

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MENTOURI - CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**N° d'ordre : 28/ TS / 2010
Série : 04/ GM / 2010**

THESE

Présentée pour obtenir le diplôme de Doctorat En-Science

EN GENIE MECANIQUE

Option

CONSTRUCTION MECANIQUE

**CONTRIBUTION A LA DETERMINATION ET A
L'ANALYSE DES SOURCES D'ERREURS EN VUE
D'UNE MAITRISE DES PROCEDES DE
FABRICATION**

Par

Hichem BOUCHENITFA

Soutenue le : 03/06/2010

Devant le jury :

Président	Brahim NECIB	Prof. Université Mentouri, Constantine
Rapporteur	Salim BOUKEBBAB	Prof. Université Mentouri, Constantine
Examineur	Toufik BOUKHAROUBA	Prof. Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger
Examineur	Abdel Azziz AMIRAT	Prof. Université Badji Moukhtar, Annaba
Examineur	Idris AMARA	M .C. Université Mentouri, Constantine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail particulièrement à ma mère qui nous a quitté après nous avoir donné de sa vie tout ce qu'il nous faut pour réussir dans notre vie,

A mon père qui nous guide toujours par la lumière de ces paroles et conseils,

A ma chère Femme,

A mes frères et sœur et leurs petites familles,

A tout homme de science qui combat pour que notre pays et notre nation sorte d'avantage des ténèbres de l'ignorance vers les lumières de la connaissance.

Remerciements

D'abord je remercie Dieu pour ses dons et sa bienveillance, et je remercie mon encadreur Prof. Salim BOUKEBBAB pour son encouragement et soutien permanent.

Je remercie aussi Prof. Jean Marc LINARES professeur des universités à l'UT d'Aix en Provence (France) pour sa contribution dans la partie expérimentale et son aide considérables.

Je tiens à remercier évidemment les membres du jury : Prof. Brahim NECIB président. Dr. Idris AMARA, Prof. Toufik BOUKHAROUBA et Prof. Abdel Azziz AMIRAT pour avoir accepté de participer au jury de these

Je remercier aussi chaleureusement, tous les amis et collègues ayant aidé ou contribuer à la finalisation de ce travail. Je cite en particulier : Mr Smail AIB, Mr Amairi FOUZI, Mr Mehdi KHALFI, Mr Rostom BOUTABA.

Et tout autre enseignant qui a contribué de près ou de loin à ma formation.

Table des matières

Liste des Figures

Remerciements

Dédicace

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I..... 4

LE CONTROLE AUTOMATISE ET LES ERREURS DE FABRICATION ... 4

I.1. Introduction :4

I.2. Le contrôle automatisé :4

I.3. Les erreurs dans les procédés de mise en forme.....6

I.3.1. Les sources d'erreurs6

I.3.1.1. Les erreurs géométriques et cinématiques.....7

I.3.1.2. Les erreurs thermiques8

I.3.1.3. Les erreurs dues à l'effort de coupe.....8

I.3.1.4. Autres erreurs.....8

I.3.2. Modélisation des erreurs.....8

I.3.2.1. Modélisation de l'erreur géométrique8

I.3.2.2. Model de l'erreur thermique.....10

I.4. Travaux de recherche sur les erreurs10

I.5. Conclusion :11

I.6. Références bibliographiques11

CHAPITRE II

**L'ACQUISITION TRIDIMENSIONNELLE (3D): PRINCIPE ET
TECHNIQUE..... 13**

II.1. Introduction13

II.2. Triangulation Laser.....15

II.2.1. Principe de calcul de la profondeur16

II.2.2. Qualité de la numérisation16

II.3. Projection de lumière structurée17

II.3.1. Précision de la méthode18

II.3.2. Limitations18

II.4. La Stéréoscopie.....19

II.4.1. Principe de base.....19

II.4.2. Variantes de la méthode.....19

II.4.3. Domaines d'application et performance.....20

II.5. La photogrammétrie.....20

II.5.1. Le principe de base20

II.5.2. Matérialisation des points de mesure.....21

II.5.3. Applications et précision	22
II.6. Les machines à mesurer tridimensionnelles	22
II.6.1. La structure	23
II.6.2. Les palpeurs	23
II.6.2.1. Palpeur à contact à bille.....	23
II.6.2.2. Palpeur sans contact	23
II.6.3. Le logiciel	24
II.7. Conclusion.....	24
II.8. Références bibliographiques	24

CHAPITRE III

LA MODELISATION GEOMETRIQUE..... 26

III.1.Introduction	26
III.2.Les modèles 3D	27
III.2.1. Modèles géométriques	27
III.2.1.1.Les modèles filaires	27
III.2.1.2.Les modèles surfaciques.....	28
III.2.1.3.Modèle volumique	29
III.2.2. Les modèles « vision »	31
III.2.3. Les modèles « déformables ».....	31
III.3.Les modèles CAO.....	31
III.4.Modèle au format STL.....	32
III.5.Formats d'échange en CAO.....	33
III.5.1. Format d'échange IGES.....	33
III.5.2. La norme STEP	34
III.5.3. STEP-NC	35
III.5.4. Echange de données et la fonction contrôle.....	35
III.6.Conclusion.....	36
III.7.Références bibliographiques	36

CHAPITRE IV

L'ASSOCIATION D'UN ELEMENT GEOMETRIQUE A UN NUAGE DE POINTS 38

IV.1.Introduction	38
IV.2.Choix des caractéristiques à mettre en correspondance.....	39
IV.3.Principe d'association d'éléments géométriques au nuage de points.....	40
IV.4.Méthode mathématique d'association par le torseur des petits déplacements.....	40
IV.4.1. Calcul des écarts optimisés par le torseur de petits déplacements	41
IV.4.2. Étude d'un plan	42
IV.4.3. Étude d'un cercle.....	43
IV.4.4. Étude d'un cylindre	43
IV.5.Méthodes non linéaires	44
IV.5.1. Cas de surfaces usuelles.....	44
IV.5.1.1.Surface cylindrique	44
IV.5.1.2.Surfaces planes	46
IV.5.2. Cas d'une surface gauche.....	47
IV.6.La méthode ICP (Iterative Closest Point)	50
IV.6.1. Variantes de l'algorithme ICP original.....	50
IV.6.1.1.Choix de la transformation initiale	50

IV.6.1.2.Sélection des points.....	51
IV.6.1.3.Elimination des points aberrants.....	51
IV.6.1.4.Utilisation des estimateurs spécifiques	52
IV.6.1.5.Réduction du temps de calcul des distances.....	53
IV.6.2. L'algorithme adopté	53
IV.6.2.1.Calcul de la projection de points sur une surface au format STL.....	54
IV.6.2.2.Calcul de la projection d'un point sur un plan (triangle)	54
IV.6.2.3.Vérification de l'appartenance de la projection d'un point à l'intérieur d'un triangle	55
IV.7.Programmation et test de performances.....	55
IV.8.Conclusion.....	57
IV.9.Références bibliographiques	57

CHAPITRE V

ANALYSE ET COMPENSATION DES ERREURS..... 59

V.1 Introduction	59
V.2 Approximation par éléments finis.....	60
V.2.1. Exemples.....	61
V.2.2. Résolution d'un problème physique par la méthode des éléments finis.....	65
V.3 Cas d'application	66
V.3.1. Cas à 2D : analyse de contraintes planes	66
V.3.2. Cas dynamique	68
V.3.3. Assemblage des éléments	69
V.4 Modèles déformables	71
V.5 Méthode utilisée.....	74
V.6 Conclusion.....	80
V.7 Références bibliographiques	80

CHAPITRE VI

APPLICATION INDUSTRIELLE : CORRECTION DE MODELES EN PROTOTYPAGE RAPIDE 82

VI.1.Introduction	82
VI.2.Le prototypage rapide	82
VI.2.1. Applications	83
VI.2.2. Limitations	84
VI.2.3. Les différentes Technologies du prototypage rapide.....	84
VI.2.3.1.Stéréolithographie	84
VI.2.3.2.Prototypage rapide en fil fondu (Fused Deposition Modeling).....	85
VI.2.3.3.Frittage sélectif au laser (Selective Laser Sintering, SLS).....	86
VI.2.3.4.Fabrication par laminage (Laminated object manufacturing)	86
VI.2.3.5.Impression 3D (3D Printing)	87
VI.2.4. Amélioration des performances	87
VI.3.Cas d'application : amélioration de la précision des pièces réalisées par prototypage rapide avec fil fondu.	88
VI.3.1. La création du modèle théorique	89
VI.3.2. Fabrication et acquisition du modèle réel.....	89
VI.3.3. Association du modèle théorique et nuage de points	90
VI.3.4. Correction du modèle théorique	91
VI.4.Conclusion.....	92

VI.5.Références bibliographiques	93
CONCLUSION GENERALE	94
ANNEXE A	96
ANNEXE B	98
BIBLIOGRAPHIE	102

Liste des Figures

Figure 1 : Intégration du contrôle dans le processus de fabrication	1
Figure 2 : Schémas global d'un système de contrôle automatisé.....	2
Figure 3 : Principe du système utilisé.....	2
Figure I.1 : Palpeur sur machine RENESHAW.	6
Figure I.2 : Structure de base d'une machine avec 3 axes.	7
Figure I.3 : Erreur d'équerrage.	9
Figure V.1 : Applications de l'acquisition 3D.	13
Figure V.2 : Application à la rétro-conception d'une aube de turbine [2]..	14
Figure V.3 : Techniques d'acquisition 3D.	14
Figure V.4 : Principe du système de mesure [4].....	15
Figure V.5 : Principe de calcul des distances de mesure	16
Figure V.6 : Principe de base.	17
Figure V.7 : Contrôle d'une chambre de combustion [7].....	18
Figure V.8 : Principe géométrique.....	19
Figure V.9 : Intersection des lignes de vues [8].....	21
Figure V.10 : Appareil mesure par photogrammétrie de la société ActiCM	21
Figure V.11 : utilisation de cible rétro-réfléchissante [8].....	22
Figure V.12 : Machine à mesure tridimensionnelle de type portique.	23
Figure IV.1 : Utilisation des informations géométrique durant le cycle de production.	26
Figure IV.2 : Construction d'un modèle filaire.	27
Figure IV.3 : Construction du modèle Brep.....	28
Figure IV.4 : Modèle d'un tore en Voxel.....	29
Figure IV.5 : Modélisation par octrees.	30
Figure IV.6 : Construction du modèle CSG.....	30
Figure IV.7 : Triangulation STL d'une pièce.	32

Figure IV.8 : Un extrais d'un fichier STL.....	32
Figure IV.9 : Modélisation STL : (a) modélisation correcte, (b) incorrecte (arrête par partagée par 3 triangles), (c) incorrecte à cause d'un trou (pas de triangle) [1]	33
Figure IV.1 : Optimisation des écarts avec les petits déplacements.	41
Figure IV.2 : Optimisation d'un plan.....	42
Figure IV.3 : Optimisation d'un cercle.....	43
Figure IV.4 : Optimisation d'un cylindre.	44
Figure IV.5 : Changement de base [2].	45
Figure IV.6 : Modélisation d'un plan [2].	46
Figure IV.7 : Procédure de calcul des attributs des surfaces associées [2].	47
Figure IV.8 : Association d'une surface gauche paramétrique $\mathcal{S}(u,v)$ à un nuage de points.	47
Figure IV.9 : Principaux étapes de l'algorithme ICP (Association d'un nuage de points et une surface STL).....	50
Figure V.1 : Processus de réalisation, (a)sans compensation, (b) avec compensation.....	59
Figure V.2 : Génération du modèle symétrique.....	60
Figure V.3 : Exemple d'une Approximation nodale.	61
Figure V.4 : Fonction continue.	62
Figure V.5 : Élément 1(domaine V^1).	62
Figure V.6 : Élément 2(domaine V^2).	63
Figure V.7 : Élément 3 (domaine V^3).	63
Figure V.8 : Fonction approchée obtenue après assemblage des éléments.....	64
Figure V.9 : Fonction continue exacte.	64
Figure V.10 : Approximation par éléments finis triangulaires de la fonction.....	64
Figure V.11 : Maillage du domaine.	66
Figure V.12 : Assemblage de deux éléments triangulaires.....	69
Figure V.13 : Effet des forces d'attraction des points sur la surface du modèle	71
Figure V.14 : Élément triangulaire de continuité.....	73

Figure V.15: Modèle du ballon déformable[9]	74
Figure V.16 : Approximation par éléments finis d'une surface.....	74
Figure V.17: Principe de l'approximation utilisée.....	75
Figure V.18 : Ecart entre un point et un élément.....	75
Figure V.19 : Approximation d'une surface ouverte.....	77
Figure V.20 : Acquisition du modèle réel.....	77
Figure V.21: Création du modèle continu de la pièce réelle par déformation d'une surface par éléments finis	78
Figure V.22 : Comparaison des modèles pour ressortir les erreurs	78
Figure V.23 : Approximation par un élément triangle dans le cas général	79
Figure V.24 : Sphère associée à un nuage de points.	79
Figure V.25 : Application de la méthode.....	80
Figure VI.1: Processus de réalisation d'une pièce en prototypage rapide.	83
Figure VI.2 : Principe de la stéréolithographie.	84
Figure VI.3 : Principe du prototypage rapide en fil fondu [1].	85
Figure VI.4 : Principe du frittage sélectif de poudre [1].....	86
Figure VI.5 : Fabrication par laminage [1].....	87
Figure VI.6: Principe de l'impression 3D [1].	87
Figure VI.7 : Principe de la méthode utilisée.	88
Figure VI.8 : Modèle théorique.	89
Figure VI.9 : Modèle STL.	89
Figure VI.10 : Fabrication du modèle réel.....	90
Figure VI.11: Acquisition du modèle réel fabriqué.....	90
Figure VI.12 : Mise en correspondance initiale (a) et finale (b).....	91
Figure VI.13 : Principe de correction du modèle théorique.	91
Figure VI.14 : Répartition des erreurs sur le modèle théorique.....	92
Figure A.1 : partie de la roue avec la dent à contrôler.....	96
Figure A.2 : Une partie du fichier de points.....	96
Figure A.4 : Nuage de points de la dent obtenu par acquisition.....	97
Figure A.5 : Association du nuage de points avec le modèle théorique : (a)association initiale, (b) ajustement final.....	97
Figure A.6 : Erreurs de forme sur les flancs de la dent.....	97

Figure B.1 : Structure du Programme développé.....	99
Figure B.2 : Extrait d'un fichier .ASC.....	100
Figure B.3 : Affichage des résultats.....	101

Introduction générale

Avec une concurrence mondiale de plus en plus difficile, l'augmentation de la qualité des produits et la diminution des coûts de production sont devenus des soucis permanents pour les industriels. Les produits modernes sont de plus en plus caractérisés par des formes complexes, de petits volumes, une grande diversité, des tolérances étroites, et une très haute qualité. Le système de production doit donc être capable de réagir en termes de fiabilité, de productivité et de flexibilité. Afin de répondre à toutes ces exigences une production automatisée et intégrée s'impose.

Soutenu par les progrès effectués dans le domaine de l'informatique et l'automatisme, la production a connu ces dernières années une évolution considérable dans toutes ces phases de la conception au contrôle en passant par la fabrication. De ce fait au moment où le logiciel et le matériel constituant les postes CAO et FAO ont rapidement évolués la fonction contrôle reste en retard. Ce retard est de plus en plus ressenti de nos jours car cette phase représente un maillon faible et un frein pour une production totalement automatisée et intégrée.

Le schéma général d'un système de contrôle intégré est présenté dans la figure 1.

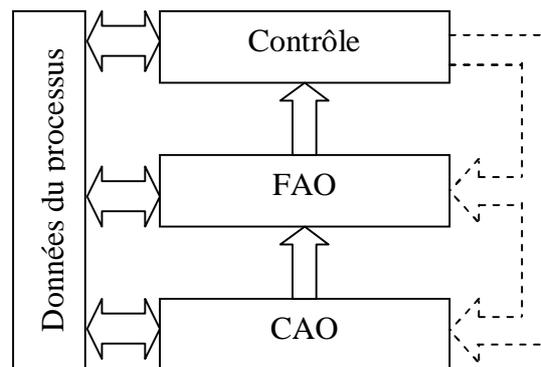


Figure 1 : Intégration du contrôle dans le processus de fabrication

Le retour d'information pour la correction du processus qui peut se faire séparément sur les supports de données relatifs à chaque phase, comme il peut être fait sur le même support d'échange relatif à l'ensemble de données du processus de fabrication.

Vu de l'intérieur, le système de contrôle automatisé se présente comme dans la figure 2. Les parties qui composent ce système peuvent être détaillées encore plus mais cela dépend de la technique utilisée pour l'acquisition, l'emplacement, la nature et le format de données échangées.

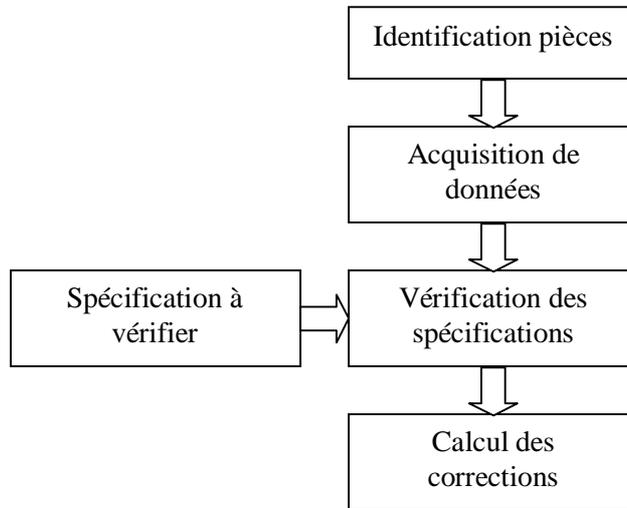


Figure 2 : Schéma global d'un système de contrôle automatisé

Dans ce travail nous allons présenter un système simplifié pour un contrôle automatique qui fonctionne en quatre phases (figure 3) : une acquisition à l'aide d'un système optique qui fournira en sortie un nuage de points obtenu par scanning, un calcul des erreurs obtenu par comparaison avec un modèle CAO, après association avec le nuage de points représentant la pièce réelle, et enfin une compensation des erreurs appliquée sur le modèle CAO utilisé dans la phase de fabrication.

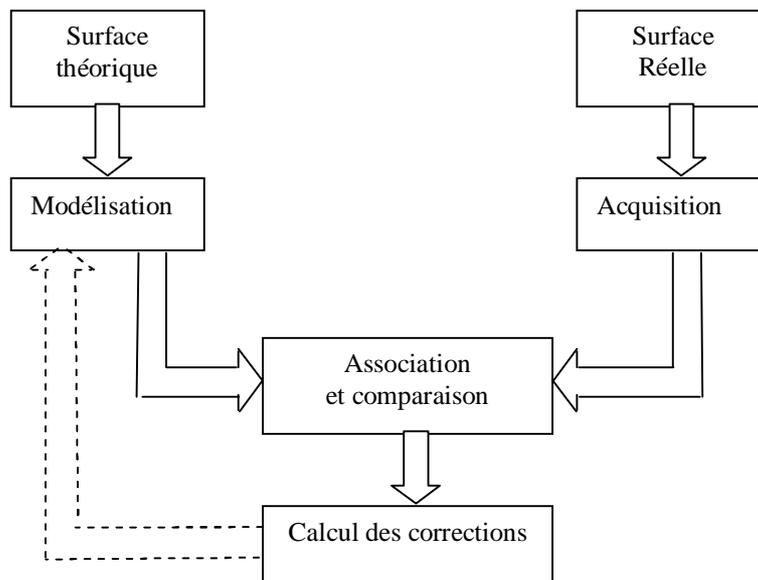


Figure 3 : Principe du système utilisé

Le calcul des erreurs se limitera au calcul du défaut de forme sur toute la surface de la pièce à contrôler ce qui nous évitera encore de faire recours à la segmentation du nuage de point et du modèle CAO pour séparer les surfaces relatives aux différentes spécifications. Pour le choix des méthodes d'acquisition, d'association et de compensation il sera argumenté dans les chapitres correspondants.

