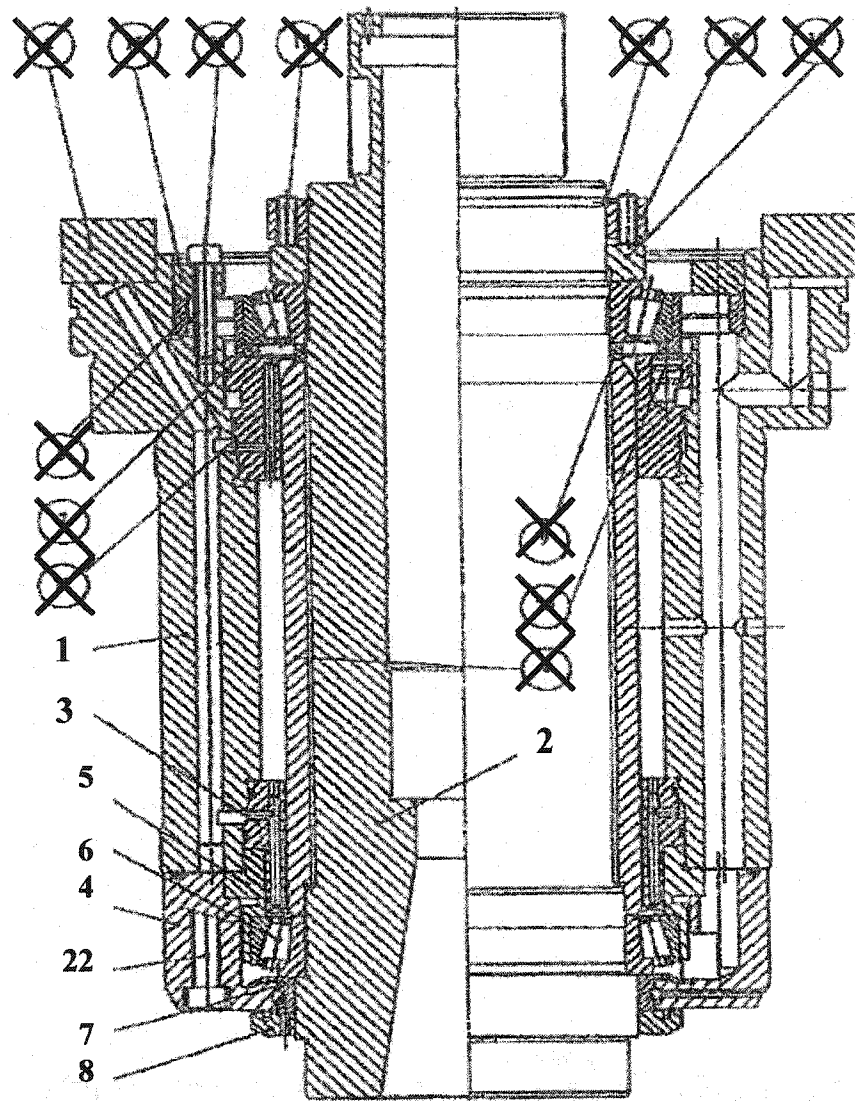


Figure 1.5 - Broche EPFL/LMO [ZHANG-96]

Après analyse de la broche et le choix des cotes résultantes, Zhang a identifié les chaînes de cotes qui ont une influence sur les cotes résultantes.

Pour l'exemple retenu, nous avons pris la pièce 4, puisque par cette composante nous pouvons voir l'intégration de la charte de tolérance au tolérancement simultané (voir les figures 1.7, 1.8 et 1.9) et l'influence de la dispersion de la force de serrage appliquée au

boulon 22 (voir les figures 1.5 et 1.6). Nous sous-entendons par tolérancement simultané le processus du tolérancement réalisé simultanément en CAO et en FAO.

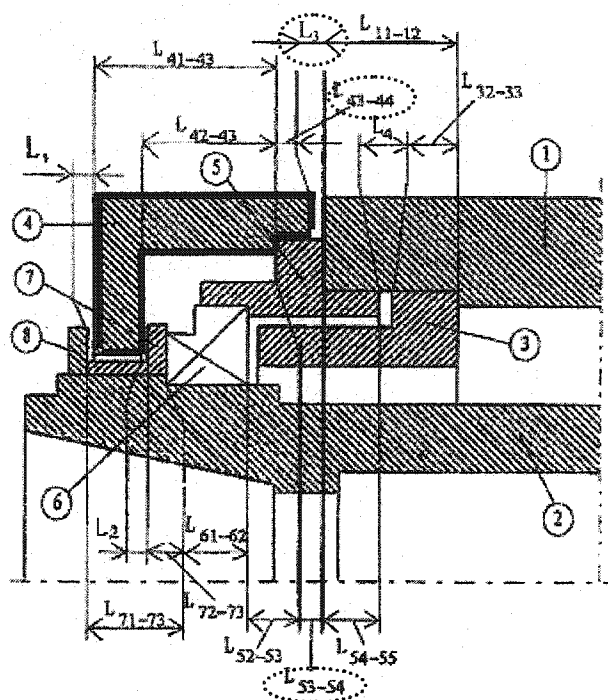


Figure 1.6 - Partie de la broche [ZHANG-96]

On peut voir sur la figure 1.7 la chaîne de cotes qui définit la cote résultante (jeu « L_3 »). Zhang appelle cette chaîne : équation fonctionnelle. Elle met en jeu seulement les composantes linéaires (cotes), c'est pourquoi les coefficients de sensibilité prennent la valeur +1 ou -1 (cette particularité de coefficient de sensibilité va être analysée dans le chapitre 2).

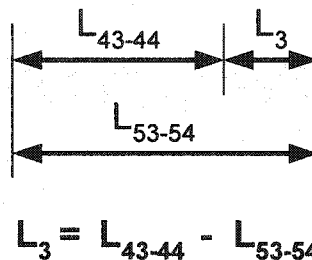


Figure 1.7 - Chaîne des cotes pour « L_3 » [ZHANG-96]

Désignation : par exemple, L_{43-44} est la cote entre les arêtes 3 et 4 (deuxième chiffre de l'indice) qui appartient à la pièce (composante) 4 (premier chiffre de l'indice).

On voit sur la figure 1.5 que la pièce 4 est attachée à la pièce 1 par le boulon 22. La dispersion due à la force de serrage dans l'étape d'assemblage peut provoquer le changement de la cote résultante « ΔL_3 » (en d'autre mot la dispersion). Ceci est produit par le contact des pièces 4 et 5.

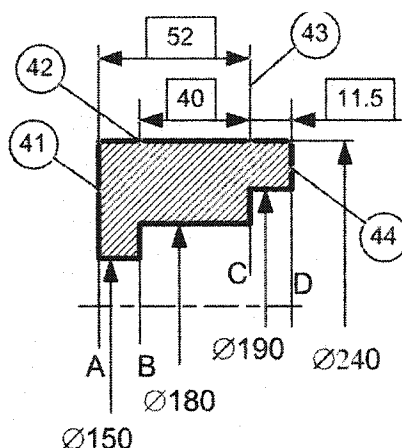


Figure 1.8 - Extrait (pour la pièce 4) des dimensions fonctionnelles des pièces (composants) [ZHANG-96]

Cette particularité n'a pas été prise en considération par Zhang dans son schéma conceptuel de tolérancement (figure 1.4). Nous allons décider de l'analyser plus profondément dans le chapitre 2.

On peut aussi également voir les points faibles dans le schéma de Zhang pour l'analyse de fabrication. La figure 1.8 permet d'extraire (pour la pièce 4) les dimensions fonctionnelles des pièces (composants).

Zhang a utilisé la charte de tolérance (voir la figure 1.9) pour garantir les tolérances fonctionnelles en résolvant les équations d'usinage pertinentes, à savoir pour la pièce 4 (Eq. 1.8):

$$t_{43-44} = t_{45} + t_{46} \quad (1.8)$$

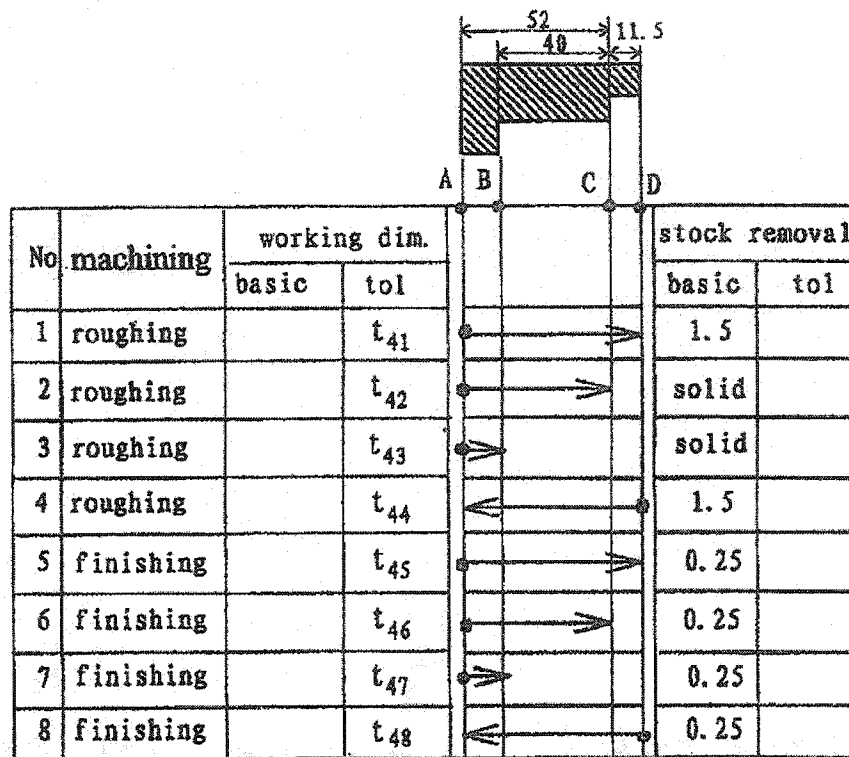


Figure 1.9 - Charte de tolérance pour la pièce 4 – douille [ZHANG96]

Malheureusement, l'utilisation par Zhang de la charte de tolérance est non complète car il ne présente pas balance de dimensions. L'absence de celle-ci peut provoquer des erreurs pendant la résolution des équations d'usinage, par exemple lors du calcul de la tolérance opérationnelle (usinage). En outre, il manque le « solid » pour les opérations t_{41} et t_{44} qui ajoute les erreurs supplémentaires.

Autre point faible de l'approche de Zhang, il ne tient pas compte des dispersions dues aux processus d'assemblage. On peut également voir ceci sur la figure 1.4, qui présente le schéma conceptuel de tolérancement.

Nous avons décidé d'étudier plus profondément les sources de dispersion de la cote résultante afin de réaliser l'allocation de tolérance par l'approche hybride. Nous allons analyser les procédés de l'assemblage et de l'usinage pour bien comprendre les sources de dispersion. Nous allons étudier les liens qui se manifestent à l'intérieur de ces procédés.

1.1 Lien dans l'assemblage

Comme Ngoi [NGOI-99] l'a mentionné, le processus d'allocation des tolérances pour l'assemblage doit être assuré par la possibilité de leur obtention par les processus disponibles, car cette vérification peut provoquer le changement de la cote du Bureau des Méthodes. Il a proposé l'intégration de la charte de tolérance de fabrication avec l'allocation de la tolérance dans l'assemblage [NGOI-99]. Selon Ngoi, le lien entre l'assemblage et la fabrication se réalise à travers les équations qui tiennent compte des dimensions et des tolérances du dessin de définition, des exigences d'assemblage et de la capacité du processus de fabrication. Néanmoins, il n'a pas tenu compte du changement de la cote résultante lors du processus d'assemblage. Par exemple, ce changement peut être provoqué par l'influence de la force de serrage dans l'assemblage comprenant les joints.

Il existe plusieurs types d'assemblage où il convient de garantir le jeu dans un mécanisme avec les joints qui se serrent en cours d'assemblage. Nous montrons par les figures 1.10 à 1.11 certains concepts.

Par exemple, le boulon 1 (sur la figure 1.10) joue le rôle d'un axe de rotation. Elle intervient aussi dans la fonctionnalité du produit à travers l'influence de ses dimensions sur les jeux J_1 et J_2 .

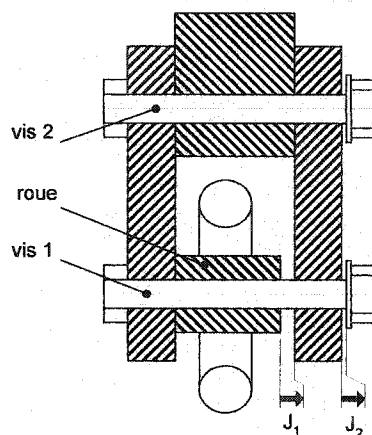


Figure 1.10 - Exemple de produit [JABB-97]

Dans un autre exemple, la largeur de la pièce 3 (sur la figure 1.11) est donnée avec sa tolérance $15f7$. Le problème revient alors à laisser entre les deux surfaces terminales des pièces 2a et 2b un espace J égal à $15H8$ ($J_{max}=15.027$, $J_{min}=15$). Le serrage augmente l'espace J .

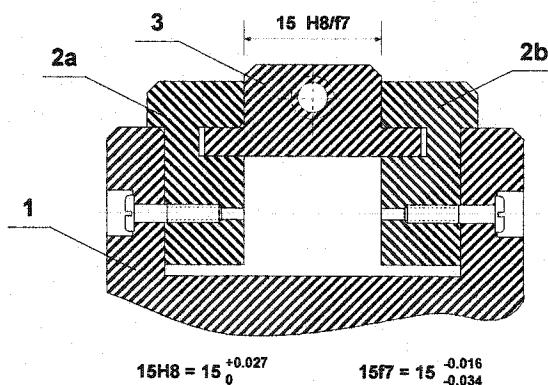


Figure 1.11 - Sous-ensemble de glissière. 1 – corps, 2a et 2b – glissières rapportées, 3 – traînard [CHEV-88]

La variation de la force de serrage générée durant le processus d'assemblage est transmise par les vis sur les joints. Cette influence est apparue dans les deux cas précédents (voir les figures 1.10 et 1.11).

Nous avons donc, montré la nécessité de tenir compte du processus d'assemblage. Ceci peut être réalisé dans l'étape d'analyse de l'assemblage.

Chase et al [CHASE-96] ont mis en évidence les trois sources principales de variation de la cote résultante qui doivent être envisagées dans l'analyse de l'assemblage :

- les variations dimensionnelles (des longueurs et des angles);
- les variations géométriques (position, obliquité) voir ANSI Y 14.5;
- les variations dues à l'ajustement cinématique au cours de l'assemblage (petits ajustements entre les pièces jointes).

Les variations dimensionnelles et géométriques sont le résultat des variations des processus de fabrication ou des matières premières (brut). Selon Chase et al [CHASE-96], les variations dimensionnelles et géométriques sont le résultat des variations dues aux processus de fabrication.

Quant aux variations cinématiques, elles apparaissent à l'assemblage. Nous pouvons voir sur la figure 1.12 le rapport entre les variations dimensionnelles et les petits ajustements cinématiques pour deux composantes assemblées.

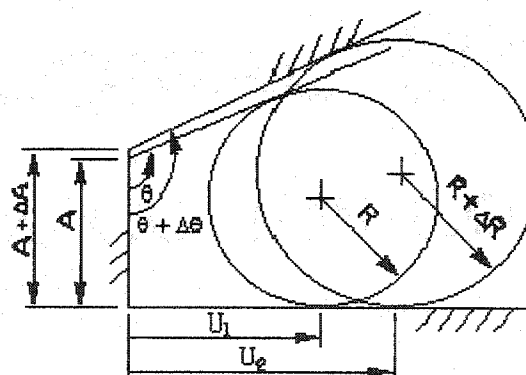


Figure 1.12 - Ajustement cinématique dû aux variations dimensionnelles [CHASE-96]

Les variations des trois paramètres A , R , et θ ont un effet sur la distance U , localisant le point de contact sur la surface horizontale. U est important pour la fonction de l'assemblage. Les pièces sont assemblées en insérant le cylindre dans la cannelure jusqu'à ce qu'elle fasse le contact des deux côtés de la cannelure. Pour chaque ensemble de

pièces, la distance U s'ajustera pour s'adapter à la valeur courante des dimensions A, R, et θ . La valeur U_1 est représentée par la position nominale du cylindre, alors que celle de U_2 représente la position du cylindre due aux variations ΔA , ΔR et $\Delta \theta$. L'ajustement d'une valeur $\Delta U = U_2 - U_1$ lors de l'assemblage décrit une contrainte cinématique sur le fonctionnement d'un produit. Il est important de distinguer les variations ΔA , ΔR et $\Delta \theta$ quand elles se produisent pendant la fabrication de différentes pièces. U n'est pas une variable de fabrication, elle est une variable cinématique. Des variations de U peuvent seulement être mesurées une fois les pièces assemblées.

Pour tenir compte de ces variations, les auteurs développent la fonction non linéaire d'assemblage « Φ_1 » qui comporte des variables d'assemblage et de fabrication et ensuite ils appliquent leur méthode DLM (Direct Linearization Method). L'idée du DLM est d'estimer quantitativement la variation d'assemblage en prenant en considération les variations des trois sources principales de la cote résultante en tant que fonctions d'assemblage. Donc, la méthode DLM (Direct Linearization Method) servant d'analyse des tolérances à l'assemblage, est une linéarisation par les séries de Taylor.

La dispersion de fonction d'assemblage « $\Delta \Phi_1$ » est exprimée de la manière suivante en utilisant l'approche « WORST CASE »:

$$\Delta \Phi_1 = \frac{\partial \Phi_1}{\partial a} tol_a + \frac{\partial \Phi_1}{\partial b} tol_b + \frac{\partial \Phi_1}{\partial c} tol_c \quad (1.9)$$

où :

- a, b, c sont les variables indépendantes;
- Φ_1 est une fonction d'assemblage.

Nous pouvons identifier dans l'équation (Eq. 1.9) : a – les variations dimensionnelles ; b – les variations géométriques ; c – les variations dues à l'ajustement cinématique au cours de l'assemblage, dans ce cas une interférence estimée par la valeur ΔU .

Nous pouvons trouver une application de l'approche « DLM » dans le travail de Merkley et al [MER-99]. Les auteurs ont simulé l'assemblage d'un bloc afin de déterminer le nombre des pièces correspondant à la spécification requise d'assemblage. Ils ont réalisé l'analyse DLM en utilisant MSC/PATRAN (les résultats sont présentés par la figure 1.13).

Cette approche établie donc un lien technologique entre les variations dimensionnelles et les forces de serrage induites par une interférence; ces forces seront générées pendant le processus d'assemblage.

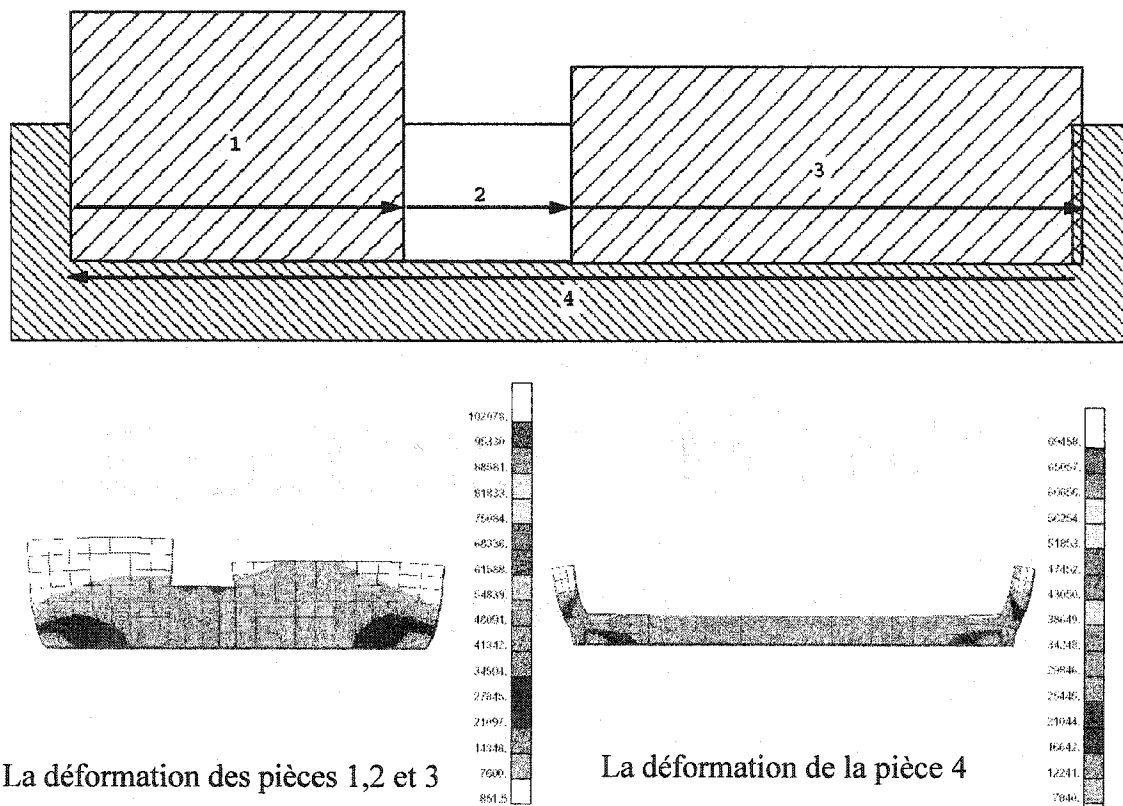


Figure 1.13 - Simulation du DLM pour les blocs 1,2,3 et 4 [MERR-99]

Par contre, les auteurs ont pris en considération seulement la caractéristique du matériau (Al) et la dimension d'interférence des pièces (0.25+/-0.25 in.). La déformation résultante est présentée à la figure 1.13, à la suite du serrage d'ajustement. Elle tient compte

seulement des variations dimensionnelles et géométriques et non des variations dues à l'ajustement cinématique au cours de l'assemblage.

Il faut souligner, que les dérivations partielles de l'équation (Eq. 1.9) représentent les coefficients de sensibilité dans l'approche du Zhang (Eq. 1.7). Nous y reviendrons plus tard au chapitre 2.

Nous étudierons maintenant dans le travail de Korsakov [KOR-87] la fonction empirique « y_{djf} » (Eq. 1.10) qui permet de tenir compte des changements de la cote résultante provoqués par l'influence des jeux défavorables due à une force de serrage. Cette fonction empirique « y_{djf} » détermine le déplacement de joint sous la force « F » durant le processus d'assemblage (Eq. 1.11).

$$y_{djf} = f(R_t, F, E) \quad (1.10)$$

On y trouve la fonction empirique :

$$y_{djf} = (4 + R_t) * \left[\frac{100 * F}{A * D * S_Y * b_\Sigma} \right]^{\frac{1}{2+k}} + 0.13(A_w)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{W * \theta * F}{A} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1.11)$$

où :

R_t = hauteur maximale du profil de rugosité, $R_t \approx 1,25R_z$;

R_z = hauteur des irrégularités de rugosité, $R_z \approx 6R_a$, [μm];

R_a = écart moyen arithmétique du profil;

F = force normale agissant sur le joint de contact, [N];

S_Y = limite d'écoulement, [MPa] ;

A = aire nominale du contact, [mm^2];

D = coefficient adimensionnel qui caractérise le durcissement de la couche superficielle des surfaces en contact;

A_w = pas moyen d'ondulation, [μm];

W = profondeur moyenne d'ondulation, [μm];

b_{Σ} = paramètre adimensionnel de la surface portante du profil (Eq. 1.12);

θ = constante élastique des matériaux en contact (Eq. 1.13), [1/GPa].

$$b_{\Sigma} = 0.24b * (0.4 - 0.1 * k) * (4 + R_t)^{\frac{2+k}{R_t^k}} \quad (1.12)$$

k et b sont les paramètres adimensionnels de la longueur portante du profil, qui dépendent du procédé d'usinage.

$$\theta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (1.13)$$

Les indices 1 et 2 représentent les deux pièces en contact et :

μ = coefficient de Poisson;

E = module d'élasticité, [GPa].

Le point faible de l'approche de Korsakov, c'est qu'il détermine une valeur de correction « y_{djf} » sans tenir compte de sa propre variation. Cette variation peut être provoquée par les dispersions des trois paramètres (ΔR_t , ΔF et ΔE).

Dans la fonction (Eq. 1.11), nous pouvons distinguer les variations principales, envisagées par Chase [CHASE-96], c'est-à-dire identifier le déplacement dans le joint du contact « y_{djf} » comme une fonction de dispersion de la hauteur maximale du profil de rugosité « R_t », la force de serrage « F » et le module d'élasticité « E ». L'effet de ces trois variables sont non linéaires, c'est pourquoi la méthode DLM sera applicable. L'application de cette formule est intéressante car elle permet d'identifier les composantes qui influencent la tolérance, à savoir :

- « F » - dans l'étape d'assemblage,
- « R_t » - dans l'étape de fabrication.

Notons que le module d'élasticité « E » est déterminé par la nature de la matière en contact.

Étant donné une fonction d'assemblage représentée par l'équation (Eq. 1.11) ceci nous amène à nous interroger sur l'assemblage à l'étape de son analyse. Par contre, bien que l'équation (Eq. 1.11) soit empirique, son application dans le contexte du tolérancement en ingénierie simultanée nécessiterait sa solution, par exemple par la méthode DLM. Nous pouvons voir que la formule (Eq. 1.10) tient compte des paramètres pertinents, à savoir le matériau (module d'élasticité), la qualité (état de surface, représenté par la rugosité), la caractéristique du procédé d'assemblage (force de serrage). Nous pouvons identifier ces paramètres comme les sources principales de variation de la cote résultante, envisagées par Chase et al [CHASE-96].

Comme nous l'avons mentionné auparavant, l'approche hybride pour l'allocation de tolérance est plus convenable dans l'ingénierie simultanée. La première étape de son application est de réaliser le tolérancement des pièces au niveau de la fabrication et d'apporter cette information vers l'assemblage. L'étape prochaine consiste à étudier les chaînes des cotes d'assemblage et de comparer la dispersion des pièces avec la tolérance imposée sur la cote résultante. Cette séquence peut être bien réalisée selon la méthode de Zhang. Par contre, le changement de la cote résultante due aux opérations d'assemblage n'a pas été pris en compte dans son modèle. Ceci peut provoquer une dispersion finale de la cote résultante qui peut être plus grande que la tolérance imposée. L'application de l'équation (Eq. 1.11) solutionnée par la méthode DLM nous permet d'estimer la tolérance dans l'étape d'analyse de l'assemblage et d'apporter les résultats à l'étape d'analyse de fabrication. Cela nous oblige à trouver l'outil qui nous permet de tenir compte des changements dimensionnels, autant pour l'assemblage que pour la fabrication. Nous allons étudier la possibilité d'utiliser la charte de tolérance comme outil.

1.2 Lien par l'analyse de fabrication à travers l'utilisation de la charte de tolérance

La charte de tolérance est un outil d'analyse utilisé dans le processus de fabrication. Le contrôle des tolérances est important car il détermine le coût de production. La charte de tolérance (voir la figure 1.14) peut être définie comme l'outil graphique d'analyse du processus.

Cet outil sert à accéder à une séquence du processus pour déterminer l'allocation optimale des dimensions et des tolérances afin d'accomplir les besoins du dessin de définition, de fabrication et de contrôle [NGOI-95]. La faisabilité des séquences d'usinage est vérifiée par la charte de tolérance; les conditions inacceptables sont corrigées à travers sa reconstruction. Comme Ngoi [NGOI-95] l'a mentionné, l'établissement de la charte est un processus qui dépend de l'estimation du gammiste, de son expérience et de la complexité de la pièce à fabriquer.

Il existe deux axes de recherche dans la charte de tolérance, à savoir :

1. la construction manuelle de la charte;
2. l'automatisation de la construction de la charte.

Au point de vue de l'ingénierie simultanée, le deuxième axe est plus important.

En faisant l'analyse de la méthode de construction de la charte de tolérance, on peut citer les trois parties essentielles (voir la figure 1.14):

- A) le choix de la tolérance opérationnelle (« Machine to $\pm TOL$ »);
- B) la fermeture de la boucle avec les cotes opérationnelles (« Balance Dimension »);
- C) le calcul du copeau minimal (« Stock removal »).

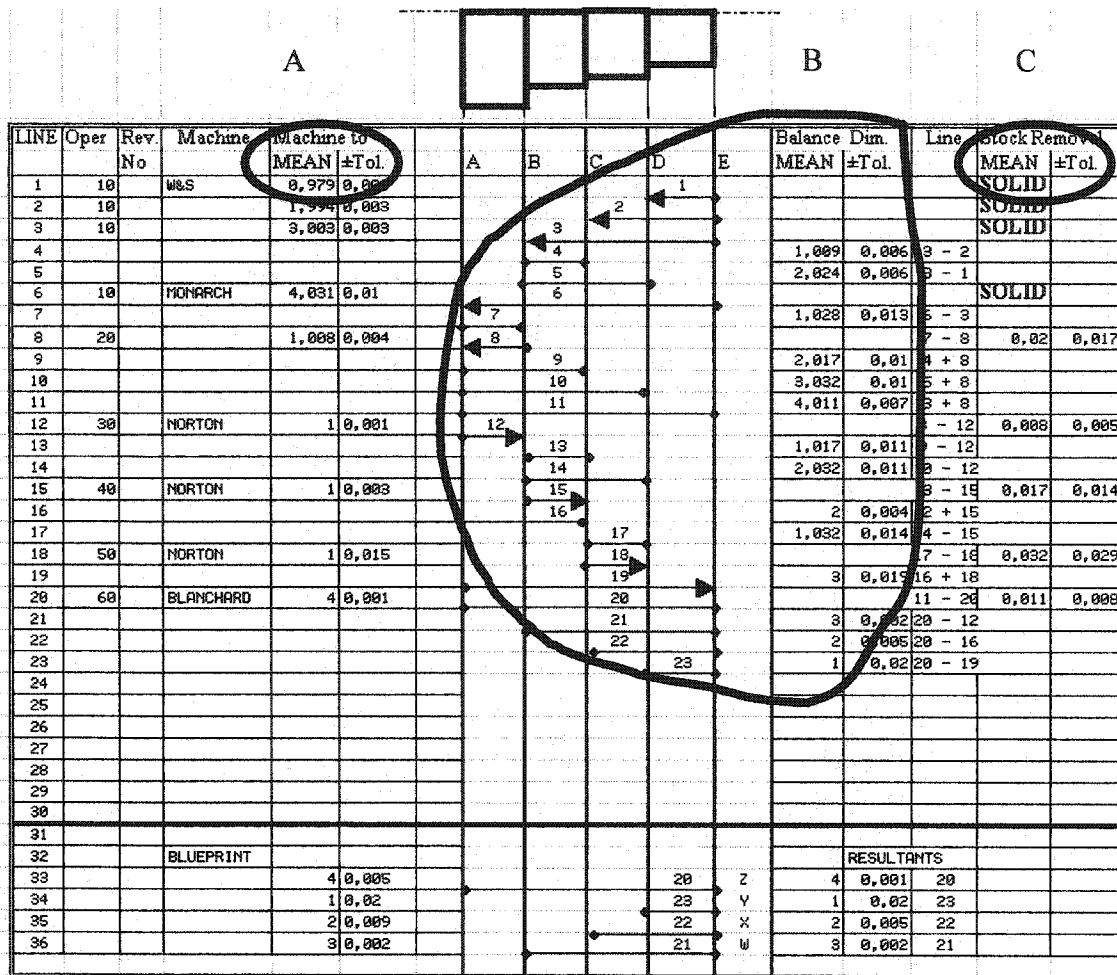


Figure 1.14 - Charte de tolérance [DROZ-83]

Nous pouvons utiliser la charte de tolérance comme outil d'analyse de la fabrication pour les raisons suivantes:

- elle permet de visualiser (à l'aide du langage graphique), de manière unique, les transformations de la matière primaire au cours de l'usinage;
- l'ingénieur peut identifier la cote opérationnelle critique (tolérance très serrée);
- la liaison interne dans la charte de tolérance (entre la tolérance de la cote opérationnelle et la surépaisseur) donne la possibilité d'automatiser la vérification de la gamme d'usinage en vue de maîtriser les erreurs primaires d'usinage.