Pour la phase de compensation, nous allons utiliser une méthode de déformation de modèles proposée basée sur une approximation d'un nuage de points avec une surface continue par la méthode des éléments finis.

Un cas d'application a été traité pour un processus qui correspond très bien au système proposé et aux choix effectués qui est le cas du prototypage rapide. Cette technologie qui fait sa place comme un outil nécessaire dans la conception de nouveaux produits, vu le gain qu'il peut apporter en termes de coûts et de délais.

Pour présenter ce travail, on propose de diviser ce manuscrit en six principaux chapitres. Dans le chapitre I nous allons parler d'une façon générale sur le contrôle automatisé et les erreurs de fabrication. Le chapitre II sera consacré aux techniques existantes pour la phase d'acquisition. Dans le chapitre III, nous exposerons les différents types de modèles utilisés en CAO et les formats d'échange pouvant être utilisés en contrôle automatisé. Quant aux méthodes d'association entre un élément géométrique et un nuage de points elles seront traitées dans le chapitre IV. Dans le chapitre V, la méthode proposée pour l'analyse et la compensation des erreurs basée sur la déformation par éléments finis sera présentée. Pour le chapitre VI le cas d'application pour le contrôle et la compensation des erreurs dans un processus de fabrication par prototypage rapide est traité. Dans la dernière partie, nous trouverons la conclusion et les perspectives du travail.

Chapitre I

Le contrôle automatisé et les erreurs de fabrication

I.1. Introduction

La difficulté pour l'automatisation de la fonction de contrôle réside principalement dans la nature des tâches qui y sont liées, nécessitant un raisonnement humain de haut niveau difficile à modéliser ou automatiser. Le problème se complique d'avantage avec les conditions d'environnement assez particulières [1] et les échanges avec les autres phases de production nécessaires pour permettre un maximum de flexibilité.

I.2. Le contrôle automatisé

Un contrôle automatisé doit répondre aux contraintes suivantes :

- Fonctionner avec un maximum d'autonomie
- Assurer une bonne précision dans un milieu de fabrication.
- Capable de contrôler diverses formes de pièces avec un maximum de précision
- Suffisamment rapide pour suivre la cadence de la production
- Capable d'échanger les données et les résultats avec les autres phases du processus.

Tenant compte de ces contraintes, un système de contrôle automatisé doit assurer les tâches suivantes :

- Identifier la pièce qu'il doit contrôler à partir d'un fichier d'échange ou d'une base de données.
- Identifier les surfaces et les spécifications à vérifier.
- Acquérir ou relever les données nécessaires de la pièce réelle.
- Effectuer le calcul de vérification avec une vitesse acceptable.

- Transmettre les résultats de contrôle en temps réel aux autres phases du processus pour effectuer les corrections qu'il faut en cas de défauts détectés et ce selon un mode et un format d'échange.

Les travaux de recherche pour le contrôle automatisé se sont consacrés pour la plupart à l'exécution et le perfectionnement de certaines phases ou tâches du système de contrôle et son interaction avec le reste du processus de fabrication.

Pour la phase d'acquisition de données, les travaux avaient pour objet la proposition de techniques ou méthodes pour améliorer la précision et la vitesse des systèmes d'acquisition. Pour cela on mise sur la stratégie de palpé, la génération automatique de planning de contrôle et la compensation des erreurs pour le cas des MMT avec palpé, le scanning, le filtrage et le traitement d'image pour les systèmes basés sur la vision [2,3].

La reconnaissance de forme [4] est une fonction de haut niveau réservée à l'origine pour des créatures vivantes disposant de système nerveux développé. A cause de la nature de ce problème, il est pris en charge généralement dans le domaine d'intelligence artificielle qui est de plus en plus proposée aussi dans plusieurs travaux comme solution pour les autres phases du contrôle automatisé [5].

L'échange de données et intégration dans le processus de fabrication nécessite la création d'une plateforme commune pour toutes les phases de fabrication. Cette dernière doit englober les informations concernant la géométrie, les dimensions et les tolérances des pièces et ensembles à fabriquer [6,7] ainsi que les informations relatives à l'exécution des différents processus de la conception au contrôle [8,9].

Pour l'implantation du système de contrôle dans la chaîne de fabrication deux voies de recherche se présentent : la première est pour une intégration des systèmes de mesure en bord de ligne de production, généralement une MMT. Cette possibilité engendre plusieurs problèmes comme ceux de l'environnement de travail qui influent directement sur la précision des mesures, et le retour d'information pour effectuer les corrections nécessaires, car il faut se rappeler que l'objectif final n'est pas de mesurer les erreurs mais de les réduire à leurs seuils de tolérances [10]. Pour répondre particulièrement à ce point et au coût d'investissements relatifs à l'acquisition d'un équipement de mesure et son entretien, et les pertes de temps et de précision accompagnant le démontage le transport et le remontage des pièces sur les dispositifs d'usinage, il y a de plus en plus de travaux qui concernent la deuxième voie qui sont les systèmes de mesure ou de contrôle sur machine [11]. Avec ce type de système, la machine devient à la fois un outil d'usinage et de mesure si nous lui ajoutons des palpeurs ou des capteurs optiques ou en lui attachant un dispositif de mesure. Ceci permettra d'effectuer les opérations d'usinage, de contrôle, et de correction sur un même poste [12,13].

D'autres travaux dans lesquels des solutions complètes ont été proposées qui couvrent tous les aspects du contrôle mais dont les performances réelles

restent à conformer dans la pratique [15]. Vu la complexité de tels systèmes, des travaux ont été orientés vers des systèmes de contrôle spécifiques à un produit particulier, ces derniers ont prouvé leur efficacité dans pas mal de cas [14,15].



Figure I.1 : Palpeur sur machine RENESHAW.

I.3. Les erreurs dans les procédés de mise en forme

I.3.1. Les sources d'erreurs

La précision peut être définie comme le degré d'accord ou conformité d'une pièce finie avec la précision requise dimensionnelle et géométriques. L'Erreur, d'autre part, peut être comprise comme une déviation de l'arrête de l'outil de coupe de la position théorique requise pour produire une pièce avec la tolérance spécifiée. La grandeur de l'erreur dans une machine donne une mesure de sa précision, c'est l'erreur de translation maximale entre deux points dans le volume de travail de la machine. Bien sûr, cela dépend de la résolution du système.

Les erreurs peuvent être classées en deux catégories, à savoir les erreurs quasi-statiques et les erreurs dynamiques :

- Les erreurs quasi-statiques sont celles entre les outils et la pièce qui sont lentement variables avec le temps et liées à la structure de la machine elle-même. Ces sources comprennent les erreurs géométriques cinématiques, les erreurs dues aux poids propres des composants de la machine et les contraintes thermiques dans la structure de la machine-outil.
- Les erreurs dynamiques, d'autre part sont causées par des sources comme le mouvement de la broche, les vibrations de la structure de la machine, erreurs due à la commande de la machine etc, elles sont plus dépendantes des conditions particulières de fonctionnement de la machine. Les erreurs quasi-statique représentent environ 70% de l'erreur totale de la machine-outil ce qui fait de la compensation de ces erreurs un axe de recherche très important. Une fois que les erreurs individuelles des composants ont été identifiées, l'étape suivante du problème et d'utiliser le concept de budget d'erreur est de déterminer les valeurs optimales de ces erreurs afin de minimiser un critère de coût [15].

Par exemple, pour une machine à commande numérique, se compose d'un banc, d'une colonne, d'une broche et des différents guidages à axes linéaire et / ou rotatif. Chacun de ces éléments contribue à l'erreur totale du système qui est représentée par le budget d'erreur.

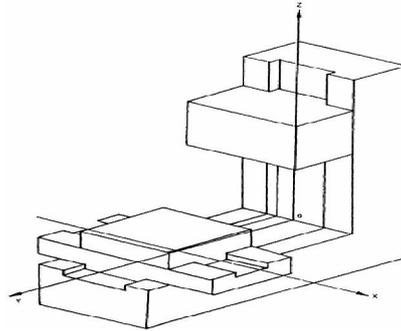


Figure I.2 : Structure de base d'une machine avec 3 axes.

Les erreurs peuvent en général, être classées en gros comme suit :

- a) les erreurs géométriques des composants de la structure de la machines
- b) les erreurs cinématiques
- c) les erreurs induites par les déformations thermiques
- d) les erreurs causées par les forces de coupe, y compris
 - (i). des forces de gravité
 - (ii). d'accélération des axes, et
 - (iii). de l'action de coupe elle-même
- e) l'instabilité des matériaux
- f) les erreurs d'assemblage de la machine
- g) l'erreur d'instrumentation
- h) l'usure des outils
- i) l'erreur de fixation
- j) autres sources d'erreurs comme les erreurs dues à la commande de la machine (erreurs de suivi et les erreurs de l'algorithmique d'interpolation) [16,17,18].

1.3.1.1. Les erreurs géométriques et cinématiques

Ces erreurs interviennent dans la précision des mouvements relatifs quasi-statiques des surfaces. Elles peuvent présenter un comportement souple et continu comme elles peuvent avoir un comportement aléatoire. Les erreurs géométriques ont différentes composantes comme Les erreurs du déplacement linéaire (précision de positionnement), de rectitude et de planéité, de l'angle d'inclinaison de broche, d'équerrage, etc.

Les erreurs cinématiques concernent les mouvements relatifs exigeant une accordance et une précision. Elles sont particulièrement importantes pour les mouvements combinés des différents axes, comme pour le cas d'exécution d'interpolation circulaire et elles sont assez répandues sur les machines d'aujourd'hui.

1.3.1.2. Les erreurs thermiques

Une autre cause principale des défauts sur les pièces est l'erreur de positionnement de l'outil due aux déformations thermiques. Il est bien entendu que les erreurs dues aux effets thermiques représentent 40-70% de la valeur totale des erreurs de forme sur une pièce en mécanique de précision.

Six sources d'effet thermique sont identifiées: (i) la chaleur due au processus de coupe, (ii) la chaleur générée par la machine, (iii) influence du système de refroidissement, (iv) échange thermique avec la pièce, (v) l'effet de personnel (vi) mémoire thermique de l'environnement. La source la plus critique et celle générée par la machine.

Le fonctionnement continu de la machine génère de la chaleur due au mouvement des éléments et la résistance au frottement, aux moteurs et pompes etc [20]. Cette chaleur provoque l'expansion relative des divers éléments de la machine-outil conduisant à l'imprécision de positionnement de la pointe de l'outil de coupe conséquence aussi de la croissance de broche, l'expansion thermique de la vis à billes et la distorsion thermique de la colonne. Alors que la génération de chaleur à la pointe de contact est inévitable, cette source d'erreur est l'une des plus difficiles à éliminer complètement.

1.3.1.3. Les erreurs dues à l'effort de coupe

Sous l'effet des forces, la position de la pointe de l'outil par rapport à la pièce varie en raison de la déformation des différents éléments de la machine. En fonction de la rigidité de la structure dans les conditions particulières de coupe, la précision de la machine-outil pourrait varier.

1.3.1.4. Autres erreurs

D'autres erreurs, comme l'usure des outils et les erreurs de fixation peuvent s'additionner aux défauts de la pièce usinée. Les erreurs de fixation sont causées par les défauts géométriques et la flexion des éléments du dispositif. Le mouvement possible de la pièce après serrage dépend de plusieurs facteurs comme la position des éléments d'agencements, la pression de serrage, le type de surface de contact, etc. Ainsi ce facteur pourrait être une source importante des erreurs.

1.3.2. Modélisation des erreurs

1.3.2.1. Modélisation de l'erreur géométrique

Pour simplifier le modèle de l'erreur autant que possible nous utilisons un modèle de corps solide pour obtenir le modèle d'erreur de la machine. Le déplacement de n'importe quel point solide peut être considéré comme une combinaison d'un déplacement linéaire et d'une rotation. Pour analyse volumétrique du mouvement d'un corps solide, les matrices homogènes se révèlent très efficaces.

Une matrice homogène pour un volume 3D est une matrice 4x4 définie comme suit :

$$Q = \begin{pmatrix} (\mathcal{C}_{3x3} \quad \mathcal{P}) \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{pmatrix} \quad \text{I.1}$$

(\mathcal{C}_{3x3} représente l'erreur angulaire du mouvement par rapport à un repère initial et P le déplacement par rapport au référentiel initial.

Nous considérons X un axe de référence, et le plan XY comme plan de référence. Donc si nous avons un mouvement d'une distance nominale x , la matrice homogène pour ce vecteur sera :

$$Q(x) = \begin{pmatrix} 1 & -E_z(x) & E_y(x) & x + \Delta(x) \\ E_z(x) & 1 & -E_x(x) & \Delta y(x) \\ -E_y(x) & E_z(x) & 1 & \Delta x(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{I.2}$$

Lorsque le mouvement se fait suivant l'axe Y avec une distance y la matrice homogène du vecteur est :

$$Q(y) = \begin{pmatrix} 1 & -E_z(y) & E_y(y) & \Delta x(y) - \alpha_{xy} + y \\ E_z(y) & 1 & -E_x(y) & y + \Delta y(y) \\ -E_y(y) & E_z(y) & 1 & \Delta x(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{I.3}$$

Pour un mouvement suivant l'axe Z d'une distance nominal z , la matrice homogène pour le vecteur sera :

$$Q(z) = \begin{pmatrix} 1 & -E_z(z) & E_y(z) & \Delta x(z) - \alpha_{xy} + z \\ E_z(z) & 1 & -E_x(z) & \Delta y(z) - \alpha_{xy} + z \\ -E_y(z) & E_z(z) & 1 & \Delta x(z) + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{I.4}$$

Où E désigne l'erreur angulaire, Δ désigne l'erreur de position, α l'équerrage entre les axes.

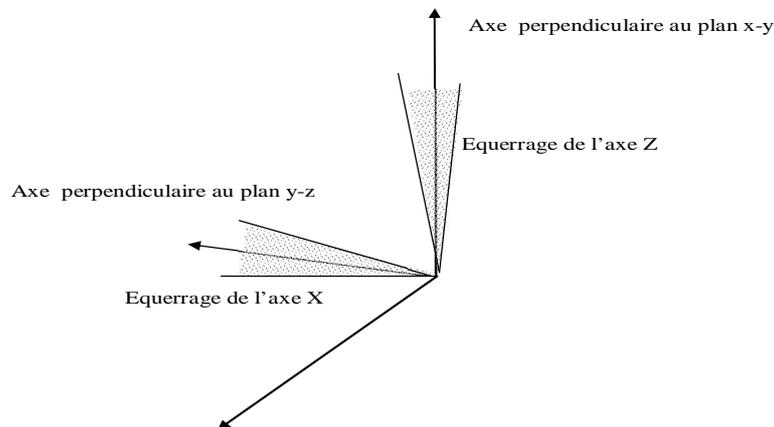


Figure I.3 : Erreur d'équerrage.

On suppose qu'au départ tous les éléments du système (bâti, pièce, axes, outil) sont alignés. Dans ce processus le vecteur de la pointe de l'outil doit coïncider avec celui du point à usiner sur la pièce.

Si on définit $\mathcal{T}(x_t, y_t, z_t, 1)$ comme étant le vecteur de la pointe de l'outil dans le système de coordonnées de l'outil, $\mathcal{P}(x_p, y_p, z_p, 1)$ comme le point à usiner dans le système de coordonnées de la pièce, pour une machine du type FXYZ :

$$P = Q(x)Q(y)Q(z)T \tag{I.5}$$

1.3.2.2. Model de l'erreur thermique

L'effet de l'erreur thermique apparait très souvent dans le domaine de l'usinage de précision. Plusieurs spécialistes partagent actuellement l'idée que les erreurs causées par les effets thermiques sont comparables à ceux causées par les défauts de géométrie ou même plus grandes. Pour cela la diminution des erreurs thermiques est plus que bénéfique.

En théorie, l'erreur due aux effets thermiques est en relation directe avec l'augmentation de la température de la source.

Le champ de température de la source peut être décrit comme suit :

$$[C] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + [h][T] = [P] \tag{I.6}$$

- [C] : matrice de capacité thermique
- [h] : matrice de résistance thermique
- [p] : matrice de chargement (sollcitation) thermique
- [T] : matrice des températures

A partir de la théorie de l'élasticité thermique nous avons :

$$[F] = [G][T] \tag{I.7}$$

$$[F] = [K][U] \tag{I.8}$$

- [F] : matrice des forces nodales
- [G] : matrice de transformation déformation-température
- [K] : matrice de rigidité
- [T] : matrice des déformations thermiques

A partir de 6, 7 et 8 nous pouvons obtenir les déformations des éléments de la machine. Cette déformation peut être aussi obtenue avec la mesure des changements dans le champ de température de la machine.

I.4. Travaux de recherche sur les erreurs

Si l'inspection automatique, qui se termine par la détermination des erreurs, a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années, l'analyse et la compensation de ces erreurs ne trouvent pas le même intérêt.

Dans ce qui suit nous présentons quelques travaux typiques traitant le sujet.

K. Tong et al [16] proposent une méthode pour réduire les erreurs et augmenter la précision sur une machine de prototypage rapide en utilisant un modèle d'erreur inspiré de la technique d'évaluation des MMT. Les modèles d'erreur et de compensation seront construits après réalisation d'un artéfact qui sera mesuré sur une MMT de référence. Les corrections seront appliquées sur le contenu du fichier de construction qui va guider l'outil de la machine.

K. Rai et al [17] proposent une modélisation de l'usinage en grande vitesse. Les éléments considérés sont : la pièce, la fixation, les paramètres de coupe et la stratégie d'usinage. Les résultats sont obtenus avec la méthode des éléments finis après modélisation de la pièce, du dispositif et de l'opération de coupe et en utilisant un couplage des phénomènes thermiques, élastiques et plastiques. Les résultats sont obtenus par le logiciel ANSYS et les modèles solides avec le logiciel CATIA.

Au lieu de considérer la contribution des paramètres d'usinage dans l'erreur finale séparément, A. Dugas et al. [18] proposent de réaliser un simulateur dans lequel ils introduisent les modèles d'erreur pour chaque paramètre. Pour cela ils réalisent les modules nécessaires pour l'analyse des mouvements, l'analyse géométrique, et pour l'analyse dynamique. Dans cet article le modèle de calcul de la déflexion de l'outil est détaillé avec des exemples de validation.

K. KIM et al. [19] présentent une méthode pour l'analyse de la précision pour une machine-outil multi-axes avec un modèle géométrique généralisé. Les modèles pour l'erreur de translation et de rotation pour chaque axe et l'erreur d'équerrage entre deux axes sont obtenus par des matrices homogènes 4x4 obtenues après approximation des petits angles.

I.5. Conclusion

L'analyse du problème du contrôle automatisé et de la maîtrise des erreurs et la recherche bibliographique effectuées nous ont montré son caractère complexe et pluridisciplinaire. Pour vérifier une spécification imposée d'une façon automatique il faut effectuer et maîtriser les étapes : d'acquisition de modélisation et comparaison numérique ou association.

I.6. Références bibliographiques

- [1] M. L. Zani, Un contrôle dimensionnel en production... oui, mais dans une "juste mesure", *Revue Mesures* 749 (43-46), Novembre 2002.
- [2] X. Zexiao, W. Jianguo, Z. Qiumei, Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (1474–1486), Springer, 2005.
- [3] M. L. Zani, Contrôle tridimensionnel : les caméras volent la vedette aux palpeurs tactiles, *Revue Mesures* 743 (33-38), Novembre 2002.

- [4] VI. Sundararajan, P.K. Wright, Volumetric feature recognition for machining components with freeform surfaces, *Computer-Aided Design* 36 (11–25), Elsevier, 2004.
- [5] D. McFarlane, S. Sarmab, J. L. Chirna, C.Y. Wonga, K. Ashton, Auto ID systems and intelligent manufacturing control, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (365–376), Elsevier, 2003.
- [6] J. Barreiro, S. Martí'nez, J.E. Labarga , E. Cuesta, Validation of an information model for inspection with CMM, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (819–829), Elsevier, 2005.
- [7] J. Barreiro, J.E. Labarga, A. Viza'n, J.Ri'os, Information model for the integration of inspection activity in a concurrent engineering framework, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (797–809), Elsevier, 2003.
- [8] T. Dereli, H. F. Filiz, A note on the use of STEP for interfacing design to process planning, *Computer-Aided Design* 34 (1075–1085), Elsevier, 2002.
- [9] F. Zhao, X. Xu, S. Xie, STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (200–216), Elsevier, 2008.
- [10] F. Zhao, X. Xu , S.Q. Xie, Computer-Aided Inspection Planning—The state of the art, *Computers in Industry xxx (xxx–xxx)*, Elsevier, 2009.
- [11] J.P. Choi , B.K. Min , S.J. Lee, Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system, *Journal of Materials Processing Technology* 155–156 (2056–2064), Elsevier, 2004.
- [12] T J Ko, J W Park, H S Kim, S H Kim, On-machine measurement using a noncontact sensor based on a CAD model, *Int J Adv Manuf Technol* 32 (739–746), Springer, 2007
- [13] F. Prieto, N. Grégoire, T. Redarce, R. Lepage, A. Jutard, S. Doré, Contrôle Automatique sans Contact de Pièces Manufacturées, Troisième Congrès International de Génie Industriel, Montréal (Canada), 26-28 mai 1999, Presses International Polytechnique, vol. 2, pp. 683-692.
- [14] M. L. Zani, Des chemises impeccables grâce à la vision, *Revue Mesures* 744 (52-55), Avril 2002.
- [15] B Kuhlenkötter, M Sdahl, Automated inspection system for headlamp reflectors, *Int J Adv Manuf Technol* 32 (500–504), Springer, 2007.
- [16] K. Tong, E. A. Lehtihet, S. Joshi, Software compensation of rapid prototyping machines, *Precision Engineering* 28 (280–292), Elsevier, 2004.
- [17] J. K. Rai, P. Xirouchakis, Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (629–643), Elsevier, 2008.
- [18] A. Dugas, J. J. Lee, and J. Y. Hascogt, An Enhanced Machining Simulator with Tool Deflection Error Analysis, *Journal of Manufacturing Systems* Vol. 21/ No. 6, 2002.
- [19] K. Kim and M. K. Kim, Volumetric accuracy analysis based on generalized geometric error model in multi-axis machine tools, *Mech. Mack. Theory* Vol.26, No.2 pp. 207-219, 1991.

Chapitre II

L'acquisition tridimensionnelle (3D): principe et technique

II.1. Introduction

Le but de la phase d'acquisition est de saisir les données nécessaires pour définir une surface ou une forme 3D, et la reconstruire en cas de besoin. En réponse à la diversité des applications de l'acquisition 3D (figures I.1, I.2) il existe actuellement un nombre important de technologies (figure I.3) : machine à mesurer, triangulation laser, stéréoscopieetc. Parmi ces technologies nous devons choisir la mieux adaptée à notre besoin.

Pour faire le bon choix de la technologie à utiliser, les principaux critères sont : la précision, la vitesse d'acquisition, la vitesse de calcul, le poids et l'encombrement, la facilité de mise en place et d'utilisation et bien entendu le coût de l'équipement [1].

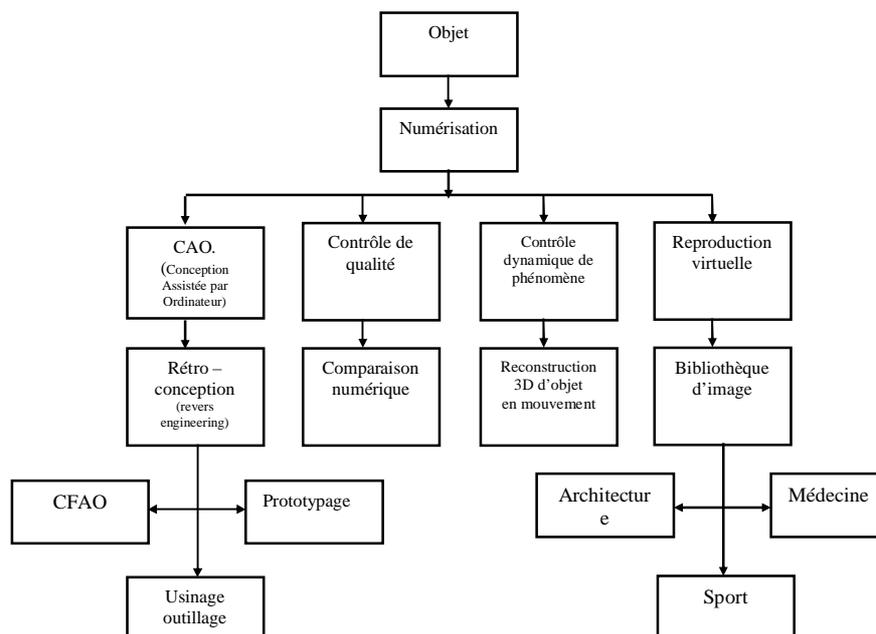


Figure II.1 : Applications de l'acquisition 3D.

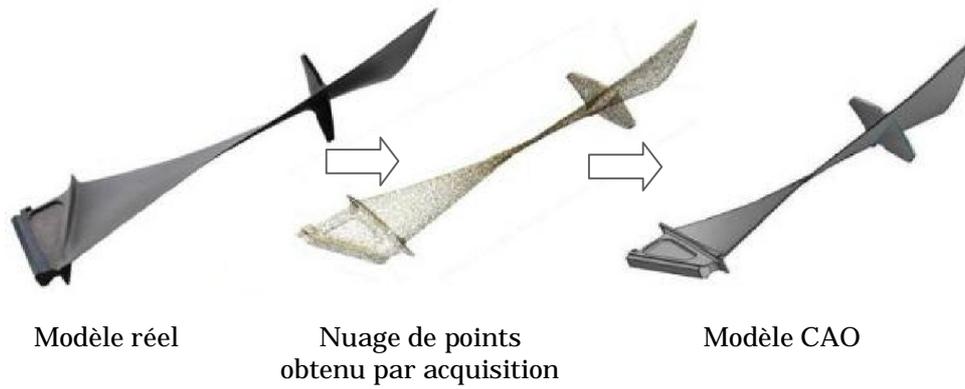


Figure II.2 : Application à la rétro-conception d'une aube de turbine [2].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les outils les plus généralement utilisés pour l'acquisition de la topologie des surfaces avec systèmes tridimensionnels.

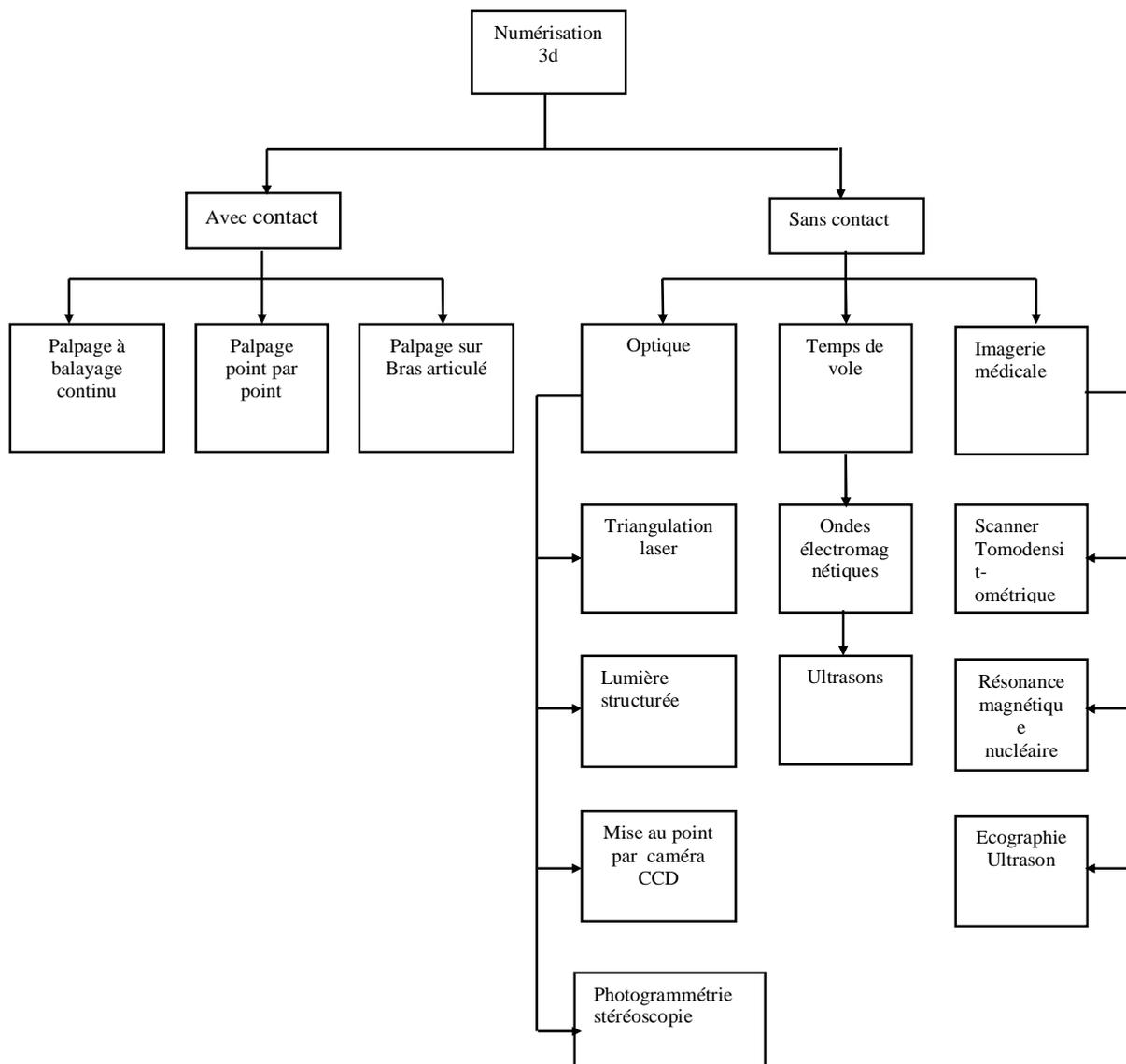


Figure II.3 : Techniques d'acquisition 3D.

II.2. Triangulation Laser

L'objectif de la triangulation laser est de reproduire une image tridimensionnelle dans l'ordinateur à travers la localisation dans l'espace d'un point ou d'une droite projetée successivement sur la surface de cet objet.

Les technologies Laser autorisent une acquisition rapide de quelques centaines à quelques milliers de points par seconde avec une précision du dixième au centième de millimètre. Toutefois que la technique de triangulation par structure Laser demeure confidentielle. Elle fait l'objet de recherches particulières notamment dans le domaine du traitement de l'information. La connaissance d'obstacles, le guidage de robots dans un espace donné. D'une façon plus générale, les différents modes de triangulation Laser peuvent être associés aux différentes machines d'outillage et de fabrication automatisées. Les objets ayant une surface absorbante ou réfléchissante nécessitent un traitement préalable [3].

Un système de mesure par triangulation laser se compose d'un capteur laser qui mesure la position de la projection du laser sur l'objet, si ce dernier et le capteur sont tous les deux fixes on ne pourra mesurer qu'une seule projection, pour cela nous utilisons un système ou une structure mécanique pour mettre, soit l'objet ou le capteur, en mouvement pour couvrir toute la surface de l'objet. Un logiciel est utilisé à la fin pour calculer les positions réelles des points par rapport à un repère de mesure et ce connaissant la position et l'orientation de la source laser et de la camera CCD. La Figure II.4 montre le principe d'un capteur de profondeur simple. Le faisceau laser passe par un miroir qui l'oriente vers la surface de l'objet. Le capteur photoélectrique ou camera CCD capture et mesure la position de l'image du point lumineux projeté sur l'objet.

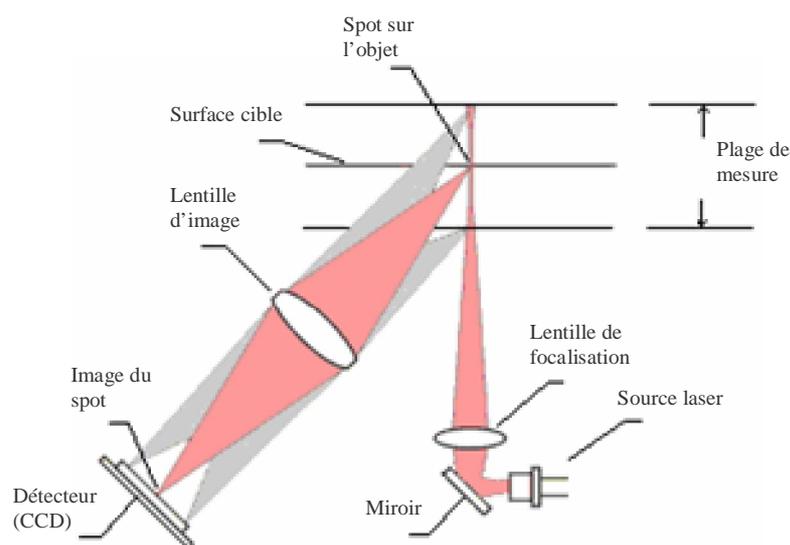


Figure II.4 : Principe du système de mesure [4]

II.2.1. Principe de calcul de la profondeur

Selon la Figure II.5 la position de l'image sur le capteur est utilisée pour déterminer sa position réelle sur l'objet avec la relation suivante :

$$z = \frac{d \cdot l}{p + l \cdot \tan(\theta)} \quad \text{I.1}$$

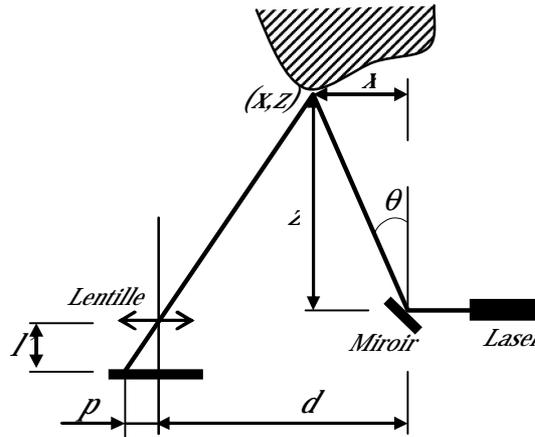


Figure II.5 : Principe de calcul des distances de mesure

Si on suppose que $l \cong f$ avec f la longueur focale de la lentille z devient :

$$z = \frac{d \cdot f}{p + f \cdot \tan(\theta)} \quad \text{I.2}$$

Et l'erreur absolue sera donnée par :

$$\Delta z = \left| \frac{z^2}{f \cdot d} \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{z^2}{d \cdot \cos^2(\theta)} \right| \cdot \Delta \theta \quad \text{I.3}$$

Donc la précision du capteur $\frac{1}{\Delta z}$ est proportionnelle à la distance d est inversement proportionnelle au carré de la distance z [3].

II.2.2. Qualité de la numérisation

Pour un système de triangulation, l'exactitude des données de profondeur dépend de l'interprétation appropriée de l'image sur le capteur CCD qui est produite par la lumière réfléchie sur l'objet et le problème revient à déterminer le centre de cette lumière. Les lasers émettent une lumière avec un profil gaussien. Si l'énergie du faisceau est perturbée, la taille et le profil du faisceau sur le capteur seront modifiés [3]. Les sources possibles de perturbation sont :

- La réflectivité de la surface
- La surface est très réfléchissante
- La géométrie a des discontinuités
- Le faisceau lumineux est partiellement occlus

- La surface est trop rugueuse pour perturber la lumière réfléchiée cette perturbation est appelée speckle.

II.3. Projection de lumière structurée

L'acquisition 3D par lumière structurée consiste à projeter un motif lumineux sur le sujet et on observe la déformation. Le motif peut être à une ou deux dimensions. Prenons l'exemple d'une ligne comme motif unidimensionnel. Elle est projetée sur le sujet à l'aide d'un vidéoprojecteur LCD ou laser. Une caméra légèrement décalée du projecteur, enregistre son éventuelle déformation (Figure II.6). Un programme informatique complexe sert à calculer les distances des points composant ce motif avec une technique similaire à la triangulation. Ceci autorise à la fin une mesure d'épaisseur avec un outil de vision 2D [5].

La complexité de cette méthode est due à l'ambiguïté. Prenons un groupe de bandes verticales balayant horizontalement un sujet. Dans le cas le plus simple, l'analyse repose sur la présomption que la séquence des bandes visibles de gauche à droite corresponde à celle de l'image laser projetée, de telle sorte que l'image de la bande la plus à gauche est bien la première de la projection du laser, la suivante est la seconde et ainsi de suite. Dans le cas de cibles non-triviales comportant des trous, des occlusions, des changements de profondeur rapide, cependant, l'ordre n'est plus forcément vérifié du fait que des bandes sont souvent masquées et peuvent même apparaître dans un ordre différent, donnant lieu à une ambiguïté des bandes lasers [6].

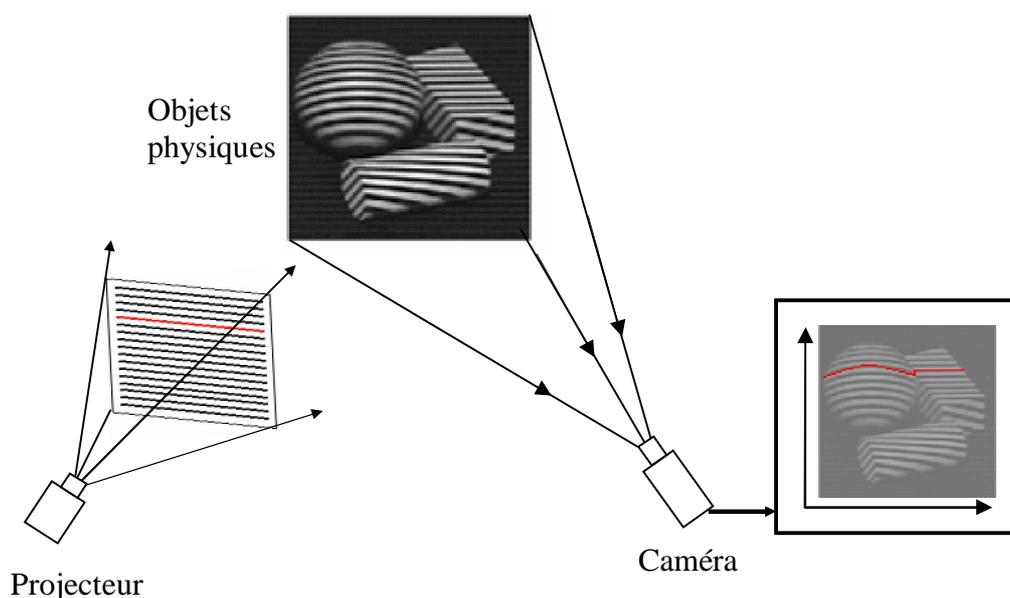


Figure II.6 : Principe de base.

Pour distinguer et faire la correspondance des bandes, ces dernières sont codées soit en variant leurs éclaircissement ou en leur attribuant des couleurs différentes.

Le point fort des scanners 3D à lumière structurée est sa rapidité. Au lieu de scanner un point à la fois, ils scannent tout le champ de vision à la fois. Ceci limite ou élimine les problèmes de distorsion liés au mouvement.

II.3.1. Précision de la méthode

La résolution de la méthode dépend de l'épaisseur des bandes qui forment le motif projeté et leurs qualités. Cette épaisseur ne peut pas être trop réduite à cause de la profondeur du champ de mesure et la résolution de la caméra. Cette résolution peut être de l'ordre de 1μ en utilisant les méthodes basées sur la projection de bandes déphasées.