En se basant sur la nature de la charte, c'est-à-dire la vérification de la gamme existante, nous allons concentrer notre recherche bibliographique sur les points suivants :

- le calcul de la surépaisseur;
- l'estimation des erreurs primaires d'usinage;
- la fermeture de la boucle de manière automatique - « balancing ».

1.2.1 Détermination de la surépaisseur en tenant compte des erreurs primaires

On sait que la surépaisseur est liée avec la tolérance pour la cote opérationnelle. Ceci est présenté dans la méthodologie de la charte de tolérance par deux approches principales du calcul de la surépaisseur.

La première approche, élaborée par Eary [EARY-62], sert à déterminer la surépaisseur pour chacune des opérations en fonction de la durée de vie de l'outil afin d'atteindre la meilleure finition de la surface. Dans cette approche, la tolérance de la surépaisseur est contrôlée par les capacités du processus. On y utilise la valeur de la tolérance de la cote opérationnelle pour calculer la surépaisseur.

La deuxième approche, proposé par Wade [WADE-67] n'est pas directe dans l'identification de la surépaisseur. La tolérance pour la surépaisseur se calcule par l'addition de trois fois la valeur considérée, figée pour chaque surface élémentaire.

Au point de vue général, les deux approches se basent sur les étapes suivantes :

- établissement du nombre des opérations nécessaires pour atteindre la précision requise et l'état de la pièce finie;
- détermination des composantes des surépaisseurs et des tolérances opérationnelles;
- réalisation du calcul des surépaisseurs d'après les formules convenables;
- calcul des cotes limites opérationnelles.

Afin de réaliser ces calculs, on y applique les valeurs des tableaux statistiques [EARY-62], [WADE-67] appartenant à chaque type d'usinage. Néanmoins, le choix est très vaste, ce qui provoque une augmentation de l'intervalle de tolérance et du prix de fabrication.

Nous pourrions utiliser le calcul de surépaisseur par l'approche analytique. Celle-ci est basée sur l'allocation de la tolérance opérationnelle en fonction des erreurs primaires. Ainsi, nous trouvons dans le travail Drozda [DROZ-83] l'équation (Eq.1.14) pour calculer la surépaisseur « MA » :

$$MA = TOL_{SRP} + C_{min} \quad (1.14)$$

où :

- TOL_{SRP} = tolérance de la surépaisseur; $TOL = (\delta_{fabr})_{j-1} + (\delta_{fabr})_j$;
- $(\delta_{fabr})_j$ = tolérance de l'opération courante (j), déterminée par la prise de compte des erreurs primaires associée avec l'opération considérée;
- $(\delta_{fabr})_{j-1}$ = tolérance de l'opération précédente (j-1), déterminée par la prise de compte des erreurs primaires associée avec l'opération considérée;
- C_{min} = copeau minimal.

On peut voir de quelle manière la valeur de copeau minimal est proche de la réalité industrielle par la méthodologie de Kovan [KOV-70]. Selon son hypothèse, C_{min} de l'opération d'usinage courante (j) sert à éliminer les défauts des opérations précédentes (j-1) (la hauteur des irrégularités de rugosité R_z , la profondeur de la couche défectueuse T , la courbure résiduelle ρ de la pièce, voir les équations 1.15 et 1.16).

$$(C_{min})_j = (R_z)_{j-1} + T_{j-1} + \rho_{j-1} \quad (1.15)$$

La courbure résiduelle ρ est calculée comme suit :

$$\rho_{j-1} = K_r * \rho_b \quad (1.16)$$

où :

- K_r = coefficient de réduction; dans le cas de trois opérations (ébauche, semi-finition, finition), on utilise les valeurs considérées : $K_r = 0.06, 0.04, 0.02$;
- ρ_b = écart sommaire de brut; il s'exprime selon la méthode choisie de l'obtention de ce brut.

L'approche du calcul de la surépaisseur et de la tolérance opérationnelle peut être prise en compte pendant les préparations des données pour la charte de tolérance.

1.2.2 Allocation de dispersions de fabrication

La méthodologie de la charte [EARY-62], [WADE-67] prévoit d'établir la tolérance opérationnelle en se basant sur les tableaux statistiques de la dispersion d'usinage. Cela nous oblige à utiliser les tolérances équilatérales.

Nous allons présenter deux approches contribuant à une dispersion de fabrication. L'accumulation des dispersions de fabrication sert à définir la tolérance opérationnelle. Les tolérances opérationnelles sont incorporées dans la charte de tolérance et présentent une précision d'usinage.

- L'approche statistique de Drozda [DORZ-99] exige des tests d'usinage pour déterminer « σ ».
- L'approche probabiliste de Korsakov [KOR-87] n'exige pas de tests d'usinage. Cette approche tient compte des conditions réelles d'une façon probabiliste.

Ces deux approches sont applicables à l'équation (Eq. 1.6) et seront mentionnées dans le chapitre 2.

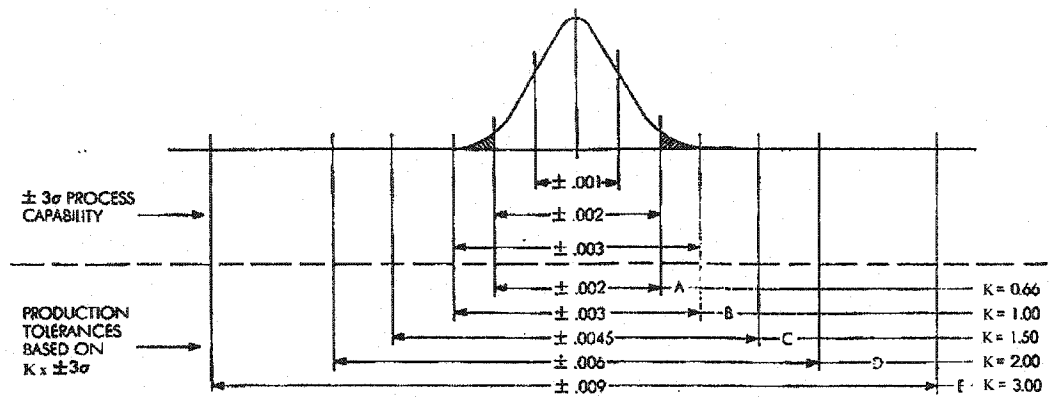


Figure 1.15 - Dispersion de fabrication ($\pm 3\sigma$ de la tolérance de production) [DROZ-83]

Selon le travail [DROZ-83], on voit qu'une précision d'usinage peut être déterminée par $\pm 3\sigma$ en utilisant le coefficient k ($k = 0.66, 1.0, 1.5, 2.0$; voir la figure 1.15). Par contre, ces valeurs ne tiennent pas compte des conditions réelles en fabrication. C'est donc un peu trop général.

Pour éviter ces inconvénients, on peut incorporer la méthode proposée par Korsakov [KOR-87] dans la partie d'allocation de dispersions de fabrication de la charte de tolérance (partie A, voir la figure 1.14).

Les erreurs primaires composent la dispersion d'usinage, ce qui permet d'établir des dispersions de fabrication et ensuite d'établir la tolérance opérationnelle pour la charte de tolérance. Afin de déterminer les causes qui sont à l'origine des erreurs d'usinage sur les machines-outils, Korsakov [KOR-87] a proposé d'utiliser la fonction (Eq. 1.17).

$$\delta_{ij} = (\Delta_{us})_{ij} = f(\Delta_r, \epsilon_p, \Delta_y, \Delta_u, \Delta_T, \Sigma_{\Delta F})$$

$$\delta_{ij} = (\Delta_{us})_{ij} = \sqrt{(\Delta_r)^2 + (\epsilon_p)^2 + (\Delta_y)^2 + 3 * (\Delta_u)^2 + 3 * (\Delta_T)^2 + \Sigma_{\Delta F}} \quad (1.17)$$

où :

$(\Delta_{us})_{ij}$ = dispersion d'usinage associée avec l'opération d'usinage « j » de la pièce « i »;

Δ_r = dispersion d'usinage due au réglage d'outil;

ϵ_p = dispersion d'usinage due au positionnement;

Δ_y = dispersion d'usinage due aux déformations élastiques d'un système technologique (ST);

Δ_u = dispersion d'usinage due à l'usure dimensionnelle d'outil;

Δ_T = dispersion d'usinage due aux déformations thermiques de S.T.;

$\Sigma\Delta_F$ = erreur de forme géométrique due à une imprécision de la machine-outil;

Δ_r = différence des positions limitées d'outil lors du réglage. Sa valeur est aléatoire et cette dispersion est soumise à la loi de Gauss [KOR-87]. L'objectif de l'installation de l'outil est d'établir une position précise connue par rapport à la pièce à usiner [WANG-91];

ϵ_p = dispersion de mise en position. Ce type d'erreur est associé à la mise en place de la pièce sur la machine-outil ou le montage d'usinage. Elle représente la différence des distances limites entre la surface de référence et l'outil mis à la cote [WANG-91]. Dans la plupart des cas, la distribution des positions de la surface de référence se soumet à la loi normale [KOR-87];

Δ_y = dispersion d'usinage due à la déformation de S.T. (la machine-outil $\leftrightarrow$ le porte-pièce $\leftrightarrow$ la pièce $\leftrightarrow$ l'outil $\leftrightarrow$ le porte-outil) sous les forces d'usinage. Elle se détermine par les variations de l'effort de coupe dépendant de la rigidité d'un S.T. et peut être estimée comme une distribution normale [KOR-87];

Δ_u = dispersion d'usinage résultant de l'usure dimensionnelle d'outil. Elle représente (10%-20%) de la dispersion $(\Delta_{us})_{ij}$, selon Korsakov [KOR-87];

Δ_T = dispersion de la déformation thermique d'un S.T. Pendant l'usinage les composantes d'un S.T. chauffent. Cela provoque une déformation thermique des éléments du système et l'usinage est réalisé avec des erreurs. La chaleur vient de plusieurs sources, tels que le processus de coupe et le frottement entre les composantes mobiles de la machine-outil [WANG-91]. Les pourcentages de la chaleur de coupe distribués à la pièce, à l'outil de coupe et aux copeaux varient selon les méthodes d'usinage et les conditions de l'usinage.

Ces dispersions comptent pour (10%-15% de $(\Delta_{us})_{ij}$) [KOR-87];

$\Sigma\Delta_F$ = dispersion de la forme géométrique due à une imprécision de la machine-outil.

Dans les travaux de Korsakov [KOR-87] et de Wang [WANG-91], on trouve les erreurs primaires et les facteurs qui les provoquent. En se référant à ces travaux, on peut déterminer les composantes de la formule (Eq. 1.17) et estimer le δ_{ij} . Cela peut rendre le calcul du tolérancement simultané de Zhang (Eq. 1.7) plus précis, car cela rapproche la réalité manufacturière, ainsi que le précise la charte de tolérance. Ce point n'est pas intégré dans notre travail et il peut être développé en future.

1.2.3 Fermeture de la boucle

La fermeture de la boucle dans la charte de tolérance est une partie importante car elle peut être utilisée pour vérifier les séquences des opérations d'usinage. Les cotes spécifiées sur le dessin de définition doivent être obtenues par usinage avec la tolérance requise.

Dans la méthode de construction de la charte de tolérance, à savoir la partie de fermeture de la boucle, on peut distinguer les travaux de Ngoi et Goh [NGOIGOH-97] (la méthode « escalier - stade ») et Ji et Lau [JIL-99] (l'approche basée sur le graphe orienté). Néanmoins, ces travaux ne représentent pas de manière claire l'algorithme de construction de la charte de tolérance et en particulier la fermeture de la boucle des cotes du Bureau d'Étude associées avec les cotes opérationnelles.

Il existe des approches de fermeture graphique de la boucle, on les trouve dans les travaux de Dorf [DORF-94] et de Drozda [DROZ-83].

Nous trouvons dans le travail [DORF-94] une charte inversée qui correspond à un contournement du haut vers le bas de la fermeture de la boucle illustrée sur la figure 1.16. Malheureusement, l'auteur n'a pas écrit avec clarté l'algorithme de la fermeture. Il a seulement spécifié qu'il faut avoir un point d'intersection durant le contournement. Ainsi, dans cette approche, l'auteur ne mentionne pas la nécessité de l'utilisation de la tolérance équilatérale (equal bilateral system) dans la charte de tolérance.

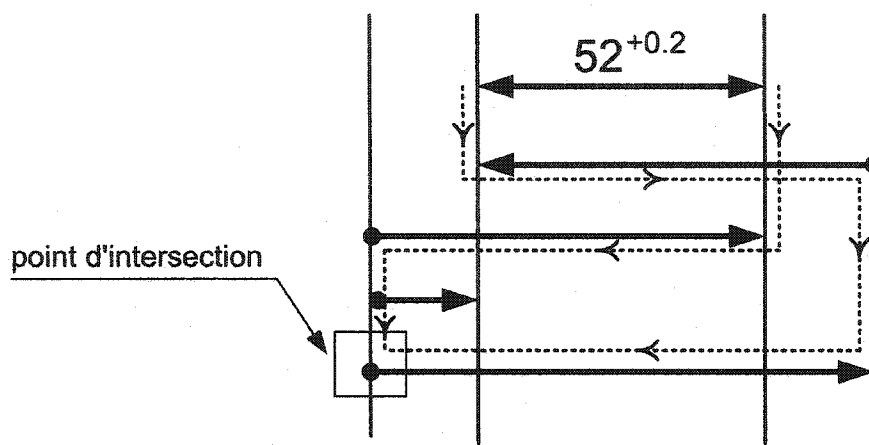


Figure 1.16 - Approche de fermeture de la boucle [DORF-94]

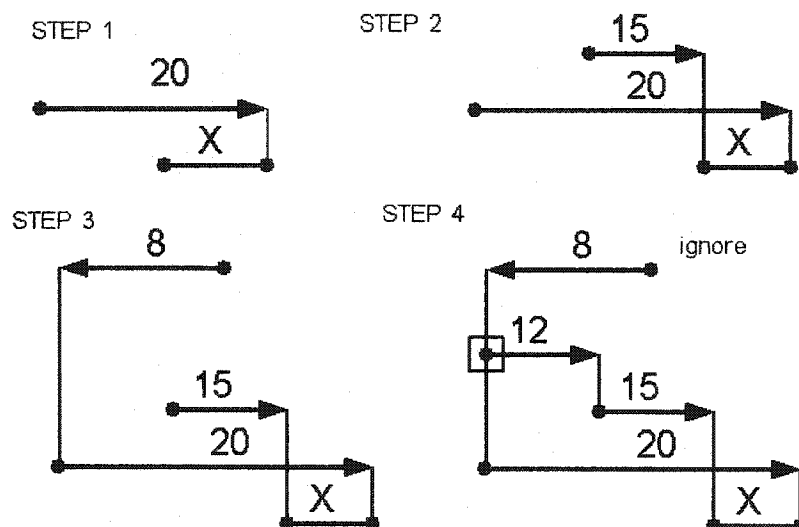


Figure 1.17 - Approche de la fermeture de la boucle par [DROZ-83]

On peut trouver dans le travail de Drozda [DROZ-83] une approche pour la fermeture de la boucle (voir la figure 1.17). Par contre, la description de cette approche ne présente pas la règle dans le cas où deux branches (gauche et droite) se fermeraient sur la pièce brute.

En se basant sur l'approche de [DROZ-83], on va élaborer l'algorithme générique de la fermeture de la boucle dans le chapitre 2 du mémoire.

Zhang et Alting [ZHANG-94] ont montré un lien entre la gamme d'usinage (présentée sous la forme de la charte de tolérance) et l'assemblage qui est défini par la cote résultante « L_Σ » (voir la figure 1.18).

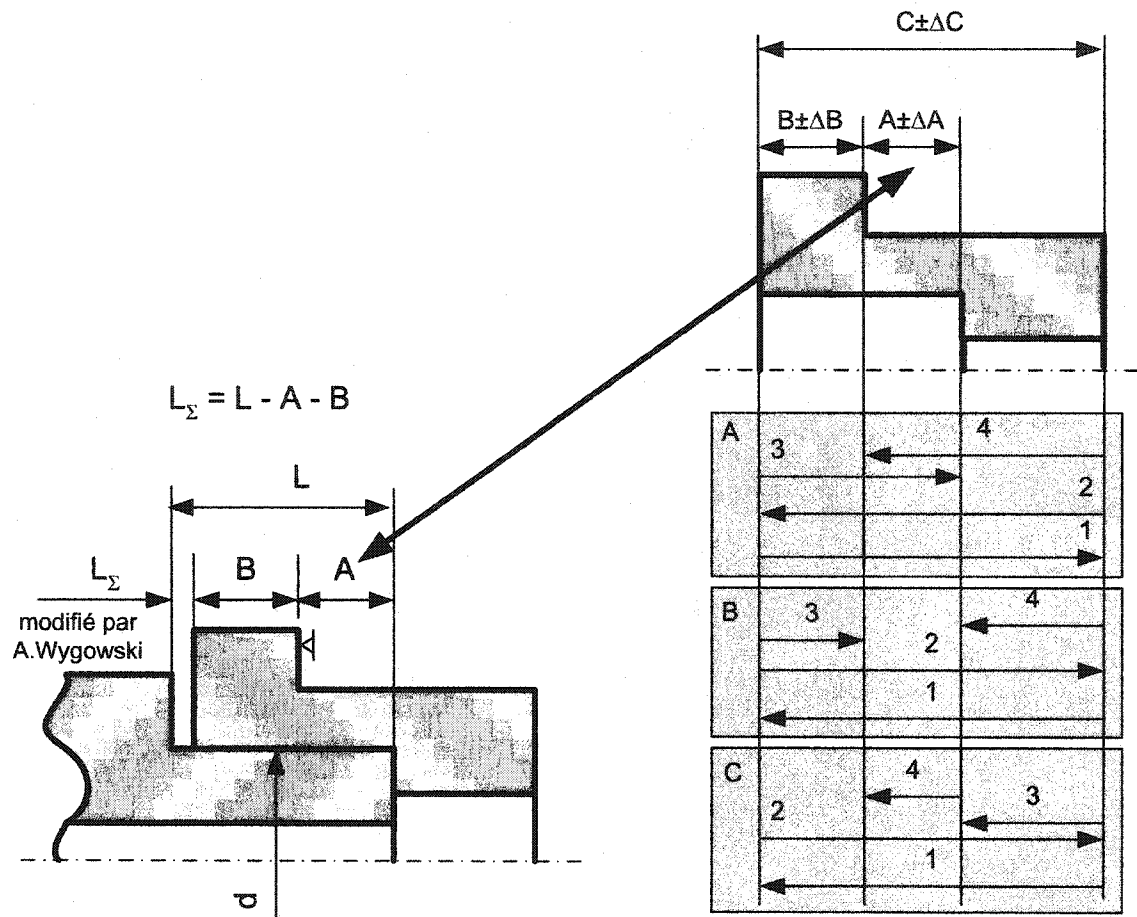


Figure 1.18 - Charte de tolérance pour la fabrication [ZHANG-94]

On voit sur la figure 1.18 que la cote résultante est définie par l'usinage de la cote « A ». Cet usinage est présenté par trois gammes possibles (A, B et C). D'autre part, les auteurs ont pris en compte l'erreur de positionnement pour la cote « L_Σ » due au processus d'assemblage. Malheureusement, les auteurs n'ont pas envisagé la nature de l'erreur de positionnement.

1.3 Conclusion à l'analyse bibliographique

Les améliorations de l'allocation de tolérance par l'approche hybride et par la charte de tolérance sont effectives lors des étapes de fabrication, d'assemblage et de conception. Ceci nous a conduit à étudier un lien entre elles en terme d'ingénierie simultanée.

L'analyse réalisée dans le chapitre 1 nous a fourni les précisions nécessaires en ce qui concerne le contexte de réalisation de la recherche, l'approche et sa réalisation, à savoir :

- La justification de l'utilisation de l'approche hybride pour l'analyse de tolérancement. Choix de la tolérance comme élément de liaison des activités de fabrication (les opérations d'usinage et d'assemblage);
- analyse et critique du modèle générique de tolérancement simultanée de Zhang.

Nous avons décidé d'étudier plus profondément :

- le processus de formation des équations fonctionnelles, notamment la sensibilité « ξ », car il représente l'influence de procédé (l'assemblage et l'usinage) sur la variation de spécification du produit (la dispersion sur la cote résultante);
- le processus d'allocation des tolérances pour l'assemblage doit être assuré avec la possibilité de leur obtention par les opérations d'usinage et l'assemblage. Ceci peut être estimé par la fonction de l'assemblage « Φ_1 »;

Étant donnée une fonction d'assemblage et sa solution par DLM, ceci nous amène à nous interroger sur l'assemblage à l'étape de son analyse. Cette solution exprime une dispersion du processus d'assemblage « $\Delta\Phi_1$ » et avec la charte de tolérance nous pouvons formaliser le calcul des tolérances opérationnelles nécessaires dues aux dispersions d'assemblage et de fabrication.

En accord avec l'analyse bibliographique, il faut souligner de manière condensée les points faibles et leur amélioration possible :

- la validation d'une correction de tolérancement lors de l'analyse de l'assemblage par serrage est insuffisante;
- la prise en compte des conditions industrielles manque (procédé, opération, machine-outil, géométrie de pièces) pour la détermination de la surépaisseur d'usinage dans la charte de tolérance;
- il n'y pas d'algorithme de fermeture de la boucle dans une construction de la charte de tolérance.

L'analyse bibliographique réalisée ci-dessus nous permettra de cibler la recherche, à savoir :

- tolérancement simultané: amélioration d'une méthode de correction de la tolérance due à la contrainte d'assemblage;
- charte de tolérance : élaboration d'un algorithme de fermeture ; enrichissement par la méthode de calcul des tolérances opérationnelles ; intégration dans le pont CAO – FAO.

CHAPITRE 2

ANALYSE APPROFONDIE DU TOLÉRANCEMENT DANS LE CONTEXTE DE L'INGÉNIERIE SIMULTANÉE

En CFAO, la modélisation des pièces et des ensembles d'un produit s'appuie sur une géométrie idéale. Cependant, elle est limitée pour maîtriser complètement les étapes du cycle de vie et donc la qualité des produits conçus.

Le travail exécuté dans ce mémoire se base sur l'idée suivante. Durant l'étape de conception, on met en évidence les tolérances d'une spécification du produit afin de garantir son bon fonctionnement. Souvent, ces valeurs ne tiennent pas compte des influences provenant du processus d'assemblage ou de l'usinage.

Nous avons montré le schéma conceptuel de tolérancement proposé par Zhang dans le chapitre 1 du mémoire. Il a étudié le tolérancement en prenant seulement en considération la fabrication et la conception du produit sans prendre en compte l'influence des opérations d'assemblage. Pendant le processus de conception, un produit est défini par ses conditions de fonctionnement, qu'on exprime dans le cahier des charges. La précision demandée est inscrite par la tolérance de la cote résultante d'assemblage. Ceci a été considéré par Zhang comme une entrée dans son schéma et présenté par « Y ».

En spécifiant la tolérance « Y », le concepteur impose non seulement la qualité requise pour le produit, mais également la qualité de la surface à respecter durant la production. On peut voir dans l'annexe X [BARL-93] qu'il existe une relation entre la valeur nominale de la cote L (mm), intervalle de la qualité ISO (IT), et celle de la valeur R_a , à savoir :

$$R_a = f(IT, L) \quad (2.1)$$

D'autre part, on trouve dans [TEC-99] une relation entre R_a et R_t (voir l'annexe XI). Aussi, il existe une relation entre « IT » et « L » (voir l'annexe XII [GIES-82]), mais pour la tolérance dimensionnelle (équation 2.2).

$$TOL = f(IT, L) \quad (2.2)$$

Nous pouvons conclure que ces deux paramètres (R_a (ou R_t) et TOL) sont liés l'un avec l'autre par l'intervalle de tolérance de qualité ISO. Entre autre, on peut dire que la performance des pièces conjuguées peut être déterminée par la qualité des surfaces en contact. Je vais développer cette idée sur la figure 2.1. Nous pouvons y voir que la cote nominale et sa tolérance sont définies ($L_{AB} \pm TOL_{AB}$) durant l'analyse de l'assemblage (1). Donc, l'état des surfaces des pièces en contact (R_{aA} et R_{aB}) peut être sélectionné (2) à l'aide du tableau 1.6.10 [BARL-93]. Le tableau d'annexe XII [GIES-82] nous donne la relation (2.2). La prochaine étape (3) est un calcul dimensionnel pour les cotes des pièces conjuguées ($L_{A1} \pm TOL_{A1}$) ($L_{A2} \pm TOL_{A2}$) ($L_B \pm TOL_B$).

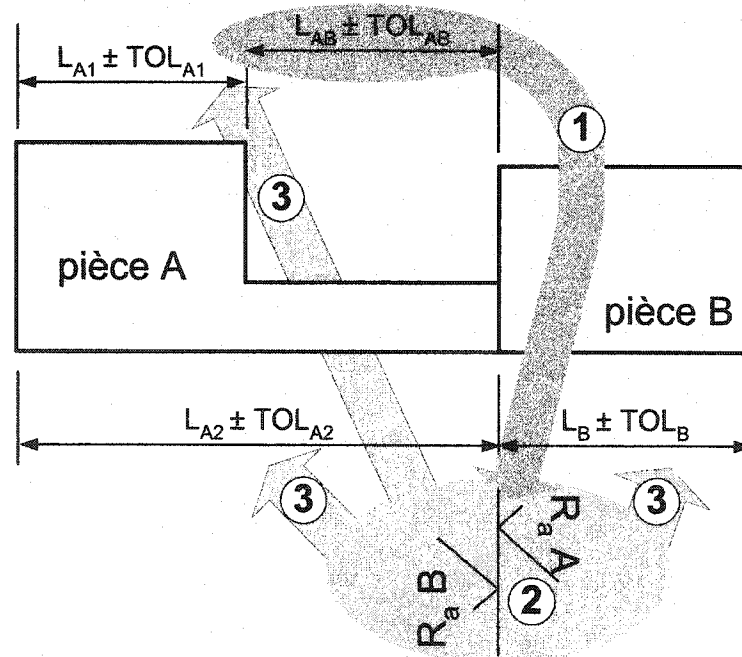


Figure 2.1 - Élément de liaison

Après l'étude réalisée dans le chapitre 1 sur l'analyse du tolérancement, nous avons décidé d'appliquer l'approche hybride afin d'assurer la précision prévue du produit. Cela

veut dire que, en prenant la qualité requise du produit comme élément clé, on va déterminer R_a pour les surfaces de contact. Cela nous permet de choisir le procédé de fabrication approprié à R_a [SPOT-83] avec IT et ensuite de choisir la tolérance opérationnelle. Ceci a été exploité par Zhang dans la formation des équations d'usinage et dans la définition des tolérances opérationnelles. Cette approche est considérée par Zhang comme une approche générique [ZHANG-96]. Par contre, il existe certaines conceptions où la cote résultante peut être modifiée par la nature de l'assemblage (serrage, soudage, brasage). Cela veut dire que la précision de fonctionnement se réalise, entre autre, lors du processus d'assemblage en tenant compte de l'influence de la fabrication.

En observant les étapes d'élaboration d'un produit, on peut noter les aspects du tolérancement pour les chaînes de cotes d'assemblage et de fabrication. Pour l'assemblage, on s'assure que toutes les cotes composantes ont bien été sélectionnées (valeur nominale et leur tolérance) en respectant des paramètres de la cote résultante (par exemple, le jeu de fonctionnement). Le calcul pour la fabrication sert à une vérification des étapes de transformation géométrique des pièces envisagées au cours de leur usinage.

Afin de réaliser cette analyse simultanément, il est nécessaire de prendre en compte les relations entre les pièces considérées. Nous allons définir l'influence des procédés d'assemblage et de fabrication sur la cote résultante. En se basant sur l'analyse des relations entre la tolérance et les activités de fabrication et de conception, cela peut être envisagé par la liaison de l'assemblage et de la fabrication à l'aide du tolérancement.

En se référant sur les relations en question, nous proposons d'établir le lien entre deux processus : la fabrication et l'assemblage (voir la figure 2.2) et d'étudier leur influence mutuelle sur la cote résultante (voir la figure 2.3).

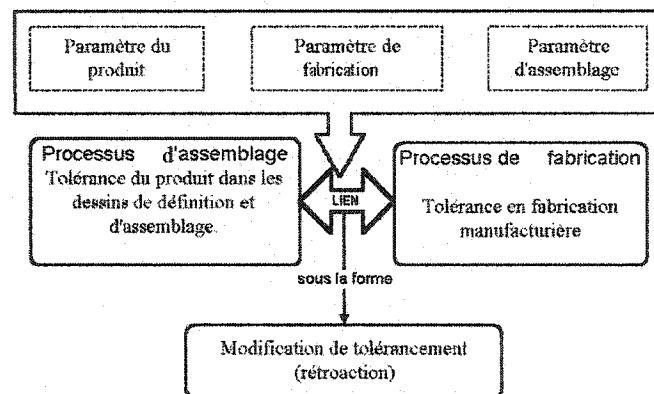


Figure 2.2 - Lien entre les processus d'assemblage et de fabrication par le tolérancement

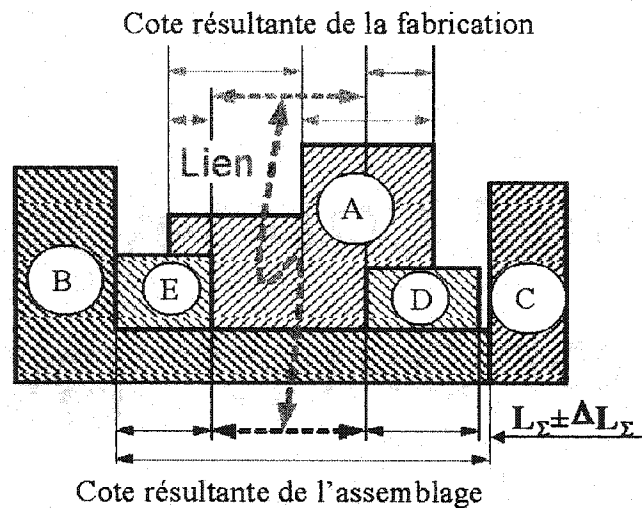


Figure 2.3 - Liaison par la cote

La fabrication (l'usinage) et l'assemblage (la déformation des pièces conjuguées due aux forces des procédés, dans notre cas) ne font pas des éléments idéaux des pièces et des produits, ni au niveau dimensionnel, ni au niveau géométrique. En plus, les erreurs accumulées pendant l'usinage se manifestent à l'assemblage.

Cela nous oblige non seulement à remonter les informations de la fabrication à la conception, mais aussi de prévoir lier l'analyse de l'assemblage et de la fabrication. Comme nous l'avons mentionné, il existe un lien entre le procédé d'assemblage et celui de fabrication qui nous permet d'estimer l'écart de la spécification du produit sous la

forme de la dispersion de la cote résultante « y ». On doit noter que la dispersion va déterminer la tolérance.

Nous avons sur la figure 2.3 le jeu critique fonctionnel comme la cote résultante « L_Σ » ayant la tolérance fonctionnelle « ΔL_Σ », en accord avec la méthode de Zhang, $\Delta L_\Sigma = Y$. La tolérance d'une spécification du produit « Y » (autrement dit, tolérance de la cote résultante) peut être liée avec les procédés de l'assemblage et de la fabrication sous la forme d'une fonction (Eq. 2.3). On doit noter, que pour le cas « WORST CASE » la tolérance est égale à la dispersion.

$$Y = f(\delta_{\text{fabr}}, \delta_{\text{ass}}) \quad (2.3)$$

où :

- Y est la tolérance d'une spécification du produit;
- δ_{fabr} est la tolérance de la fabrication;
- δ_{ass} est la tolérance de l'assemblage.

Le modèle proposé par Zhang (Eq. 1.7) ne mentionne pas totalement la tolérance δ_{ass} , il tient compte seulement de l'influence des chaînes dans le prépositionnement de l'assemblage à l'aide du coefficient de sensibilité ξ_1 . On va en discuter plus tard dans le paragraphe 2.2.

Citons que la cote résultante est déterminée non seulement par le prépositionnement dans l'assemblage, mais dans certains cas (serrage des joints) par l'opérateur et l'outillage pendant l'assemblage. Donc, cela peut provoquer une variation de la cote résultante, l'analyse de l'assemblage permet d'estimer son influence sur « Y ». L'analyse de fabrication sert à résoudre le problème d'une précision technologique, c'est-à-dire qu'il convient de déterminer la dispersion totale d'usinage - Δ_{us} , et de s'assurer qu'elle ne dépasse pas la tolérance de fabrication - δ_{fabr} . Nous pourrions utiliser l'approche envisagée par l'équation (Eq. 1.17) du chapitre 1 afin de calculer Δ_{us} .

L'équation (Eq. 2.3), nous permettra de réaliser l'analyse de l'assemblage et de la fabrication dès l'étape de conception. En effet, la tolérance d'une spécification du produit exprime les conditions de bon fonctionnement des produits en tenant compte des processus. Nous avons mentionné auparavant qu'un lien existe entre les processus d'assemblage et de fabrication par le tolérancement et doit être étudié (voir la figure 2.2). Nous nommons ce lien « technologique » car il reflète une réalité manufacturière. Nous allons limiter notre recherche à la description de certains liens qui se manifestent lors de l'analyse de la fabrication et de l'assemblage. Cette relation, ce « lien technologique », sera étudié dans le contexte du calcul de la précision demandée et sera envisagé à travers le cas pratique analysé dans la partie 2.1 du mémoire.

Nous avons étudié un cas d'assemblage par l'application d'une force de serrage afin de présenter l'amélioration apportée à l'analyse du tolérancement. Nous avons choisi l'architecture d'une pompe d'alimentation (figure 2.4) comme cas pratique. Nous utilisons SolidWorks comme outil de CAO.

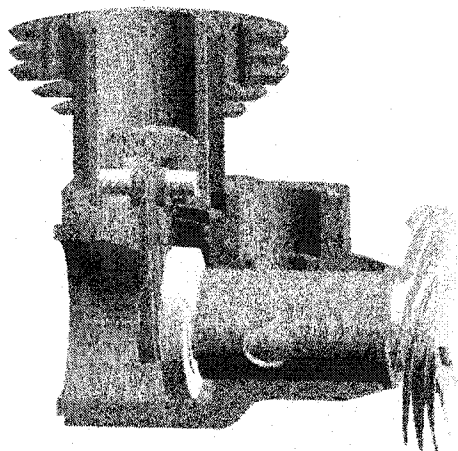


Figure 2.4 - Pompe d'alimentation

Les deux surfaces de contact étudiées entre l'hélice (2) et le vilebrequin (1), sont présentées dans la figure 2.5. L'analyse attribuée à la zone de contact exige de prévoir une méthode d'isolation des sous-faces de contact.

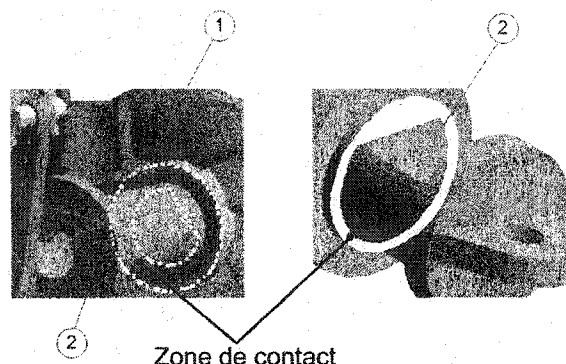


Figure 2.5 - Zone de contact : 1- vilebrequin, 2 – hélice

C'est possible dans SolidWorks grâce à la fonction de vérification du volume d'interférence entre les composants d'assemblage. Néanmoins, cette fonction a ses limites, à savoir qu'elle permet de calculer le volume de l'interférence sous forme cubique par la longueur, la largeur et la hauteur du cube (figure 2.6).

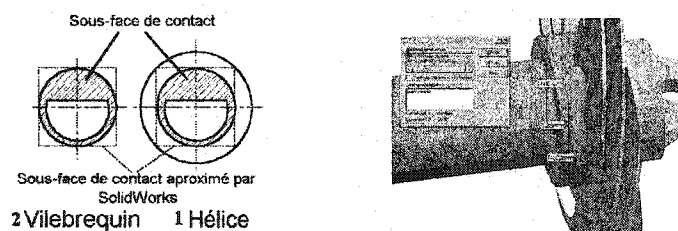


Figure 2.6 - Zone de contact estimé par SolidWorks

Donc, pour bien définir l'influence des procédés d'assemblage et de fabrication sur la cote résultante, il faut simplifier le contact des pièces à assembler. Dans le cadre d'une simplification généralisée sous la forme de blocs, nous examinons le cas pratique. En appliquant la force sur la pièce « C - hélice », nous identifions sur la figure 2.7 un déplacement dans le contact : hélice (C) - vilebrequin (B). Il faut souligner que toutes les autres pièces dans l'ensemble sont considérées comme une pièce « A ».

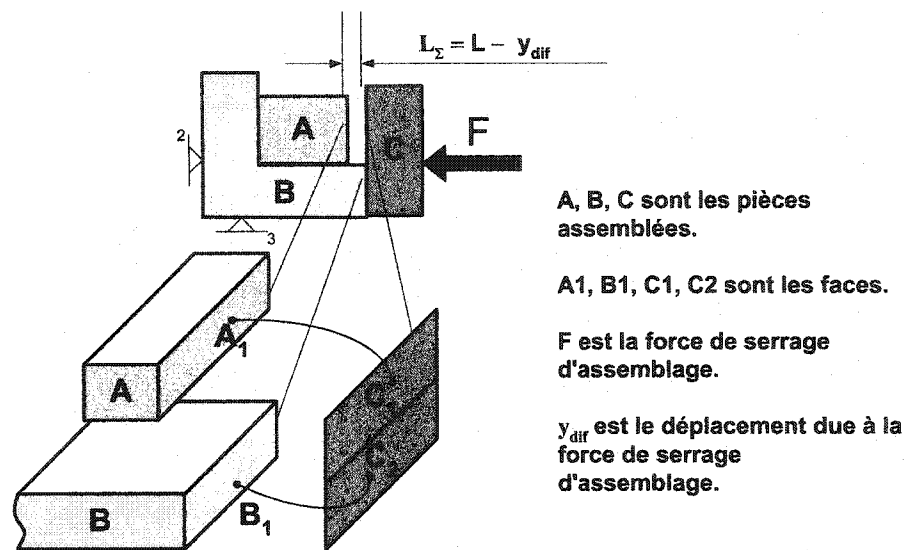


Figure 2.7 - Interprétation graphique de l'influence de la force d'assemblage sur la cote résultante

Étudions sur la figure 2.7 le lien « B1 – C2 ». L'ensemble des blocs donne une simulation d'assemblage, où le bloc « C » se déplace sous l'action de la force « F » dans le joint « B1 – C2 ». Nous considérons l'hypothèse que les blocs sont solides, c'est-à-dire que le déplacement des sous-faces C1 et C2 se produit simultanément. Notons que A1 et B1 sont des faces. Le déplacement y_{dif} est défini par le lien « A1 – C1 » et peut être calculé par l'équation (Eq. 1.11).

Le déplacement dans le joint va provoquer la variation de la cote résultante due à l'assemblage. Nous proposons de tenir compte de cette variation par des rétroactions dans l'analyse du tolérancement simultané. Nous allons discuter de cette possibilité dans le chapitre 3.

La simultanéité du tolérancement dans l'analyse de la fabrication (FAO-GAMME) et de l'assemblage (CAO) peut être exprimée par un passage d'information, où l'information liée peut être exprimée par les entités (voir la figure 2.8).

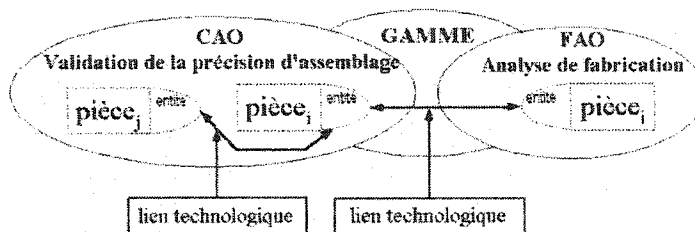


Figure 2.8 - Schéma de liaison dans CAO/GAMME/FAO

L'entité peut être distinguée et précisée par une caractéristique. La caractéristique peut être topologique, géométrique et technologique (l'exemple de ce dernier est présenté sur la figure 2.9).

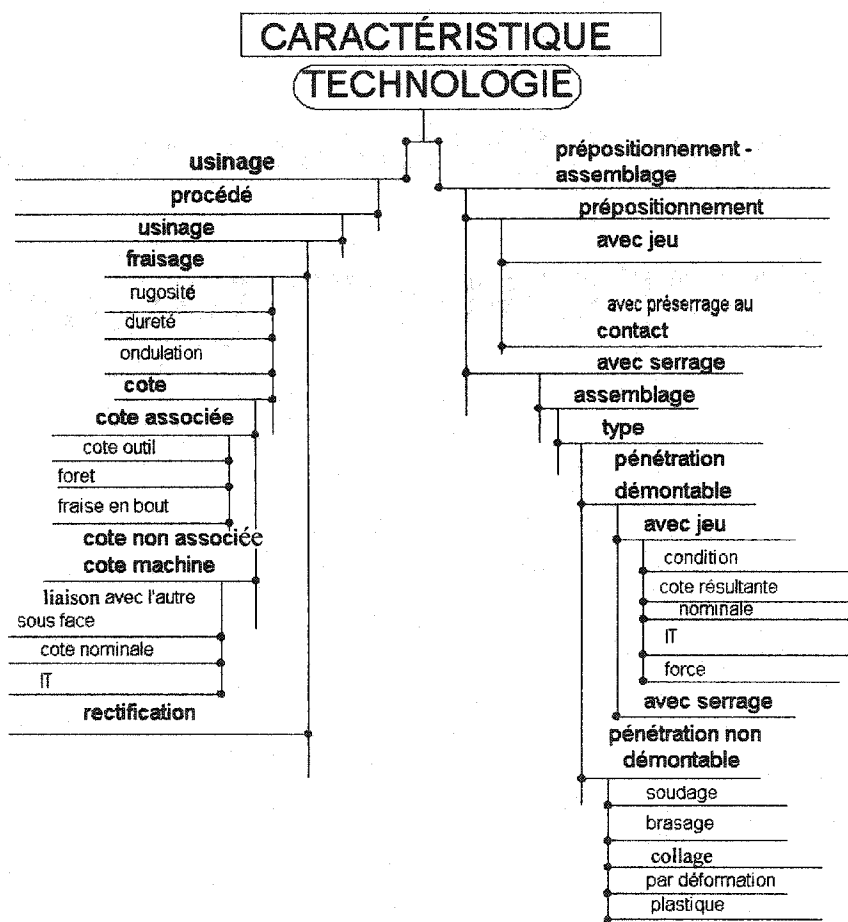


Figure 2.9 - Caractéristique élargie en technologie

Nous pourrions mettre en évidence les entités intrinsèques et extrinsèques définies de la manière suivante :

- *entité intrinsèque* est une caractéristique associée simultanément à plusieurs éléments topologiques (par exemple: les matériaux de la pièce peuvent être associés avec le volume);
- *entité extrinsèque* est une caractéristique associée à un élément topologique (par exemple: l'ondulation de la surface peut être associée avec la face ou la sous-face).

Le concepteur doit construire le modèle de produit en tenant compte de l'influence et du lien entre la conception, la fabrication et l'assemblage. Cela nous a obligé d'inclure dans un modèle les informations topologiques, géométriques et technologiques, ainsi que les relations qui lient ces informations entre elles. Pour résoudre plus efficacement les problèmes de lien, nous analysons la notion d'entité exposée par le groupe GAMMA [GAMMA-98].

Une entité est un groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisé pour décrire un objet indécomposable utilisé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et à l'utilisation des produits et des systèmes de production.

L'entité, d'après le groupe GAMMA, possède un niveau sémantique suffisant pour y associer des connaissances de toute nature, mais surtout technologique, par exemple des informations de tolérancement, d'assemblage et de fabrication. Chaque entité identifiée par un nom et un type bien déterminé est défini par un ensemble de paramètres (caractéristiques, dimensions, tolérances, procédé de fabrication). Les contraintes d'assemblage et de fabrication s'appliquent alors à ces entités.

L'entité n'existe pas isolée. Elle a un lien avec une ou plusieurs autre entité (par exemple, l'entité intrinsèque peut être associée avec une ou plusieurs entités extrinsèques). D'autre

part, nous pouvons distinguer les trois groupes d'entités qui nous intéressent, c'est-à-dire la ressource, la modélisation et le savoir-faire.

Afin de généraliser l'utilisation d'entité, nous proposons d'incorporer ces types d'entité dans une « entité générique » (EG). En l'utilisant, nous pourrions définir le lien technologique (LT) comme suit :

Lien technologique : c'est une relation entre deux ou plusieurs entités génériques.

Nous allons réaliser l'analyse sémantique (ontologie) de notre définition. La notion de « lien technologique » comporte deux éléments sémantiques : lien et technologie. Par relation on entend : un tolérancement, une formule ou une fonction. On trouve dans le Larousse plusieurs définitions du lien :

- ce qui sert à lier pour maintenir ou fermer (ficelle, courroie, chaîne, etc.);
- ce qui attache, unit, établit un rapport logique ou de dépendance, lien de cause à effet;
- ce qui lie deux, plusieurs personnes; relation;
- ce qui impose une contrainte, enchaîne.

Le qualificatif « technologique » laisse sous-entendre d'une relation qu'on tient compte de la technologie. C'est donc à ce niveau que peut s'appliquer le lien technologique afin de permettre la communication. Nous avons visualisé sur la figure 2.10 l'idée directrice du lien technologique.

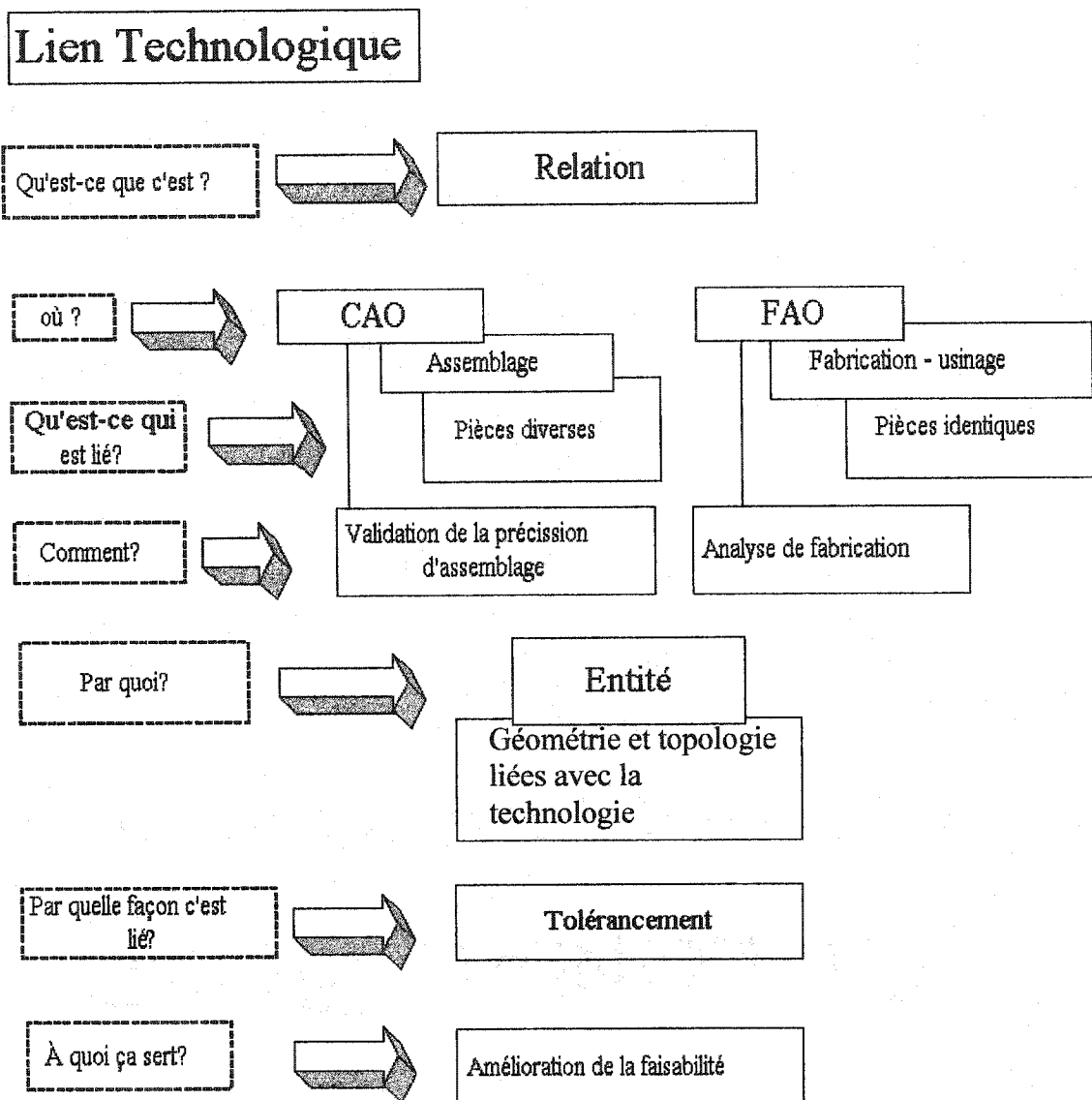


Figure 2.10 - Idée directrice du lien technologique

2.1 Exemples d'utilisation du lien technologique dans l'analyse de l'assemblage et dans l'analyse de fabrication

En tenant compte de tout ce que nous avons proposé ci haut, nous allons donner un exemple d'utilisation de la notion proposée de lien technologique. Nous allons mettre en évidence trois groupes d'entités afin de définir l'entité générique qui englobe la ressource, la modélisation et le savoir-faire. L'intersection de ces trois entités sert à définir l'état du produit (par exemple : micromoteur) au temps exact du processus de développement (figure 2.11).

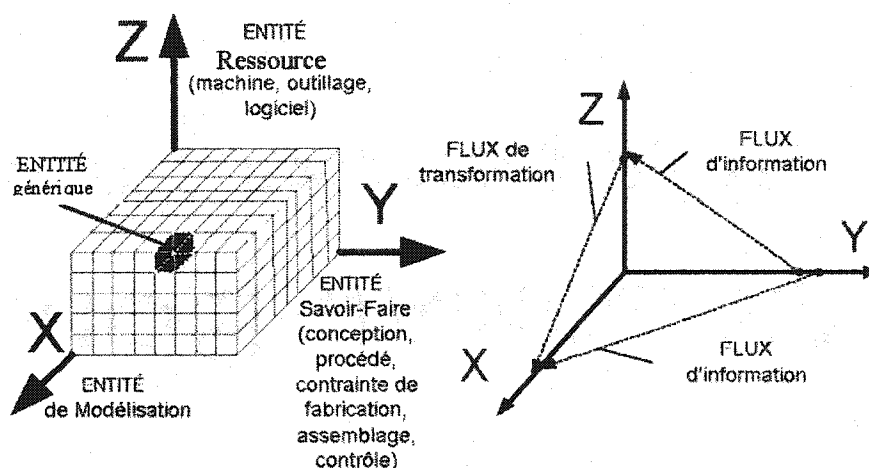


Figure 2.11 - Entité représentative en CFAO

Afin de gérer l'état du produit, nous avons proposé de regrouper ces trois entités dans l'entité générique. Dans le cas d'analyse de l'assemblage (du micromoteur), elles se manifestent de la manière suivante (figure 2.12):

- « EG₁ » est une entité générique qui comporte l'information sur le prépositionnement du vilebrequin dans le banc d'ajustage sous la forme des entités pertinentes et de ses attachements à la sous-face du vilebrequin;
- « EG₂ » est une entité générique qui définit l'état du produit après le changement selon les axes « Y » et « Z ». Dans le cas du micromoteur, c'est une force engendrée par la clef d'assemblage.

Le processus de transformation EG_1 dans EG_2 représente l'application du lien technologique.

Nous évaluons la relation sous la forme du tolérancement ou de la formule. Nous pourrions proposer la méthodologie de correction de la cote en tenant compte de l'assemblage par serrage.

Lien technologique (CFAO): correction de la cote résultante

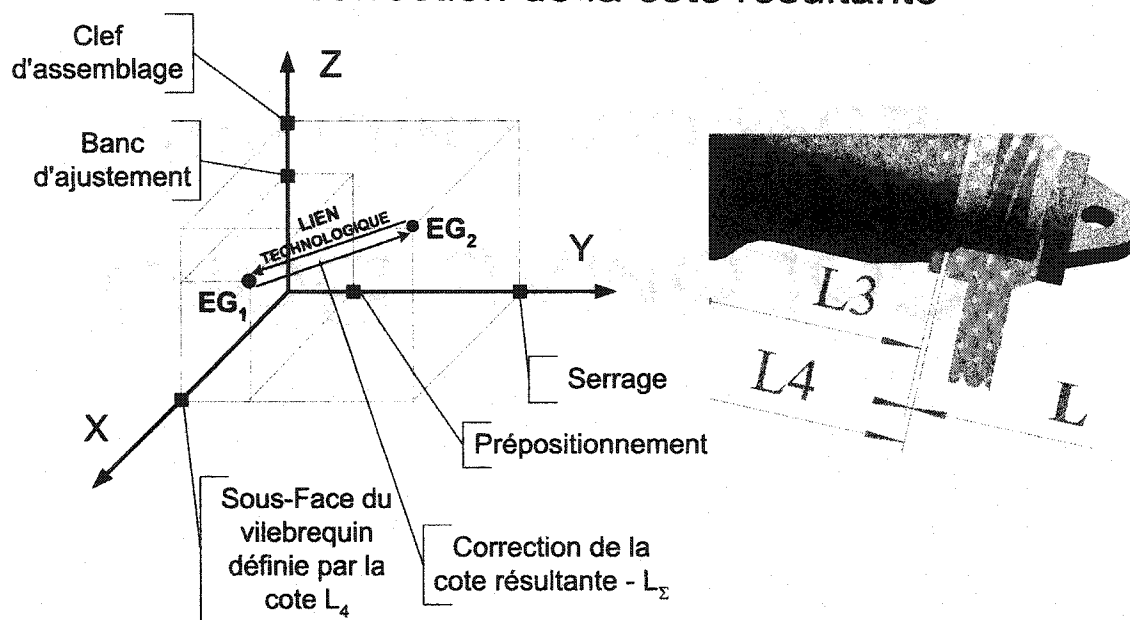


Figure 2.12 - Exemple d'utilisation de LT en CAO

Quand nous avons proposé la présentation du lien technologique, on trouve toujours une relation entre « EG_1 » et « EG_2 », attachée simultanément aux entités de modélisation (dans notre cas c'est une sous-face du vilebrequin). En se référant à la figure 2.11, on peut distinguer le lien technologique (voir la figure 2.13) entre l'assemblage et la fabrication.

Lien technologique (CAO - FAO): validation des cotes opérationnelles

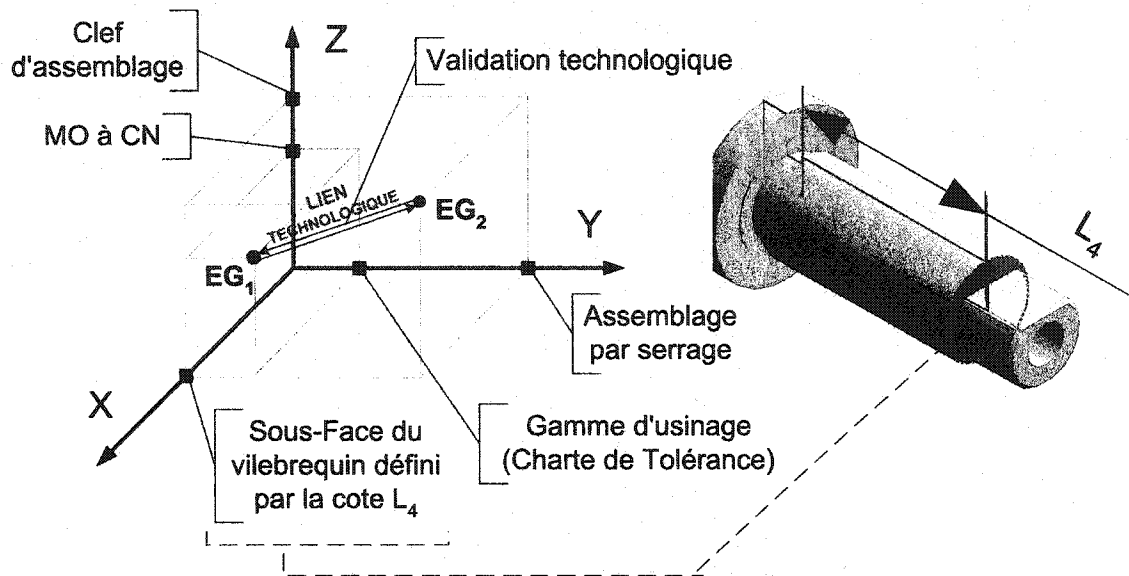


Figure 2.13 - Exemple d'utilisation de LT entre CAO et FAO

D'après la définition proposée, on peut définir le LT pour l'analyse de la fabrication comme une relation entre « EG₁ » et « EG₂ ». Cette réalisation représente la validation technologique d'obtention d'une cote « L₄ » du vilebrequin (valeur nominale et sa tolérance) :

- « EG₁ » est une entité générique qui regroupe des entités portant les informations sur l'assemblage par serrage en utilisant la clef. Elles sont attachées à la sous-face de contact du vilebrequin dans l'état de la gamme d'assemblage;
- « EG₂ » est une entité générique qui comporte la même entité que EG₁ selon l'axe « X », mais dans l'état de fabrication. On y attache les entités de savoir-faire manufacturier (par exemple, la précision d'une machine-outil, le montage d'usinage ou les conditions de coupe).

Selon la nature de la relation entre « EG₁ » et « EG₂ », nous voulons proposer la méthodologie basée sur la charte de tolérance pour l'analyse de la fabrication. Cela nous permet de valider la gamme d'usinage après l'analyse d'une relation entre « EG₁ » et

« EG₂ », autrement dit l'application du lien technologique pour l'analyse de la fabrication.

L'éventail des domaines concernés par cette problématique est assez large et l'application potentielle de l'approche mène à l'utilisation du concept de lien technologique. On constate que le lien technologique fournit une plate-forme particulièrement bien adaptée à la prise en compte de l'influence mutuelle de la fabrication et de l'assemblage afin de supporter un processus d'ingénierie simultanée. Cela nous amène à apporter certaines améliorations au tolérancement simultané, c'est-à-dire :

- l'analyse de l'assemblage : la fonction empirique (Eq. 1.11) qui permet de tenir compte des changements de la cote résultante provoqués par l'influence des jeux défavorables, ainsi que sa résolution par la méthode DLM;
- l'analyse de la fabrication : le calcul précisé par la charte de tolérance (fermeture de la boucle pour les cotes opérationnelles, le choix des tolérances opérationnelles);
- la liaison d'analyse de l'assemblage et de la fabrication par l'établissement des liens technologiques.

Nous allons implémenter les améliorations proposées dans le prototype envisagé dans le chapitre 3.

2.2 Ajustement effectué dans l'analyse de l'assemblage

Nous avons montré dans le chapitre 1 qu'il existe des approches mathématiques pour l'estimation de la dispersion de la cote résultante en fonction des variables indépendantes [CHASE-96], [CHASE-97], [MER-99] et [KOR-87]. Cette dispersion apparaît durant les opérations de l'assemblage et peut être estimée par la fonction non linéaire d'assemblage « Φ_1 ».

L'analyse de la méthode de Zhang [ZHANG-96] dans le chapitre 1 nous a permis de déduire les éléments principaux à ajouter dans son algorithme. Nous améliorons

l'approche de Zhang en y ajoutant l'influence du procédé d'assemblage sur la cote résultante. Afin de tenir compte de ces influences sur « y », nous proposons d'améliorer la méthode de Zhang. Un élément important dans l'approche de Zhang est un modèle mathématique du tolérancement. Afin de généraliser son approche, nous apportons certaines modification, à savoir :

1. Afin d'améliorer la lisibilité des formules, nous proposons d'y introduire l'abréviation : ASS – pour l'assemblage et FABR – pour la fabrication (usinage).
2. L'amélioration de l'approche de Zhang (Eq. 1.7) consiste à y introduire la dispersion due au procédé d'assemblage (Δ_{ASS}), estimé par une fonction non linéaire d'assemblage selon les équations (Eq. 1.9 et Eq.1.11). Ainsi que, la dispersion due au procédé d'usinage (Δ_{FABR}) estimée par l'équation (Eq. 1.17).
3. Nous proposons de tenir compte non seulement des coefficients de sensibilité appartenant aux chaînes des cotes [ZHANG-96], mais aussi des coefficients de sensibilité de l'assemblage et de la fabrication.
4. En tenant compte des points précédents, nous divisons le modèle en deux composantes, une pour l'assemblage et l'autre pour la fabrication.

En se basant sur les équations (Eq. 1.7), (Eq. 1.9) et (Eq. 2.3) nous obtiendrons la forme (Eq. 2.5) :

$$y = \Delta\Phi_{ASS} + \Delta\Phi_{FABR} \leq Y \quad (2.5)$$

où :

$$\Delta\Phi_{ASS} = \sum_{k=1}^p (\xi_{ASS} | \Delta_{ASS})_k \quad (2.6)$$

$$\Delta\Phi_{FABR} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\xi_{ASS})_i \| (\xi_{FABR})_j | (\Delta_{FABR})_{ij} \quad (2.7)$$

ξ_{ASS} = coefficient de sensibilité de l'assemblage (la direction des maillons d'une chaîne de cote par rapport à la cote résultante) et ξ_{FABR} – de la fabrication ;

$(\Delta_{FABR})_{ij}$ = dispersion d'usinage associée avec l'opération d'usinage « j » de la pièce « i » ;

Δ_{ASS} = dispersion due au procédé d'assemblage;

p = nombre de facteurs qui changent la cote résultante. Ça peut être par exemple le changement dû à la force de serrage, R_i et E dans l'équation (Eq. 1.11) avec le prépositionnement cinématique [CHASE-97];

y = dispersion de la cote résultante ;

Y = tolérance de spécification du produit.

On doit noter que pour le cas « WORST CASE » seules les valeurs maximales sont prises en considération. C'est-à-dire que les tolérances associées avec les procédés (assemblage et fabrication) devront être plus grandes ou égales à leur dispersions.

La formule (Eq. 2.5) représente une amélioration à l'approche existante (Zhang) du tolérancement simultané. La fonction en question comporte deux composantes, une définit la dispersion provenant des opérations d'usinage et l'autre l'opération d'assemblage.

La dispersion des opérations d'usinage peut être calculée à partir de l'équation (Eq.1.17). Nous avons décidé d'étudier l'assemblage et non la fabrication donc, nous devons introduire l'équation (Eq. 1.17) dans l'équation (Eq. 2.5) dans la suite du travail.