Les exemples typiques de la précision sont les suivants :

- Planéité de $10\mu\text{m}$ pour une surface large de 60 cm.
- La forme d'une chambre de combustion de $2\mu\text{m}$.
- Le rayon d'une arête tranchante de $10\mu\text{m}$ à $\pm 0.4\mu\text{m}$.

La Figure II.7 illustre l'exemple du contrôle d'une chambre de combustion.

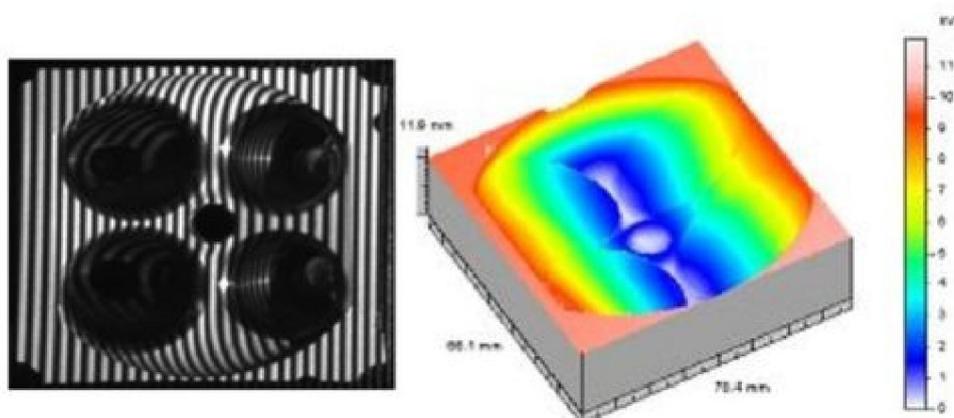


Figure II.7 : Contrôle d'une chambre de combustion [7].

II.3.2. Limitations

Comme toute autre méthode optique, les surfaces transparentes ou réfléchissantes soulèvent des difficultés qui provoquent des réflexions de lumière pour se projeter loin de son optique.

Les réflexions double peuvent provoquer la superposition de bande indésirable ce qui élimine la possibilité de faire une détection correcte. Les surfaces transparentes et semi-transparentes provoquent des problèmes comparables. Dans ces cas, le revêtement des surfaces avec une laque opaque mince est une pratique courante.

II.4. La Stéréoscopie

II.4.1. Principe de base

C'est une solution de mesure 3D rapide et sans contact. Elle met en oeuvre 2 cameras liées de façon rigide. Les positions des points 3D sont mesurées par triangulation optique.

Après avoir enregistré deux prises de vue sous deux angles différents d'un objet, les coordonnées images (couple stéréoscopique) des points à mesurer p_1 et p_2 sur chacune des prises de vue sont déterminées sur chacune des images (Figure II.8). Les coordonnées du point tridimensionnel P sont calculées en utilisant une transformation géométrique connue.

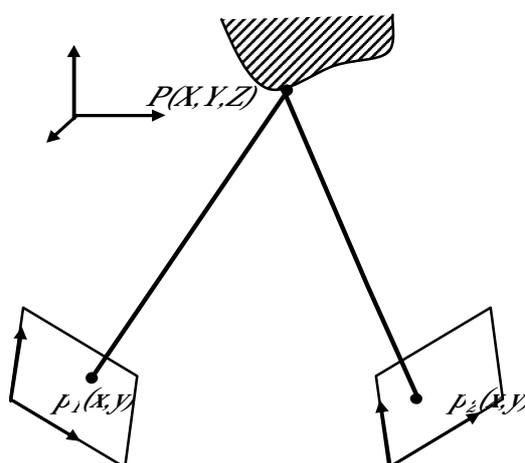


Figure II.8 : Principe géométrique.

Pour déterminer l'échelle (les dimensions de la pièce), il est nécessaire d'étalonner le système de mesure. Les positions relatives des systèmes de prise de vue sont fixes.

II.4.2. Variantes de la méthode

Un système de mesure par stéréovision plus simple à exploiter peut être constitué en alignant les axes des caméras avec la ligne qui joint leurs centres optiques pour constituer une géométrie épipolaire : l'analyse des concordances peut se faire alors ligne par ligne. Cela conduit à simplifier l'analyse des concordances et réduit considérablement les temps de calcul.

La plupart des systèmes de reconstruction 3D basés sur la lumière structurée utilisent une seule caméra comme capteur, et un projecteur qui émet un ou plusieurs motifs sur la surface observée. Nous utilisons l'analogie suivante avec un système stéréoscopique classique à deux caméras : le projecteur peut être vu comme une caméra pour laquelle l'image de la scène 3D est connue (c'est le motif projeté), et l'autre caméra voit la même scène depuis une autre position. Ainsi, on peut utiliser toute la famille d'algorithmes disponibles pour la stéréoscopie dense, avec un avantage important : puisqu'on peut choisir le

contenu d'une des deux images, on peut facilement obtenir une solution unique au problème de mise en correspondance.

Nous utilisons cette analogie pour calibrer un système à lumière structurée, capable d'acquérir des scènes dynamiques, et pour reconstruire la géométrie 3D et la texture à partir d'une seule image, en utilisant la stéréoscopie par corrélation. Le projecteur éclaire la pièce à mesurer par un réseau de franges qui sont observées par les deux caméras.

II.4.3. Domaines d'application et performance

De nombreux domaines concernant le comportement mécanique des matériaux posent le problème de la mesure des déplacements ou des déformations. Pour ce type de mesure, les méthodes optiques se sont largement imposées car elles présentent de grands avantages tels que l'absence de contact, une résolution spatiale élevée, et l'obtention d'une information de champ (par opposition à une information ponctuelle).

- Le contrôle dimensionnel
- Analyse de la courbe limite de formage (CLF) lors de l'emboutissage de tôles minces, par exemple dans le domaine de l'automobile.
- Analyse et validation des procédés.
- Validation du design et de la simulation par éléments finis.
- Détermination des caractéristiques de "formabilité".
- Précision sur la mesure de déformation : 1.5%.

II.5. La photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique utilisée historiquement dans la représentation de territoire qui trouve actuellement des applications en métrologie en permettant de réaliser des mesures de coordonnées en trois dimensions à partir de photographies.

II.5.1. Le principe de base

Le principe de base de la photogrammétrie est la triangulation. Considérons un point sur l'objet photographié depuis deux positions différentes, le rayon reliant ce point à l'appareil photo est appelé "ligne de vue". L'intersection des "lignes de vue" (ou triangulation) permet de déterminer la position dans l'espace 3D du point photographié.

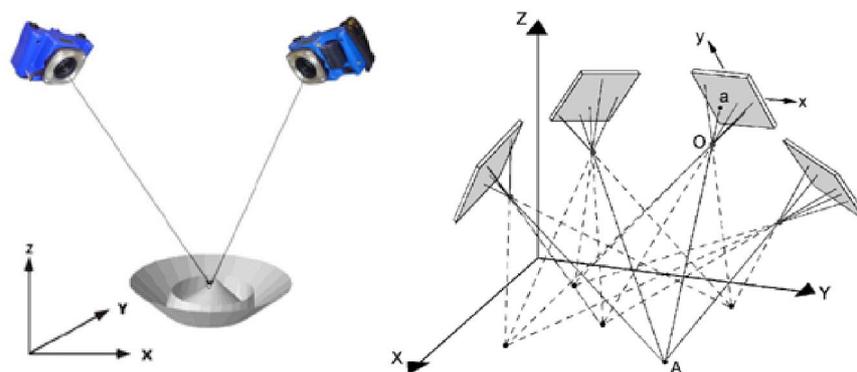


Figure II.9 : Intersection des lignes de vues [8].

En pratique, on prendra plus de deux photographies du point sur l'objet, ce qui améliorera la précision de la mesure. Le calcul de photogrammétrie est appelé calcul de compensation par la méthode des faisceaux (bundle bloc adjustment en anglais). C'est un calcul global qui permet de déterminer simultanément les positions et orientations de la caméra lors des prises de vues, les paramètres de la caméra ainsi que la position des points mesurés. La Figure II.10 montre le modèle de l'appareil de mesure de la société ActiCM.



Figure II.10 : Appareil mesure par photogrammétrie de la société ActiCM.

II.5.2. Matérialisation des points de mesure

Différentes techniques sont utilisées pour matérialiser les points de mesure sur l'objet: cibles rétro-réfléchissantes, cibles optiques projetées, palpeurs et points naturels.

La caractéristique du papier rétro-réfléchissant est qu'il renvoie la lumière vers sa source avec un rendement important. Par exemple, une cible rétro-réfléchissante est 100 à 1000 fois plus efficace qu'une cible traditionnelle noir et blanc pour retourner la lumière.

Un flash intégré à la caméra permet d'illuminer les cibles rétro-réfléchissantes pendant les prises de vue. Les images des cibles sur les photographies seront alors plus facilement détectées et mesurées plus précisément. Un autre avantage très important des cibles rétro-réfléchissantes

(Figure II.11) est que l'exposition des cibles devient complètement indépendante de la lumière ambiante. En effet, les photos peuvent être prises dans un environnement très lumineux ou en pleine obscurité sans que l'exposition des cibles soit modifiée [8].



Figure II.11 : utilisation de cible rétro-réfléchissante [8]

Les points non visibles ou cachés aux champs de vision des appareils peuvent être mesurés par des palpeurs de plusieurs formes adaptables à la configuration de l'objet.

II.5.3. Applications et précision

La flexibilité du système de mesure par photogrammétrie, sa rapidité d'intervention et son faible coût le rendent extrêmement compétitif par rapport aux machines à mesurer tridimensionnelles classiques et aux lasers de poursuite.

Grâce à ses avantages, la photogrammétrie est utilisée pour contrôler des pièces de moyennes et de grandes dimensions dans les ateliers de production, notamment dans le domaine de l'automobile, de l'aéronautique, ou dans les applications navales et nucléaires. Elle est par exemple utilisée pour :

- Contrôler la géométrie d'un objet
- Comparer le modèle mesuré à la définition numérique
- Mesurer les déformations subies par un objet
- Créer une maquette numérique

Quant au volume de mesure, il n'y a pas de limite théorique, du moment bien sûr que les différentes cibles sont toujours visibles. En revanche, la précision se dégrade avec l'augmentation de la distance. Avec un seul appareil photo, nous pouvons obtenir une précision de 5 μm , auxquels il faut ajouter 5 μm par mètre.

II.6. Les machines à mesurer tridimensionnelles

Une Machine à Mesurer Tridimensionnelle est une structure mécanique permettant le déplacement d'un palpeur appelé stylet (le palpeur est une bille de haute sphéricité montée sur une tige métallique) dans un volume de travail limité où la pièce à mesurer est placée (Figure II.12) [9].

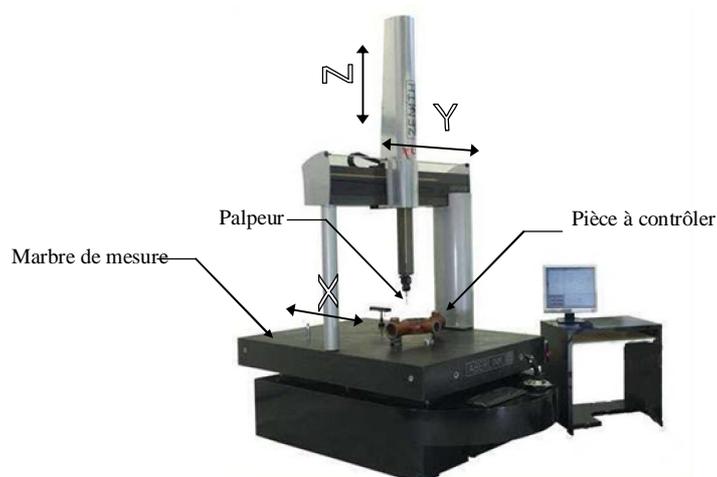


Figure II.12 : Machine à mesure tridimensionnelle de type portique.

II.6.1. La structure

Plusieurs types de structures existent qui diffèrent en termes de volume de contrôle et de précision [6]. Parmi les principales structures on trouve :

- Machine à portique.
- Machine du type pont.
- Machine de type potence.
- Machine type cylindro-polaire.

II.6.2. Les palpeurs

Le palpeur constitue l'interface entre la machine à mesurer et la pièce. Il est l'un des principaux facteurs qui ont permis l'évolution de la MMT. On trouve deux catégories de palpeurs : les palpeurs à contact à bille et les palpeurs sans contact [9].

II.6.2.1. Palpeur à contact à bille

Ce type de palpeur est d'utilisation courante car il permet d'obtenir un contact ponctuel bille pièce. Il assure un contact franc avec un effort suffisant mais assez faible pour éviter la déformation de la pièce (en pratique l'effort de contact est compris entre 0.1 et 0.5 N)

II.6.2.2. Palpeur sans contact

Lorsqu'il s'agit de mesurer des pièces très flexibles (tôles fines par exemple) ou en matière plastique peu résistante, les palpeurs à bille ne conviennent plus parce qu'ils introduisent un effort de contact qui pourrait déformer la pièce à mesurer. Il est donc préférable de mesurer la pièce sans contact. Cette condition est remplie par l'utilisation de deux types de palpeurs : les palpeurs laser et les palpeurs à caméra CCD. Ces palpeurs possèdent une grande précision de mesure

(0.1 μm pour les palpeurs laser par exemple), mais ils sont limités uniquement aux mesures des points que les rayons lumineux peuvent toucher [9].

II.6.3. Le logiciel

Le développement rapide qu'a connu la machine à mesurer est dû en grande partie au caractère évolutif des logiciels de mesure. Ceux-ci sont spécifiques à chaque constructeur mais ils permettent en général :

- La définition d'un repère dans lequel seront exprimées les coordonnées des points palpés et la qualification du palpeur par mesure du rayon de son extrémité sphérique afin de pouvoir estimer les coordonnées du point de contact sur la surface mesurée.
- L'association d'élément géométrique simple (point, droite, plan, cylindre, sphère, et cône) au nuage de points palpés suivant un critère d'association qui est en général le critère des moindres carrées.
- La construction de nouveaux éléments à partir des éléments associés. Par exemple, le point obtenu par l'intersection d'une droite et un plan.
- Le calcul des distances et des angles entre les éléments géométriques, palpés (associés) ou construits, et leur projection sur des repères construits.
- La vérification de la conformité avec les dessins de définition par contrôle et mesure des spécifications géométriques.

II.7. Conclusion

Différentes techniques ont été présentées dans ce chapitre chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Le choix d'une technique dépend du domaine d'application et des performances recherchées. Pour les grandes précisions l'utilisation d'une MMT équipée de palpeurs à contact s'impose, mais pour une grande vitesse d'acquisition pour des pièces déformables, l'idéal c'est d'utiliser les techniques optiques par scanning ou par vision. Pour tirer profits des différentes techniques certains fabricants proposent actuellement des machines multi-capteurs capables d'effectuer deux ou trois types de mesures.

II.8. Références bibliographiques

- [1] VI. Moron, Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996.
- [2] <http://www.optic-3d.com/retroconception>
- [3] Lavio PRIETO, Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1999.
- [4] <http://www.laser-ndt.com/profilometry.html>
- [5] http://www.evasion.inrialpes.fr/people/Lionel.Reveret/M2R07/M2R_scanner.html
- [6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Scanner_3D

- [7] Frankowski, G. Chen, M. Huth, Optical Measurement of the 3D-Coordinates and the Combustion Chamber Volume of Engine Cylinder Heads Proc. Of "Fringe 2001", pp. 593 – 598
- [8] <http://www.geodesie-maintenance.com/fr/photogrammetrie.php>
- [9] M. Bouaziz, Contribution au contrôle d'engrenages sur machine à mesurer, Thèse de doctorat d'état, Ecole national polytechniques, Décembre 1995.

Chapitre III

La modélisation géométrique

III.1. Introduction

L'information géométrique est très importante dans une production car elle intervient tout le long du cycle de production. Elle regroupe les données sur le fonctionnement requis, les contraintes, et critères d'optimisation qui sont dérivés des considérations du marché, et qui servent comme entrée pour le processus de conception. Le concepteur génère le détail, les spécifications des pièces et les assemblages à produire (Figure III.1). Ces spécifications sont principalement des informations géométriques sur les objets, avec des données non géométriques comme les matériaux utilisés, caractéristiques techniques, ...etc.

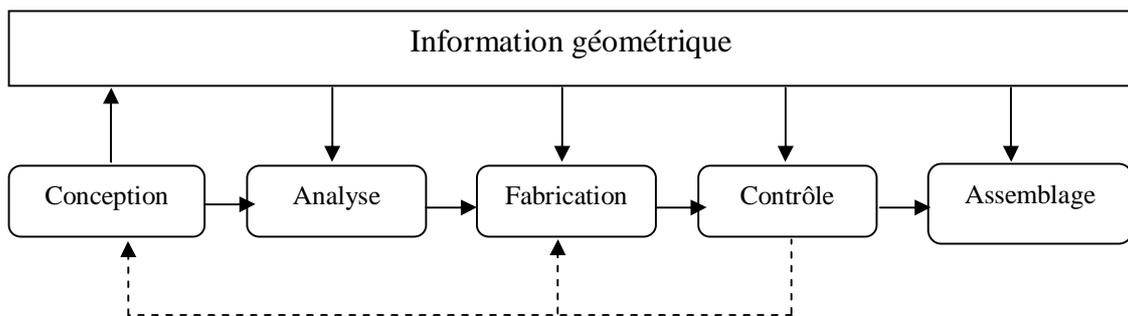


Figure III.1 : Utilisation des informations géométrique durant le cycle de production.

Les conceptions proposées sont analysées avec les spécifications, et modifiées si c'est nécessaire. Ceci peut être fait par des essais, où nous utilisons des techniques d'optimisation assistée par ordinateur. Les spécifications géométriques des pièces passent à la phase d'usinage où le choix du procédé utilisé sera fait. Lors de ce choix nous devons prendre en considération non seulement les spécifications du produit mais aussi les connaissances sur la capacité, les coûts et la disponibilité des équipements et du processus de fabrication.

Dans ce cadre, le contrôle quant à lui consiste à comparer les mesures des propriétés géométriques et dimensionnelles du produit fabriqué avec les spécifications précisées dans sa définition.

Traditionnellement, la géométrie est définie à travers les dessins de définition, mais ils avaient beaucoup d'inconvénients, ils ont été remplacés donc

par des modèles numériques obtenus avec des logiciels. De ce fait, nous allons voir dans ce qui suit les modèles géométriques ainsi que les autres types de modèles qui peuvent être utilisés dans la conception et le contrôle des pièces mécaniques.

III.2. Les modèles 3D

Il existe plusieurs types de modèle 3D qui varient selon leurs utilisations et les données utilisées. Néanmoins en ce qui nous intéresse, on distingue principalement trois types de modèles [1] :

III.2.1. Les modèles géométriques

Pour ce type de modèles on s'intéresse aux propriétés géométriques et dimensionnelles des objets en exploitant des informations topologiques. Ils sont utilisés principalement dans les domaines de CAO et FAO. Ce type sera traité en détail dans le prochain paragraphe.

A cause du fait que ces types de modèles sont les plus utilisés pour modéliser les pièces mécaniques, il serait donc intéressant de les voir dans ce qui suit avec plus de détail. Selon leurs simplicités et leurs performances, nous divisons les modèles géométriques en trois catégories : filaire, surfacique et volumique [1].

III.2.1.1. Les modèles filaires

Le modèle filaire d'un objet est un graphe dont les noeuds sont des points de la surface de l'objet (sommets ou coins) et les traits du graphe sont les arêtes physiques de l'objet. Ces représentations ne contiennent pas d'informations pour les surfaces et restent incomplètes (Figure III.2).