En analysant la formule (Eq. 2.5), on peut constater que l'influence des opérations d'usinage et d'assemblage sur « y » pourrait être estimée par les coefficients de sensibilité « ξ ». Le coefficient de sensibilité nous montre la propagation de la dispersion de chaque procédé (assemblage et fabrication) sur la dispersion de spécification du produit, notamment sur la dispersion de la cote résultante.

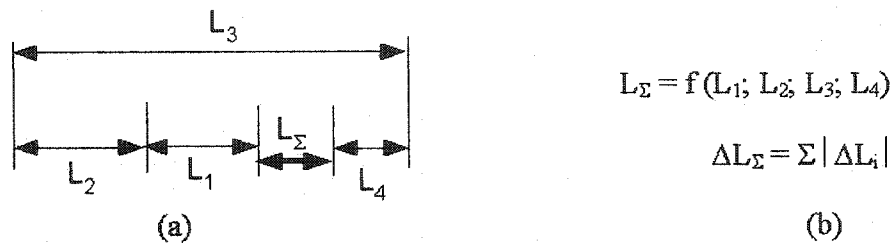


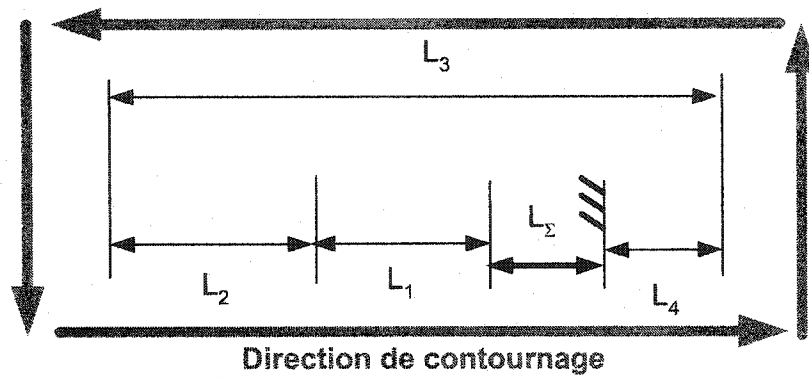
Figure 2.14 - Chaîne des cotes

Afin de comprendre la nature de l'influence des coefficients de la sensibilité « ξ_{ASS} » et « ξ_{FABR} » sur la cote résultante, nous allons analyser les chaînes de cotes. La chaîne de cotes de l'assemblage définit « ξ_{ASS} » et de l'usinage (charte de tolérance) - « ξ_{FABR} ». Ces chaînes de cotes peuvent être présentées par l'interprétation graphique de la figure 2.14(a). La figure 2.14(b) nous montre l'interprétation mathématique de la chaîne des cotes de la figure 2.14(a), que nous appelons l'équation fonctionnelle.

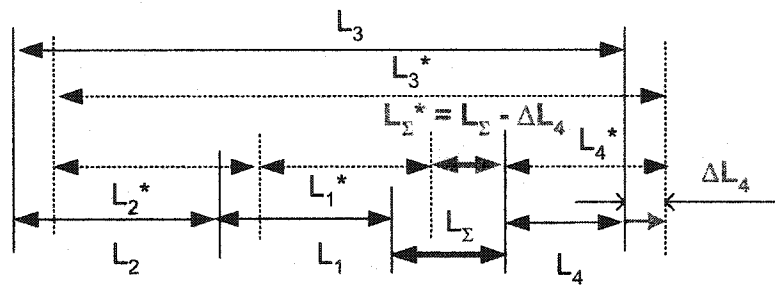
Nous allons analyser l'équation fonctionnelle seulement pour la variation dimensionnelle. Nous obtiendrons :

$$\Delta L_{\Sigma} = f(\Delta L_1; \Delta L_2; \Delta L_3; \Delta L_4) \quad (2.8)$$

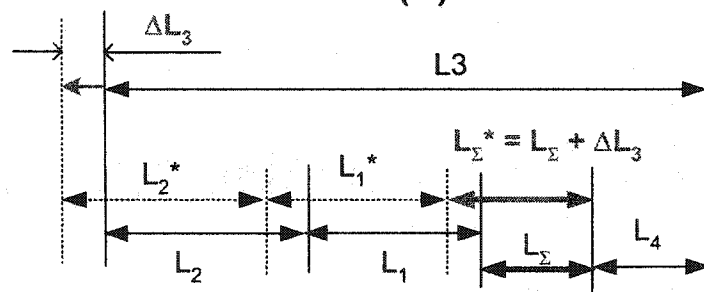
Afin de trouver la loi de changement « ΔL_{Σ} » en fonction du changement « ΔL_i », nous allons visualiser un petit déplacement ΔL_i (dispersion) pour la cote « L_i ». Cette approche a été utilisée dans la figure 2.15. Nous avons posé le changement « ΔL » d'une cote et fixé les autres.



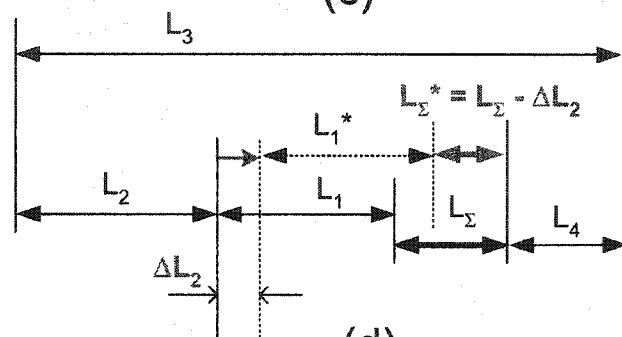
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2.15 - Analyse graphique de la chaîne de cote linéaire

Pour le cas d'analyse présenté par la figure 2.15 (b), on peut voir que L_1 , L_2 et L_3 sont constants. Ça veut dire que leur influence sur « L_Σ » est aussi constante et que l'équation (Eq. 2.8) se transforme sous la forme :

$$L_\Sigma + \Delta L_\Sigma = f(L_1, L_2, L_3, L_4 + \Delta L_4) \quad (2.9)$$

Nous avons la cote résultante en tenant compte de la variation de la cote résultante sous la forme (Eq. 2.10) :

$$L_\Sigma^* = (L_\Sigma + \Delta L_\Sigma) \quad (2.10)$$

On présente l'interprétation graphique sur la figure 2.16, les deux cas possibles d'influence de la cote composante sur la cote résultante. La figure 2.16 (a) représente la loi mathématique pour la cote augmentant et 2.16 (b) pour la cote diminuant. On peut voir la cote augmentant sur la figure 2.15 (c), car l'augmentation L_3 sur la valeur ΔL_3 va augmenter L_Σ , et diminuant sur la figure 2.15 (b). Nous sommes en train d'étudier les pièces solides, c'est pourquoi nous obtiendrons les graphiques linéaires avec la pente de 45 degrés ($k=1$).

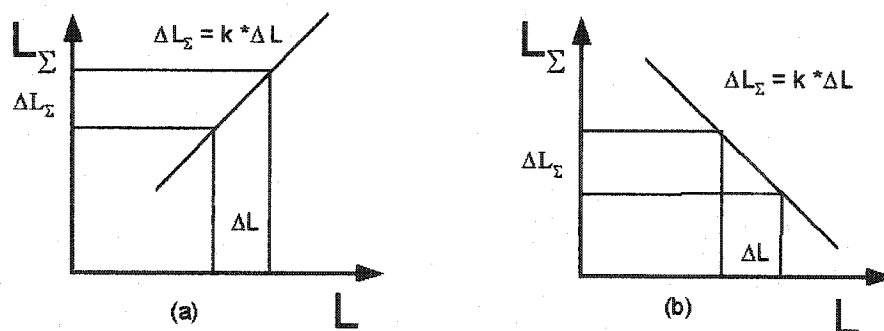


Figure 2.16 - Chaîne des cotes : (a) pour la cote augmentant et (b) pour la cote diminuant
 Analysant la figure 2.15 (b), on peut voir que le changement ΔL_4 sur « L_4 » va changer « L_Σ » par la même valeur (pour le cas en question, $k=1$). Donc, on peut constater que :

$$\Delta L_4 = L_{\Sigma} - L_{\Sigma}^* \quad (2.11)$$

Cela se transforme sous la forme :

$$L_{\Sigma}^* = L_{\Sigma} - \Delta L_4 \quad (2.12)$$

Étant donnée une fonction « L_{Σ} » de paramètres indépendants $L_1, L_2, \dots, L_n$ et après l'analyse effectuée pour la chaîne linéaire, on peut poser la forme générique (Eq. 2.13) :

$$L_{\Sigma} = f(L_1, L_2, \dots, L_n) \quad (2.13)$$

On va identifier cette fonction comme la chaîne paramétrique. En effectuant un petit accroissement pour les paramètres $L_1, L_2, \dots, L_n$, nous obtiendrons les dispersions : $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_n$. Selon la terminologie de la chaîne de cote, on aura :

$$L_{\Sigma} + \Delta L_{\Sigma} = f(L_1 + \Delta L_1, L_2 + \Delta L_2, \dots, L_n + \Delta L_n) \quad (2.14)$$

Supposons que la fonction en question soit dérivable dans le domaine des valeurs $L_1, L_2, \dots, L_n$ qui sont proches des valeurs moyennes $(L_1)_m, (L_2)_m, \dots, (L_n)_m$. Il en résulte que nous pouvons développer « ΔL_{Σ} » en série de Taylor.

Selon [KREY-99] et avec notre notation :

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= L_1 - (L_1)_m \\ \Delta L_2 &= L_2 - (L_2)_m, \\ &\dots, \\ \Delta L_n &= L_n - (L_n)_m \end{aligned} \quad (2.15)$$

ainsi qu'en négligeant les membres de la série de Taylor pour les quantités infiniment petites [FOR-67] (les dérivées du deuxième ordre et d'ordres plus élevés), on obtiendra :

$$L_m + \Delta L_\Sigma = f((L_1)_m, (L_2)_m, \dots, (L_n)_m) + \frac{\partial f}{\partial L_1} \bigg|_{(L_1)_m} \Delta L_1 + \frac{\partial f}{\partial L_2} \bigg|_{(L_2)_m} \Delta L_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial L_n} \bigg|_{(L_n)_m} \Delta L_n \quad (2.16)$$

où :

L_m est une valeur moyenne de L_Σ .

On fait une transformation sur (Eq. 2.17) :

$$L_m - f((L_1)_m, (L_2)_m, \dots, (L_n)_m) + \Delta L_\Sigma = \frac{\partial f}{\partial L_1} \bigg|_{(L_1)_m} \Delta L_1 + \frac{\partial f}{\partial L_2} \bigg|_{(L_2)_m} \Delta L_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial L_n} \bigg|_{(L_n)_m} \Delta L_n \quad (2.17)$$

dans la formule (Eq. 2.17), nous avons :

$$L_m - f((L_1)_m, (L_2)_m, \dots, (L_n)_m) = 0 \quad (2.18)$$

$$\Delta L_\Sigma = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \dots + \Delta L_n \quad (2.19)$$

où :

$$\begin{aligned} \Delta L_1 &= \frac{\partial f}{\partial L_1} \bigg|_{(L_1)_m} \Delta L_1 \\ \Delta L_2 &= \frac{\partial f}{\partial L_2} \bigg|_{(L_2)_m} \Delta L_2 \\ &\dots \\ \Delta L_n &= \frac{\partial f}{\partial L_n} \bigg|_{(L_n)_m} \Delta L_n \end{aligned} \quad (2.20)$$

Citons que la chaîne de cotes géométriques est un cas particulier de chaîne paramétrique qui comporte n'importe quels paramètres physiques liés par une fonction (Eq. 2.13).

Il nous reste à dire que les expressions (Eq. 2.19) et (Eq. 2.20) sont semblables non seulement à la fonction (Eq. 1.9) [CHASE-96], mais aussi à la formule générique du calcul de tolérance pour le cas de « WORST CASE ». Qu'on peut aussi trouver dans les travaux [CRE-96], [KAP-93] et [GREN-88] (voir les formules Eq. 2.21 et Eq. 2.22). Dans ces formules, nous avons la tolérance tol_i qui est égale à dispersion ΔL_i ; tol_y à ΔL_Σ et x_i à L_i ; NOM_y à L_Σ .

$$tol_y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| tol_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| tol_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| tol_n \quad (2.21)$$

$$NOM_y \approx \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| x_n \quad (2.22)$$

où :

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| = \xi \text{ est un coefficient de sensibilité.}$$

On doit noter que le coefficient de sensibilité prend une valeur +1 ou -1 dans le cas des chaînes de cotes, car la fonction « L_Σ » est définie par les composants linéaires (voir les figures 2.16 (a) et 2.16 (b)). Par contre, sa valeur n'égale pas 1 pour les chaînes de cotes angulaires.

La sensibilité de tolérance est un aspect essentiel de l'analyse de tolérance dans des ensembles mécaniques 2D et 3D. Elle détermine la contribution de la variation de chaque composant au produit, autrement dit la propagation d'erreur. L'analyse de sensibilité indique quels composants sont les plus critiques à l'exécution (les étapes de fabrication) et quelle opération de l'assemblage a le plus d'influence.

Dans notre cas, nous avons décidé d'envisager seulement le changement de la cote résultante durant l'opération d'assemblage par serrage. Nous proposons d'estimer ce changement par les variables suivantes : la force de serrage « F », l'état des surfaces en contact « R_t » et les caractéristiques des pièces en contact « E ». Nous pouvons estimer la dispersion de la fonction de l'assemblage « $\Delta\Phi_{ASS}$ » par la dispersion de la fonction « Δy_{djf} ».

En se basant sur l'équation (Eq. 2.5), nous obtiendrons :

$$y = \Delta y_{djf} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |(\xi_{ASS})_i| |(\xi_{FABR})_j| |(\delta_{FABR})_{ij}| \leq Y \quad (2.23)$$

Afin d'estimer la propagation « Δy_{djf} » sur « y » (notamment le coefficient de sensibilité ξ_{djf}), nous allons solutionner l'équation (Eq.1.11) à l'aide de la méthode DLM, car l'effet de « E », « F » et « R_t » est non linéaire (voir l'annexe I). Afin de réaliser cela, nous avons amélioré l'approche existante, par l'application de la méthode DLM et « WORST CASE » pour l'équation (Eq. 1.11) avec l'identification des trois variables influençant la cote résultante durant l'assemblage. Une application de MAPLE sert à résoudre la deuxième dérivation de l'équation (Eq. 1.11).

Cela permet de trouver la dispersion de la valeur de la correction due à la force de serrage et les coefficients de sensibilité sous la forme symbolique (voir dans l'annexe I l'exemple de MAPLE).

Afin de souligner l'amélioration apportée à l'approche existante du tolérancement simultané, nous avons choisi l'architecture en bloc. Le modèle des blocs peut simplifier l'étude de certaines pompes d'alimentation, les montages de soudage ou de brasage. Les cotes résultantes pour l'assemblage peuvent être définies par les jeux, les serrages, les positions relatives des surfaces. Nous avons choisi le jeu « J », car il joue un rôle très

important dans la conception des produits ayant une grande précision (compresseur de turboréacteur, pompe d'alimentation) (voir la figure 2.17).

$$\frac{\Delta J \text{ (distorsion de } J)}{l \text{ (longueur de l'aube)}} = \uparrow (1\%) \Rightarrow \text{rendement} \downarrow (3\%) \Rightarrow \text{débit de combustible} \uparrow (10\%)$$

Figure 2.17 - Lien technologique exerçant une influence sur la modification de la cote
[KOR-87]

Nous avons mis en évidence dans le modèle des blocs deux surfaces au contact. En général, on peut utiliser plusieurs surfaces à l'assemblage par la force de serrage et dans ce cas, il faudra envisager « L_{LT} » paire à paire afin de calculer la somme de la valeur corrective résultante. Mais la validation de cela doit être réalisée dans les travaux futurs. Présentons le modèle choisi par la figure 2.18.

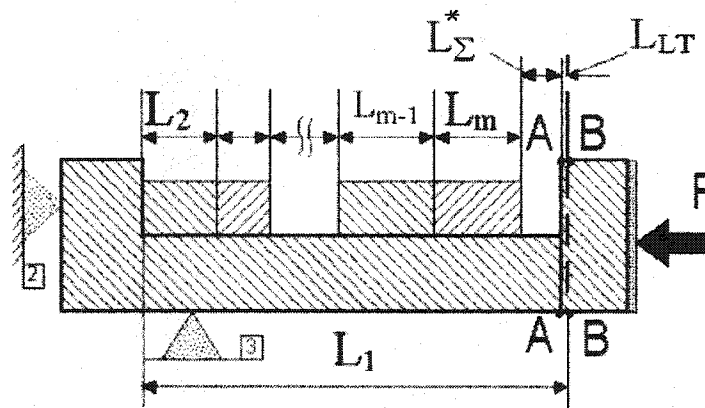


Figure 2.18 - Conception d'un assemblage en bloc sous l'action d'une force - F
On a sur la figure 2.18 :

- B-B = position au prépositionnement (CAO);
- A-A = position après l'application de la force - F (processus d'assemblage);
- $L_1, L_2, \dots, L_{m-1}, L_m$ = cotes composantes (définies par le processus de fabrication);
- $(L_2)^*$ = cote résultante en tenant compte de la variation maximale de la cote résultante due à l'assemblage;

- L_{LT} = déplacement dû à la force de serrage. Ceci est provoqué par une déformation du contact au joint par la force F .

Nous aurons la cote résultante L_{Σ} , sa distorsion vient du processus d'assemblage et s'attache à A-A. En se basant sur le modèle d'assemblage, nous avons visualisé le processus d'analyse de la façon suivante : L_{LT} est le petit déplacement (déformation au joint).

Désignons L_{LT} par « y_{djf} » et dans les formules (Eq. 2.24) et (Eq. 2.25) exprimons-le comme une fonction de trois variables technologiques indépendantes.

$$L_{LT} = y_{djf} = f(R_t, F, E) \quad (2.24)$$

$$y_{djf} = (4 + R_t) * \left[\frac{100 * F}{A * D * S_y * b_{\Sigma}} \right]^{\frac{1}{2+k}} + 0.13(A_w)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{W * \theta * F}{A} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.25)$$

$$R_t \approx 1,25R_z \quad (2.26)$$

$$R_z \approx 6R_a \quad (2.27)$$

$$\theta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (2.28)$$

$$b_{\Sigma} = 0.24b * (0.4 - 0.1 * k) * (4 + R_t)^{\frac{2+k}{R_t^k}} \quad (2.29)$$

où les paramètres essentiels sont:

- R_t = hauteur maximale du profil de rugosité des surfaces des pièces au joint,

- R_z = hauteur des irrégularités de rugosité, [μm];
- R_a = écart moyen arithmétique du profil;
- F = force de serrage;
- E = module d'élasticité.

Analysons l'équation (Eq. 2.25). Nous pouvons y distinguer les variables indépendantes issues de la fabrication. Ce sont la rugosité et l'ondulation. Nous pouvons trouver leur source dans [TECH-01] et les estimer par les équations (Eq. 2.30) et (Eq. 2.31):

Niveau d'analyse	Types de défauts	Causes
Macrographiques		Fraisage : le pas de l'ondulation est défini par l'avance par tour de fraise, vibrations, pièce et outil.
Micrographiques		L'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations

y_r : qui englobe l'influence de la rugosité et conformément à cela:

$$y_r = (4 + R_t) * \left[\frac{100 * F}{A * D * S_y * b_\Sigma} \right]^{\frac{1}{2+k}} \quad (2.30)$$

y_{on} : qui englobe l'influence d'ondulation :

$$y_{on} = 0.13(A_w)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{W * \theta * F}{A} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.31)$$

Nous pouvons trouver l'importance des critères de rugosité et d'ondulation pour diverses fonctions de surfaces dans [TRIB-03].

Fonction appliquée à la surface	Critères		
	Profil de rugosité	Profil d'ondulation	
	R_t	W	A_w
Étanchéité dynamique (avec joint)	O	$<0.6R_t$	X
Ajustement fixe avec contrainte	X	-	-
X - Critères principaux ; O - Critères secondaires			

Le cas des blocs représente un ajustement fixe avec contrainte (la force de serrage « F ») où le profil de rugosité est le critère principal selon [TRIB-03].

Afin d'intégrer le déplacement du joint dans l'approche du tolérancement simultané, nous allons trouver la dispersion Δy_{djf} . En se basant sur la formule (Eq.1.9) (en accord avec la méthode DLM), et les équations (Eq. 2.25 et Eq. 2.30), exprimons le Δy_{djf} :

$$\Delta y_{djf} = \frac{\partial y_{djf}}{\partial F} \Delta F + \frac{\partial y_{djf}}{\partial R_t} \Delta R_t + \frac{\partial y_{djf}}{\partial E} \Delta E \quad (2.32)$$

où :

- ΔF = dispersion F;
- ΔR_t = dispersion R_t ;
- ΔE = dispersion E.

L'approche envisagée par (Eq. 2.32) peut être utilisée pour toutes les variables des autres procédés manufacturiers (par exemple, brasage ou soudage).

Pour le cas « WORST CASE » nous pouvons remplacer les dispersions par les tolérances conformément aux paramètres:

$$\delta L_{LT} = \frac{\partial y}{\partial F} (\delta F) + \frac{\partial y}{\partial R_t} (\delta R_t) + \frac{\partial y}{\partial E} (\delta E) \quad (2.33)$$

où :

- δL_{LT} = tolérance de la cote L_{LT} due à l'opération de l'assemblage;
- δF = tolérance de la force de serrage du joint;
- δR_t = tolérance de la profondeur maximale R_t de rugosité des surfaces en contact;
- δE = tolérance du module d'élasticité.

Les valeurs δF , δR , δE peuvent être déterminées par le savoir-faire manufacturier.

Afin d'éviter les erreurs dues au calcul de la dérivation partielle, à savoir : $\partial y / \partial F$, $\partial y / \partial R$, $\partial y / \partial E$, nous avons utilisé le programme MAPLE V. Nous allons réaliser ce calcul pour le cas envisagé sur la figure 2.19 en prenant les données de départ suivantes :

- $A = 1400$, aire nominale du contact, [mm^2];
- $D = 5.48$, coefficient adimensionnel qui caractérise le durcissement de la couche superficielle des surfaces en contact;
- $A_w = 2000$, pas moyen d'ondulation, [μm];
- $W = 5$, profondeur moyenne d'ondulation, [μm];
- $S_y = 190$, limite d'écoulement, [MPa];
- $\mu = 0.255$, coefficient de Poisson;
- $k = 2$ et $b = 1$, paramètres adimensionnels de la longueur portante du profil et qui dépendent du procédé d'usinage.

Le code du programme développé en MAPLE V est présenté dans l'annexe I. Son application nous donne les expressions symboliques conformément aux dérivations partielles :

$$\xi_F = \frac{\partial y}{\partial F} = 0.05 \frac{4 + R_t}{F^{\frac{3}{4}}} + 0.04 \frac{1}{E \left(\frac{F}{E} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.34)$$

$$\xi_R = \frac{\partial y}{\partial R_t} = 0.19 F^{\frac{1}{4}} \quad (2.35)$$

$$\xi_E = \frac{\partial y}{\partial E} = -0.04 \frac{F}{E^2 \left(\frac{F}{E} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.36)$$

L'application de MAPLE permet de trouver le coefficient de sensibilité « ξ_{djf} », (autrement dit la propagation totale de « Δy_{djf} » sur la « L_Σ ») sous la forme symbolique (Eq. 2.37) :

$$\xi_{djf} = 0.05 \frac{4 + R_t}{F^{\frac{3}{4}}} + 0.04 \frac{1}{E \left(\frac{F}{E} \right)^{\frac{1}{3}}} + 0.19 F^{\frac{1}{4}} - 0.04 \frac{F}{E^2 \left(\frac{F}{E} \right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.37)$$

Nous pouvons généraliser l'équation (Eq. 2.37) comme suit :

$$|\xi_{djf}| = |\xi_R| + |\xi_E| + |\xi_F| \quad (2.38)$$

Nous avons donc défini des sensibilités liées au processus d'assemblage qui peuvent servir à calculer la dispersion totale représentée par l'équation (Eq. 2.5).

Le coefficient ξ_{djf} montre l'influence totale de la dispersion calculée par la fonction d'assemblage y_{djf} .

Nous avons justifié les améliorations apportées dans l'analyse d'assemblage par le calcul de la valeur de correction. Cette valeur est calculée pour un ensemble de blocs, qui simulent une pompe à engrenages et elle est estimée par la fonction y_{djf} . Nous avons décidé de prendre le cas « WORST CASE ».

Afin de valider les équations (Eq. 2.25 et Eq. 2.37), nous avons réalisé une simulation pour le cas du bloc (figure 2.18). Ayant les données de départ, le nombre de joints équivaut à 2, matériaux des pièces en contact – fonte grise 30, $A=1400\text{mm}^2$, $E_1 = E_2 = E = 120\text{GPa}$, $k=2$, $b=1$, $\mu_1=\mu_2=\mu=0,255$, $A_w=2000\mu\text{m}$, $S_Y=190\text{MPa}$, $D=5,48$, $W=5\mu\text{m}$.

Nous pouvons trouver la plage de variation de R_t en fonction du procédé dans [TEC-99]. On a dans le cas de fraisage de précision $R_t = 4$ de $10\mu\text{m}$, c'est-à-dire $\Delta R_t = 6\mu\text{m}$. Nous avons considéré une variation de la force de serrage « F », $\Delta F = 1200\text{N}$. On doit noter que la simulation se fait par l'utilisation du programme développé en MAPLE (voir l'annexe I). Le résultat de la simulation nous permet de conclure qu'il est nécessaire de tenir compte du déplacement du joint pour les surfaces en contact dont le matériau est en acier de construction (voir la figure 2.19). La cote résultante, qui définit le jeu fonctionnel, a une tolérance à partir de 0.035 mm . Car nous obtenons un déplacement maximal $y_{\text{dif}} = 35\mu\text{m}$, donc le jeu fonctionnel est égal à 0 mm . Ce qui ne peut pas être accepté par la spécification imposée sur le produit.

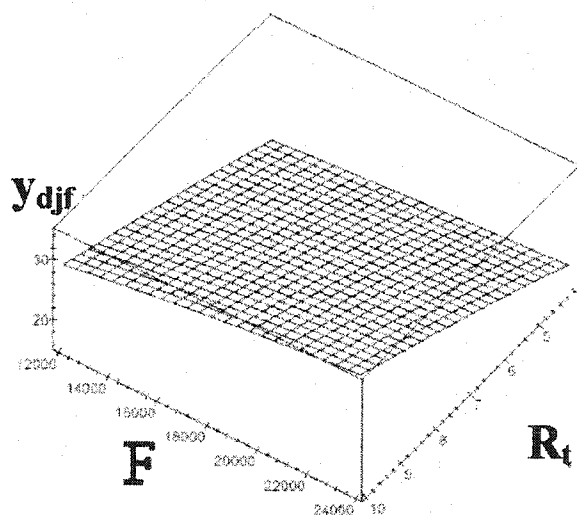


Figure 2.19 - Déplacement du joint sous l'influence multiple de « R_t » et « F »

Le coefficient de sensibilité obtenu nous montre l'importance du procédé d'assemblage sur la dispersion de la cote résultante. Ainsi l'influence de la rugosité ($\xi_R = 1.27$) sur la valeur de correction est plus importante que celle de la force de serrage ($\xi_F = 0.002$).

Après le calcul du déplacement du joint, nous avons déterminé leur dispersion $\Delta y_{djf} = 1.4 \mu m$.

Les variations des paramètres dimensionnels estimées par Δy_{djf} résulteront de l'influence du lien technologique de l'assemblage et de la fabrication. Ceci est conforme à la définition du lien technologique. C'est-à-dire, nous avons un lien technologique dû à la tolérance, estimé comme une relation sous la forme d'une fonction y_{djf} entre deux entités génériques. Ces deux entités génériques comportent les entités :

- entité géométrique – la surface de contact (A);
- entité technologique – les paramètres définis par l'opération d'usinage (R_t) et l'opération d'assemblage (F).

2.3 Ajustement effectué dans la charte de tolérance - outil d'analyse de fabrication

Afin d'incorporer les résultats obtenus à l'ajustement dans l'analyse d'assemblage, nous proposons d'utiliser la charte de tolérance comme outil de liaison d'assemblage et de fabrication. En se basant sur le schéma conceptuel de tolérancement (voir la figure 1.9) et sur l'analyse bibliographique (chapitre 1), nous allons aborder les composantes pertinentes de la charte (voir la figure 1.14).

2.3.1 Détermination de la dispersion d'usinage (« Machine to $\pm TOL$ »)

L'analyse dimensionnelle de la précision dans la gamme de fabrication comporte l'établissement de liens dimensionnels de pièces avec leur fabrication y compris les calculs des paramètres considérés à l'aide des chaînes de cotes. Cette analyse se fait d'après les contraintes de phase et permet de résoudre les tâches suivantes :

- *calculer* les cotes opérationnelles et imposer les prescriptions technologiques en vue de garantir la qualité prévue des pièces mécaniques;

- *déterminer* les dimensions du brut en ayant les surépaisseurs minimales qui augmenteront le coefficient d'utilisation du matériau - γ_m ; peut être défini comme $\gamma_m = G_p / G_b$, [KOR-87]; où G_p est le poids du brut et G_b est le poids de pièce finie;
- *faire l'étude* de la gamme de fabrication pour minimiser le nombre de phases, ce qui diminuera la quantité de travail au lancement de la production.

Afin de réaliser une analyse du tolérancement complet, on propose d'utiliser une méthodologie qui se base sur le mécanisme de charte de tolérance et l'approche de l'équation (Eq. 1.17).

2.3.2 Fermeture de la boucle avec les cotes opérationnelles (« Balance Dimension »)

En faisant l'analyse des méthodes de construction de la charte de tolérance, on peut citer un élément essentiel : la fermeture de la boucle des cotes opérationnelles.

La fermeture de la boucle nous permet d'identifier toutes les opérations d'usinage utilisées à la formation des extrémités de chaque cote issue du bureau d'étude.

En se basant sur l'analyse bibliographique, nous allons conclure qu'il faut clarifier l'algorithme de fermeture de la boucle, ce qui nous a amené au développement de l'algorithme générique de fermeture de la boucle par l'implantation de la notion de cote opérationnelle—virtuelle « L_0 ». La nature de cette cote est la suivante : elle appartient à l'opération d'obtention du brut et représente la surface non usinée. Cela nous permettra d'élaborer l'algorithme de la fermeture de boucle de manière automatique et programmable (voir le chapitre 3).

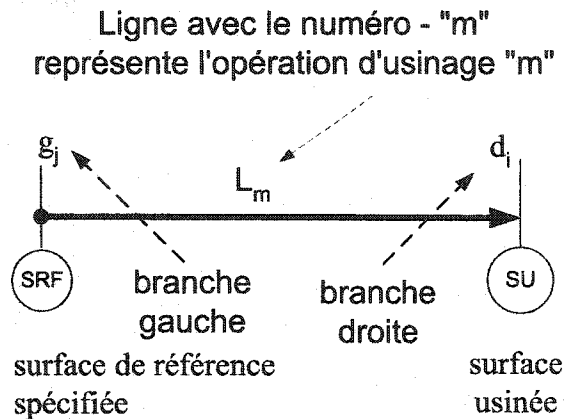


Figure 2.20 - Visualisation générique des éléments de la charte de tolérance

Ainsi que nous avons défini sur la figure 2.20 les éléments pertinents servant à développer l'algorithme de la fermeture de boucle.

Les étapes de l'algorithme développé sont les suivantes : pour chaque cote X_i identifiée, on applique les règles de construction suivantes :

- 1) on remonte verticalement la branche de droite (d_i) jusqu'à la première pointe de flèche;
- 2) on remonte verticalement la branche de gauche (g_i) jusqu'à la première pointe de flèche;
- 3) est-ce que la surface d'appui, autrement dit la surface de référence justifiée (indiquée par un point), de la flèche de numéro supérieur est la même que la surface usinée (indiquée par une pointe) de la flèche de numéro inférieur?
- 4) si non, on mémorise la flèche de numéro supérieur; on glisse horizontalement sur celle-ci vers le point, puis on remonte verticalement jusqu'à la prochaine pointe de flèche et on retourne à l'étape 3;
- 5) si oui, on ignore la flèche de numéro inférieur et on ferme la boucle avec les flèches par lesquelles on a passé.

L'algorithme élaboré s'applique non seulement pour construire la fermeture de la boucle à partir des cotes du Bureau d'Étude ou des Méthodes, mais aussi pour bâtir les boucles

fermées pour toutes les cotes opérationnelles. L'exercice d'application est présenté dans la figure 2.21 y compris la règle de construction.

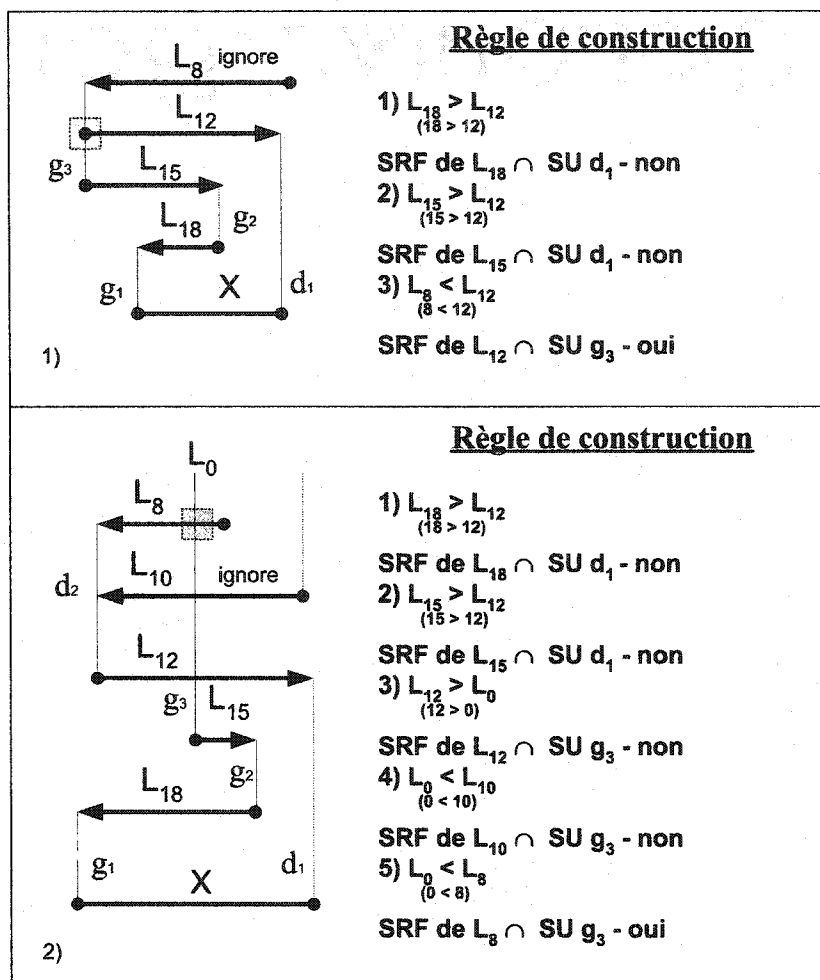


Figure 2.21 - Exploration de l'algorithme - fermeture d'une boucle

2.3.3 Calcul du copeau minimal (« Stock removal »)

Nous avons décidé de prendre la méthodologie (Eq. 1.15) afin de calculer le copeau minimal. On peut voir que sa valeur est définie par la rugosité R_z . Cela permet son application à notre modèle de correction de cote pour l'étape d'analyse d'assemblage. Cette approche va lier la fabrication et l'assemblage.

Ce n'est pas notre but d'élaborer le module complet de cette analyse. Donc, on présente la vue orientée vers la fabrication sur la figure 2.22.

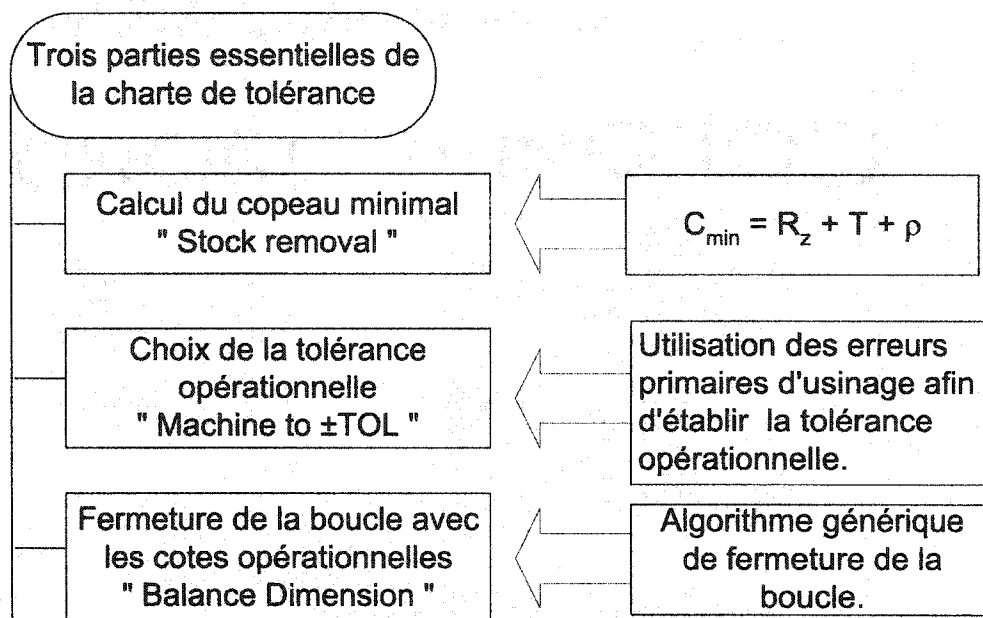


Figure 2.22 - Élément ajouté dans la méthodologie de la charte de tolérance

2.4 Conclusion

L'analyse approfondie du tolérancement nous permet de ressortir les nouveautés suivantes :

1. Il existe une variation de la cote résultante provoquée par certains procédés d'assemblage (serrage des joints, soudage, brasage).
2. L'influence de cette variation est définie par le coefficient de sensibilité qui peut être calculé dans MAPLE pour l'assemblage par serrage des joints.
3. L'ajustement de la charte de la tolérance permet de valider la gamme de fabrication (usinage).
4. Le tolérancement permet l'analyse simultanée de la fabrication et de l'assemblage.
5. La simultanéité de l'analyse de la fabrication et de l'assemblage est écrite à l'aide du lien technologique et peut être estimée par la fonction (Eq. 2.5).

6. Le lien technologique présente une relation entre trois entités : la ressource, la modélisation et le savoir-faire.
7. Les entités sont englobées par l'entité générique rendant possible la définition du lien technologique.

CHAPITRE 3

MODÈLE SADT DU PROTOTYPE ET SON ALGORITHME

L'analyse simultanée de l'assemblage et de la fabrication englobe le tolérancement. Nous avons précisé auparavant le manque de recherche de l'influence des paramètres intrinsèques du procédé d'assemblage (telles que la force de serrage ou la déformation de soudage) dans l'analyse de l'assemblage (tolérancement). Nous proposons d'estimer ces paramètres par une fonction d'assemblage, car son influence apparaît durant les opérations d'assemblage et peut provoquer soit un changement de la cote résultante, soit de la cote appartenant à la pièce en contact. C'est pourquoi il faut penser à prendre en compte ce changement.

Lors de l'analyse de l'assemblage avec jeu, le concepteur détermine la cote résultante (valeur nominale et tolérance) qui influence le fonctionnement du mécanisme. Dans le cas d'un assemblage avec serrage des joints au contact, il convient de tenir compte du déplacement dans ce joint et éventuellement de déterminer la valeur de la correction de la cote résultante.

Le but du prototype développé est l'intégration de certaines contraintes de fabrication (définissant R_t) et d'assemblage (définissant F) dans le processus de conception d'un produit, à savoir le tolérancement, estimé par la fonction (Eq. 2.23).

Afin de structurer le processus de développement du prototype, nous allons utiliser la méthodologie SADT. Le niveau de détail représenté dans le modèle SADT est limité par le but (voir la figure 3.1). Nous allons présenter par les figures 3.2 à 3.4 les relations entre les modules principaux du SADT utilisé dans le développement du prototype.

Il faut noter que nous utilisons le standard de SADT approuvé par CAE Inc., à savoir sur la figure 3.2 par l'indice A2 au-dessous du bloc A1-2 nous montrons qu'il existe une structure hiérarchique A2-X.



BUT: Analyse du tolérancement simultané pour l'assemblage avec jeu par forces de serrage.

Figure 3.1 - Niveau A0 du SADT

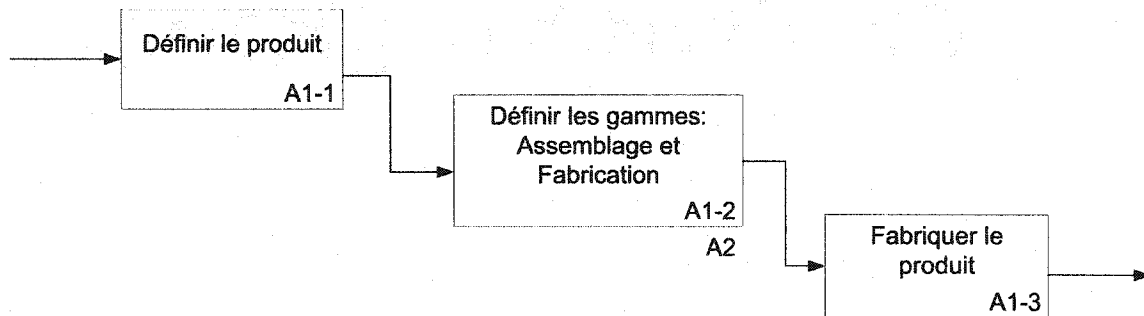


Figure 3.2 - Modèle du prototype sous la forme de SADT - A1

Nous allons montrer par la figure 3.3 les relations logiques entre les étapes d'élaboration du produit. Nous allons nous concentrer sur le module A2-3 présenté à la figure 3.3 et développé comme niveau A3 à la figure 3.4. Ce module représente la logique de notre prototype. Avant de décrire les étapes de fonctionnement du prototype, nous allons définir les structures de données d'entrée du bloc A2-3.

3.1 Entité comme un moyen de présenter les informations dans le prototype

Le concepteur doit construire le modèle de produit en tenant compte des influences de la conception, de la fabrication et de l'assemblage. Cela nous oblige à inclure comme les données les informations topologiques, géométriques et technologiques, ainsi que les

relations qui lient ces informations entre elles. Nous avons décidé de considérer les entités comme un moyen de présenter les informations dans le prototype.

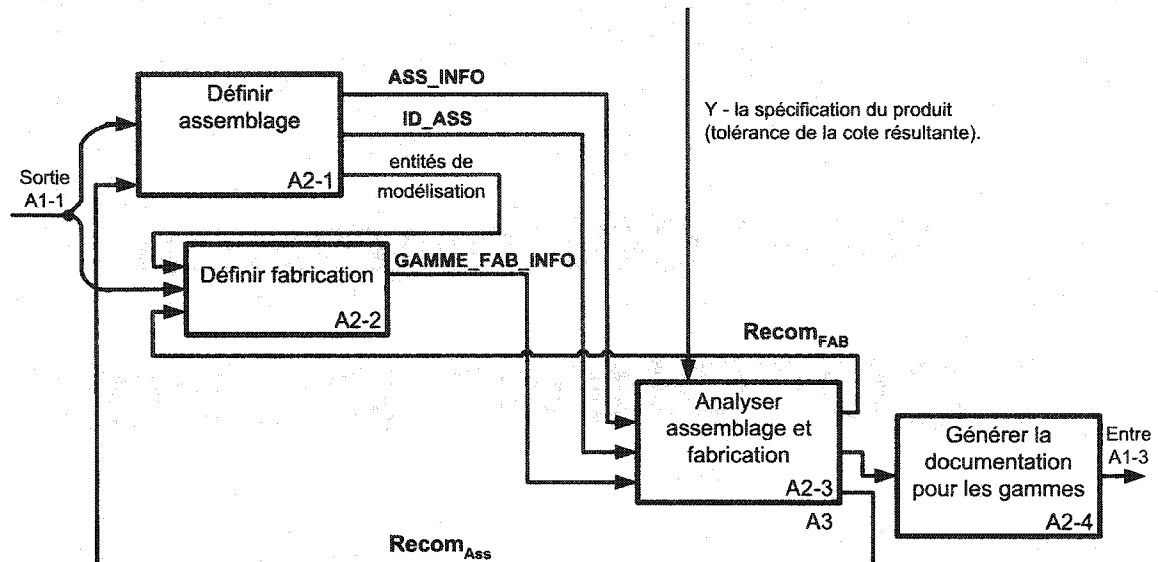


Figure 3.3 - Modèle du prototype sous la forme de SADT - A2

Chaque entité identifiée par un nom et un type est définie par un ensemble de paramètres (caractéristiques, dimensions, tolérances, procédé de fabrication). Les contraintes d'assemblage et de fabrication s'appliquent alors au niveau de ces entités. Nous utilisons le concept basé sur la présentation orientée objet et facilement programmable en utilisant le langage JAVA.

Nous avons les entrées pour le module A2-3 sur la figure 3.4 qui sont les sorties des blocs A2-1 (Définir l'assemblage) et A2-2 (Définir la fabrication). Ils comportent les informations pertinentes sous la forme des entités suivantes :

Entité de modélisation. Elle consiste à représenter le modèle d'assemblage ainsi que les pièces par les éléments géométriques (créé dans Solid Works).

Entité technologique. Elle définit toutes les informations pertinentes appliquées dans la formation de la cote résultante, à savoir la gamme d'usinage (GAMME_FAB_INFO) et le procédé d'assemblage (ASS_INFO).

Entité de ressource. Elle comporte des informations sur les machines appliquées au processus d'assemblage et les outillages. L'entité ressource est limitée dans le

prototype envisagé à l'appareil d'assemblage (automatique ou manuel) elle est incorporée dans le ID_ASS. Nous utilisons la charte de tolérance pour la fabrication, donc toute l'information sur les machines-outils est stockée dans GAMME_FAB_INFO.

Afin de faciliter le développement du prototype dans le langage de programmation orientée objet (dans notre cas - JAVA), nous avons incorporé ces trois types d'entité dans le prototype. Nous allons les unir par « l'entité générique » (EG). Cela tient compte de l'utilisation de EG comme élément qui permet de définir les informations passées par les arcs du SADT.

Nous pouvons ressortir les critères attribués au EG, telles que :

Identification unique : EG compose des entités, où une entité est identifiée de manière unique (entité de modélisation, entité technologique et entité de ressource).

Spécification personnalisée : chacune des entités dans EG contient ses propres spécifications, telles que technologiques (par exemple état de surface, force de serrage), modélisations (par exemple paramétrique, surfacique).

L'analyse du bloc A2-3 et ses relations au niveau A2 nous a permis de construire les modules principaux de notre prototype qui sont visualisés par la figure 3.4 (le niveau A3 du SADT).

3.2 Logique du prototype

Le module A3-1 sert à calculer l'équation fonctionnelle représentée par la fonction (2.5). Par contre, nous construisons l'équation fonctionnelle dans le niveau A2, c'est-à-dire les chaînes des cotes d'assemblage dans le module A2-1, ainsi que les chaînes des cotes des opérations d'usinage (charte de tolérance) dans le module A2-2.

Le but principal du module A3-1 est d'assurer que la dispersion de la cote résultante définie durant la fabrication et l'assemblage ne dépasse pas celle de la spécification du

produit ($y < Y$). Ayant les données de départ telles que la caractéristique des sous-faces en contact (l'aire de contact, les matériaux des pièces, l'état de surface au joint) et la condition d'assemblage (par exemple, pour le serrage c'est la force et son application), on peut répondre à la question suivante:

Est-ce nécessaire de tenir compte de la valeur de la correction, provoquée par le processus d'assemblage?

Dans le cas où la réponse serait négative, nous allons au module A3-2. Si la réponse est positive, nous allons dans le module A3-3.

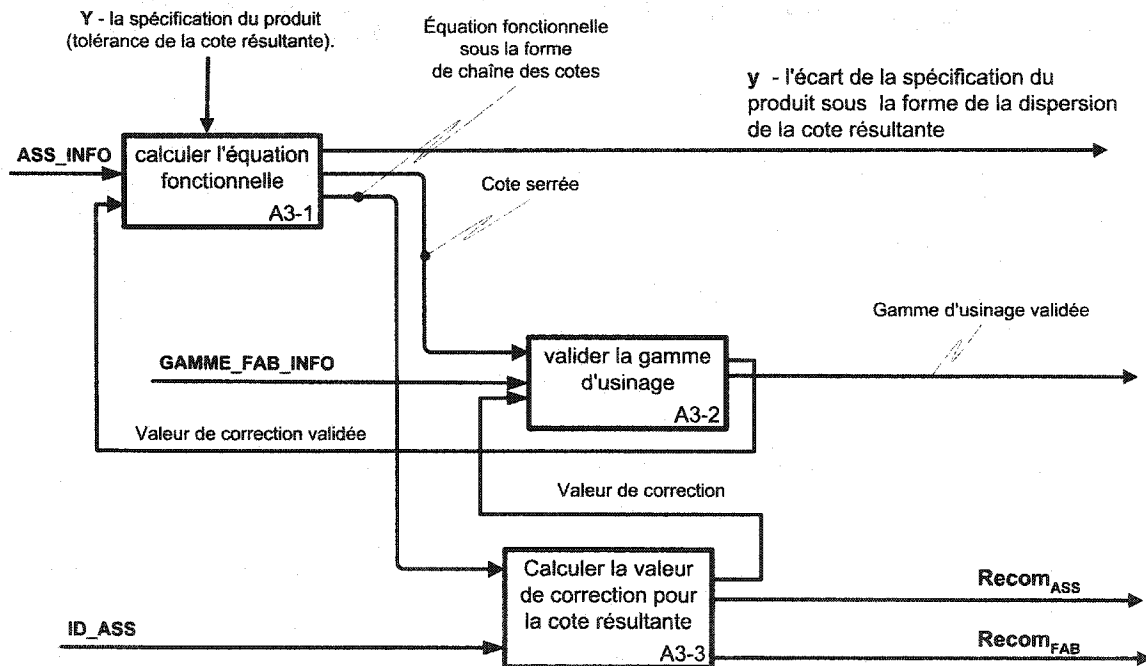


Figure 3.4 - Modèle du prototype sous la forme de SADT – A3

Le module A3-2 sert à valider la gamme d'usinage. Dans ce module, nous réalisons la validation de la gamme d'usinage à l'aide de la charte de tolérance pour s'assurer que la gamme de fabrication permette d'obtenir les cotes de la pièce (dimension et tolérance). Nous réservons ce module aussi pour l'optimisation de la gamme d'usinage en utilisant les critères de coût de fabrication. Cet aspect d'optimisation est bien discuté dans le travail de Zhang et nous avons pris la décision de ne pas développer ce problème dans

notre mémoire. Par contre, comme nous l'avons discuté dans le chapitre 2, la méthodologie de la charte de tolérance nécessite d'être améliorée. C'est-à-dire que nous y introduisons le calcul de la surépaisseur d'usinage (Eq. 1.14) en se basant sur la tolérance opérationnelle (δ_{fabr}) (usinage), à savoir :

$$MA = (\delta_{fabr})_{j-1} + (\delta_{fabr})_j + (R_z)_{j-1} + T_{j-1} + \rho_{j-1} \quad (3.1)$$

$$\delta_{fabr} = \Delta_{us} = f(\Delta_r, \varepsilon_p, \Delta_y, \Delta_u, \Delta_T, \Sigma\Delta_F) \quad (3.2)$$

Un élément qui améliore l'analyse par la charte de tolérance est développé dans le prototype, c'est l'algorithme de fermeture de la boucle.

Le module A3-3 sert à calculer la valeur de correction pour la cote résultante. Ce module est réservé au calcul de la dispersion due au processus d'assemblage estimé par la fonction non linéaire d'assemblage « y_{djf} ». Nous calculons aussi leur coefficient de sensibilité « ξ_{djf} ». La valeur « y_{djf} » nous donne les choix suivants :

1. Soit modifier la gamme d'usinage à cause du changement de la tolérance pour la cote critique (cote avec la tolérance serrée), en vue de diminuer le coût d'usinage (cela est représenté par la sortie $Recom_{FAB}$, figure 3.4).
2. Soit modifier le mode d'assemblage, qui influence la dispersion de la cote résultante (cela est représenté par $Recom_{ASS}$, figure 3.4).

Afin de choisir entre ces deux possibilités nous proposons l'analyse de l'équation (Eq.3.3) :

$$\Delta\Phi_{ASS} > \Delta\Phi_{FABR} \quad (3.3)$$

La comparaison (Eq. 3.3) peut nous donner la réponse à la question :

Quel processus (la fabrication ou l'assemblage) a le plus d'influence sur la dispersion finale de la cote résultante « L_Σ » ?

Donc, la résolution de la relation (Eq.3.3) nous guide soit à la modification de l'assemblage (Recomm_{ASS}) ou de la fabrication (Recomm_{FAB}). L'application de la logique du niveau A3 du SADT nous permet de réaliser la simulation du tolérancement dans l'étape d'analyse d'assemblage (A3-3) et d'apporter les résultats à l'étape d'analyse de fabrication (A3-2).

La Recom_{ASS} peut être appliquée en analysant les différentes approches d'obtention de précision de la cote résultante d'assemblage qui change le procédé d'assemblage et influence la cote résultante. On trouve une telle approche dans les solutions, présentées par la figure 3.5 (A, B, C). Dans cet exemple, la cote L_Σ dépend des pièces conjuguées (1, 2, 3, 4) et sa valeur peut dépendre des solutions suivantes :

- A : le déplacement de douille (palier) 4 avec une fixation par la vis 5;
- B : l'introduction d'un élément supplémentaire (dans ce cas l'entretoise 6);
- C : l'enlèvement d'une couche de matière 7 (par exemple opération de rodage).

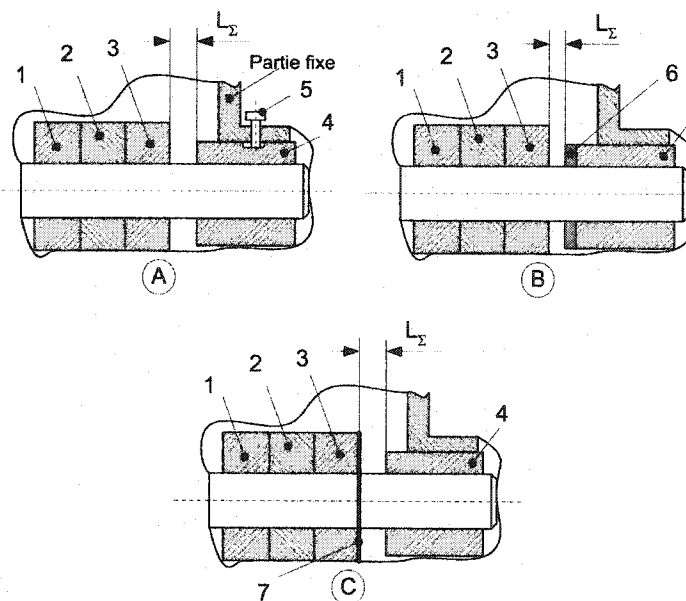


Figure 3.5 - Réglage à l'assemblage [KOR-87]

Dans le cas contraire (Eq.3.4):

$$\Delta\Phi_{ASS} < \Delta\Phi_{FABR} \quad (3.4)$$

Nous allons comparer les valeurs de tolérance et ses coefficients de sensibilité pour chacune des cotes définissant la cote résultante. Cela nous permet de sélectionner la pièce avec la tolérance plus serrée ($Recomm_{FAB}$). Ensuite, on va étudier la gamme de fabrication pour cette pièce à l'aide de la charte de tolérance. Donc, nous allons passer à la séquence suivante :

- l'identification de la cote critique qui détermine la pièce à examiner;
- l'appel à la gamme d'usinage associée avec cette pièce;
- la modification et l'analyse de la fabrication à l'aide de la charte de tolérance.

Après la fermeture des boucles (le module élaboré est dans le prototype), on prévoit l'ajustement et l'optimisation de la tolérance pour les cotes opérationnelles (la fonctionnalité sera prévue pour le prototype commercial). Cela va nous assurer que la gamme de fabrication respecte la précision de la cote critique.

La logique développée dans les diagrammes SADT (voir les figures 3.4 et 3.5) va nous guider dans les étapes de la logique présentées par la figure 3.9. Alors, afin de valider la méthodologie proposée, nous avons élaboré le prototype en langage de programmation JAVA pour SolidWorks. Son implémentation va être discutée dans la prochaine section du mémoire.

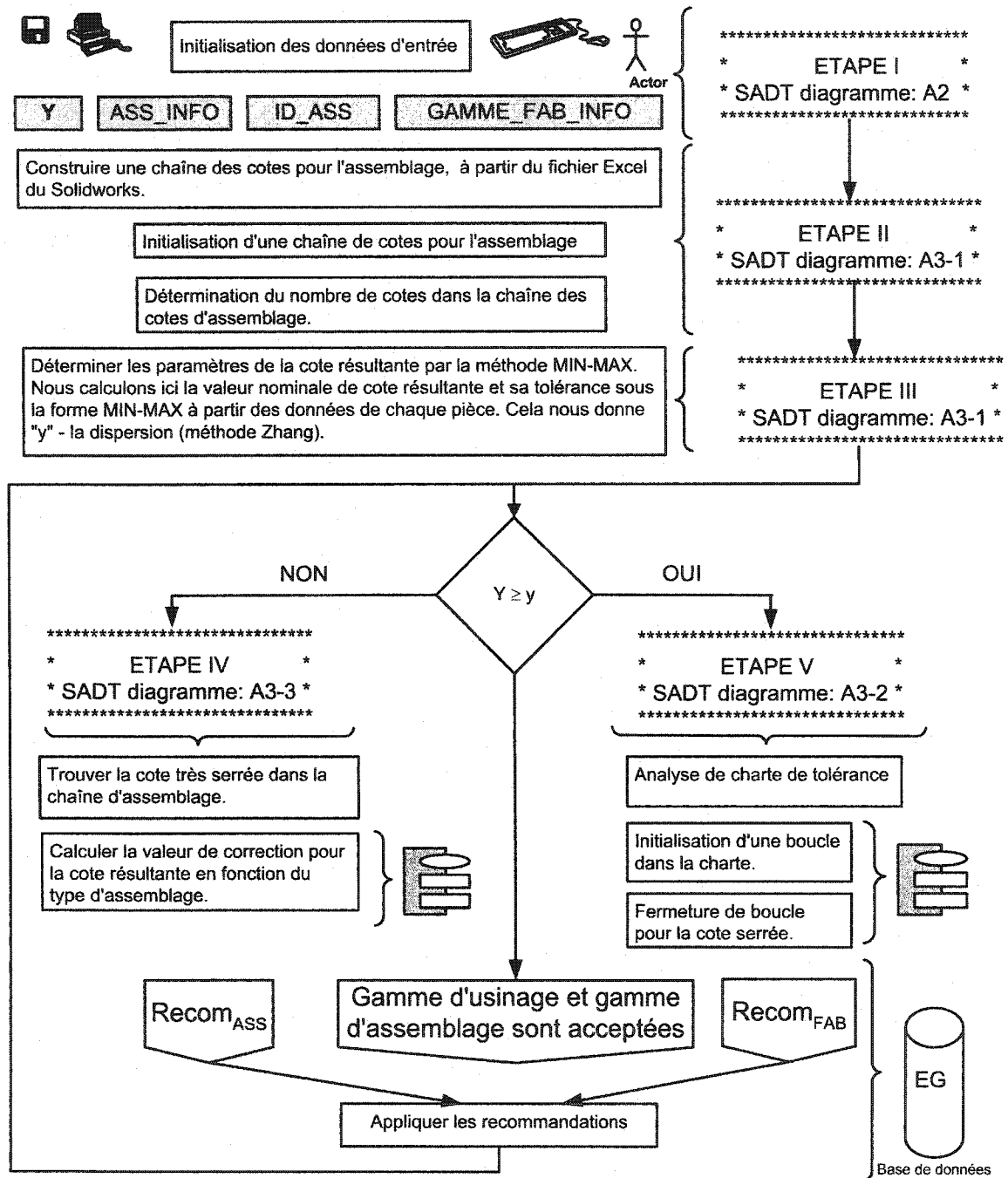


Figure 3.6 - Intégration des contraintes de fabrication et d'assemblage dans le tolérancement simultané

CHAPITRE 4

FONCTIONNEMENT DU PROTOTYPE

Le prototype proposé constitue un module externe d'un système CAO connu (SolidWorks). Nous estimons les particularités du prototype élaboré comme suit :

1. L'analyse est limitée pour un assemblage par serrage. Les modules d'analyse sont prévus pour l'assemblage (calcul de la valeur de correction due au serrage) et pour la validation de la gamme de fabrication (vérification de la fermeture de boucle).
2. L'application des résultats d'analyse se limite à indiquer une modification d'assemblage ou de fabrication, sans suggérer de moyen pour corriger la situation.
3. Le prototype fonctionne dans l'environnement Windows et établit un lien entre la CAO (SolidWorks) et la FAO (charte de tolérance).

Afin de réaliser le prototype, nous avons décidé d'utiliser le langage de programmation orienté objet JAVA. Ce langage nous permet de développer le prototype basé sur la structure des classes. Une classe est la description d'un ensemble d'entités et elle représente EG, par exemple :

- classe réservée à la description d'une entité générique;
- classe qui contient des informations associées avec le procédé d'assemblage;
- classe qui contient des informations associées avec le procédé d'usinage.

4.1 Exemple simplifié pour la pompe d'engrenage

Nous allons présenter un exemple simplifié pour la pompe à engrenage afin de décrire les étapes envisagées dans le chapitre 3 par la figure 3.6.

Cet exemple va nous servir pour présenter les tâches à résoudre durant l'analyse de tolérancement. Nous y appliquons la logique développée par la méthode SADT en terme d'ingénierie simultanée.

Avant tout, il faut dire que nous allons aborder le cas d'une chaîne de cotes linéaires dont la cote résultante est mise en relation avec une force de serrage au joint. En outre, nous sommes autorisés à ne prendre en considération qu'un tolérancement très serré. En raison de cela, nous avons pris la conception d'une pompe à engrenage (voir la figures 4.1).