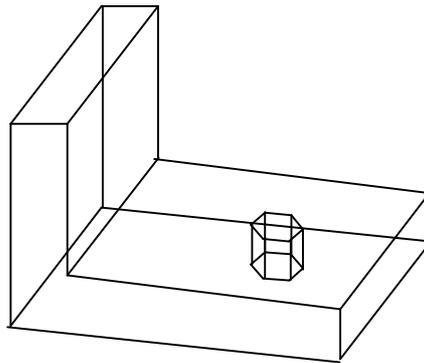


Figure III.2 : Construction d'un modèle filaire.

La modélisation filaire polyédrique est largement utilisée en vision par ordinateur à cause de sa simplicité et comme bon support pour les informations topologiques et spatiales. Pour ce type de modèles filaires les faces sont des polygones plats délimités par une liste d'arêtes délimitées elles même par des coins [1].

Avantages :

- Simple.
- Rapide de visualisation.
- Nécessite un minimum de puissance de calcul.

Inconvénients :

- Ambigu (on ne distingue pas le vide du plein).
- Possibilité de créer des solides sans aucun sens physique.
- Difficulté pour résoudre le problème des parties cachées.
- Impossibilité de calculer certaines propriétés physiques comme le poids.

III.2.1.2. Les modèles surfaciques

La modélisation surfacique est venue pour combler les lacunes de la modélisation filaire (Figure III.3) avec ce type de modèle, un objet est défini par une ou plusieurs surfaces plus ou moins complexes qui représentent son enveloppe (sa peau) [4]. Ces surfaces peuvent être planes, ce qui procure une simplicité et une certaine vitesse de manipulation, comme ils peuvent être non-planes comme les surfaces NURBS très utilisées pour les modeleurs pour la CFAO et qui donnent une présentation exacte de l'objet. Le calcul des intersections courbe-surface ou surface-surface, par exemple, nécessite la résolution d'un problème mathématique très complexe. On dit qu'un modèle surfacique est valide lorsqu'il définit une enveloppe qui aborde le solide et forme un volume occupant une portion de l'espace.

Le modèle surfacique le plus utilisé est le modèle BRep (Boundary Representation). L'idée générale de ce modèle est de conserver comme information sur un objet modélisé uniquement sa « peau » et d'indiquer de quel côté de celle-ci se trouve la matière. Un objet est donc représenté par une surface fermée. Celle-ci est le plus souvent représentée par un ensemble de faces représentant chacune un des éléments de la limite de l'objet (Figure III.3). Elles sont typiquement composées d'un ensemble d'arêtes.

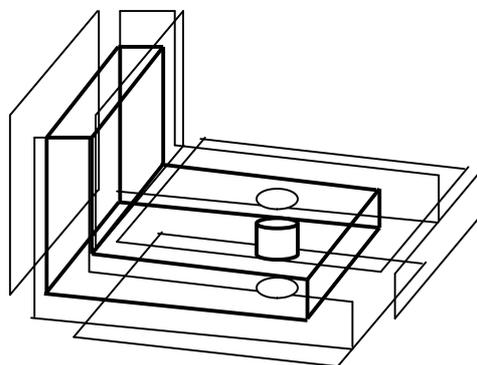


Figure III.3 : Construction du modèle Brep.

Avantages :

- Facilité de description de visualisation et de transformations géométriques.
- Le modèle avec facettes permet facilement d'effectuer des opérations complexes comme le calcul du volume d'un solide, la vérification de l'appartenance d'un point au solide...etc.
- Il offre la possibilité de placement de contraintes géométriques et d'assemblage pour des applications de cao.

Inconvénients :

- Grande difficulté de réalisation des opérations logiques
- Difficulté de validation (les faces ne constituent pas toujours un volume)
- Il est nécessaire de stocker une grande quantité d'informations
- Grande difficulté pour revenir en arrière lors d'une conception.

III.2.1.3. Modèle volumique

Dans un modèle volumique, on modélise directement le volume de l'objet. On distingue deux grandes catégories de modèles : les modèles à base de voxels (volumes élémentaires) et les modèles CSG (Constructive Solid Geometry).

Modèles avec voxels : Dans ce type de modèles, le solide est représenté par une liste de voxels . Les voxels sont des cellules spatiales occupées par le solide; ce sont généralement des cubes de taille fixe répartis selon une grille (Figure III.4). En général, le solide est défini par la liste des coordonnées des centres des cellules. Les avantages sont la facilité de validation, la simplicité d'accès à un point donné et l'unicité spatiale assurée. Par contre, il faut relever qu'il n'y a pas de structure entre les différentes parties d'un objet, que c'est coûteux en terme de mémoire et que par conséquent, il n'est pas possible de représenter des objets très complexes [1].

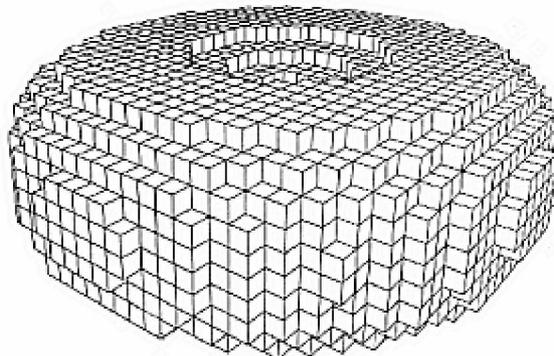


Figure III.4 : Modèle d'un tore en Voxel.

Octrees : La principale méthode de décomposition en cellule est l'octree qui est une généralisation des quadtree. Un quadtree est la représentation d'un objet 2D basée sur la subdivision récursive d'un carré de même taille (quadrants).

L'octree est donc une extension pour encoder des solides. Une région cubique est récursivement divisée en 8 octants ou régions cubiques (Figure III.5).

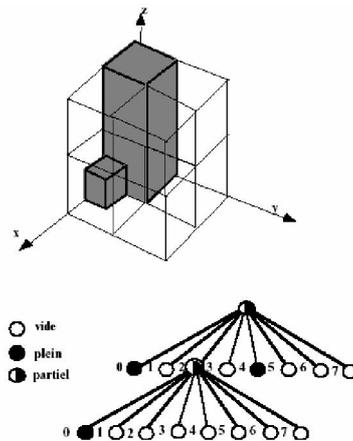


Figure III.5 : Modélisation par octrees.

Modèle CSG (Constructive Solid Geometry) : Dans ce modèle, nous disposons d'un ensemble de volumes élémentaires (parallélépipèdes, des sphères, des cônes, des tores,...etc.). La composition entre ces éléments permet de construire des objets plus complexes (Figure III.6). Le CSG repose sur la définition de la géométrie par un graphe acyclique de construction dont les feuilles sont des volumes primitifs (élémentaires) et les noeuds des opérations de composition booléennes (union, intersection,...).

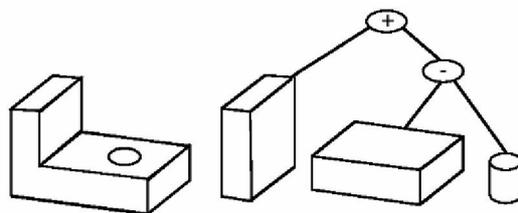


Figure III.6 : Construction du modèle CSG.

Avantages :

- Facilité de description (de l'objet en mouvement et de sa trajectoire),
- Facilité de stockage,
- Facilité de transformation géométrique,
- Permet la création de rendu très réaliste.

Inconvénients :

- Manque d'outils algorithmiques pour le calcul des propriétés géométriques,
- Ne permet pas d'avoir une définition explicite de la surface de l'objet,
- Difficulté de mise en oeuvre des opérateurs booléens.

III.2.2. Les modèles « vision »

Dans un modèle vision on exploite les données fournies par des outils de vision 2D ou 3D (nuage de points 3D, vues 2D, contours,...). Parmi ces modèles on trouve les modèles multi-vues, triangulation de Delaunay...etc. Parmi les domaines d'applications de ce type de modèles on trouve l'imagerie médicale, ainsi que la reconnaissance de formes (voir chapitre II)

III.2.3. Les modèles « déformables »

Ce type de modèles est utilisé essentiellement pour simuler le comportement d'objets déformables (super quadrique, hyper quadrique) et l'interaction avec leur environnement (modèles physiques), et leur suivi dans l'espace et dans le temps (voir chapitre V).

III.3. Les modèles CAO

Les systèmes interactifs de graphisme, initialement développés comme aide à produire des dessins bidimensionnels, se sont rapidement transformés en systèmes beaucoup plus sophistiqués pour la conception de solides tridimensionnels. Cette amélioration a produit une croissance rapide des systèmes de CFAO, dans lesquelles plusieurs représentations d'un même modèle peuvent cohabiter. Le choix de primitives CAO dépend de la classe géométrique des objets étudiés et de la technique utilisée pour extraire les primitives correspondantes dans la scène. Les niveaux de primitives utilisées par les systèmes de CFAO sont présentés par la suite [3].

Niveau zéro : À ce niveau, on a que des primitives ponctuelles, qui sont représentées par leurs coordonnées dans l'espace de définition. Même si nous pouvons utiliser cette description pour des étapes de calcul pendant la saisie de données brutes, son format est encombrant et désorganisé.

Niveau un : Est le niveau des primitives curvilignes, (coniques, splines cubique, intersection de surfaces...etc.) qui permettent la définition des modèles filaires qui décrit simplement les frontières mais ne détermine pas de quel côté se situe la matière.

Niveau deux : Ce niveau correspond aux primitives surfaciques (surfaces de révolution, de Bézier, B-Spline, NURBS,...etc.) qui permettent de décrire des formes plus complexes.

Niveau trois : C'est le niveau des primitives volumiques (blocs, cônes, sphères, cylindres...etc.) et des modèles solides. Contrairement aux modèles filaires, ils ne sont pas ambigus et l'affichage d'une vue avec élimination des parties cachées est immédiat.

III.4. Modèle au format STL

C'est un format utilisé pour le prototypage rapide (stéréolithographie). Il est obtenu généralement par une triangulation d'un modèle exact à l'aide d'un logiciel de CAO qui nous fournit un fichier au format STL (Figure III.7). Ce fichier contient les sommets et la normale orientée vers l'extérieur pour chaque triangle (Figure III.8).

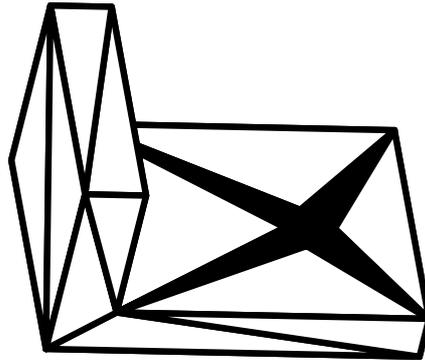


Figure III.7 : Triangulation STL d'une pièce.

Le nombre de triangles et leur répartition sont fonction de la courbure de la surface exacte et de l'erreur de modélisation tolérée.

```
facet normal 9.95184e-001 9.80171e-002 1.49958e-016
  outer loop
    vertex 1.498e+002 1.43754e+002 4.00000e+001
    vertex 1.498e+002 1.43754e+002 0.00000e+000
    vertex 1.494e+002 1.47116e+002 0.00000e+000
  endloop
endfacet
facet normal 9.95184e-001 9.80171e-002 -5.57162e-016
  outer loop
    vertex 1.49829e+002 1.43754e+002 4.00000e+001
    vertex 1.49498e+002 1.47116e+002 0.00000e+000
    vertex 1.49498e+002 1.47116e+002 4.00000e+001
  endloop
end facet...
```

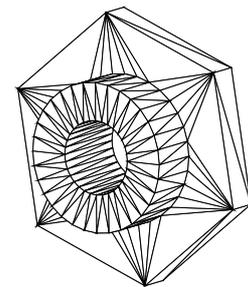


Figure III.8 : Un extrait d'un fichier STL.

Le modèle STL peut être incorrect lorsqu'il contient des trous dus à l'absence de certains triangles, ou dans le cas où les facettes peuvent s'intersecter incorrectement (la même arête peut être partagée par plus de deux facettes), ou des facettes peuvent se superposer.

Les logiciels qui produisent des fichiers STL n'informent pas toujours que le modèle généré n'est pas correcte (Figure III.9), les défauts ne sont alors détectés que lors du prototypage [1].

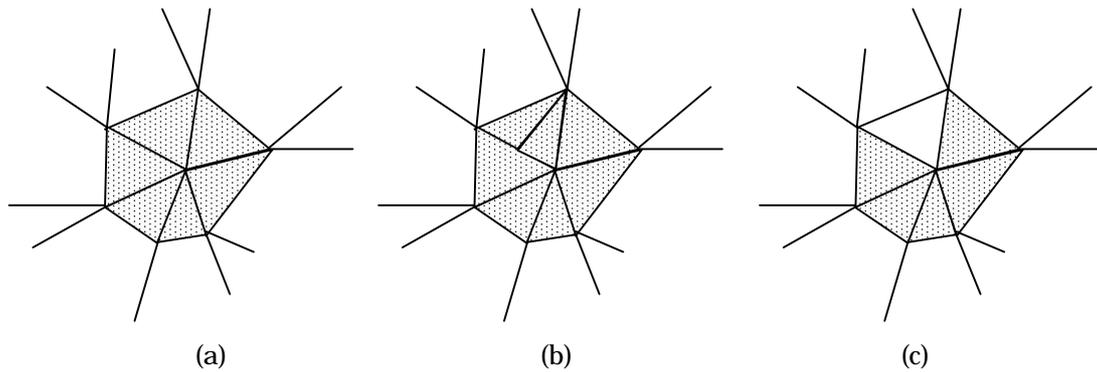


Figure III.9 : Modélisation STL : (a) modélisation correcte, (b) incorrecte (arête par partagée par 3 triangles), (c) incorrecte à cause d'un trou (pas de triangle) [1]

III.5. Formats d'échange en CAO

La profusion des logiciels de DAO n'a été rendue possible qu'avec l'émergence de normes relatives au format des fichiers contenant les informations de dessins. En effet les dessins ayant souvent pour vocation d'être échangés entre bureaux d'études, il est impératif que des logiciels différents puissent communiquer entre eux grâce à des formats d'échange de données normalisés. Aux USA le "National Bureau of Standard" propose la norme IGES, qui est de très loin la norme la plus suivie par les concepteurs de logiciels à la fois sur micros et stations de travail. Le format DXF créé par AutoDesk est plus couramment utilisé sur micro mais se limite aux échanges de type dessin; ce format DXF (type ASCII) ou son équivalent binaire DWG est de fait devenu un format standard d'échange puisque pratiquement tous les logiciels de CAO proposent des entrées/sorties compatibles. Avec ICAB version 5, la norme internationale STEP est disponible, offrant les dernières avancées en matière d'échange de données électroniques [4].

Gérer l'ensemble des données relatives aux produits, indépendamment de leur origine, de leur contenu ou de leur signification, à travers toutes les étapes de son cycle de vie (cahier des charges, conception, fabrication, contrôle qualité, vente, maintenance...).

III.5.1. Format d'échange IGES

IGES signifie Initial Graphics Exchange Standard. Ce format est normalisé par l'institut américain de normalisation ANSI (American National Standards Institute). Le format IGES fonctionne indépendamment des fabricants et de leurs logiciels.

IGES est très répandu dans le monde de la CAO. Il peut décrire les données 2D et 3D. L'accent est principalement mis sur la transmission exacte des détails de conception et les possibilités graphiques sont limitées.

Outre les préliminaires graphiques habituels tels que la ligne ou le cercle, ce format permet de décrire des éléments très complexes tels que les surfaces, les volumes ou encore les inscriptions des cotes sur les dessins, les éléments assemblés et les paramètres de représentation.

La description des différents éléments s'effectue dans le fichier IGES avec ce que l'on appelle les entités. Ces entités sont très nombreuses. Elles peuvent décrire les cercles, les lignes, les textes, etc. mais également les structures telles que les groupes, les renvois à des éléments existants, etc.

Les fichiers IGES sont établis en texte clair. Ce qui signifie que vous pouvez ouvrir et lire les fichiers dans un éditeur.

Après un en-tête, vous trouvez deux sections dans lesquelles les entités sont énumérées. La première section donne la liste des entités avec des paramètres spéciaux qui elles-mêmes renvoient à la deuxième section dans laquelle les entités sont décrites plus en détail [5].

Voici comment se présente une description de données typique dans la deuxième section par les entités :

Dans cet exemple, les entités indiquées ci-dessous décrivent les éléments suivants :

102,4,519,521,525,527;	529P 476
142,1,507,517,529,2;	531P 477
144,507,1,0,531;	533P 478
128,2,2,2,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,	535P 479

...
102: Composite Curve Entity
142: Curve on a Parametric Surface Entity
144: Trimmed Parametric Surface Entity
128: Rational B- Spline Surface Entity

III.5.2. La norme STEP

Avant l'arrivée de STEP (Norme pour l'échange de données de produit - Standards for the Exchange of Product data) ou norme ISO 10303, des formats spécifiques émanant essentiellement des industries automobiles et aéronautiques ont été développés. Plusieurs standards nationaux (SET, IGES, VDA...) et standards (DXF...) ont vu le jour caractérisés par leur multiplication et leur ressemblance, la raison pour laquelle STEP a été initié au milieu des années 80, avec pour objectif de développer une seule norme internationale pour couvrir tous les aspects de l'échange de données CAO/CFAO, capable de remplacer, entre autres, les normes nationales existantes [6].

La norme STEP, fournit un mécanisme qui est capable de décrire les données de produit sur l'ensemble du cycle de vie, indépendamment du système employé. De par sa nature, cette description est adaptée non seulement à l'échange de fichiers neutres, mais également comme base pour appliquer et partager des bases de données de produits et pour l'archivage. De plus, les échanges de données utilisant la norme internationale STEP ont contribué à faire progresser les collaborations mondiales ainsi qu'à améliorer les communications avec les chaînes d'approvisionnement.

STEP est utilisée par des organisations de pointe dans l'aérospatiale, l'industrie automobile, la construction navale et le secteur de la défense, par exemple par Boeing, Lockheed Martin, Raytheon, IBM, BAE Systems, Newport News Shipbuilding, Electric Boat Corporation, Rockwell et la NASA [7].

III.5.3. STEP-NC

La programmation conventionnelle des machines-outils à commande numérique (MOCN) est basée sur le langage ISO connu sous le « code G » ne répond plus aux exigences de la technologie moderne. Dans le cadre la normalisation ISO une nouvelle interface (ISO 14649) a été développée pour l'échange d'informations entre les systèmes de CAO/FAO et les MOCN. Cette nouvelle interface « STEP-NC » décrit des données selon le concept « orienté objet » basé sur le standard STEP et devra permettre un échange bidirectionnel complet (ISO 10303)

En outre, STEP-NC (STEP Compliant Numerical Command) ouvre la voie des commandes numériques modernes vers une meilleure intégration et interopérabilité des données.

Pour piloter les machines-outils à commande numérique plutôt que de spécifier **COMMENT usiner** (la trajectoire de l'outil), il s'agit de spécifier **QUOI usiner** (un trou, une poche...), en incluant aussi les critères de qualité (tolérances, états de surface). Ceci permet d'implanter plus de fonctions « intelligentes » au niveau des CN tout en supprimant le post-processeur coûteux et source de problèmes[8].

III.5.4. Echange de données et la fonction contrôle

Malgré le développement atteint dans les phases de conception et de fabrication en termes d'intégration dans le processus de production, la métrologie et le contrôle restent isolés. Par ailleurs, les tentatives se multiplient dans le cadre de la recherche pour trouver les modules de données et les modes d'échange adéquats pour faire le lien avec le reste du processus dans une vision de production intégrée.

Dans ce cadre, Zhwo et al [9] ont cité, dans un état de l'art, les principaux travaux traitant le sujet parmi lesquels nous pouvons citer les suivants :

Lin et Chow [10] ont intégré un module de données STEP avec la méthode de modélisation IDEF0 pour la planification du processus de contrôle par MMT afin de mieux gérer les données lors de l'opération de contrôle. Un module pour la conception des flux d'information a été mis en place qui intègre le module IDEF0 et un module de données EXPRESS. L'objectif est de fournir des outils pour un développement efficace des systèmes de mesures en général et ceux utilisant le format d'échange STEP.