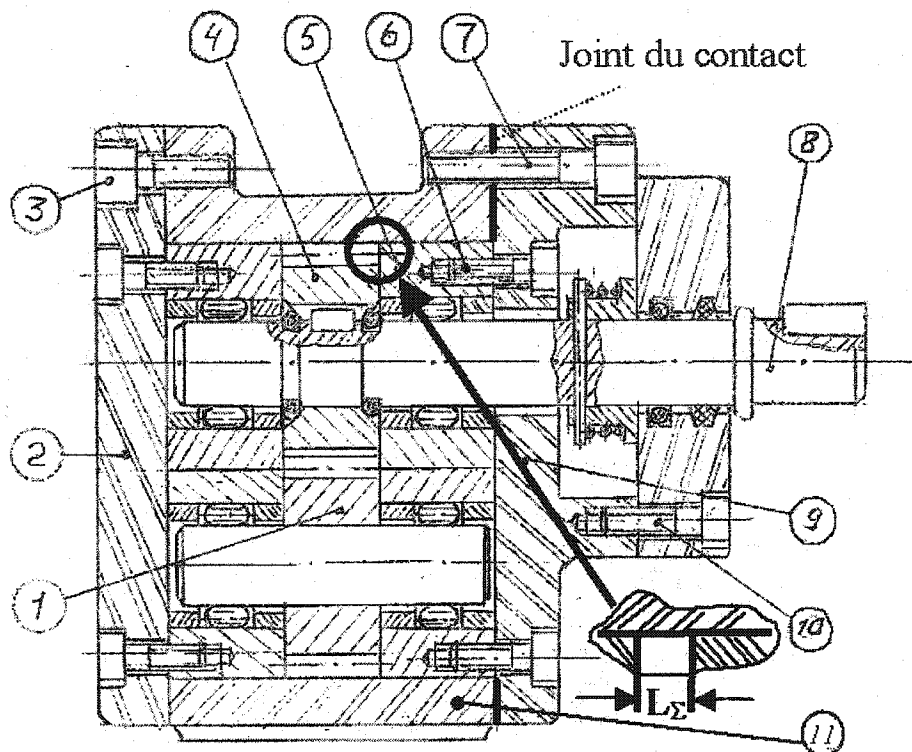


Figure 4.1 - Pompe à engrenage

La pompe possède deux roues dentées en acier : un pignon d'entraînement - (4), qui est monté sur l'arbre (8) par clavette et qui est lié avec un moteur électrique, et celui mené - (1), qui est fixé à la presse sur l'arbre, celui-ci tourne sur des roulements à aiguilles. L'engrenage est monté dans le corps (11). Les douilles (5) sont immobilisées dans le corps et fixées par les vis (6) aux couvercles (2) et (9). Les couvercles sont serrés au corps à l'aide des vis (3) et (7). Les douilles constituent les bagues extérieures des roulements à aiguilles. Le jeu axial « L_{Σ} » définit le rendement de la pompe,

$$L_{\Sigma} = 0.03 \begin{matrix} +0.095 \\ -0.021 \end{matrix} \text{ mm.}$$

4.1.1 Préparation des données d'entrées du prototype

Le modèle du produit en étape de conception doit assurer les fonctionnalités demandées. Dans notre cas, c'est une cote « L_Σ ». On réalise la modélisation préliminaire avec définition de grandeur des éléments principaux (valeur nominale) et choix des éléments qu'ils vont acheter.

Nous avons réalisé certaines étapes de Zhang (voir chapitre 1, figure 1.4) envisagées dans l'étape I de notre prototype (voir chapitre 3, figure 3.6). Ces étapes sont les parties représentées dans le diagramme A2 du modèle SADT (voir le bloc A2-1 de la figure 3.3), à savoir :

- conception d'assemblage (figure 4.2) et description des pièces (figure 4.3);
- identification des composantes fonctionnelles.

En se basant sur la description de la pompe, nous avons réalisé la modélisation préliminaire dans le but de donner les informations pertinentes à la fabrication (voir la sortie « entités de modélisations » du diagramme A2-1, figure 3.3).

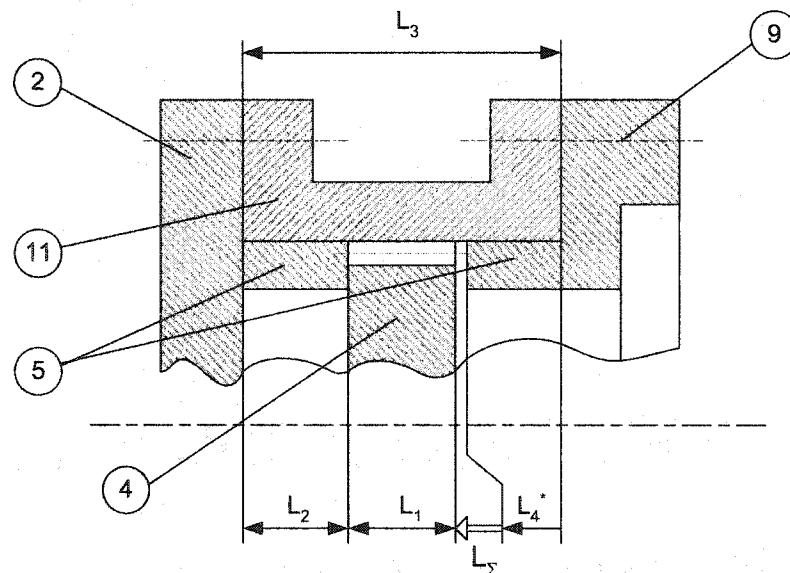


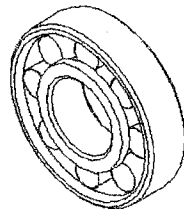
Figure 4.2 - Simulation graphique de la pompe à engrenage

Nous avons sur la figure 4.2 les éléments de modélisation d'une simplification des éléments de pompe :

- 2 et 9 : couvercles;
- 4 : pignon d'entraînement;
- 5 : douille et roulements à aiguilles;
- 11 : corps;
- L_4^* : on y tient compte du lien technologique;
- F : force de vissage.

Nous modélisons aussi les éléments à acheter (voir la figure 4.3).

Pièce : 5 (L_4 et L_2)



Vis pour attacher les pièces 9 à 11

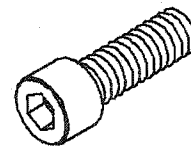


Figure 4.3 - Éléments d'assemblage à acheter

Afin de démontrer le fonctionnement du prototype élaboré, nous avons décidé de simplifier le modèle des pièces de la pompe par des blocs. Le modèle de blocs dans SolidWorks tient compte de l'information pertinente, telle que l'aire de contact entre les pièces 4 (le couvercle) et 3 (le corps). Il faut noter que le modèle des blocs sera aussi applicable pour un micromoteur, envisagé dans le chapitre 2 (voir la figure 2.4).

Selon notre schéma, présenté sur la figure 3.6, après la première étape, nous allons avoir les informations suivantes :

- pour chacune des pièces dans l'assemblage : la dimension linéaire et sa tolérance, la gamme d'usinage standard sous la forme de la charte de tolérance;

- pour l'assemblage : chaînes de cotes d'assemblage avec mise au point de la cote résultante.

Nous utilisons SolidWorks comme modelleur CAO. L'analyse attribuée à la zone de contact (à savoir la cote résultante à l'assemblage) exige de prévoir une méthode d'isolation des sous-faces de contact. C'est possible dans SolidWorks grâce à la fonction de vérification du volume d'interférence entre les composants d'assemblage. Nous avons sur la figure 4.4 le volume d'interférence 100,00x0,04x30,00 mm calculé par cette fonction du SolidWorks.

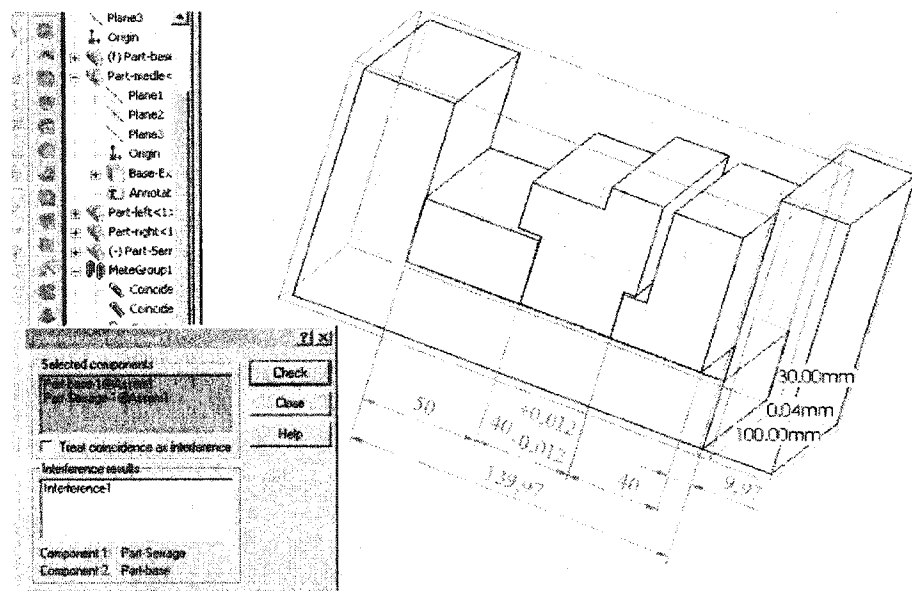


Figure 4.4 - Simplification généralisée d'une pompe (conception d'un bloc)

Néanmoins, cette fonction a ses limitations, à savoir, elle permet de calculer le volume de l'interférence sous forme de la longueur, de la largeur et de la hauteur du cube.

Comme nous l'avons mentionné dans le cas du serrage, la valeur de correction est une fonction de trois paramètres :

- la profondeur maximale de rugosité des surfaces des pièces au joint (R_t);
- la force de serrage (F);
- le module d'élasticité (E).

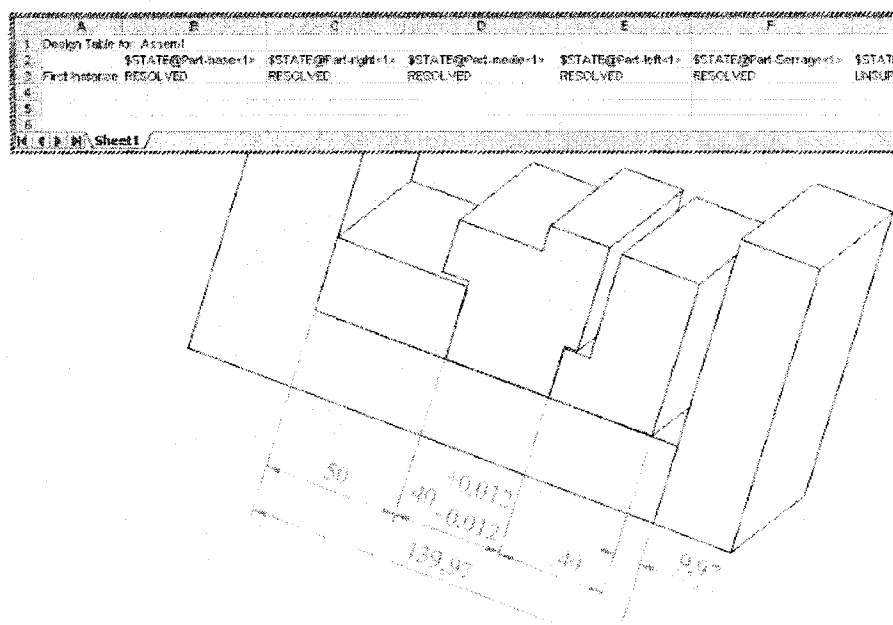


Figure 4.6 - Design Table de SolidWorks pour un assemblage

Par contre, les informations suivantes ne peuvent pas être générées de manière automatique dans SolidWorks, version 1999 :

- les tolérances (pour la pièce);
- les dimensions linéaires et les tolérances pour l'assemblage (chaîne de cotes).

Les informations définies par la fonction « Mate » (la relation dimensionnelle entre deux surfaces liées par la fonction « Mate »). Dans notre cas, nous utilisons cette fonction afin de déterminer la relation entre deux surfaces qui définissent la cote résultante.

Les informations mentionnées ci-dessous sont importantes pour l'analyse du tolérancement simultané, c'est pourquoi nous décidons de les ajouter dans le tableau Excel, générées par la fonction « Design Table » du SolidWorks.

Nous avons ajouté dans le tableau d'Excel pour l'assemblage les informations présentées par la figure 4.7.

	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 4
ID de la pièce	Part-base<1>	Part-right<1>	Part-medle<1>	Part-left<1>
État des pièces	RESOLVE	RESOLVE	RESOLVED	RESOLV
Dimension nominale	25.00	40.00	15.00	80.00
Direction de maillon	-1	-1	-1	1
Tolérance (+/-)	0.016	0.012	0.016	0.014
Type d'assemblage : serrage				

Figure 4.7 - Information d'assemblage (fichier Ass_Info)

Ainsi, nous avons ajouté les informations sur la gamme d'usinage. Nous allons utiliser la gamme d'usinage déjà développée pour la préparation des données (GAMME_FAB_INFO). Cela nous permet de préparer l'information pertinente pour la charte de tolérance. Afin de réaliser une fermeture de boucle, nous avons décidé de présenter la gamme d'usinage sous la forme du tableau de la figure 4.8.

Face de la pièce Opération	1	2	3	4	5
Opération 1	US	-	-	-	- SRF
Opération 2	SRF	-	-	-	-US
Opération 3	SRF	-	-	-	- SRF
Opération 4	US	-	-	-SRF	-
Nombre Opérations 4					
NOTA : SRF – surface de référence; US – surface à usiner ; +/- indique la direction de contournage d'une boucle.					

Figure 4.8 - Gamme d'usinage en se basant sur la charte de tolérance

Les informations présentées dans la figure 4.7 et la figure 4.8 servent à préparer les fichiers d'entrée du prototype : ASS_INFO.dat et GAMME_FAB_INFO.dat. Notre prototype ne contient pas les fonctions API. Ces fonctions sont utilisables pour retirer les informations à partir de tableau Excel de SolidWorks de manière automatique. Afin de surpasser cette limitation, nous proposons d'enregistrer les informations du tableau Excel comme un fichier de texte.

À la fin de cette étape nous allons avoir les fichiers suivants :

- Ass_Info.dat : ce fichier comporte les informations du tableau Excel (assemblage);
- Gamme_Fab_Info.dat : ce fichier comporte les informations du tableau Excel (fabrication);
- Id_Ass.dat : ce fichier comporte les informations sur l'opération d'assemblage.

4.1.2 Fonctionnement du prototype

Le prototype élaboré réalise les étapes IV et V du schéma présenté par la figure 3.6 du chapitre 3. Nous avons décidé de diviser le prototype en trois parties. Chaque partie va réaliser une étape spécifique.

Étape 1 : l'initialisation d'une chaîne de cote pour l'assemblage. Nous y réalisons l'initialisation des données d'entrée dans le prototype à partir des fichiers Ass_Info.dat, ID_ASS.dat et Gamme_Fabr_Info.dat. Aussi que le nombre de cotes dans la chaîne des cotes de l'assemblage à déterminer. Le choix d'une cote avec une tolérance très serrée se fait (la fonctionnalité prévue pour la prochaine version du programme).

Étape 2 : Le calcul de valeur de la correction. Nous y calculons la valeur de correction due à l'opération d'assemblage. Dans notre cas, cette opération est le serrage.

Étape 3 : L'initialisation et la fermeture d'une boucle dans la charte. Cette boucle représente les opérations d'usinage associées avec la cote établie dans l'étape 1 du prototype. L'algorithme original a été développé par nous-même afin de fermer la boucle dans la charte de tolérance.

Nous visualisons sur la figure 4.9 les résultats du fonctionnement de notre prototype pour le cas des blocs (la simulation de la pompe à engrenage).

```
C:\Maîtrise\Proga>java AssFab
Etape 1 : initialisation d'une chaîne de cote pour l'assemblage
Nombre des cotes dans l'assemblage: 4

Etape 2: Calcul de valeur de la correction.
Valeur de correction de la cote résultante
due à l'assemblage par serrage, valCor = 0.0253

Etape 3 : Initialisation d'une boucle dans la charte.
Visualisation de la charte de tolérance
<- -- -- -- -0
0- -- -- -- ->
<- -- -- -- -0
<- -- -- -- -0
-- <- -- -- -0
-- <- -- -- -0
-- <- -- -- -0
-- -- <- -- -0
-- -- <- -- -0
-- 0- -- -- ->
-- 0- -- -- ->
-- 0- -- -- ->
-- 0- -- -- ->
-- <- -- -- -0
-- -- <- -- -0
-- 0- -- -- ->
Question : Est-ce que la boucle est fermée ?
Reponse : YES
```

Figure 4.9 - Exemple du calcul

Ayant le $L_{\Sigma} = 0.03 \begin{smallmatrix} +0.095 \\ -0.021 \end{smallmatrix}$ mm qui se transforme dans le cas « WORST CASE » en $L_{\Sigma} = 0.067 \pm 0.058$ mm. Donc, nous pouvons avoir $(L_{\Sigma})_{\min} = 0.009$ mm et $(L_{\Sigma})_{\max} = 0.125$ mm. Selon la conception, $(L_{\Sigma})_{\min}$ et $(L_{\Sigma})_{\max}$ vont satisfaire les exigences du fonctionnement de la pompe. Par contre ayant la valeur de correction égale à 0.03 mm, nous obtiendrons $((L_{\Sigma})_{\min})_{\text{cor}} = -0.02$ mm et $((L_{\Sigma})_{\max})_{\text{cor}} = 0.095$ mm. Donc, le résultat du calcul $(L_{\Sigma})_{\text{cor}}$ nous oblige à ré-analyser le processus d'assemblage ou d'usinage afin de garantir « L_{Σ} » imposée.

Il faut remarquer que la valeur de correction 0.03 mm correspond au cas plus critique, c'est-à-dire $F \rightarrow \max$ et $R_i \rightarrow \max$.

Afin de valider la valeur de correction obtenue, nous avons réalisé une simulation de ces paramètres pour le cas du bloc (voir les figures 4.10 et 4.11).

Pour l'opération de l'assemblage nous allons varier la valeur de la force de serrage entre 12000 à 22000N. En se référant à l'exemple du calcul de la force de serrage [KRUL-94] pour les données de départ : le boulon M10 en acier de construction, nous avons pris comme hypothèse la valeur $F_{\max}$ égale à 60% par rapport à celle de l'exemple, c'est-à-dire 22000N.

Pour l'usinage, nous faisons une comparaison de deux usinages différents. Premier cas (la figure 4.10) : l'état des surfaces (sous-face) en contact est obtenu par fraisage de précision. Deuxième cas (la figure 4.11) - par rectification de précision.

En sachant que la valeur de correction est une fonction de trois paramètres : R_t , F et E (voir l'équation Eq. 1.10), ils vont varier :

- $R_t = 4$ à $10 \mu\text{m}$ pour le fraisage [BARL-92] ;
- $R_t = 1$ à $4 \mu\text{m}$ pour la rectification [BARL-92] ;
- $E_1 = E_2 = E = 190$ à 220GPa pour la pièce en acier de construction [BAZ-93];
- $F = 12000$ à 22000N .

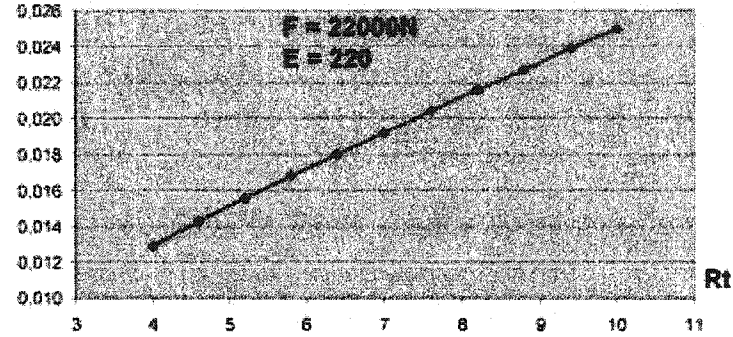
Pour les autres paramètres, nous avons fixé les valeurs suivantes : $S_Y=190\text{MPa}$; $k = 2$; $b = 1$; $\mu_1=0.255$; $\mu_2=0.255$; $\mu=0.255$; $A_W=2000\mu\text{m}$; $W=5\mu\text{m}$.

Supposons que l'intervalle de la profondeur de rugosité doit comporter 100% des pièces usinées (la méthode de « WORST CASE »). Donc, nous avons divisé la plage de rugosité en dix intervalles. Nous faisons varier les paramètres « E » et « F » dans la même plage.

fraisage de précision: matière des pièces en contact - acier de construction

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Rt	µm	10	9,4	8,8	8,2	7,6	7	6,4	5,8	5,2	4,6	4
Ydjf	mm	0,025	0,024	0,023	0,022	0,020	0,019	0,018	0,017	0,016	0,014	0,013
E	GPa	220	217	214	211	208	205	202	199	196	193	190
Ydjf	mm	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
F	N	22000	21000	20000	19000	18000	17000	16000	15000	14000	13000	12000
Ydjf	mm	0,021	0,020	0,020	0,020	0,020	0,019	0,019	0,019	0,018	0,018	0,018

Ydjf



Ydjf

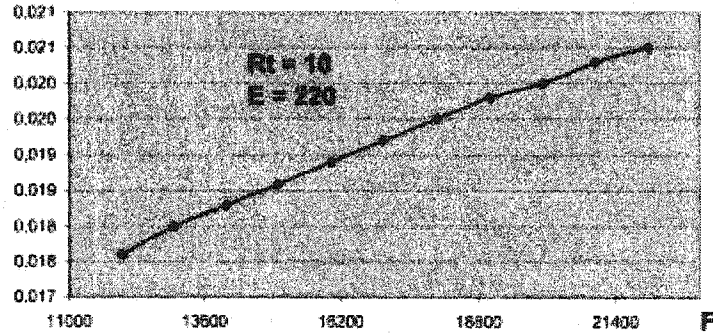
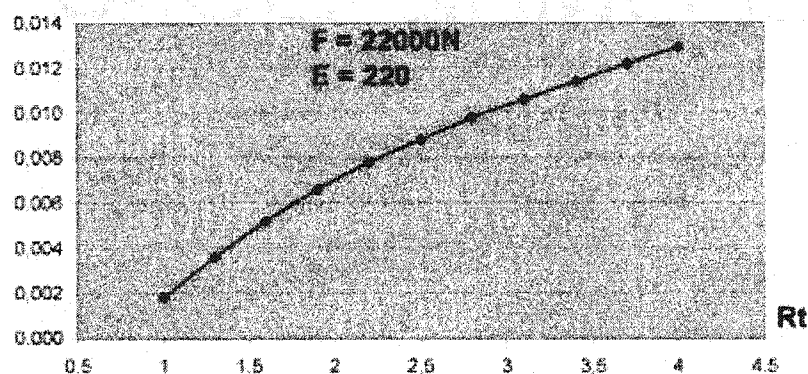


Figure 4.10 - Valeurs de correction dues au fraisage de précision

rectification de précision: matière des pièces en contact - acier de construction

Rt	µm	4	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,3	1
Ydjf	mm	0,013	0,012	0,011	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	0,005	0,004	0,002
E	GPa	220	217	214	211	206	205	202	199	196	193	190
Ydjf	mm	0,009	0,009	0,009	0,009	0,008	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
F	N	22000	21000	20000	19000	18000	17000	16000	15000	14000	13000	12000
Ydjf	mm	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,008

Ydjf



Ydjf

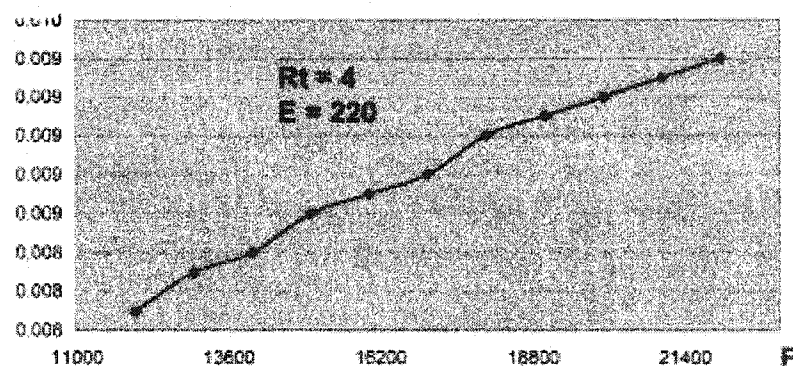


Figure 4.11 - Valeurs de correction dues à la rectification de précision

Des figures 4.10 et 4.11, il ressort que :

L'influence de la rugosité « R_t » sur la valeur de correction « y_{djf} » est plus importante que la force de serrage « F » (notamment pour le fraisage de précision). Ceci est une recommandation pour la fabrication ($Recom_{FAB}$).

Nous pouvons voir sur la figure 4.12 le changement de « y_{djf} » en fonction de l'état de la surface « R_t » obtenu par deux procédés d'usinage différents.

1) fraisage de précision; matière des pièces en contact - acier de construction

R_t	μm	10	9,4	8,8	8,2	7,6	7	6,4	5,8	5,2	4,6	4
Y_{djf}	mm	0,025	0,024	0,023	0,022	0,020	0,019	0,018	0,017	0,016	0,014	0,013

2) rectification de précision; matière des pièces en contact - acier de construction

R_t	μm	4	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,3	1
Y_{djf}	mm	0,013	0,012	0,011	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	0,005	0,004	0,002

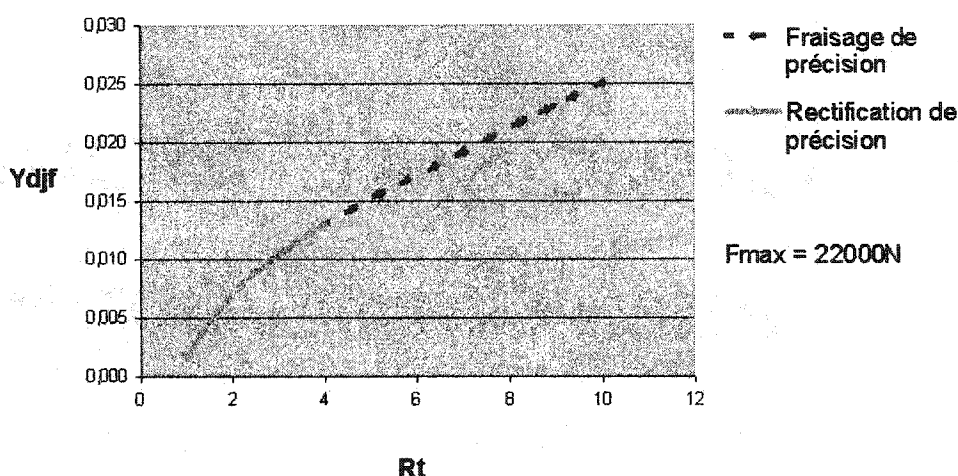


Figure 4.12 - Valeurs de correction dues à la rectification de précision

Il est nécessaire de tenir compte de la valeur de correction pour les surfaces en contact dont le matériau est en acier de construction si la tolérance de jeu fonctionnel (cote résultante) est commencée à partir de 0.028 mm (fraisage de précision, $(y_{djf})_{\max}=0.021$, voir la figure 4.10) et à 0.010 mm (rectification de précision, $(y_{djf})_{\max}=0.021$, voir la figure 4.11). Ceci est une recommandation pour l'analyse de l'assemblage (Recom_{ASS}). Nous pouvons les voir sur le diagramme A2 et A3 (figures 3.3 et 3.4).

En prenant en considération les points mentionnés ci-dessus, nous pourrions estimer le coefficient de sensibilité « ξ_{djf} » pour le cas plus critique. Ce cas est le fraisage de précision ($R_t = 10 \mu m$) avec la force de serrage 22000N appliquée au joint des pièces en acier de construction ($E = 220GPa$). Dans le chapitre 2, nous avons proposé d'utiliser la

méthode DLM pour l'équation (Eq. 2.24) afin d'obtenir les dérivations partielles. Nous avons développé le programme en MAPLE et obtenu les résultats (voir les équations Eq.2.34, Eq.2.35 et Eq. 2.36). Nous les introduisons dans (Eq. 2.37) et nous avons:

$$\xi_F = 0.02$$

$$\xi_R = 2.3$$

$$\xi_E = - 8.4 \times 10^{-7}$$

Donc, on peut trouver, que $\xi_{djf} = 2.32$.

Le coefficient de sensibilité obtenu nous montre l'importance du procédé de l'assemblage sur la dispersion de la cote résultante.

CONCLUSION

Ce mémoire a présenté une étude de certains liens technologiques pour l'analyse de fabrication virtuelle. On exige des produits l'augmentation de leurs performances techniques et l'assurance d'une tolérance très serrée du jeu fonctionnel (par exemple, pour le rendement d'une pompe à l'engrenage).

Nous avons limité notre recherche à l'analyse du tolérancement pour l'assemblage avec jeu par forces de serrage. De même, nous avons décrit les liens technologiques, qui se manifestent au cours des processus d'assemblage et de fabrication (usinage) et qui s'appliquent à la transformation dimensionnelle.

Les hypothèses formulées au début du travail et sur lesquelles s'est basée la définition du lien technologique étaient :

- l'allocation de tolérance par l'approche hybride est effective lors des étapes de fabrication, d'assemblage et de conception d'un produit;
- le tolérancement simultané réalise une intégration dans le pont CAO – GAMME – FAO;
- étant donné le changement de la cote résultante due au processus d'assemblage, cela nécessite d'apporter une correction attribuée à la modification des cotes composantes. Cette correction a besoin de validation à l'étape de fabrication (gamme d'usinage).

Partant de ces hypothèses, les travaux présentés dans le cadre de ce mémoire ont eu pour objectif de mettre en place une maquette d'un prototype de calcul pour l'analyse du tolérancement simultané en abordant les aspects :

- l'amélioration du tolérancement simultané en y ajoutant l'influence du procédé d'assemblage;
- la mise en place d'une méthode du calcul pour ajuster la cote résultante dans le cas d'assemblage par la force du serrage;

- la validation d'ajustement de la cote se fait à l'aide de la charte de tolérance dont l'application a exigé l'élaboration de règles précises pour une fermeture de boucle.

L'investigation sur les aspects mentionnés ci-dessus, nous a permis de fixer les éléments clés sur lesquels se base le modèle SADT du prototype et son algorithme. Il s'agit alors d'un coefficient de sensibilité. Ce coefficient représente l'influence du procédé (l'assemblage et l'usinage) sur la variation de spécification du produit (notamment, la dispersion sur la cote résultante).

Le jeu fonctionnel est garanti par la cote résultante qui varie en cours d'assemblage par serrage des joints au contact. Cette variation est calculée par notre méthode d'analyse et peut être prise en compte durant l'étape de conception d'un produit sous la forme du tolérancement corrigé ou de la correction dimensionnelle. Cette correction est réalisée par le changement des conditions d'assemblage (force de serrage), par la modification des cotes composantes ou par une méthode combinée.

Dans ce travail nous avons résolu la fonction non linéaire d'assemblage en prenant en considération la méthode du DLM. L'application de la méthode DLM nous a permis d'obtenir non seulement la dispersion due à l'assemblage, mais aussi son coefficient de sensibilité. Ceci permet de réaliser l'analyse des tolérances associées avec les procédés (assemblage et fabrication).

En se basant sur l'analyse envisagée nous avons démontré qu'il existe un lien entre l'assemblage et la fabrication par le tolérancement. Nous avons pu étudier leur influence mutuelle sur la cote résultante. Nous appelons ce lien: lien technologique.

En résumé, les principaux apports de notre proposition sont l'application du prototype de calcul, comme outil automatisé dans une intégration CAO – GAMME – FAO.

Les perspectives de notre travail s'articulent autour de deux axes:

- tolérancement simultané,
- lien technologique.

L'éventail des domaines concernés par cette problématique est assez large et l'application potentielle de l'approche mène à l'utilisation du concept de lien technologique. On constate que le lien technologique fournit une plate-forme particulièrement bien adaptée à la prise en compte de l'influence mutuelle de la fabrication et de l'assemblage afin de supporter un processus d'ingénierie simultanée.

Il nous reste à souligner que les travaux réalisés ont permis une application pédagogique comme introduction de l'exemple pratique d'une charte de tolérance dans un complément de notes de cours : MEC3500 « Fabrication et métaux » - hiver 2001.