Brecher et al. [11] du Laboratoire de machines-outils et productique (WZL) à l'université Aachen d'Allemagne ont mis au point un système pour intégrer des informations d'inspection dans le flux d'information STEP-NC d'usinage. Le caractère bidirectionnelle dans le STEP-NC permet de récupérer les résultats de mesure, effectuer la commande CNC et les injecter dans le processus d'usinage.

Ali et al. [12] de l'Université de Loughborough, Royaume-Uni ont mis au point un environnement de développement de la fonction contrôle avec le reste des processus assisté par ordinateur CAx. La caractéristique principale de leur environnement est qu'il fournit des informations de haut niveau et en détail pour les étapes et la planification du contrôle, et un mécanisme pour le retour des informations de l'inspection et leurs diffusion à travers la chaîne CAx du processus total. STEP-NC (ISO 14649-16), et DMIS AP219 étaient utilisés comme base pour la représentation du produit et les modèles de fabrication. Cette recherche est principalement axée sur l'utilisation du MMT.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre les différents types de modèles ont été exposés qui varient selon leur domaine d'utilisation et qui ont évalué avec le temps en réponse à l'évolution du besoin et profitant du développement en puissance des ordinateurs. Parmi les modèles présentés, les modèles surfaciques NURBS ou à triangulation restent les plus puissants et les plus utilisés à cause de leurs capacités représentatives et les possibilités de leurs utilisations.

Pour un maximum d'intégration et d'interaction entre les différentes phases d'un processus de fabrication la diversité de leurs formats les modèles géométriques ne sont plus suffisants. La norme STEP vient pour répondre à ce besoin du fait qu'elle fournit une ressource intégrée contenant toutes les données liées aux produit depuis sa conception jusqu'à son contrôle.

III.7. Références bibliographiques

- [1] VI. Moron, Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996.
- [2] N. Magnenat-Thalmann, Cours sur la modélisation d'objets solides & surfaces implicites et objet mous.
- [3] L. PRIETO, Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1999.
- [4] http://www.icab.fr/new_art1.htm
- [5] www.antea.fr/antea/logiciels/itedo/pdf.../format_igs.pdf
- [6] <http://guide-cfao.infometiers.org/documents/exploiter/step.doc>
- [7] www.iso.org/iso/fr/iso_cafe_step.htm
- [8] www.hes-imec.ch/cnmp/.../STEP-NC_UTGV_2004.pdf
- [9] F. Zhao, X. Xu , S.Q. Xie, Computer-Aided Inspection Planning—The state of the art, Computers in Industry xxx (xxx-xxx), Elsevier, 2009.

- [10] Z.-C. Lin and J.-J. Chow, Integration planning model of IDEF0 and STEP Product in a CMM measuring system, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17 (39–53), Elsevier, 2001.
- [11] J. Wolf, M. Vitr and C. Brecher, Closed-loop CAPP/CAM/CNC process chain based on STEP and STEP-NC inspection tasks, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 19 (570-580), Elsevier, 2006.
- [12] L. Ali, S.T. Newman and J. Petzing, Development of a STEP-compliant inspection framework for discrete components, *Proceedings of the Institutions of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219 (557–563), Elsevier, 2006.

Chapitre IV

L'association d'un élément géométrique à un nuage de points

IV.1. Introduction

D'une manière générale, le problème de mise en correspondance 3D s'exprime ainsi: après avoir choisi une représentation de l'ensemble de données géométriques \mathcal{D} , de modèles \mathcal{M} et de transformation, à partir d'une sélection de primitive dans \mathcal{D} et \mathcal{M} , trouver l'ensemble des paramètres de la transformation qui minimise un critère de distance entre l'ensemble de données transformées et le modèle. D'un point de vue mathématique, le problème étant fortement non-linéaire, il s'agit de trouver les paramètres de la transformation qui minimisent globalement un critère de distance, ce qui nécessite un choix convenable de transformations initiales [1].

Pour définir complètement un problème de mise en correspondance [1], il est donc nécessaire de déterminer:

- La représentation de la transformation rigide recherchée,
- Les primitives de \mathcal{d} et m à utiliser pour la mise en correspondance,
- Le calcul de distance associée aux primitives sélectionnées pour \mathcal{d} et m ,
- La méthode d'optimisation,
- Le critère à optimiser,
- Le choix de la transformation initiale,

Une transformation rigide peut être décomposée en une composante de rotation \mathcal{R} et une composante vecteur de translation \mathcal{T} . Le point p se transforme alors en un point p' et la relation qui relie p' à p est :

$$p' = \mathcal{R} \cdot p + \mathcal{T} \tag{IV.1}$$

La matrice \mathcal{R} calculée doit être orthogonale et son déterminant doit être égal à un pour que celle-ci représente une rotation. Ces contraintes imposent que la

matrice R n'a que trois paramètres indépendants. Ainsi une transformation rigide est décrite par six paramètres indépendants, trois pour la rotation, trois pour la translation. Ces représentations sont très utilisées pour leur simplicité [1].

Les transformations rigides les plus utilisées sont les suivantes:

- Matrice de rotation et vecteur translation,
- Axe quelconque et angle de rotation,
- Angles d'euler,
- Quaternions,

Les représentations qui font intervenir des axes et des angles de rotation constituent les représentations les plus intuitives d'une transformation rigide. Par contre, elles sont souvent plus complexes à manipuler lorsqu'il s'agit de composer des transformations et présenter des indéterminations [1].

IV.2. Choix des caractéristiques à mettre en correspondance

Les caractéristiques à associer peuvent être de différents types (points 3D, lignes, surfaces). Il est nécessaire de bien faire le choix en fonction des outils d'acquisition et de modélisation disponibles pour garantir, à la fois une bonne exactitude et une grande robustesse.

Avec le développement des outils d'acquisition, comme les capteurs télématiques, la caractéristique usuelle pour le modèle réel comme pour notre cas est un nuage de points 3D. Mais il est possible d'utiliser des courbes 3D représentant des contours extraits d'image 2D, ou des courbes de niveau, ou d'utiliser des surfaces obtenues par interpolation de points 3D.

Pour le deuxième modèle, soit qu'il est construit à partir de données provenant de capteurs 2D ou 3D, auquel cas il est de même type que le premier (les données). Soit, la géométrie de l'objet est supposée connue, nous disposons alors d'un modèle complètement défini [1] (modèle CAO, par exemple) dans ce cas il peut être soit :

- Un ensemble de courbes ou de surfaces implicites,
- Ensemble de courbes ou de surfaces paramétriques,
- Un ensemble de triangles,
- Un ensemble d'éléments géométriques de base (plans, cylindres, cônes, sphères...) Définis par leur paramètres d'orientation, de position et intrinsèque,

IV.3. Principe d'association d'éléments géométriques au nuage de points

L'association d'un élément géométrique idéal à un ensemble de points revient à résoudre un problème mathématique d'optimisation sous contraintes. En effet, les lignes et les surfaces n'étant jamais parfaites, elles sont mesurées par un nombre de points supérieur au nombre minimal nécessaire pour les définir mathématiquement. L'élément géométrique associé retenu est celui qui représente le mieux le nuage de points suivant un critère exprimant la « meilleure représentation » d'une fonction technologique que l'élément réel doit satisfaire.

Les normes de spécification ISO donnent des indications sur la « meilleure représentation » d'une surface réelle par une surface idéale mais ces critères ne peuvent pas être appliqués aux éléments mesurés sur la majorité des machines à mesurer actuellement utilisées. En effet le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est le critère des moindres carrées [3].

Ce critère permet d'associer un élément idéal qui passe au milieu des points en minimisant la somme des carrés des distances d_i entre ces points et l'élément idéal.

$$\left(\sum_{i=1}^n d_i^2 \right) \text{ minimale} \quad \text{IV.2}$$

n : nombre de points

IV.4. Méthode mathématique d'association par le torseur des petits déplacements

Le concept de "Torseur de petits déplacements" a été développé à l'ENS de Cachan (France) au début des années 1970 pour résoudre le problème d'association sous contrainte d'une surface quelconque à un nuage de points. Ce concept général a été ensuite utilisé dans de nombreuses applications et plus particulièrement dans de nombreux logiciels de machines à mesurer à coordonnées (PROMESUR, PERCEVAL, MESTRID, Logiciel de référence du BNM, MARLEN, PRELUDE, METROLOG II,...etc.) et dans des logiciels de simulation cinématique des mécanismes avec prise en compte des défauts (Chaînes de cotes 3D, Mecamaster ...etc.)[3].

Le petit accroissement de position d'un solide est caractérisé en un point O par un vecteur Translation $\overset{1}{D}_O(u, v, w)$ et un vecteur rotation $\overset{1}{\Omega}(d\alpha, d\beta, d\gamma)$ liés par la relation :

$$\overset{1}{D}_M = \overset{1}{D}_O + \overrightarrow{OM} \wedge \overset{1}{\Omega} \quad \text{IV.3}$$

Le couple de vecteurs $\{\overset{1}{D}_O, \overset{1}{\Omega}\}$, et la formule fondamentale $\overset{1}{D}_M = \overset{1}{D}_O + \overrightarrow{OM} \wedge \overset{1}{\Omega}$ (permettant de calculer le vecteur Translation d'un point M quelconque du solide)

constituent un torseur que l'on appellera dans ce cas torseur de petits déplacements.

IV.4.1. Calcul des écarts optimisés par le torseur de petits déplacements

Pour mieux placer l'élément géométrique au milieu de l'ensemble des points mesurés, il suffit de lui faire subir un petit déplacement à partir de sa position initiale, ce déplacement peut être exprimé en un point A par un torseur de petits déplacements $\begin{Bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{D}_A \end{Bmatrix}$ où \mathbf{k} représente la petite rotation et \mathbf{D}_A la petite translation du point A. Les écarts suivant les normales \mathbf{n}_i entre les points mesurés M_i et les points théoriques M_{thi} correspondants sont :

$$\xi_i = \overrightarrow{M_{thi} M_i} \cdot \mathbf{n}_i \quad \text{IV.4}$$

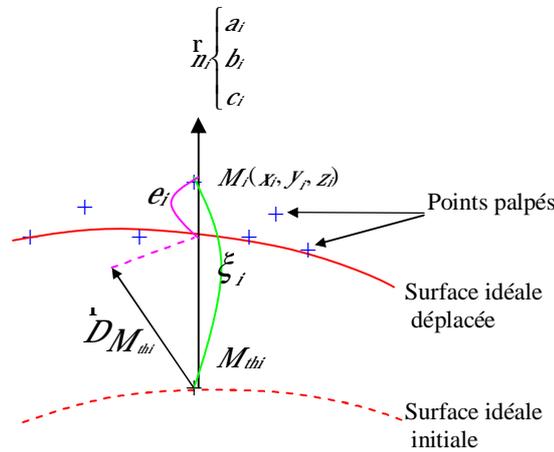


Figure IV.1 : Optimisation des écarts avec les petits déplacements.

En faisant l'hypothèse d'un petit déplacement, l'écart optimisé e_i sera égal à l'écart ξ_i diminué du déplacement $\mathbf{D} M_{thi}$ du point théorique M_{thi} projeté sur la normale théorique \mathbf{n}_i . L'écart ξ_i étant défini pour une taille donnée de l'élément géométrique initial, une variation δt de la taille donne au point M_i mesuré un écart de la forme $\xi_i - \delta t$, par suite l'écart optimisé est de la forme (Figure IV.1) :

$$e_i = \xi_i - \delta t - \mathbf{D} M_{thi} \cdot \mathbf{n}_i \quad \text{IV.5}$$

en remplaçant $\mathbf{D} M_{thi}$ par son expression en terme de torseur de petit déplacement, on trouve :

$$e_i = \xi_i - \delta t - (\mathbf{D}_A \cdot \mathbf{n}_i + (\mathbf{A} M_{thi} \wedge \mathbf{n}_i) \cdot \mathbf{k}) \quad \text{IV.6}$$

en posant \mathbb{P}_A le torseur des coordonnées Plückeriennes de la normale \mathbf{n}_i au point A on obtient :

$$e_i = \xi_i - \delta t - (\mathbb{P}_A \cdot \mathbb{T}_i) \quad \text{IV.7}$$

avec : $\mathbb{P}_A \begin{cases} \mathbf{r}_{n_i} \\ AM \wedge \mathbf{n}_i \end{cases}$ et $\mathbb{T}_A \begin{cases} \mathbf{r}_{D_A} \\ \mathbf{r}_{D_A} \end{cases}$

Il est alors possible de rechercher le petit déplacement significatif \mathbb{T} permettant de satisfaire au mieux un critère d'optimisation.

Pour un critère des moindres carrés, nous formons la fonction $W = \sum e_i^2$ et l'on résout le système d'équations linéaires formé par les dérivées partielles de W par rapport aux composantes du torseur de petits déplacements et des paramètres intrinsèques de la surface ou de la ligne [4].

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0, \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0, \frac{\partial W}{\partial u} = 0, \frac{\partial W}{\partial v} = 0, \frac{\partial W}{\partial w} = 0, \frac{\partial W}{\partial t} = 0$$

IV.4.2. Étude d'un plan

$$\xi_i = Z_i - Z_n$$

Recherche de la fonction à minimiser ϵ_i

$$\mathbb{W} \begin{cases} \alpha \\ \beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w \end{cases} \begin{cases} \mathbf{r}_R \\ \mathbf{r}_D \end{cases} \cdot \mathbb{W} \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 1 \\ Y_i \\ -X_i \\ 0 \end{cases} \begin{cases} \mathbf{r}_{n_i} \\ \overrightarrow{OM_i} \wedge \mathbf{r}_{n_i} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \overrightarrow{OM_i} \begin{cases} X_i \\ Y_i \\ 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \mathbf{n}_i \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 1 \end{cases}$$

$$\epsilon_i = \xi - \alpha Y_i + \beta X_i + W \quad \text{IV.8}$$

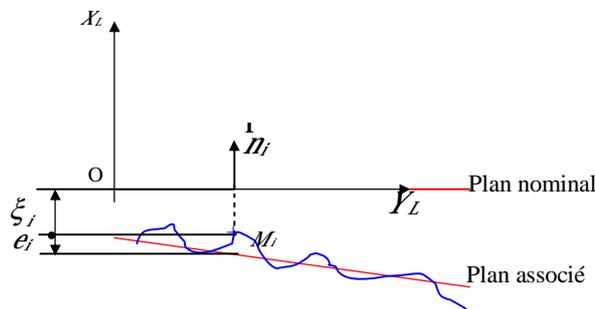


Figure IV.2 : Optimisation d'un plan.

IV.4.3. Étude d'un cercle

$$\xi_i = \rho_i - R_n$$

Recherche de la fonction à minimiser ϵ_i

$$\begin{matrix} \mathbb{A} \\ \mathbb{A} \end{matrix} \begin{matrix} \left[\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u \\ v \\ 0 \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} r \\ R \\ D \end{matrix} \right\} \\ \left[\begin{matrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} r \\ n_i \\ \overline{OM_i} \wedge \mathbf{r}_{n_i} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \quad \overline{OM_i} \text{ et } \mathbf{r}_{n_i} \text{ sont colinéaires}$$

$$\epsilon_i = \xi_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i)$$

IV.9

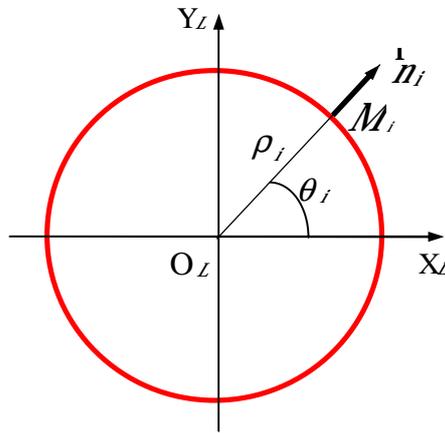


Figure IV.3 : Optimisation d'un cercle

IV.4.4. Étude d'un cylindre

$$\xi_i = \rho_i - R_n$$

Recherche de la fonction à minimiser ϵ_i

$$\begin{matrix} \mathbb{A} \\ \mathbb{A} \end{matrix} \begin{matrix} \left[\begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u \\ v \\ 0 \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} r \\ R \\ D \end{matrix} \right\} \\ \left[\begin{matrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \\ -Z_i \sin \theta_i \\ Z_i \cos \theta_i \\ 0 \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} r \\ n_i \\ \overline{OM_i} \wedge \mathbf{r}_{n_i} \end{matrix} \right\} \end{matrix} \quad \text{avec} \quad \overline{OM_i} \left\{ \begin{matrix} R \cos \theta_i \\ R \sin \theta_i \\ Z_i \end{matrix} \right\} \quad \text{et} \quad \mathbf{r}_{n_i} \left\{ \begin{matrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \end{matrix} \right\}$$

$$\epsilon_i = \xi_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i - \alpha Z_i \sin \theta_i + \beta Z_i \cos \theta_i)$$

IV.10

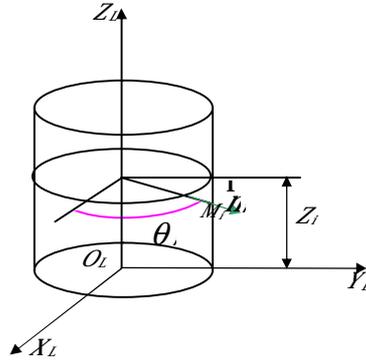


Figure IV.4 : Optimisation d'un cylindre.

IV.5. Méthodes non linéaires

Comme pour toute méthode de mise en correspondance après avoir choisi une représentation des paramètres de transformation, il faudra exprimer l'écart entre un point donné appartenant au nuage de points et la surface avec laquelle il doit être recalé en fonction des paramètres de transformation et des coordonnées des points. Cet écart est généralement défini par une relation non linéaire. A la différence de la méthode des petits déplacements on ne va pas simplifier l'écart en linéarisant les fonctions qui le constituent, mais nous allons exploiter les formules à l'état brut. Ceci va permettre de se libérer de la contrainte des petits déplacements et donc traiter le problème dans un repère quelconque, mais en contre partie on va se retrouver en face d'un problème d'optimisation non linéaire qu'il faut résoudre.

IV.5.1. Cas de surfaces usuelles

L'une des étapes les plus difficiles dans une procédure d'association ou de recalage est l'expression des écarts points-surface. L'étape est d'autant plus difficile que la surface est plus complexe. Dans la référence [2] nous trouvons une astuce qui consiste à appliquer un changement de repère vers le centre de gravité du nuage de points, puis un autre changement de repère pour faire varier l'orientation de l'élément géométrique jusqu'à coïncider avec le nuage de points.

IV.5.1.1. Surface cylindrique

Le changement d'origine des points M_i par translation s'effectue par la relation suivante :

$$O_{CdG} \overset{v}{M}_{i/(O_{CdG}, e_1, e_2, e_3)} = [T].O \overset{v}{M}_{i/(O, e_1, e_2, e_3)}$$

$$\text{Où } [T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{cdg} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{cdg} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{cdg} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Par l'utilisation d'un changement de base suivant la matrice de passage [P], nous connaissons les points M_i dans la nouvelle base (e'_1, e'_2, e'_3) où le vecteur unitaire e'_3 est colinéaire au vecteur directeur v_{cyl} recherché de la surface cylindrique (Figure IV.5):

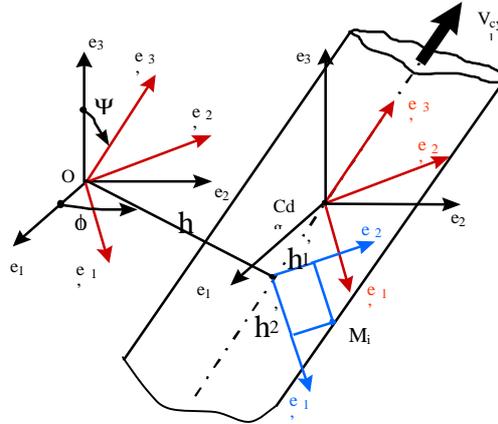


Figure IV.5 : Changement de base [2].

Le changement de base des points M_i se calcule par la relation suivante :

$$O_{Cd} \overset{v}{M}_{i/(e'_1, e'_2, e'_3)} = [P] \cdot O_{Cd} \overset{v}{M}_{i/(e_1, e_2, e_3)}$$

L' où:

$$\begin{matrix} \begin{matrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{matrix} \\ (e'_1, e'_2, e'_3) \end{matrix} = \begin{bmatrix} \cos\Psi \cdot \cos\phi & \cos\Psi \cdot \sin\phi & -\sin\Psi \\ -\sin\Psi & \cos\phi & 0 \\ \sin\Psi \cdot \cos\phi & \sin\Psi \cdot \sin\phi & \cos\Psi \end{bmatrix} \times \begin{matrix} \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} \\ (e_1, e_2, e_3) \end{matrix}$$

D'où l'écart entre la surface réelle et la surface associée est égal à :

$$y_j = d_j - R = F(\phi, \Psi, h'_1, h'_2, R)$$

Avec

$$d_j = \sqrt{(x'_1 - h'_1)^2 + (x'_2 - h'_2)^2}$$

Avec la linéarisation en un point de la fonction $F(\phi, \Psi, h'_1, h'_2, R)$ on obtient :

Soit la Fonction $\iota(a_j) = t$, où $a_j = a_j^c + \Delta a_j$

$$\text{Ce qui nous donne : } \iota(a_j) = \iota(a_j^c) + \sum_{j=1}^N \Delta a_j \cdot \frac{\partial \iota(a_j)}{\partial a_j}$$

L' application sur la fonction $y_j = F(\phi, \Psi, h'_1, h'_2, k)$ nous donne :

$$y_j = F_c(\phi_c, \Psi_c, h'_1_c, h'_2_c, k_c) + \sum_{j=1}^5 \Delta a_j \cdot \frac{\partial F(\phi, \Psi, h'_1, h'_2, k)}{\partial a_j}$$

Avec : $a_j = (\phi, \Psi, h'_1, h'_2, k)$ sont les paramètres à optimisation

Par la suite, l'optimisation suivant la méthode des moindres carrés nous permet d'identifier les attributs des surfaces associées grâce à la relation suivante :

$$\frac{\partial \sum_{k=1}^m y_k^2}{\partial a_j} = 0 \quad \text{IV.11}$$

Avec : $k = 1$ à m (points palpés)

Les attributs de la surface associée sont calculés dans le référentiel attaché à cette dernière. Par la démarche inverse, on peut calculer les attributs dans le référentiel de mesure [2].

IV.5.1.2. Surfaces planes

Dans le cas de surfaces planes, les attributs de la surface associée (Figure IV.6) sont calculés eux aussi avec leur incertitude après une optimisation de l'écart y_i . Il est écrit en utilisant une matrice de changement de base et optimisé par la méthode des moindres carrés.

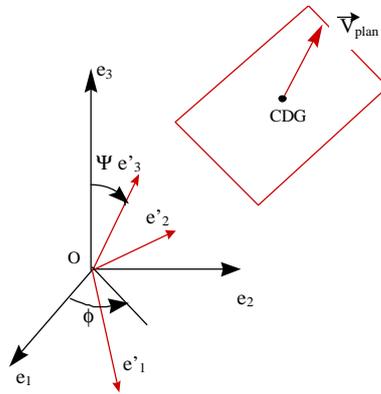


Figure IV.6 : Modélisation d'un plan [2].

L'utilisation de la matrice de changement d'origine [T] nous permet de calculer les coordonnées des points M_i dans le nouveau repère (O_{cdg}, e_1, e_2, e_3) . D'autre part, le changement de base nous permet d'exprimer les points connus dans la base initiale (e_1, e_2, e_3) dans la base finale (e'_1, e'_2, e'_3) . Cette opération est réalisée par l'application de la même matrice de changement de base décrite plus haut. L'écart entre la surface réelle et la surface associée est égal à :

$$y_i = \sum_{j=1}^n x'_j - h \quad \text{IV.12}$$

Par la suite, l'optimisation par les moindres carrés après linéarisation en un point, nous permet d'identifier les attributs de la surface associée.

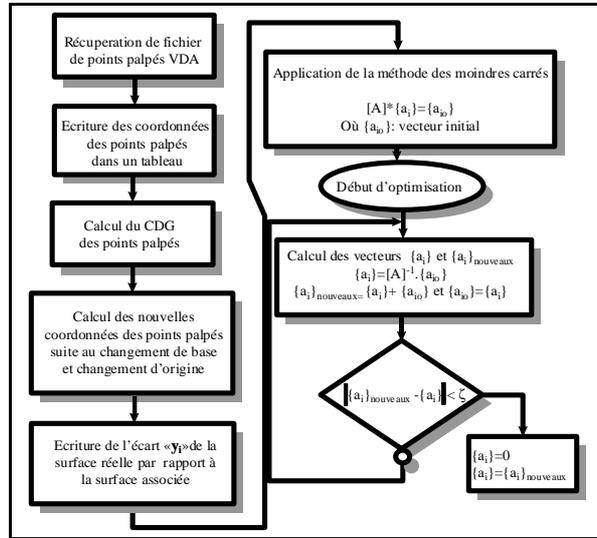


Figure IV.7 : Procédure de calcul des attributs des surfaces associées [2]

La procédure présentée sur la Figure IV.7 illustre la démarche de détermination des attributs des surfaces associées.

IV.5.2. Cas d'une surface gauche

T. M. Tucker [5,6] a présenté une méthode pour le recalage d'un nuage de points avec une surface définie avec une équation paramétrique $\mathcal{S}(u, v)$ (Figure IV.8). La distance d_i entre un point p_i et sa projection sur la surface \mathcal{S} est :

$$\|d_i\| = \min_{v, u} \|p_i - \mathcal{S}(u, v)\| \quad \text{IV.13}$$

dans ce cas la déviation ou l'écart entre l'ensemble de points et le modèle de la surface est quantifié par le carré des distances points/modèle.

$$f = \sum_{i=1}^n \|d_i\|^2 = \sum_{i=1}^n (d_i^x \|d_i\|) \quad \text{IV.14}$$

Le carré est utilisé pour éliminer le signe.

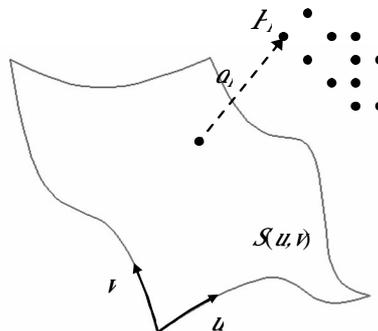


Figure IV.8 : Association d'une surface gauche paramétrique $\mathcal{S}(u, v)$ à un nuage de points.

Pour la représentation de la transformation rigide, un vecteur \mathcal{X} à six composantes qui sont les trois rotations autour des trois axes et les trois translations suivant les mêmes axes est utilisée.

L'étape suivante et donc l'optimisation de l'écart suivant les différents paramètres de transformation à savoir les trois translations et les trois rotations qui forment le vecteur de transformation \mathcal{X}

$$\mathcal{X} = [\theta_x \theta_y \theta_z t_x t_y t_z]^T \quad \text{IV.15}$$

On peut donc réécrire la distance d_i en fonction de \mathcal{X} comme suit :

$$d_i(\mathcal{X}) = \rho(\mathcal{X}) - \mathcal{S}(u_{ci}(\mathcal{X}), v_{ci}(\mathcal{X})) \quad \text{IV.16}$$

u_{ci} , v_{ci} représentent les valeurs de u , v qui correspondent à la projection de p_i sur la surface \mathcal{S} et minimisant la distance d_i . ρ est fonction de \mathcal{X} ce qui fait de u_{ci} , et v_{ci} des fonctions de \mathcal{X} la substitution du vecteur \mathcal{X} dans la formule de l'écart donne :

$$f = \sum_{i=1}^n \left(d_i(\mathcal{X})^2 \right) \quad \text{IV.17}$$

Cela veut dire que pour réaliser la mise en correspondance entre le nuage de points et la surface il faut donc minimiser la fonction f en termes de composantes du vecteur de transformation \mathcal{X}

Pour qu'une valeur \mathcal{X}^* minimise la fonction f , il faut que :

$$\nabla f(\mathcal{X}^*) = 0 \text{ et } \nabla^2 f(\mathcal{X}^*) \text{ soit défini positif}$$

Pour déterminer la valeur \mathcal{X}^* , plusieurs méthodes d'optimisation sont envisageables (méthode de Newton, gradient conjugué, ...etc.). La plus utilisée est la méthode de Newton, son application pour la fonction f donne après un développement en série de Taylor :

$$\nabla \hat{f}(\mathcal{X}) = \nabla f(\mathcal{X}_k) + \nabla^2 f(\mathcal{X}_k) \Delta \mathcal{X}_k = 0 \quad \text{IV.18}$$

L'incrément $\Delta \mathcal{X}$ sera donc égal a :

$$\Delta \mathcal{X}_k = -(\nabla^2 f(\mathcal{X}_k))^{-1} \nabla f(\mathcal{X}_k) \quad \text{IV.19}$$

L'incrément de \mathcal{X}_{k+1} lors de chaque itération permet de se rapprocher successivement de la solution \mathcal{X}^* . L'algorithme d'optimisation se résume comme suit :

- Donner une première estimation \mathcal{X}_0
- Calculer $\Delta \mathcal{X}_k$
- Calculer $\mathcal{X}_{k+1} = \mathcal{X}_k + \Delta \mathcal{X}_k$
- Répéter 1 et 2 jusqu'à ce que $\nabla f(\mathcal{X}_k)$ soit suffisamment petit.

L'exécution de la deuxième étape nécessite le calcul de trois quantités qui sont : la fonction objective $f(X_k)$, le gradient $\nabla f(X_k)$, et la matrice Hessienne des dérivées secondes $\nabla^2 f(X_k)$.

La fonction objective est obtenue en faisant la somme des distances d_i entre les points P_i et leurs projections sur la surface obtenue après une minimisation des paramètres correspondants u_{ci}, v_{ci} avec une procédure itérative [6].

Pour le calcul du gradient $\nabla f(X_k)$, et si on considère une composante arbitraire de X , ζ , pour généraliser nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial f}{\partial \zeta} = 2 \sum_{i=1}^n \left(d_i \frac{\partial d_i}{\partial \zeta} \right)$$

$$\frac{\partial d_i(\zeta)}{\partial \zeta} = \frac{\partial p_i(\zeta)}{\partial \zeta} - \frac{\partial \mathcal{S}(u_{ci}(\zeta), v_{ci}(\zeta))}{\partial \zeta}$$

Le terme le plus difficile à calculer dans ce cas c'est la dérivée de \mathcal{S} . Si on applique la règle de Chain pour une fonction à plusieurs variables on obtient :

$$\frac{\partial \mathcal{S}(u_{ci}(\zeta), v_{ci}(\zeta))}{\partial \zeta} = \frac{\partial \mathcal{S}(u_{ci}, v_{ci})}{\partial u} \frac{\partial u_{ci}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \mathcal{S}(u_{ci}, v_{ci})}{\partial v} \frac{\partial v_{ci}}{\partial \zeta}$$

La dérivée partielle de \mathcal{S} par rapport à u et v étant déjà calculée durant la recherche de u_{ci} et v_{ci} (lors du calcul des projections), reste donc à calculer les dérivées partielles de u_{ci} et v_{ci} . Après démonstration l'auteur a abouti aux relations suivantes :

$$\frac{\partial u_{ci}}{\partial \zeta} = \frac{a_{vv} b_u - a_{uv} b_v}{a_{uu} a_{vv} - a_{uv}^2}$$

$$\frac{\partial v_{ci}}{\partial \zeta} = \frac{a_{uu} b_u - a_{uv} b_v}{a_{uu} a_{vv} - a_{uv}^2}$$

avec :

$$a_{uu} = \frac{\partial g}{\partial u}(u_{ci}, v_{ci}, X_0), \quad a_{vv} = \frac{\partial h}{\partial v}(u_{ci}, v_{ci}, X_0)$$

$$a_{uv} = a_{vu} = (p_i(X_0) - \mathcal{S}(u_{ci}, v_{ci}))^T \frac{\partial^2 \mathcal{S}}{\partial u \partial v}(u_{ci}, v_{ci}) - \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial v}(u_{ci}, v_{ci})^T \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial u}(u_{ci}, v_{ci})$$

$$b_u = -\frac{\partial p_i}{\partial \zeta}(X_0)^T \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial u}(u_{ci}, v_{ci}), \quad b_v = -\frac{\partial p_i}{\partial \zeta}(X_0)^T \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial v}(u_{ci}, v_{ci})$$

$$g(u_{ci}, v_{ci}(X), X) = (p_i(X) - \mathcal{S}(u_{ci}, v_{ci}(X)))^T \frac{\partial \mathcal{S}(u_{ci}, v_{ci}(X))}{\partial u}$$

$$h(u_{ci}(X), v_{ci}(X), X) = (p_i(X) - \mathcal{S}(u_{ci}(X), v_{ci}(X)))^T \frac{\partial \mathcal{S}(u_{ci}(X), v_{ci}(X))}{\partial v}$$

La dernière quantité qu'il faut calculer est la matrice Hessienne (la matrice des dérivées secondes de fonction objective). La formulation de cette dernière peut être obtenue analytiquement [7] en prenant par exemple les dérivées de la formule du gradient, soit générée numériquement.

IV.6. La méthode ICP (Iterative Closest Point)

L'ICP est une méthode précise et fiable pour la mise en correspondance de surfaces gauches. le but de l'ICP est de trouver la transformation rigide qui va correspondre au mieux un nuage de points \mathcal{P} et un modèle géométrique \mathcal{M} . Le processus d'alignement tente de minimiser la somme des carrés des distances entre les points du nuage et leurs correspondants appartenant au modèle (Figure IV.9). L'ICP est efficace, elle converge d'une façon monotone vers un minimum local. Pour chaque itération l'algorithme calcule la correspondance en cherchant les points les plus proches, puis il minimise l'erreur des moindres carrés entre les points correspondant.

L'algorithme ICP de base :

1. Choisir ou déterminer une transformation initiale \mathcal{T} .
2. Appliquer la transformation sur l'ensemble des points \mathcal{P} .
3. Calculer la projection des points sur la surface du modèle \mathcal{M} .
4. Calculer la transformation rigide \mathcal{T} optimale au sens des moindres carrés [8], amenant les points vers leurs projection ou l'inverse
5. Répéter les étapes de 2 à 4 jusqu'à atteindre la convergence.

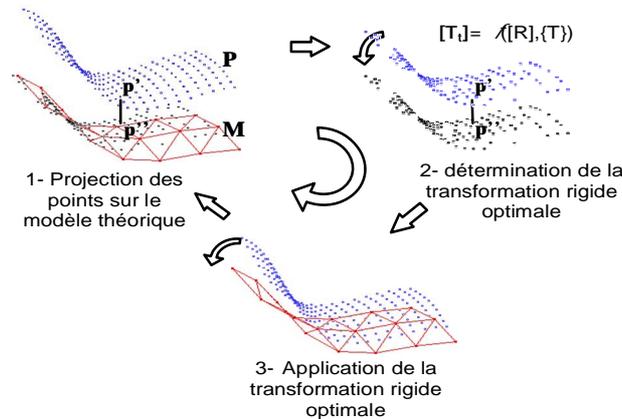


Figure IV.9 : Principales étapes de l'algorithme ICP (Association d'un nuage de points et une surface STL).

IV.6.1. Variantes de l'algorithme ICP original

Après la présentation de la méthode par Besl et Mckey [9] plusieurs améliorations ont été proposées qui affectent une ou plusieurs étapes de l'algorithme original pour tenter d'augmenter ces performances mesurées essentiellement par la précision finale des résultats et la vitesse de calcul ce qui a donné naissance à plusieurs variantes de l'algorithme ICP. Dans ce qui suit on va présenter quelques unes de ces améliorations.

IV.6.1.1. Choix de la transformation initiale

A cause du fait que l'ICP est un algorithme de descente itérative, la méthode peut converger vers un minimum local qui n'est pas nécessairement le minimum

global recherché, sauf pour certaines méthodes complètes et complexe telles que les méthodes du recuit simulé (Simulated Annealing, Very Fast simulated Annealing,...). Dans la plupart des méthodes présentées précédemment, la transformation initiale est supposée proche de la transformation recherchée [1].

Voici quelques solutions pour choisir la transformation initiale:

- Aligement interactif grossier [10]
- Rotation et translation approximativement estimées à partir des axes principaux de l'objet dans chaque vue.
- Navigation visuelle: entre deux images le déplacement est faible (vitesse maximale de déplacement de l'objet limitée et la fréquence d'échantillonnage des images suffisamment élevée) et connu avec une certaine précision.
- Raisonnement de P. Besl [9]: la seule solution pour être sûr de trouver le minimum global est de rechercher le minimum de tous les minimums locaux. La répartition des minimums locaux dépend de la forme de l'objet observé.

IV.6.1.2. Sélection des points

Pour l'algorithme original tous les points disponibles sont utilisés pour réaliser la mise en correspondance alors qu'il est possible d'utiliser une partie uniquement pour le faire, cette partie est choisie suivant plusieurs stratégies parmi lesquelles nous pouvons citer :

- La sélection des points avec une grande valeur du gradient de couleur ou d'intensité qui va aider à réaliser une meilleure mise en correspondance [11].
- Essayer de trouver une bonne estimation de la transformation rigide à partir de sous-ensembles de points extraits aléatoirement durant chaque itération en souhaitant lors des tirages sélectionner un minimum de points aberrants [12].
- Choisir les points autour desquels la distribution des normales est la plus large possible [13].

IV.6.1.3. Elimination des points aberrants

Le but est d'ignorer les points qui sont dus probablement à des erreurs ou à des parasites et qui peuvent avoir une grande influence sur les résultats surtout lors de l'utilisation du critère des moindres carrées. Parmi les stratégies existantes, on trouve:

- Rejeter les paires de points avec des distances plus grandes qu'une valeur spécifiée.

- Rejeter les n % des plus mauvaises paires selon une distance métrique généralement la distance point- point. K. Pulli[14] a suggéré de rejeter 10% des paires.
- Le rejet des points dont la distance point -point est supérieure à un multiple de l'écart type des distances. Selon t. Masuda [12], on rejette les paires dont la distance est supérieure à 2.5 fois l'écart type.
- Rejeter les paires ayant des points sur la frontière.
- D'après p. J. Rousseuw et a. M. Leroy [15], la meilleure sélection des points 3d utilisant la distance médiane est obtenue avec le critère suivant :

$$\{p_i \in P \mid d(\mathcal{T}(p_i), M) < 2.5s\} \quad \text{avec } s = 1.4826 \left(1 + \frac{5}{N_s}\right) \sigma_{med} \quad \text{IV.20}$$

Où :

σ_{med} : est la distance médiane obtenue par la transformation rigide; la distribution est supposée gaussienne.

N_s : le nombre de paires de points

IV.6.1.4. Utilisation des estimateurs spécifiques

Les techniques robustes se caractérisent par pourcentage de points aberrants qui peut être toléré sans corrompre le résultat de la transformation recherchée, appelé point d'arrêt. L'algorithme ICP original utilise un estimateur aux moindres carrées avec un point d'arrêt à 0%. Il existe d'autres estimateurs comme :

- Estimateur LMS (Least Median of Squares): cet estimateur introduit par Rousseuw et Leroy en 1987 [17] minimise la distance médiane entre les deux formes à mettre en correspondance et présente ainsi une robustesse à 50%.
- Estimateur de variance minimum (MVE) [10, 16]

$$e^k = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{d_s}^2} d_s^2 \quad \text{IV.21}$$

Où σ est la variance du bruit de mesure estimée à une distance d_s .