RÉFÉRENCES

- [ARAI-92] ARAI, T., TAKEUCHI, K. 1992 . «A Simulation System on Assembly Accuracy». *Annals of the CIRP*. 41:1. 37 - 40.
- [ASQC-83] ASQ Statistics Division. 1996. *Glossary and Tables for Statistical Quality Control*, Milwaukee WI.: American Society for Quality Control. 176p.
- [BARL-92] BARLIER, C., GIRARDIN, L. 1992. *Memotech, Productique, matériaux et usinage*. Paris : Éditions CASTEILLE. 406p.
- [BARL-93] BARLIER, C., POULET, B. 1993. *Memotech. Génie mécanique. Productique mécanique*. Paris : Éditions CASTEILLE. 408p.
- [BARN-99] BARNES,C.J, DALGLEISH,G.F., JARED,G.E.M., MEI,H., SWIFT,K.G. 1999. «Assembly Oriented Design», *Procecedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*. Porto, Portugal – July.
- [BONN-98] BONNEMAZOU, J.L., DECAIX,A., LOIRE, A., LEFLOCH, E., MAUREL, P. 1998. «The CATIA Revolution in the Manufacturing Industry». *Catia Network*. No 3.
- [BRUN-89] LOTTER, B. 1989. *Manufacturing Assembly Handbook*. UK : London. Butterworths.
- [BAZ-93] BAZERGUI, A., THANG, B., BIRON, A., MCINTYRE, G. 1993. *Résistance des matériaux*. Montréal : École Polytechnique.

- [CEG-97] CEGLAREK DARIUSZ J., JIANJUN, S. 1997. « Tolerance analysis for sheet metal assembly using a beam-based model ». *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. USA : Dallas, TX. 153-159.
- [CHASE-96] CHASE, K.W., GAO, J., MAGLEBY, S.P., SORENSON, C.D. 1996. « Including Geometric Feature Variations in Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies ». [En ligne]. *IIE Transactions*. 28. 795-807. [http://adcats.et.byu.edu/ WWW/ Publication/](http://adcats.et.byu.edu/WWW/Publication/) (Page consultée le 12 avril 2002).
- [CHASE-97] CHASE, K.W., GAO, J., MAGLEBY, S.P. 1997. « Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Mechanical Assemblies with Small Kinematic Adjustments ». [En ligne]. *ADCATS Report No.97-5*. <http://adcats.et.byu.edu/> (Page consultée le 2 avril 2002).
- [CHEV-88] CHEVALIER, A. *Guide de dessinateur industriel*. Paris : Hachette Technique, ISBN2-01-017210-8.
- [CRE-96] CREVELING, Clyde. 1996. *Tolerance design : a handbook for developping optimal specification*. Publisher : Addison Wesley. 576p.
- [DAN-73] DANILEVSKY, V. 1973. *Manufacturing Engineering*. Moscou, USSR : Éditions MIR.
- [DES-91] DESROCHERS, A. 1991. *Modèle conceptuel du dimensionnement et du tolérancement des mécanismes. Représentation dans les systèmes CFAO*. Thèse de Doctorat,

École Centrale Paris.

- [DES-94] DESROCHERS, A., CLÉMENT, A. 1994. «A Dimensioning and Tolerancing Assistance Model for CAD/CAM Systems». *The International journal of Advanced Manufacturing Technology*. London : Springer-Verlag. 9. 352-361.
- [DESM-95] DESROCHERS, A., MARANZANA, R., 1995. «Constrained dimensioning and tolerancing assistance for mechanisms». *CIRP/JSPE/ASME Proceedings of the 4th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*. The University of Tokyo. Tokyo, Japan. 5 : 6. 21-30.
- [DETC-99] National Institute of Standards and Technology. 2001. *Virtual Manufacturing Technical Workshop*. Compiled and Edited by Lawrence Associates Inc.
- [DIX-88] DIXON, J.R. 1988. « Designing with Features: Building Manufacturing Knowledge into More Intelligent CAD Systems ». *Symposium on Product and Process Design, Proceedings of Manufacturing International Conference*. ASME. 1. 51-57.
- [DONG-98] DONG,Z., WANG,G. 1998. «Automated Cost Modeling for Tolerance Synthesis Using Manufacturing Process Data, Knowledge Reasoning and Optimization». *Geometric Design Tolerancing : Theories, Standards and Applications*. Edited by H. A. ElMaraghy. London : Chapman&Hall, P. 282-293.

- [DORF-94] DORF, C.R., KUSIAK, A. 1994. *Handbook of design, manufacturing and automation*. Wiley-Interscience; ISBN: 0471552186. 1064p.
- [DROZ-83] DROZDA, T.J., WICK C. 1983. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*. SME. 4th ed.
- [DUV-95] DUVERLIE, P., CASTELAIN, J.M. 1995. «Intégration des techniques de raisonnement à partir de cas dans un système CAO pour l'estimation du coût des pièces de révolution», *Colloque PRIMECA 95*, 19-26.
- [EARY-62] EARY, B.F., JOHNSON, G.E. 1962. *Process Engineering For Manufacturing*. Prentice-Hall, New Jersey. 119p.
- [FOR-67] FORTINI, E.I. 1967. *Dimensioning for Interchangeable Manufacturing*. New York : Industrial Press. 48p.
- [GAMMA-98] Groupe GAMMA. 1998. « Modélisation par entités ». *Conception de produits mécaniques. Méthodes, modèles et outils*. Sous la direction de Tollenaere. M., Hermes. Chapitre 14.
- [GIES-82] GIESECKE, F. 1982. *Dessin Technique*. Éditions du renouveau pédagogique Inc. 773p.
- [GIN-89] GINDY, N.N.Z., 1989. «A hierarchical structure for form features». *International Journal of Production Research*. 27:12. 2089-2103.

- [GREN-88] GREENWOOD W.H., CHASE, K.W. 1998. « Worst Case Tolerance Analysis with Nonlinear Problems ». *ADCATS publishing*.
- [HAM-99] HAMMET Pat. 2000. Tolerance Analysis Methods. *In Site de The University of Michigan. The Lecture Notes of Total Quality Management Engineering 401*. [In ligne]. <http://www.engin.umich.edu/class/eng401/003/LCNotes/tol.pdf> (Page consultée le 16 mai 2002).
- [JABB-97] JABBOUR, T. 1997. *Intégration de modèles de caractéristiques à une modélisation géométrique pour supporter l'assemblage*. Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal.
- [JEAN-96] JEANG, A. 1996. «Tolerance Chart Balancing for Machining Process Planing». *Quality and Reliability Engineering International*. John Wiley & Sons Ltd. 12. 355-364.
- [JIL-99] JI, P., LAU, K.H. 1999. «Design for manufacturing: a dimensioning aspect». *Journal of Materials Processing Technology*. 19. 121-127.
- [KAP-93] KAILASH C. KAPUR. 1993. Quality Engineering and Tolerance Design. *Concurrent Engineering : Automation, Tols and Technique*. Edited by Andrew Kusiak. John Wiley & Sons, Inc. Chapter 11.

- [KIM-99] KIMURA, F. 1999. «Life Cycle Design for Inverse Manufacturing». *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*. Portugal : Porto.
- [KOR-87] KORSAKOV, V. 1987. *Technologie de la fabrication mécanique*. Russie : Moscou. Machinostroenie (en rus).
- [KOV-70] KOVAN, V. 1970. *Technologie de la Construction Mécanique*. Russie : Moscou. Éditions Mir (en français).
- [KREY-99] KREYSZIG E. 1999. *Advanced Engineering Mathematics*. 8th edition. Hardcover, Wiley. 1296p.
- [KRUL-94] KRULIKOWSKI, Alex. 1994. *Geometric Tolerancing. Applications Workbook*. ISBN 0-924520-08-6. Effective Training Inc. 258p.
- [LEE-99] LEE, Y.T. 1999. «An Overview of Information Modeling for Manufacturing Systems Integration». *NISTIR 6382, National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, MD.
- [MAC-00] MACABIES, L., DESROCHERS, A., RIVEST, L., MARANZANA, R. 2000. « Liens multi - modèles en CAO Application au rivetage en aéronautique ». *IDMME'2000 & Forum SCGM 2000* , Montréal, Canada.
- [MADD-87] MADDEN, C., WRIGHT, C. 1987. «Air force in-house manufacturing research: feature modeling». *Official Proceedings of Third International IMS'87 Conference*.

- [MER-99] MERKLEY, K.G., CHASE, K.W., PERRY, E. 1999. « An Introduction to Tolerance Analysis of Flexible Assemblies ». Internet conference [en ligne]. Provo, UT : Brigham Young University. <http://www.mssoftware.com> (Page consultée le 12 avril 2002).
- [NGOI-99] NGOI, B.K A., ONG, J.M. 1999. « A complete tolerance charting system in assembly ». *International Journal of Product Research*. Taylor & Francis Ltd. 11: 11. 2477-2498.
- [NGOIGOH-97] NGOI, B.K.A., GOH, L.C. 1997. «A stepper approach to tolerance charting». *Proceedings of the I MECH E Part B. Journal of Engineering Manufacture*. UK : University of Bath. 211. 539-546.
- [PREV-00] JPREVÉRAUD J.F. 2001. « CE/TOL 6 Sigma Technical Tips ». *PTC*.
- [RAN-89] RANTA, M. INUI, M., KIMURA, F., 1989. «A process Planning System for Productibility Feback to Designer». *Computer Applications in Production and Engineering*. IFIP. 373-381
- [SAL-93] SALOMONS, O.W., VAN HOUTEN, F.J.A.M., KALS, H.J.J. 1993. «Review of Research in Feature - Bas Design». *Journal of Manufacturing Systems*. 12 : 2. 113-132.
- [SAL-96] SALOMONS, O.W., JONGE POERINK, H.J., VAN SLOOTEN, F., VAN HOUTEN, F.J.A.M., KALS, H.J.J. 1996. « A Tolerancing Tool based on kinematic analogies » *Computer-*

Aided Tolerancing - Proceedings of the 4th CIRP Design Seminar. Tokyo : Kimura. 47 – 70

- [SHA-91b] SHAH. J.J., MATHEW, A. 1991. «Experimental Investigation of the STEP Form – Features Information Model», *Computer Aided Design*, 23 : 4. 282-296.

- [SPOT-83] SPOTTS, M.F. 1983. *Dimensioning and Tolerancing for Quantity Production*. NJ : Englewood Cliffs. Prentice-Hall.

- [STEP-96] Industrial automation systems and integration. 1996. *Product data representation and exchange STEP - Part 47 : Integrated generic ressources : shape variation tolerance*. ISO_10303_47, June 6.

- [SUB-91] SUBRAMANIA, S., LU, S.C. 1991. «The Impact of an AI Bas Design Environm Simultaneous Engineering on Process Planning», *International Journal of Computer Manufacturing*. 4 :2. 71-82.

- [TEC-99] Techniques de l'Ingénieur. Volume B7010-6.

- [TECH-01] Technologie. 2001. Internet cours [en ligne]. Lycée Édouard Branly, 94000 Créteil. <http://www.ac-creteil.fr/branlycreteil/cours/techno/index.htm> (Page consultée le 1 avril 2002).

- [TIC-94] TICHKIEWITCH, S. 1994. «De la CFAO à la conception intégrée», *Revue internationale de CFAO et d'infographie*. 9 : 5. 609-621.

- [TRIB-03] Tribologie et expertises. Internet cours [en ligne]. De L'École Centrale de Lyon. <http://servers.ec-lyon.fr/tribologie/HTML/french/frwelc.html> (Page consultée le 19 june 2002).
- [WADE-67] WADE, Q.R. 1967. *Tolerance Control in Design and Manufacturing*. USA , New York : Industrial Press.
- [WANG-91] WANG, Hsu-Pin, LI, Jian-Kang. 1991. *Computer - Aided Process Planning*. New York : ELSEVIER. 450p.
- [ZHANG-94] ZHANG, Hong-Chao, ALTING, Leo. 1994. *Computerized Manufacturing Process Planning Systems*. London : Chapman & Hall.
- [ZHANG-96] ZHANG, G., 1996. « Simultaneous tolerancing for design and manufacturing ». *The International Journal of Product Research*. 34:12. , pp. 3361 - 3382.

ANNEXE I

CONTENU DU FICHIER « MAPLE CALCUL »

■ Calcul du déplacement

Afin de tenir compte des changements de la cote résultante provoqués par influence des jeux défavorables, nous proposons d'utiliser la fonction "y_{djf}" pour la correction de la cote résultante dans le cas d'assemblage par force de serrage.

Y_{djf} - la fonction empirique "y_{djf}" de trois variables

R_t - hauteur maximale du profil de rugosité, [mm].
F - force normale agissant sur le joint de contact, [N].
E - module d'élasticité, [GPa].

De cette manière on peut identifier le déplacement dans le joint en contact en fonction de la dispersion de la rugosité (R_t), de la force de serrage (F) et du module d'élasticité (E).

Exprimons ce déplacement comme suit:

STUDENT > Y_{djf} := (4 + R_t) * (100 * F / (A * d * S_y * B_{sum})) ^ (1 / (2 + k)) + 0.13 * (A_w) ^ (1 / 3) * (W * THET * F / A) ^ (2 / 3);

$$Y_{djf} := (4 + R_t) \left(100 \frac{F}{A d S_y B_{sum}} \right)^{\left(\frac{1}{2+k} \right)} + .13 A_w^{1/3} \left(\frac{W THET F}{A} \right)^{2/3}$$

Y_r : englobe l'influence de la rugosité

STUDENT > Y_r := (4 + R_t) * ((100 * F / (A * d * S_y * B_{sum})) ^ (1 / (2 + k)));

$$Y_r := (4 + R_t) \left(100 \frac{F}{A d S_y B_{sum}} \right)^{\left(\frac{1}{2+k} \right)}$$

Y_{on} : englobe l'influence d'ondulation

STUDENT > Y_{on} := 0.13 * (A_w) ^ (1 / 3) * (W * THET * F / A) ^ (2 / 3);

$$Y_{on} := .13 A_w^{1/3} \left(\frac{W THET F}{A} \right)^{2/3}$$

Bsum : paramètre réduit adimensionnel de la surface portante du profil.

```
STUDENT > Bsum :=
0.24*(0.4-0.1*k)*b*(4+Rt)^( (2+k)/(Rt)^k );
```

$$Bsum := .24 (.4 - .1 k) b (4 + Rt)^{\left(\frac{2+k}{Rt^k}\right)}$$

THET : constante élastique des matériaux en contact.

```
STUDENT > THET := 2*(1-MU^2)/E;
```

$$THET := 2 \frac{1 - MU^2}{E}$$

Données de départ:

A - aire nominale du contact, [mm²];
d=D - coefficient adimensionnel qui caractérise le durcissement de la couche superficielle des surfaces en contact;
Aw - pas moyen d'ondulation, [mm];
W - profondeur moyenne d'ondulation, [mm];
Sy - limite d'écoulement, [MPa].
MU - coefficient de Poisson;
k et b - les paramètres adimensionnels de la longueur portante du profil et qui dépendent du procédé d'usinage.

```
STUDENT > A:= 1400; d:= 5.48; Aw:= 2*10^3; W:= 5; Sy:=
190; MU:= 0.255; k:= 2; b:= 1;
```

A := 1400

d := 5.48

Aw := 2000

W := 5

Sy := 190

MU := .255

k := 2

b := 1

■ Analyse de la dispersion du déplacement

En prenant une hypothèse que les deux pièces en contact soient les mêmes matériaux, on peut fixer E

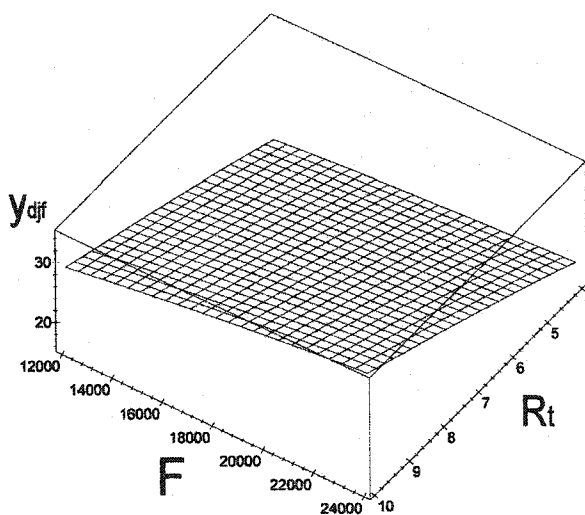
```
STUDENT > E:=120;
```

$E := 120$

```
STUDENT >
```

```
STUDENT > plot3d(Ydjf,Rt=4..10,F=12000..24000,title='Influence multiple: Rt et F',axes=BOXED,orientation=[35,25],color=black);
```

Influence multiple: Rt et F



On va analyser ces paramètres successivement en 2D

```
STUDENT > Rt:=4; l1:=(4+Rt)*(100*F/(A*d*Sy*Bsum))^(1/(2+k))
+0.13*(Aw)^(1/3)*(W*THET*F/A)^(2/3);
```

$Rt := 4$
Page 3

Maple V Release 4 - Student Edition

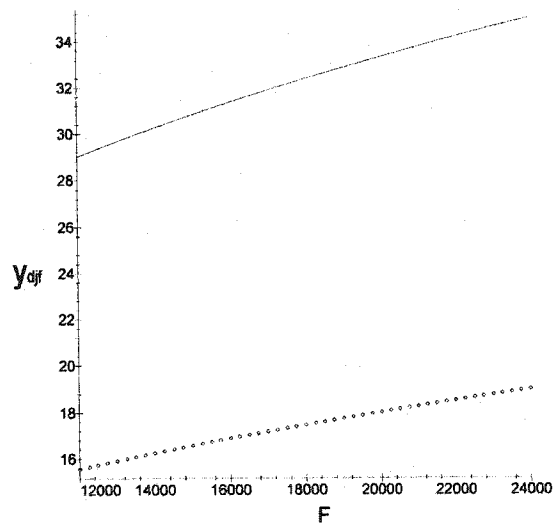
$$l1 := .9248932976 (F 8^{3/4})^{1/4} + .0001894976507 2000^{1/3} F^{2/3}$$

```
STUDENT > Rt:=10;l2:=((4+Rt)*(100*F/(A*d*Sy*Bsum))^(1/(2+k))
)+0.13*(Aw)^(1/3)*(W*THET*F/A)^(2/3));
```

$Rt := 10$

$$l2 := 1.407246473 \left(F 14^{\frac{24}{25}} \right)^{1/4} + .0001894976507 2000^{1/3} F^{2/3}$$

```
STUDENT > plot([l1, l2], F=12000..24000,
color=[black,black], style=[point,line]);
```



La valeur de la dispersion du déplacement dans le joint est définie par les fonctions l1 et l2

La dispersion de l1 avec Rt=4 est 3.44 pour la fonction l1.

La dispersion de l2 avec Rt=10 est 6.0 pour la fonction l2.

```
STUDENT > F:=12000; l3:=((4+Rt)*(100*F/(A*d*Sy*Bsum))^(1/(2
+k)))+0.13*(Aw)^(1/3)*(W*THET*F/A)^(2/3));
```

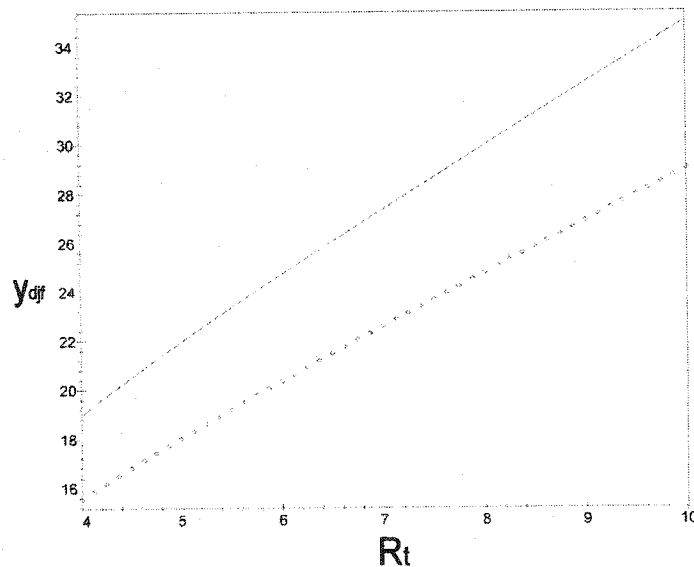
$$l3 := 2.035023615 (4 + Rt) \left(\frac{1}{(4 + Rt)^{\left(\frac{4}{Rt^2}\right)}} \right)^{1/4} + .09932486749 2000^{1/3}$$

```
STUDENT >
```

```
STUDENT > F:=24000; l4:=((4+Rt)*(100*F/(A*d*Sy*Bsum))^(1/(2
+k)))+0.13*(Aw)^(1/3)*(W*THET*F/A)^(2/3));
```

$$l4 := 2.420064563 (4 + Rt) \left(\frac{1}{(4 + Rt)^{\left(\frac{4}{Rt^2}\right)}} \right)^{1/4} + .1576683991 2000^{1/3}$$

```
STUDENT > plot([l3, l4], Rt=4..10, color=[black, black],
style=[point, line], axes=BOXED);
```



La valeur de la dispersion du déplacement dans le joint est définie par les fonctions 13 et 14.

La dispersion de 13 avec $F = 12000$ est 13.45 pour la fonction 13.

La dispersion de 14 avec $F = 24000$ est 16.0 pour la fonction 14.

Alors, l'influence de la rugosité (R_t) sur la valeur de correction est plus importante que la force de serrage (F).

La dispersion maximale est 16.0 comparée à celle de minimale 3.44.

STUDENT >

STUDENT >

■ Analyse de la sensibilité

On va estimer la sensibilité de la dispersion du déplacement en fonction de trois

paramètres : Rt, F; E.

On y adopte la dispersion maximale de cette dispersion.

STUDENT > SYS1 := diff(Ydjf, Rt);

$$\text{SYS1} := .1944348645 \left(\frac{F}{(4 + Rt) \left(\frac{4}{Rt^2} \right)} \right)^{1/4} - .04860871613 \frac{(4 + Rt) F \left(-8 \frac{\ln(4 + Rt)}{Rt^3} + \frac{4}{Rt^2 (4 + Rt)} \right)}{\left(\frac{F}{(4 + Rt) \left(\frac{4}{Rt^2} \right)} \right)^{3/4} (4 + Rt) \left(\frac{4}{Rt^2} \right)}$$

STUDENT >

STUDENT >

STUDENT > SYS2 := diff(Ydjf, F);

SYS2 :=

$$.04860871613 \frac{4 + Rt}{\left(\frac{F}{(4 + Rt) \left(\frac{4}{Rt^2} \right)} \right)^{3/4} (4 + Rt) \left(\frac{4}{Rt^2} \right)} + .003073501305 \frac{2000^{1/3}}{\left(\frac{F}{E} \right)^{1/3} E}$$

STUDENT > SYS3 := diff(Ydjf, E);

$$\text{SYS3} := -.003073501305 \frac{2000^{1/3} F}{\left(\frac{F}{E} \right)^{1/3} E^2}$$

Nous obtiendrons la dispersion maximale avec les paramètres suivants:

STUDENT > F:=24000; Rt := 10; E:=120;

F := 24000

Rt := 10

```

[                                     E := 120
[ la sensibilité (Rt)
[ STUDENT > evalf(SYS1);
[                                     2.507632387
[ la sensibilité (F)
[ STUDENT > evalf(SYS2);
[                                     .0003989144681
[ la sensibilité (E)
[ STUDENT > evalf(SYS3);
[                                     -.01103609638
[
[ La dispersion maximale :
[ STUDENT > LINAIRE_NOM := evalf(Ydjf);
[                                     LINAIRE_NOM := 34.98496004
[ STUDENT >

```

Nous obtiendrons la dispersion minimale avec les paramètres suivants:

```

STUDENT > F:=14000; Rt := 6; E:=120;
[                                     F := 14000
[                                     Rt := 6
[                                     E := 120
[ la sensibilité (Rt)
[ STUDENT > evalf(SYS1);
[                                     2.351810303
[ la sensibilité (F)
[ STUDENT > evalf(SYS2);
[                                     .0004203158057
[ la sensibilité (E)
[ STUDENT > evalf(SYS3);
[                                     -.007704775947
[
[ La dispersion maximale :

```

```
[STUDENT > LINAIRE_NOM := evalf(Ydjf);  
                                LINAIRE_NOM := 21.22625232  
[STUDENT >  
[
```

ANNEXE II

CONTENU DU FICHIER ASSFAB.JAVA

```
// =====
//
// Autour: (C) Andrei Wygowski, 2000
// E-mail: wygowski@yahoo.ca
//
// Modules des calculs impliqués dans le prototype:
// -----
// AssFab.java : module maître
// CoteFab.java
// ChartItem.java
// ReadInfo.java
// Cote.java
// AssemblageDefinition.java
//
// Input Data:
// -----
// ID_ASS.dat
// Ass_Info.dat
// Gamme_Info.dat
//
// =====

import java.io.*;
import java.util.*;
import java.math.*;
import ReadInfo.*;
import Cote.*;
import CoteFab.*;
import AssemblageDefinition.*;

class AssFab
{
    public static void main(String args[]) throws Exception
    {
        // *****
        // *   ETAPE I   *
        // *****
        //
        //      Étape      : 1.1.
        //      But        : Définition des fichiers d'entrée.
        //      Description : Ces fichiers sont utilisés pour garder des entités génériques

        String filenameAss = new String ("/Maitrise/Pont/ID_ASS.dat");
        String fileName = new String ("/Maitrise/Pont/Ass_Info.dat");
        String fileNameCharte = new String ("/Maitrise/Pont/Gamme_Info.dat");
    }
}
```

```

int nombreDesCotes = 0;
ReadInfo FInput = new ReadInfo ();

// Initialisation des données
System.out.println ("Etape 1: initialisation d'une chaîne de cote pour l'assemblage");
try
{
    BufferedReader bin2 = new BufferedReader(
        new InputStreamReader (
            new FileInputStream (fileName ) ) );
    String str = bin2.readLine();
    str = bin2.readLine();

    StringTokenizer st = new StringTokenizer(str);

    nombreDesCotes = st.countTokens()-1;
    System.out.println ("Nombre des cotes dans l'assemblage: \t" + nombreDesCotes + "\n");
    bin2.close();
} catch (Exception oops)
{
    System.out.println("Could not read file" + fileName);
}

// *****
// *   ETAPE II   *
// *****
//
// ---- 2.1. ----
// Bâtir une chaîne de cotes pour assemblage,
// à partir de fichier Excel du Solidworks.

Cote [] ChaineDesCotes = new Cote [nombreDesCotes*2];
FInput.ReadInfo _CotesAss (fileName, ChaineDesCotes);

// Vérification des Outputs
/* System.out.println ("ID pour la cote 3 : \t" + ChaineDesCotes[2].IdCote);
System.out.println ("Cote Nominale pour la cote 3 : \t" + ChaineDesCotes[2].CoteNominale);
System.out.println ("RapportDeMaion pour la cote 3 : \t" + ChaineDesCotes[2].RapportDeMaillon);
System.out.println ("ESL pour la cote 3 : \t" + ChaineDesCotes[2].ESL);
System.out.println ("EIL pour la cote 3 : \t" + ChaineDesCotes[2].EIL);
*/

// ---- 2.2. ----
// Déterminer les paramètres de la cote résultante
// par la méthode MIN-MAX (Worst-Case)

AssemblageDefinition AssSerage = new AssemblageDefinition();
Cote Resultante = new Cote ();
AssSerage.CalculerCoteResultante ( Resultante, nombreDesCotes, ChaineDesCotes );

// System.out.println ("CoteNominale pour la cote Resultante : \t" + Resultante.CoteNominale);

```

```

// ---- 2.3. ----
// Trouver la cote avec la tolérance très serrée dans la chaîne d'assemblage.
// Cette fonctionnalité est prévue pour la prochaine version du programme
// *****
// *   ETAPE III   *
// *****

// ---- 3.1. ----
// Calculer la valeur de correction pour la cote resultante
// en fonction du type d'assemblage.

System.out.println ("Etape 2: Calcul de valeur de la correction.");
FInput.ReadInfo_AssSerage (filenameAss, AssSerage);
// System.out.println (" profondeur moyenne d'ondulation est " + AssSerage.W);

double LT_cor = AssSerage.Petit_Deplacement(AssSerage);

String ValeurDeCorrection = new String(Double.toString(LT_cor));
String Val = ValeurDeCorrection.substring(0,6);
System.out.println ("Valeur de correction de la cote résultante");
System.out.println ("due à l'assemblage par serrage, ValCor =" + Val + "\n");

// *****
// *   ETAPE III   *
// *****
System.out.println ("Etape 3 : Initialisation d'une boucle dans la charte.");
// ---- 3.1. ----
// Fermeture de la boucle pour la cote serrée (1.3.).
int NombreOperation =0;
try
{
    BufferedReader bin2 = new BufferedReader(
        new InputStreamReader (
            new FileInputStream (fileNameCharte ) ) );
    String str = bin2.readLine();
    StringTokenizer st = new StringTokenizer(str, "\t");
    while (st.hasMoreTokens())
    {
        String key = st.nextToken();
        String val = st.nextToken();
        NombreOperation = Integer.parseInt(val);
    }
    System.out.println ("Nombre des operations d'usinage est : \t" + NombreOperation + "\n");
    bin2.close();
} catch (Exception oops)
{
    System.out.println("Could not read file " + fileNameCharte);
}

// Array pour stocker tous les informations associées avec l'opération d'usinage en question
CoteFab [] ToleranceCharte = new CoteFab [NombreOperation*2];
FInput.ReadInfo_Gamme (fileNameCharte, ToleranceCharte);

```

```

CoteFab CoteBP = new CoteFab ();
CoteBP.AficherCharte(ToleranceCharte, NombreOperation );

// *****
// Cette partie du code est présentée à l'étape 2.3
// *****
// Information de la cote avec la tolérance serrée va introduire à la CoteBP
CoteBP.Nominale = 45.00; // CoteNominale Opérationnelle
CoteBP.Tolerance = 0.003; // Tolérance de fabrication;
CoteBP.SurfGauche = 2; // Information du B-P
CoteBP.SurfDroite = 4;
// *****
// *****

String [][] BoucleFerme = new String [ToleranceCharte[1].SurfaceImpliq.size()][NombreOperation];
CoteBP.FermerBoucleBP(CoteBP,
    ToleranceCharte,
    NombreOperation,
    BoucleFerme);

// System.out.println("parti du boucle " + BoucleFerme[1][1]);

System.out.println("\nBlueprint dimention: ID_gauche: " + CoteBP.SurfGauche + " ID_droite: " +
CoteBP.SurfDroite);

// ---- 3.2. ----
// Vérification de fabricabilité de la cote serrée (1.3.)
// en fonction des tolérances alloués aux opérations de fabrication.
// Cette fonctionnalité est prévue pour la prochaine version du programme

// ---- 3.3. ----
// Optimisation des tolérances opérationnelles en utilisant la valeur
// de correction (2.1.) due au procédé d'assemblage
// Cette fonctionnalité est prévue pour la prochaine version du programme

    }
}

```

ANNEXE III

CONTENU DU FICHIER COTEFAB.JAVA

```
// =====
//
// (C) Andrei Wygowski, 2000
// E-mail: wygowski@yahoo.ca
//
// Modules des calculs:
// -----
// AssFab.java
// CoteFab.java
// ChartItem.java
// ReadInfo.java
// Cote.java
// AssemblageDefinition.java
//
// Input Data:
// -----
// ID_ASS.dat
// Ass_Info.dat
// Gamme_Info.dat
//
// =====

import java.io.*;
import java.util.*;
import ChartItem.*;

public class CoteFab extends AssFab {

    public String IdOper;
    public double Nominale; // CoteNominale Opérationnelle
    public double Tolerance; // Tolérance de fabrication;
    public int LigneInvol;
    public double StockRemoval;
    public double TolStockRemoval;
    public int SurfGauche; // Information du B-P
    public int SurfDroite; // Information du B-P

    public Vector SurfaceImplic; // Il correspond à chaque opération

    public void AfficherCharte (CoteFab [] ToleranceCharte, int NombreOperation)
    {
        int count = 1;
        int i =0;
        int j =0;
        String StrTmp = null;
    }
}
```

```

String [][] Charte_Gamme = new String [ToleranceCharte[1].SurfaceImpliq.size() ]
[NombreOperation*2];
while (count < NombreOperation+1 )
{
    for (i=0; i < ToleranceCharte[count].SurfaceImpliq.size(); i++)
    {
        // System.out.print(" " + ToleranceCharte[count].SurfaceImpliq.elementAt(i) );
        StrTmp = (String) ToleranceCharte[count].SurfaceImpliq.elementAt(i);
        if (StrTmp.compareTo("M") == 0)
        {
            Charte_Gamme [i] [j] = "o-";
        }
        else if (StrTmp.compareTo("-M") == 0)
        {
            Charte_Gamme [i] [j] = "-o";
        }
        else if (StrTmp.compareTo("U") == 0)
        {
            Charte_Gamme [i] [j] = "<";
        }
        else if (StrTmp.compareTo("-U") == 0)
        {
            Charte_Gamme [i] [j] = ">";
        }
        else if (StrTmp.compareTo("O") == 0)
        {
            Charte_Gamme [i] [j] = "--";
        }
        else {Charte_Gamme [i] [j] = " ";}

        System.out.print(" " + Charte_Gamme [i] [j] );
    } j++; count++; System.out.print("\n");
}

public void FermerBoucleBP(CoteFab CoteBP,
    CoteFab [] ToleranceCharte,
    int NombreOperation,
    String [][] BoucleFerme)
{
    int Reponse = 0; // Est ce que la boucle fermé
    String Out = null;
    int NumberSurface = ToleranceCharte[1].SurfaceImpliq.size();

    ChartItem [] ItemDroite = new ChartItem [NombreOperation]; // * NumberSurface];
    ChartItem [] ItemGauche = new ChartItem [NombreOperation]; // * NumberSurface];
    ChartItem ItemDR = new ChartItem ();
    ChartItem ItemGH = new ChartItem ();
    ChartItem Item = new ChartItem ();

    int CountOper = 0;
    int CountSurf = 0;

```

```

int CountBranchGh = 0;
int CountBranchDr = 0;
int LG;
int LD;

Item.LigneNumber = NombreOperation;
String Branch = "NON"; // initialisation d'entre par la droite BP
Item.FirstEntre = "Dr";
do
{
    if( (Branch.compareTo("Droite") == 0) || (Item.FirstEntre.compareTo("Dr") == 0) )
    {
        TracerBranch (CoteBP, NumberSurface, NombreOperation, ToleranceCharte,
            Item); // tracer Droite
        ItemDR.SurfaceID = Item.SurfaceID;
        ItemDR.PositJ_M = Item.PositJ_M;
        ItemDR.PositJ_U = Item.PositJ_U;
        ItemDR.LigneNumber = Item.LigneNumber;
    }
    else if (Branch.compareTo("Gauche") == 0 || (Item.FirstEntre.compareTo("Gh") == 0) )
    {
        TracerBranch (CoteBP, NumberSurface, NombreOperation, ToleranceCharte,
            Item); // tracer Gauch
        ItemGH.SurfaceID = Item.SurfaceID;
        ItemGH.PositJ_M = Item.PositJ_M;
        ItemGH.PositJ_U = Item.PositJ_U;
        ItemGH.LigneNumber = Item.LigneNumber;
    } else {}

    if (Branch.compareTo("Gauche") == 0 || (Item.FirstEntre.compareTo("Gh") == 0) )
    {
        TracerBranch (CoteBP, NumberSurface, NombreOperation, ToleranceCharte,
            Item); // tracer Gauch
        ItemGH.SurfaceID = Item.SurfaceID;
        ItemGH.PositJ_M = Item.PositJ_M;
        ItemGH.PositJ_U = Item.PositJ_U;
        ItemGH.LigneNumber = Item.LigneNumber;
    }
    else if( (Branch.compareTo("Droite") == 0) || (Item.FirstEntre.compareTo("Dr") == 0) )
    {
        TracerBranch (CoteBP, NumberSurface, NombreOperation, ToleranceCharte,
            Item); // tracer Droite

        ItemDR.SurfaceID = Item.SurfaceID;
        ItemDR.PositJ_M = Item.PositJ_M;
        ItemDR.PositJ_U = Item.PositJ_U;
        ItemDR.LigneNumber = Item.LigneNumber;
    } else {}
    ItemDroite[CountBranchDr] = ItemDR;
    ItemGauche[CountBranchGh] = ItemGH;

    System.out.println ("Question: Est-ce que la boucle est fermée ?" );
}

```

```

Out = VerificationFermeture (ItemGauche [CountBranchGh],
                             ItemDroite [CountBranchDr],
                             Item, Reponse);

```

```

System.out.println ("Réponse : " + Out );

```

```

if(Out.compareTo("YES") == 0)
{
    Reponse = 1;
    break;
}
else if (Out.compareTo("Gauche") == 0)
{
    CountBranchGh++;
    Branch = "Gauche";
    Item.SurfaceID = ItemGH.SurfaceID;
    Item.PositJ_M = ItemGH.PositJ_M;
    Item.PositJ_U = ItemGH.PositJ_U;
    Item.LigneNumber = ItemGH.LigneNumber;
}
else if (Out.compareTo("Droite") == 0)
{
    CountBranchDr++;
    Branch = "Droite";
    Item.SurfaceID = ItemDR.SurfaceID;
    Item.PositJ_M = ItemDR.PositJ_M;
    Item.PositJ_U = ItemDR.PositJ_U;
    Item.LigneNumber = ItemDR.LigneNumber;
}
else {System.out.println("Error " );}
} while (Reponse != 1);
}

```

```

public void TracerBranch ( CoteFab CoteBP,
                           int NumberSurface,
                           int NombreOperation,
                           CoteFab [] ToleranceCharte,
                           ChartItem Item)
{
    int j = Item.LigneNumber;

```

```

    int i = Item.SurfaceID;

```

```

    int CountOper = NombreOperation;
    String STOP = "NON";
    String TMP = null;

```

```

// *****

```

```

    if (Item.FirstEntre.compareTo("Gh") == 0)

```

```

{
    i = CoteBP.SurfGauche;
    Item.FirstEntre = "NON";
}
else if (Item.FirstEntre.compareTo("Dr") == 0)
{
    i = CoteBP.SurfDroite;
    Item.FirstEntre = "Gh";
}
else { i = Item.SurfaceID; }

while ((CountOper > 0) && (STOP.compareTo("YES") != 0))
{
    TMP = (String)ToleranceCharte[j].SurfaceImpliq.elementAt(i);
    if (TMP.compareTo("U") == 0)
    {
        Item.LigneNumber = j;
        Item.PositJ_U = i;
        while (i < NumberSurface && STOP.compareTo("YES") != 0)
        {
            TMP = (String)ToleranceCharte[j].SurfaceImpliq.elementAt(i);
            if (TMP.compareTo("M") == 0 ||
                (TMP.compareTo("-M") == 0))
            {
                Item.SurfaceID = i;
                Item.PositJ_M = i;
                STOP = "YES";
            }
            i++;
        }
    }
    else if (TMP.compareTo("-U") == 0)
    {
        Item.LigneNumber = j;
        Item.PositJ_U = i;
        while ((i > 0) && (STOP.compareTo("YES") != 0))
        {
            TMP = (String)ToleranceCharte[j].SurfaceImpliq.elementAt(i);
            if (TMP.compareTo("M") == 0 ||
                (TMP.compareTo("-M") == 0))
            {
                Item.SurfaceID = i;
                Item.PositJ_M = i;
                STOP = "YES";
            }
            i--;
        }
    }
}
if (STOP.compareTo("NON") == 0)
{
    j--;
    CountOper--;
}

```

```

    }
    }
    if (STOP.compareTo("NON") == 0) { Item.LigneNumber = 0; }
    }

    public String VerificationFermeture (ChartItem ItemGauche,
                                         ChartItem ItemDroite,
                                         ChartItem Item,
                                         int Reponse)
    {
        String OutPut = null;
        System.out.println ("Compairison LigneGh =" + ItemGauche.LigneNumber + "LigneDr =" +
                             ItemDroite.LigneNumber);

        if( (ItemDroite.LigneNumber < ItemGauche.LigneNumber) &&
            (ItemGauche.PositJ_M) == (ItemDroite.PositJ_U) )
        {
            OutPut = "YES";
            Reponse = 1;
        }
        else if( ( ItemDroite.LigneNumber > ItemGauche.LigneNumber) &&
                 (ItemDroite.PositJ_M) == (ItemGauche.PositJ_U))
        {
            OutPut = "YES";
            Reponse = 1;
        }

        if( (ItemDroite.LigneNumber < ItemGauche.LigneNumber) &&
            (ItemGauche.PositJ_M) != (ItemDroite.PositJ_U) )
        { OutPut = "Gauche";
          Item.SurfaceID = ItemGauche.PositJ_U ;
        }
        else if( ( ItemDroite.LigneNumber > ItemGauche.LigneNumber) &&
                 (ItemDroite.PositJ_M) != (ItemGauche.PositJ_U))
        { OutPut = "Droite";
          Item.SurfaceID = ItemDroite.PositJ_U ;
        }

        return OutPut;
    }

    public void AfficherBoucle (CoteFab [] ToleranceCharte,
                               int NombreOperation,
                               ChartItem [] ItemDroite,
                               ChartItem [] ItemGauche
                               )
    {
        int count = 0;
        int i = 0;
        int j = 0;
        String StrTmp = null;
        String [] [] Charte_Gamme = new String [ToleranceCharte[1].SurfaceImpliq.size() ]
        [NombreOperation*2];
    }

```

```

while (count < NombreOperation+1 )
{
    if (ItemDroite[count].LigneNumber == count)
        for (i =0; i < ToleranceCharte[count].SurfaceImpliq.size()*2; i++ )
        {
            if ( ( ItemDroite[i].PositJ_M == i ) ||
                ( ItemDroite[i].PositJ_U == i ) )
            {
                StrTmp = (String) ToleranceCharte[count].SurfaceImpliq.elementAt(i);
                Charte_Gamme [i] [j] = "StrTmp";
            }
            else { Charte_Gamme [i] [j] = " ";}
        }
    else if (ItemGauche[count].LigneNumber == count)
        for (i =0; i < ToleranceCharte[count].SurfaceImpliq.size()*2; i++ )
        {
            if ( ( ItemGauche[i].PositJ_M == i ) ||
                ( ItemGauche[i].PositJ_U == i ) )
            {
                StrTmp = (String) ToleranceCharte[count].SurfaceImpliq.elementAt(i);
                Charte_Gamme [i] [j] = "StrTmp";
            }
            else { Charte_Gamme [i] [j] = " ";}
        }
    else {Charte_Gamme [i] [j] = " ";}

    System.out.print(" " + Charte_Gamme [i] [j] );
    j++; count++; System.out.print("\n");
}
}
}

```

ANNEXE IV

CONTENU DU FICHIER CHARTITEM.JAVA

```
// =====
//
// (C) Andrei Wygowski, 2000
// E-mail: wygowski@yahoo.ca
//
// Modules des calculs:
// -----
// AssFab.java
// CoteFab.java
// ChartItem.java
// ReadInfo.java
// Cote.java
// AssemblageDefinition.java
//
// Input Data:
// -----
// ID_ASS.dat
// Ass_Info.dat
// Gamme_Info.dat
//
// =====
```

```
import CoteFab.*;
```

```
public class ChartItem extends AssFab
```

```
{
    int LigneNumber;
    String BranchID;
    int SurfaceID;
    int PositJ_U;
    int PositJ_M;
    String Branch;
    String FirstEntre;
```

```
public void ChartItem ()
```

```
{
    int LigneNumber = 0;
    String BranchID = null; //Left or Right
    String SurfaceID = null;
    int PositJ_U = 0;
    int PositJ_M = 0;
}
}
```

ANNEXE VI

CONTENU DU FICHIER READINFO.JAVA

```
// =====
//
// (C) Andrei Wygowski, 2000
// E-mail: wygowski@yahoo.ca
//
// Modules des calculs:
// -----
// AssFab.java
// CoteFab.java
// ChartItem.java
// ReadInfo.java
// Cote.java
// AssemblageDefinition.java
//
// Input Data:
// -----
// ID_ASS.dat
// Ass_Info.dat
// Gamme_Info.dat
//
// =====

import java.io.*;
import java.util.*;
import Cote.*;
import CoteFab.*;
import AssemblageDefinition.*;
import AssFab.*;

public class ReadInfo extends AssFab
{
    public String DataAssSerrage [] [] = new String [16] [16];

    public AssamblageDefinition ReadInfo_AssSerage (
        String fileName, AssamblageDefinition AssSerage)
        throws EOFException
    {
        int j =0;
        try
        {
            BufferedReader bin2 = new BufferedReader(
                new InputStreamReader (
                    new FileInputStream (fileName) ) );

            String str = null;
            while ((str = bin2.readLine()) != null)
            {
```

```

StringTokenizer st = new StringTokenizer(str, "=");
while (st.hasMoreTokens())
{
    String key = st.nextToken();
    String val = st.nextToken();
    DataAssSerrage [0] [j] = key;
    DataAssSerrage [1] [j] = val;
    j++;
}
}
bin2.close();
} catch (Exception oops)
{
    System.out.println("Could not read file pour les COTES");
}

AssSerge.Type_de_Material = DataAssSerrage [1] [0];
AssSerge.R_max = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [1]);
AssSerge.E_1 = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [2]);
AssSerge.E_2 = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [3]);
AssSerge.E = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [4]);
AssSerge.F = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [5]);
AssSerge.A = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [6]);
AssSerge.D = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [7]);
AssSerge.R_e = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [8]);
AssSerge.k = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [9]);
AssSerge.b = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [10]);
AssSerge.mu_1 = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [11]);
AssSerge.mu_2 = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [12]);
AssSerge.mu = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [13]);
AssSerge.AW = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [14]);
AssSerge.W = Double.parseDouble(DataAssSerrage [1] [15]);

return AssSerge;
}

public void ReadInfo_CotesAss (
    String fileName,
    Cote [] ChaineDesCotes)
    throws EOFException
{
    int count = 0;
    boolean oui = true;

    try
    {
        BufferedReader bin2 = new BufferedReader(
            new InputStreamReader (
                new FileInputStream (fileName) ));

        String str = null;
        String val = null;
        String val_1 = null;
        boolean OUI = true;
    }
}

```

```

while ((str = bin2.readLine()) != null)
{
    StringTokenizer st = new StringTokenizer(str, "\t");
    while (st.hasMoreTokens())
    {
        val = st.nextToken();
        if (val.compareTo("ID") == 0)
        {
            count = 0;
            while (st.hasMoreTokens())
            {
                val = st.nextToken();
                Cote CoteTmp = new Cote ();
                CoteTmp.IdCote = val;
                ChaineDesCotes[count] = CoteTmp;
                count++;
            }
        }
        else if (val.compareTo("Mean") == 0)
        {
            count = 0;
            while (st.hasMoreTokens())
            {
                val = st.nextToken();
                ChaineDesCotes[count].CoteNominale = Double.parseDouble(val);
                count++;
            }
        }
        else if (val.compareTo("Dir") == 0)
        {
            count = 0;

            while (st.hasMoreTokens())
            {
                val = st.nextToken();
                ChaineDesCotes[count].RapportDeMaillon = Integer.parseInt(val);
                count++;
            }
        }
        else if (val.compareTo("TolPlus") == 0)
        {
            count = 0;
            while (st.hasMoreTokens())
            {
                val = st.nextToken();
                ChaineDesCotes[count].ESL = Double.parseDouble(val);
                count++;
            }
        }
        else if (val.compareTo("TolMin") == 0)
        {
            count = 0;
            while (st.hasMoreTokens())

```

```

    {
        val = st.nextToken();
        ChaineDesCotes[count].EIL = Double.parseDouble(val);
        count++;
    }
}
else if (val.compareTo("Type@Serrage") == 0)
{
}
else
{
    while (st.hasMoreTokens())
    {
        val_1 = st.nextToken();
        if (OUI){
            OUI = false;
        }
    }
}
}
}
bin2.close();
} catch (IOException oops)
{
    System.out.println("Could not read file \t" + fileName);
}
}

// *****
public void ReadInfo_Gamme (String fileNameCharte,
                           CoteFab [] ToleranceCharte)
                           throws EOFException
{
    int count=0;
    try
    {
        BufferedReader bin2 = new BufferedReader(
            new InputStreamReader (
                new FileInputStream (fileNameCharte ) ) );

        String str = null;
        String val = null;
        str = bin2.readLine();

        while ((str = bin2.readLine()) != null)
        {
            CoteFab CoteTmp = new CoteFab ();
            CoteTmp.SurfaceImpliq = new Vector ();

            StringTokenizer st = new StringTokenizer(str, "\t");
            while (st.hasMoreTokens())
            {
                val = st.nextToken();
                CoteTmp.SurfaceImpliq.addElement(val);
                // System.out.println(CoteTmp.SurfaceImpliq.lastElement());
            }
        }
    }
}

```

```
}
ToleranceChart[count] = CoteTmp;
count++;
}
bin2.close();
} catch (IOException oops)
{
    System.out.println("Could not read file pour la Gamme_Info");
}
}
```

ANNEXE VII

CONTENU DU FICHIER ASSEMBLAGEDEFINITION.JAVA

```
// =====
//
// (C) Andrei Wygowski, 2000
// E-mail: wygowski@yahoo.ca
//
// Modules des calculs:
// -----
// AssFab.java
// CoteFab.java
// ChartItem.java
// ReadInfo.java
// Cote.java
// AssemblageDefinition.java
//
// Input Data:
// -----
// ID_ASS.dat
// Ass_Info.dat
// Gamme_Info.dat
//
// Reference:
// -----
// [1] A.Bazergui et les autres, Résistance ds matériaux, POLY, 1993
//
// =====

import java.math.*;

public class AssamblageDefinition extends AssFab {
// variables

    public String Type_de_Material;

    public double R_max;      // approximative 1.25R_z approximative R_z 6R_a
                             // R_a : écart moyen arithmétique du profil;
    public double E_1, E_2, E; // module d'élasticité, GPa
                             // Selon [1] pour le Fonte grise E = 90 - 145 GPa (pp.117 [1])
    public double F;          // force normale agissant sur le joint de contact, N
    public double A;          // aire nominale du contact, mm^2
    public double D;          // coefficient nondimensionnel qui
                             // caractérise le durcissement
                             // de la couche superficielle
                             // des surfaces en contact;

    public double R_e;        // limite d'élasticité des surfaces en contact, MPa
    public double k, b;       // les paramètres adimensionnels de la longueur portante du profil et
                             // qui dépendent du procédé d'usinage.
```

```

public double mu_1, mu_2, mu; // coefficient de Poisson;
public double AW;           // pas moyen d'ondulation, \mu m
public double W;            // profondeur moyenne d'ondulation, \mu m

// constructeurs
// AssamblageDefinition Data_Ass = new AssamblageDefinitionv ();
// methodes

public void CalculerCoteResultante (
    Cote Resultante,
    int nombreDesCotes,
    Cote [] ChaîneDesCotes)
{
    Resultante.CoteNominale = 0.0;
    double SUM_ES_plus = 0.0;
    double SUM_EI_plus = 0.0;
    double SUM_ES_minus = 0.0;
    double SUM_EI_minus = 0.0;

    for (int i = 0; i < nombreDesCotes; i++)
    {
        if (ChaîneDesCotes [i].RapportDeMaillon < 0)
        {
            ChaîneDesCotes [i].CoteNominale *= -1;
            SUM_ES_minus += ChaîneDesCotes [i].ESL;
            SUM_EI_minus += ChaîneDesCotes [i].EIL;
        }
        Resultante.CoteNominale += ChaîneDesCotes [i].CoteNominale;
    }

    for (int j = 0; j < nombreDesCotes; j++)
    {
        if (ChaîneDesCotes [j].RapportDeMaillon > 0)
        {
            SUM_ES_plus += ChaîneDesCotes [j].ESL;
            SUM_EI_plus += ChaîneDesCotes [j].EIL;
        }
    }
    Resultante.EIL = SUM_EI_plus - SUM_ES_minus;
    Resultante.ESL = SUM_ES_plus - SUM_EI_minus;
    // if( Resultante.CN< 0) Resultante.CN*= -1 ;
}

public double Petit_Deplacement (AssamblageDefinition DATA_Ass)
{
    double b_sum; // paramètre réduit adimensionnel de surface portante du profil
    double theta; // constante élastique des matériaux en contact, [1/GPa]
    double L_LT; // le petit déplacement (déformation au joint)
    double y_r; // englobe l'influence de rugosité.
    double y_on; // englobe l'influence d'ondulation.

```

```

// -----
b_sum=0.24*DATA_Ass.b*(0.4-0.1*DATA_Ass.k)* Math.pow( (4+DATA_Ass.R_max) , (
(2+DATA_Ass.k)/(Math.pow(DATA_Ass.R_max,DATA_Ass.k))) );
// System.out.println ("b_sum" + b_sum );

theta=( Math.pow( (1-DATA_Ass.mu_1),2) / DATA_Ass.E_1 ) + ( Math.pow( (1-DATA_Ass.mu_2),2)
/ DATA_Ass.E_2 ); /* Les indices 1 et 2 représentent les deux pièces en contact */
// System.out.println ("theta" + theta );

y_r=(4+DATA_Ass.R_max) * Math.pow( (
(100*DATA_Ass.F)/(DATA_Ass.A*DATA_Ass.D*DATA_Ass.R_e*b_sum) ), ( 1/(2+DATA_Ass.k) ) );
//EQUATION 1
y_on= Math.pow ( (0.13*DATA_Ass.AW), (1/3) ) * Math.pow(
(DATA_Ass.W*theta*DATA_Ass.F/DATA_Ass.A),(2/3) ); //EQUATION 2
L_LT=y_r*y_on; //EQUATION 3
// System.out.println ("L_LT" + L_LT);

return L_LT/100;
}
}

```

ANNEXE VIII

CONTENU DU FICHIER COTE.JAVA

```
// =====
//
// (C) Andrei Wygowski, 2000
// E-mail: wygowski@yahoo.ca
//
// Modules des calculs:
// -----
// AssFab.java
// CoteFab.java
// ChartItem.java
// ReadInfo.java
// Cote.java
// AssemblageDefinition.java
//
// Input Data:
// -----
// ID_ASS.dat
// Ass_Info.dat
// Gamme_Info.dat
//
// =====

public class Cote extends AssFab {

    public String IdCote;
    public double CoteNominale; // CoteNominale
    public int RapportDeMaillon; // +1 ou -1
    public double ESL; // EcartSuperieureLimite;
    public double EIL; // EcartInferieureLimite;
    public double ChampDeTolerance ;
    public double DemiTolerance;

    public void AfficherId () {
        System.out.println ("ID de la cote est: " + IdCote);
    }
}
```

ANNEXE IX

FICHIERS D'ENTRÉE DANS LE PROTOTYPE

1. ASS_INFO.dat

Design Table for: Assem1

ID \$STATE@Part-base<1> \$STATE@Part-right<1> \$STATE@Part-medle<1> \$STATE@Part-left<1>

First Instance		RESOLVED	RESOLVED	RESOLVED	RESOLVED	RESOLVED
Mean	25.00	40.00	15.00	80.003		
Dir	-1	-1	-1	1		
TolPlus	0.02	0.012	0.009	0.054		
TolMin	-0.02	-0.012	-0.009	-0.054		

Type@Serrage

2. GAMME_FAB_INFO.dat

NombreOperation			10		
ID	1	2	3	4	5
op1	O	M	O	-U	O
op2	O	O	U	O	-M
op3	O	U	O	O	-M
op4	O	M	O	-U	O
op5	O	M	O	O	-U
op6	O	O	U	O	-M
op7	O	U	O	O	-M
op8	U	O	O	O	-M
op9	M	O	O	O	-U
op10	U	O	O	O	-M

3. ID_ASS.dat

TypeDeMaterial = Fonte Grise;

Rmax = 1.76;

E1 = 120.00;

E2 = 120.00;

E = 120.00;

F = 15905.00;

A = 1400.00;

D = 5.48;

Re = 190.00;

k=2.00;

b=1.00;

mu1=0.255;

mu2=0.255;

mu=0.255;

AW=2000.00;

W=5.00;

ANNEXE X

VALEURS DE R_A RECOMMANDÉES

Tolérances d'états de surface (suite)

1.6.10. Données générales

Valeurs normalisées des critères :

Ces valeurs sont exprimées en μm et sont à choisir dans la série Renard R10/3 (en caractères gras dans le tableau) ou à défaut dans la série Renard R10 (caractères maigres).

Valeurs normalisées des critères de profil

40	10,0	2,5	0,63	0,16
32	8,0	2,0	0,5	0,125
25	6,3	1,6	0,4	0,1
20	5,0	1,25	0,32	
16	4,0	1,0	0,25	
12,5	3,2	0,8	0,2	

Valeurs de rugosité recommandées :

En l'absence de données plus précises, les valeurs suivantes donnent une bonne base de départ. Il faut toutefois rappeler que la valeur d'un critère d'état de surface doit avoir une origine fonctionnelle. Les valeurs suivantes seront donc utilisées pour connaître les limites possibles en fabrication.

Valeurs de R_a recommandées (d'après S. ENACHE)

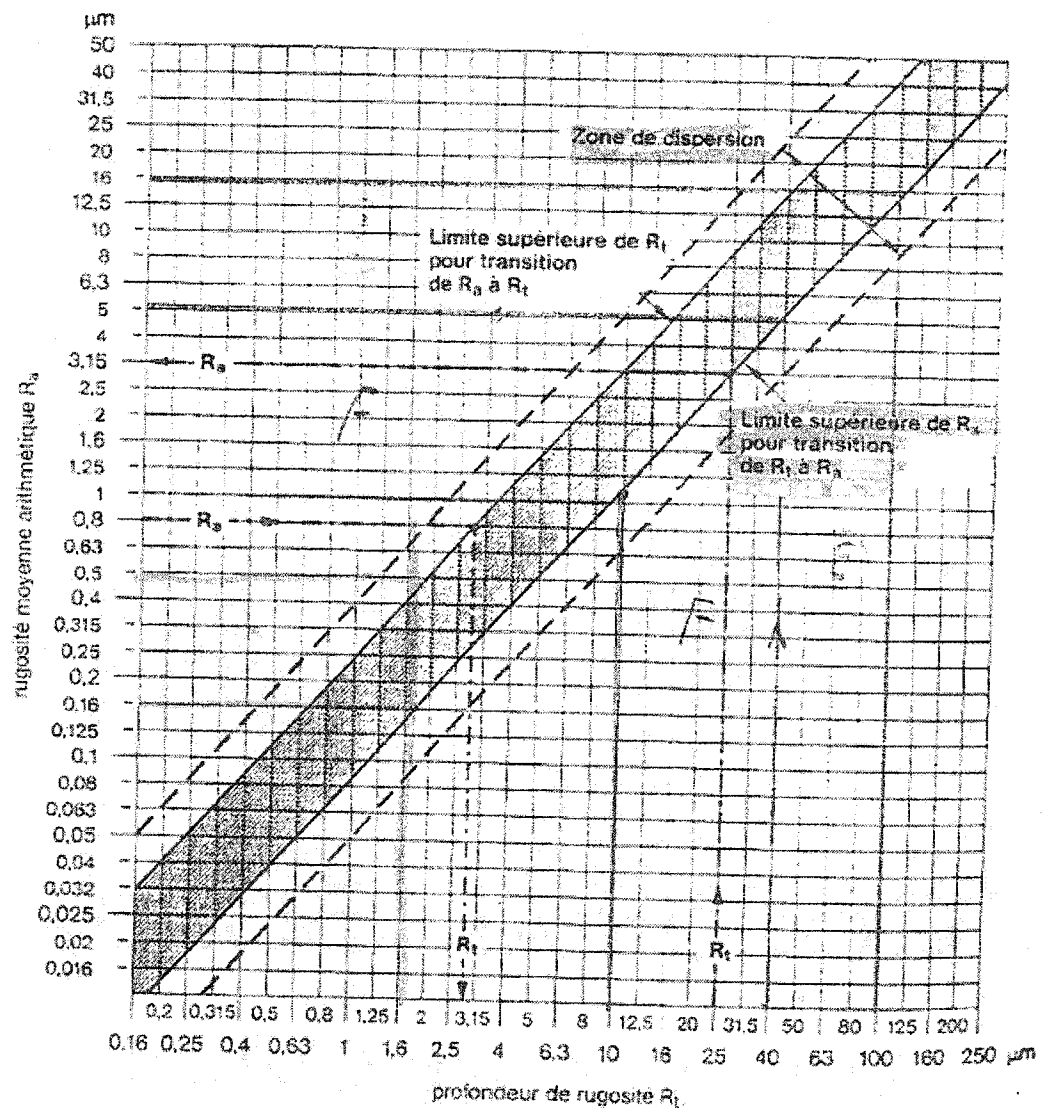
Valeurs de R

Diamètre nominal ϕ (mm)	Qualité ISO*					Qualité ISO*		
	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	< 7	≥ 8	
1 - 3	0,20 - 0,32	0,32 - 0,63	0,50 - 0,80	0,63 - 1,00	1,25 - 2,00	IT 2	IT 4	
3 - 6	0,25 - 0,40	0,40 - 0,63	0,63 - 1,00	0,80 - 1,25	1,00 - 2,50			
6 - 10	0,32 - 0,50	0,50 - 0,80	0,80 - 1,25	1,00 - 1,00	2,00 - 3,20			
10 - 16	0,40 - 0,63	0,63 - 1,00	1,00 - 1,60	1,25 - 2,00	2,50 - 4,00			
16 - 30	0,40 - 0,80	0,60 - 1,25	1,25 - 2,00	1,60 - 2,50	3,20 - 5,00			
30 - 50	0,50 - 0,80	1,00 - 1,60	1,25 - 2,00	1,60 - 2,50	4,00 - 5,00			
50 - 80	0,63 - 1,00	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	2,00 - 3,20	4,00 - 6,30			
80 - 120	0,63 - 1,00	1,25 - 2,00	2,00 - 3,20	2,50 - 4,00	5,00 - 6,30			
120 - 180	0,80 - 1,25	1,25 - 2,00	2,50 - 3,20	2,50 - 4,00	6,30 - 8,00			
180 - 260	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	2,50 - 4,00	3,20 - 5,00	6,30 - 10,0			
260 - 360	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	3,20 - 5,00	3,20 - 5,00	8,00 - 12,5			
360 - 500	1,25 - 2,00	2,00 - 3,20	3,20 - 5,00	4,00 - 6,30	10,00 - 12,5			
* le premier nombre correspond à la qualité des arbres, le second à celle des alésages								

1.6.11. Ancienne désignation : correspondance

Désignation suivant NF E 05 - 016		Valeurs de R_a équivalentes (μm)	
Ancienne	ISO 1.302		
		Non défini	Usinage intermit ou surface brute
		10 < R_a < 50	Surface usinée par enlèvement de matière
		3,2 < R_a < 10	
		0,8 < R_a < 2	
		0,1 < R_a < 0,25	

ANNEXE XI

RELATIONS ENTRE R_A ET R_T 

ANNEXE XII

RELATIONS ENTRE « IT » ET « L »

Valeurs numériques des tolérances fondamentales^a.

Appendices

VALEURS MÉTRIQUES

Qualité	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 ^b	15 ^b	16 ^b
≤ 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	5	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
> 3 à 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
> 6 à 10	0,4	0,5	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
> 10 à 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
> 18 à 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
> 30 à 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
> 50 à 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
> 80 à 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
> 120 à 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	26	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
> 180 à 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	280	460	720	1150	1850	2900
> 250 à 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
> 315 à 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
> 400 à 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000

Tolérances fondamentales en micromètres
pour papiers de diamètres en millimètres

ISO/R286-1993 (f1)

^a Jusqu'à 1 mm, les qualités 14 à 16 ne sont pas prévues.