- Estimateur MF pour la prise en compte des erreurs de mesure [17] : Cet estimateur introduit par Zhang, présente l'avantage d'être hautement robuste (point d'arrêt à 50%), Par ailleurs, il est indépendant des recherches initiales, sa complexité de calcul est raisonnable et facilement parallélisable.
- Le critère à minimiser et le suivant:

$$\max_{\beta, \sigma} \mathcal{Q}(\beta, \sigma) = \sum_{n=1}^N \log \left\{ \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^3} \exp \left[-\frac{\|r_n\|^2}{2\sigma^2} \right] + t \right\} \quad \text{avec } r_n = y_n - (R_{X_n} + T) \quad \text{IV.22}$$

β : Paramètres de la transformation rigide

σ : Variance gaussienne.

IV.6.1.5. Réduction du temps de calcul des distances

La phase la plus longue dans les algorithmes de mise en correspondance est d'établir la correspondance des primitives et aussi les calculs de distances inter-primitives. Quelques techniques sont utilisées maintenant permettant de réduire efficacement la durée des calculs.

- Octrees : cette méthode utilisée en modélisation volumique n'est pas très adaptée, car nombre de voxels seront vides.
- K-D-Tree (K-Dimensional binary Trees) : ils représentent des bisections successives d'un espace de dimension k et la complexité du calcul de distance peut être réduite à $N_p \cdot \log N_m$.
- Point cachés : Cette amélioration du temps de calcul s'appuie sur le fait que les points de \mathcal{P} et de \mathcal{M} qui sont proches à l'instant k le seront sûrement à l'instant $(k+1)$, il suffit donc de s'intéresser uniquement aux points cachés à l'étape précédente [1].

IV.6.2. L'algorithme adopté

Pour faire le choix d'un algorithme, plusieurs critères sont à vérifier : vitesse, précision des résultats, stabilité, robustesse, et simplicité. L'importance de l'un ou de l'autre parmi ces critères dépend de l'utilisation et du domaine d'application du programme final, pour des applications en temps réel le critère le plus important est la vitesse tel que celui proposé par Rusinkiewicz [13] qui a fait une combinaison entre plusieurs variantes pour ressortir un algorithme avec un temps d'exécution de l'ordre du nano-seconde pour des scènes de moyenne complexité. Pour notre cas, les critères les plus importants étaient : la vitesse, la robustesse, et la simplicité, pour cela on s'est basé principalement sur l'algorithme proposé par VI.MORON [1] auquel nous avons fait des changements pour essayer d'apporter plus de simplicité tout en gardant le maximum de performances [18,19]. Le nouvel algorithme se résume comme suit :

1. Faire une sélection aléatoire d'un sous-ensemble de points.
2. Calculer la projection ou la correspondance pour les points sélectionnés.
3. Calculer la transformation rigide optimale avec la méthode SVD.
4. Appliquer la transformation calculée sur les points sélectionnés.
5. Evaluer la qualité de la mise en correspondance par un estimateur LMS.
6. Si la qualité est bonne, appliquer la transformation calculée sur l'ensemble des points disponibles.
7. Répéter les étapes de 1 à 6 jusqu'à la convergence.

Pour le modèle de la surface théorique nous avons opté pour une surface au format STL à cause de la simplicité de manipulation, sa génération et sa

compatibilité avec la plupart des logiciels de CAO. Il nous facilite ainsi son exploitation pour les tests de l'application finale.

IV.6.2.1. Calcul de la projection de points sur une surface au format STL

Une surface au format STL est composée de plusieurs surfaces planes sous forme de triangles définis par leurs sommets. Le calcul de la projection d'un point sur un plan n'est pas difficile, mais le problème c'est de savoir sur quel plan, il faut le faire. La réponse est de considérer que le plan sur lequel la projection du point palpé appartienne à l'intérieur du triangle.

Donc pour tout point P , et pour chaque triangle, nous calculons sa projection P' (Figure IV.10) sur le plan qu'il définit. Si P' se trouve à l'intérieur du triangle nous le considérons comme étant la projection du point P sur la surface et on passe à un autre point, sinon on passe à un autre triangle pour effectuer le calcul de projection et vérifier de nouveau l'appartenance.

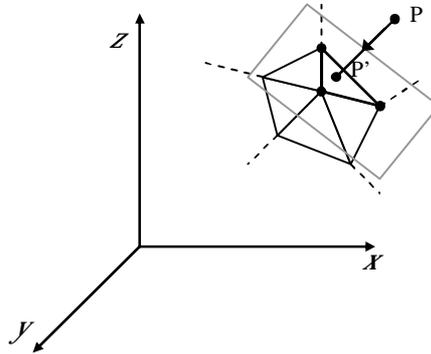


Figure IV.10 : Calcul de la projection d'un point P sur surface au format STL (triangulée)

IV.6.2.2. Calcul de la projection d'un point sur un plan (triangle)

Soit le triangle défini par ses sommets P_1, P_2, P_3 et le vecteur normal \vec{N} , et soit P un point et P' sa projection sur le plan (Figure IV.11).

Nous pouvons donc écrire :

$$\vec{OP} = \vec{OP'} + k \vec{N} \tag{IV.23}$$

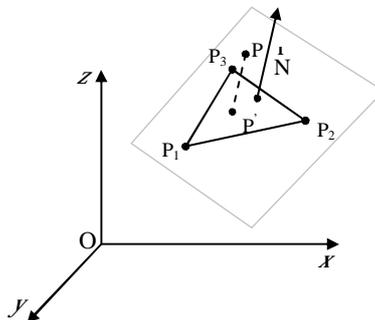


Figure IV.11 : Projection d'un point sur le plan défini par un triangle.

$$\vec{OP} = \vec{OP} + k \cdot \vec{N} \quad \text{et} \quad k = \frac{\vec{P}_1 P \cdot \vec{N}}{\vec{P}_1 P \cdot \vec{N}}$$

IV.6.2.3. Vérification de l'appartenance de la projection d'un point à l'intérieur d'un triangle

Soit u et v les coordonnées du point P' par rapport au repère $(P_1, \vec{P}_1 P_2, \vec{P}_1 P_3)$ défini par le sommet P_1 et les deux vecteurs $\vec{P}_1 P_2$ et $\vec{P}_1 P_3$ (Figure IV.12).

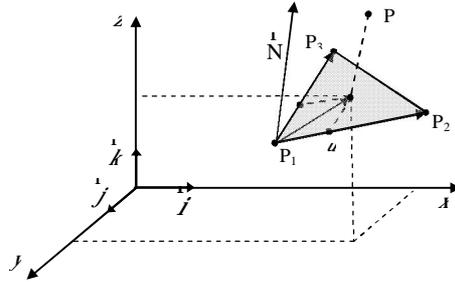


Figure IV.12 : Calcul des coordonnées du point P' par rapport au repère lié à un triangle

Dans ce cas on dit que P' est à l'intérieur du triangle seulement si : ($u \geq 0$) et ($v \geq 0$) et ($u + v \leq 1$)

IV.7. Programmation et test de performances

Le langage de programmation choisi est le MatLab à cause de sa grande richesse en fonctions prédéfinies ce qui nous permet de tester rapidement l'algorithme et effectuer les corrections nécessaires, comme il dispose aussi des outils qu'il faut pour la visualisation des résultats. Le programme MathLab ainsi développé pourra être utilisé plus tard par exemple pour la réalisation d'application autonome ou de module intégrable dans des logiciels de CFAO.

Le principe adopté pour effectuer les tests est simple, il suffit de générer une ou plusieurs surfaces gauches au format STL (triangulation), pour simuler le modèle théorique, et un nuage de points idéal (Figure IV.13) auquel nous pouvons ajouter des perturbations pour simuler des défauts de forme ou des erreurs d'acquisition [4, 8]. Si on éloigne le nuage de points de la surface, avec l'application d'une transformation rigide, la transformation finale fournie par le programme doit être l'inverse de cette dernière.

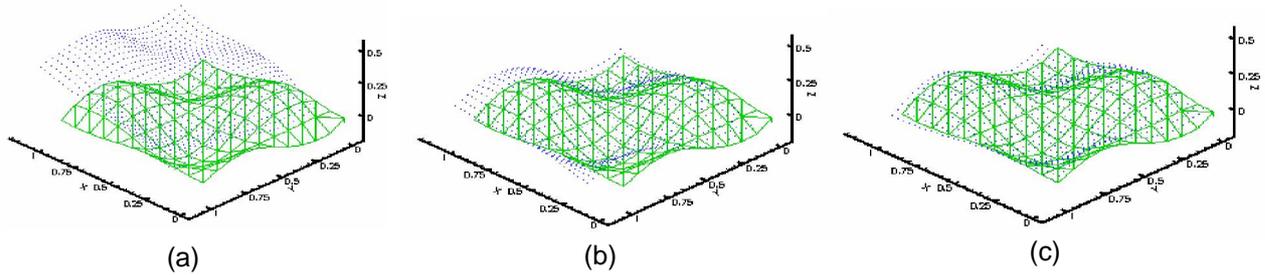


Figure IV.13 : Le nuage de points associé au modèle de la surface théorique au format STL:

(a) position initiale, (b) position après 5 itérations, (c) position après 10 itérations.

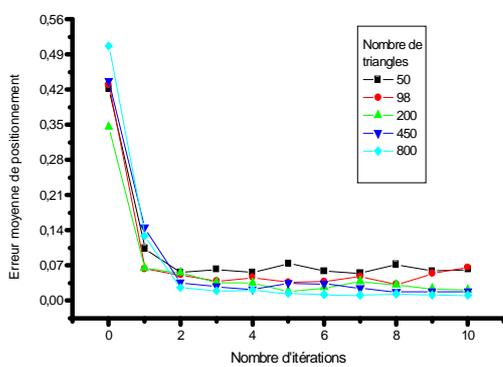


Figure IV.14 Erreur de position moyenne finale en fonction du nombre d'itération et du nombre de triangles

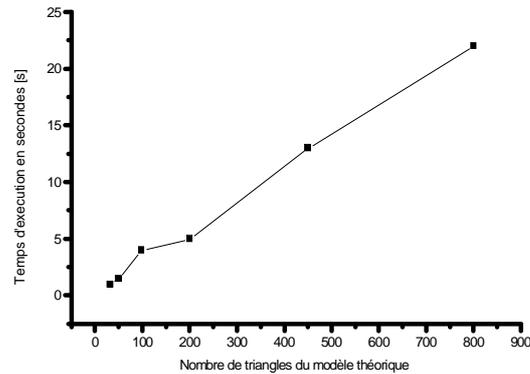


Figure IV.15 : Temps d'exécution en fonction du nombre de Triangles du modèle théorique

Les paramètres testés étaient : la fidélité, la convergence...etc. les figures et le tableau ci-dessous résument une partie des résultats obtenus :

Déplacement initial suivant les axes x, y, z [mm]			Rotation initiale autour des axes x, y, z [deg.]			Erreur de position moyenne initiale	Erreur de position moyenne finale
X	Y	Z	R _x	R _y	R _z		
0.1	0.1	0.1	25	0	0	0.3080	0.0217
0.1	0.1	0.1	0	25	0	0.0676	0.0217
0.1	0.1	0.1	0	0	25	0.3510	0.0173
-0.1	-0.1	-0.1	25	0	0	0.1260	0.0356
0.1	-0.1	0.1	25	0	0	0.3360	0.0149
0.1	0	0.1	25	0	0	0.3360	0.0131

Tableau IV.1 : Erreur moyenne initiale et finale de position pour différents cas de position initiale

Comme on peut le constater, la Figure IV.14 montre que le programme converge rapidement sur une solution stable après un maximum de cinq itérations. L'erreur maximale après convergence est de l'ordre de 0.01 mm ce qui est très acceptable pour un bon nombre d'applications. Si on observe la variation du nombre d'itérations en fonction du nombre de triangles qui forment la surface théorique, on peut dire qu'il n'a pas une influence significative, mais il reste un peu réduit pour un nombre élevé de triangles.

La Figure IV.15 montre la variation du temps d'exécution en fonction du nombre de triangles et elle nous permet de voir que ce temps augmente avec l'augmentation du nombre de triangles ce qui est logique si on sait que l'étape qui prend le plus de temps d'exécution est l'étape du calcul des projections des points sur la surface et qui est liée directement au nombre de triangles. La valeur du temps d'exécution pour 800 triangles par exemple est environ 20 secondes, valeur qui est assez petite et que l'on peut réduire d'avantage si on adopte une stratégie pour le calcul des projections.

Le tableau IV.1 contient l'erreur de position finale pour différentes positions initiales du nuage de points, ce qui nous permet d'avoir une idée sur l'influence et la sensibilité du programme envers le choix de la solution initiale. D'après ces résultats on peut conclure que le programme se comporte bien et converge pour tous les cas traités. Toute fois nous pouvons obtenir des résultats meilleurs si nous utilisons une des techniques présentées au chapitre précédent (estimées à partir des axes principaux, navigation visuelle,...etc.) pour le choix de la solution initiale quoi que le programme perdra un peu de sa simplicité.

IV.8. Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons fait un tour d'horizon des principales méthodes d'association d'élément géométrique à des données géométriques (nuage de points). La méthode des petits déplacements malgré sa simplicité, qui a fait d'elle la méthode la plus utilisée pour les logiciels des MMT, reste un peu limitée par la condition qui impose son utilisation dans un repère local. La méthode non linéaire quant à elle n'impose pas de condition sur les repères mais son caractère non linéaire pose de sérieux problèmes de programmation surtout pour des surfaces de géométrie complexe comme les surfaces gauches. La troisième méthode traitée est la méthode ICP qui est une méthode assez nouvelle qui converge facilement vers un minimum local et qui est facile à mettre en œuvre surtout avec le choix qu'on a fait pour la modélisation de la surface théorique (format STL). Tout ceci, fait de cette méthode la plus favorite pour être utilisée pour notre problème.

Nous avons aussi présenté brièvement l'étape de réalisation de notre programme ainsi que son test. Le but final de cette phase est de réaliser un programme pour tester l'algorithme proposé. Pour cette raison nous avons utilisé l'outil MATLAB qui permet l'élaboration et la modification rapide de programme. Le test effectué à la fin a montré que notre programme a de bonnes performances, particulièrement pour la convergence, et ces performances peuvent être améliorées d'avantage.

IV.9. Références bibliographiques

- [1] VI. Moron, Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996.

- [2] S. Boukebbab, Contribution à l'étude des discontinuités présentes dans les mécanismes en vue d'une coopérative-engineering, thèse de doctorat, ENSAM d'Aix en Provence, Juillet 1998.
- [3] P. Bourdet, Logiciel des machine a mesurer tridimensionnelles, technique de l'ingénieur, R 1316, Editions techniques.
- [4] P. Bourdet, Cour sur la Spécification Géométrique des Produits (GPS), Département de Génie Mécanique de L'École Normale Supérieure de Cachan, Février 2001
- [5] T. M. Tucker, T. R. Kurfess, Newton method for parametric surface registration, Part I. Theory, ELSEVIER, computer-aided design, p.107-114, 35(2003).
- [6] T. M. Tucker, T. R. Kurfess, Newton method for parametric surface registration, Part V. Experimental validation, ELSEVIER, computer-aided design, p.115-120,35 (2003).
- [7] J. J. Dennis, R. Schnabel, Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations. Philadelphia: SIAM, 1996.
- [8] H. Talbi, A. Layeb, Un réseau neurones pour la mise en correspondance des primitives en recalage d'images, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en informatique, département d'informatique, université Mentouri, Constantine, Juin 2000.
- [9] P. Besl, N. McKay, A Method for Registration of 3-D shapes, Trans. PAMI, Vol. 14, No. 2, 1992.
- [10] S. Lavalee, R. Szeliski, Recovering the position and orientation of free- form object from image contours using 3D distance maps. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, N°4, p.378-390, 1995.
- [11] S. Weik, Registration of 3-D Partial Surface Models Using Luminance and Depth Information, Proc. 3DIM, 1997.
- [12] T. Masuda, K. Sakaue, N. Yokoya, Registration and Integration of Multiple Range Images for 3-D Model Construction, Proc. CVPR, 1996.
- [13] S. Rusinkiewicz, M. Levoy, Efficient Variants of the ICP Algorithm, Stanford University.
- [14] K. Pulli, Multiview Registration for Large Data Sets, Proc. 3DIM, 1999.
- [15] P. J. Rousseuw, A. M. Leroy, Robust registration & Outlier Detection, New York: John Wiley & Sons, Wiley Series in probability and statistics, 1987.
- [16] C. Dorai, J. Weng, A. K. Jain, Optimal registration of multiple range views. I proceeding, 12th International Conferences on Pattern Recognition, Los Alamos, California: IEEE Computer Society press, p.569-571, 1994.
- [17] Z. Zhang, Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. International journal of computer Vision, Vol. 13, N°2, p. 119-152, 1994.
- [18] H. Bouchenitfa, S. Boukebbab, H. Boughouas, « Mise en place de modèle pour gabarit virtuel pour surface gauche », Conférence Internationale de Mécaniques Avancées, CIMA'2004, 30 Novembre-02 Décembre 2004, Boumerdes, Algérie, 2004.
- [19] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, J.M. Linares, «Towards an automated inspection method of complex surface by using the Iterative Closest point algorithm» 13^{ème} Congrès International de Métrologie, 19-21 Juin 2007, Lille, France

Chapitre V

Analyse et compensation des erreurs

V.1. Introduction

Le but recherché dans cette partie est d'éliminer ou réduire les écarts issus de la machine à des valeurs tolérables. Pour atteindre ce but plusieurs méthodes sont utilisées qui consistent à effectuer une correction des coordonnées d'usinage en se basant sur des modèles d'erreurs de la machine obtenus expérimentalement [1] ou par analogie avec d'autres machines dont les erreurs sont mieux maîtrisées [2].

L'approche développée dans notre travail se base sur l'idée d'utiliser un modèle contenant des erreurs opposées à celles générées par la machine. Au passage dans cette dernière les erreurs vont s'additionner pour se compenser et s'auto-éliminer (figure V.1) [3].

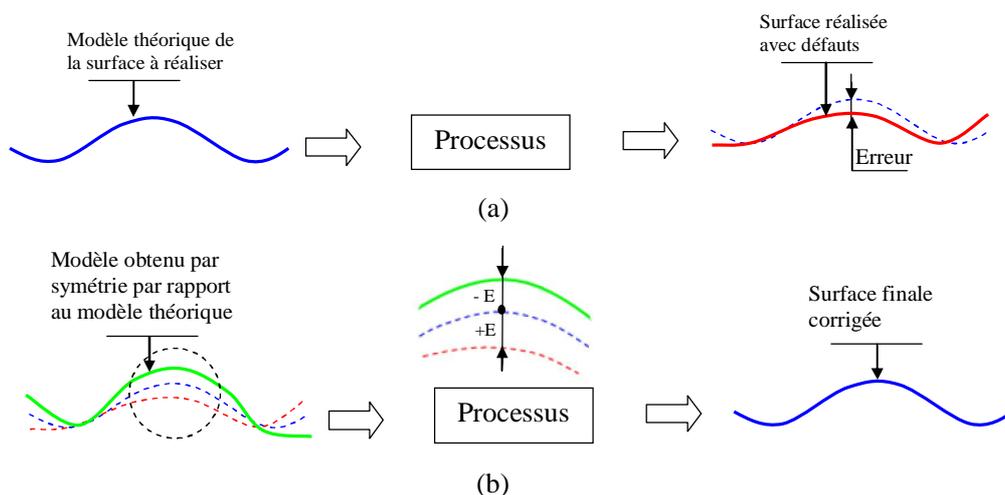


Figure V.1 : Processus de réalisation, (a) sans compensation, (b) avec compensation.

Le modèle utilisé est obtenu par symétrie au modèle réalisé par la machine, par rapport à la surface du modèle théorique. Cette symétrie est obtenue par

déformation de la surface théorique au nuage de points généré par symétrie au nuage de points issu de l'acquisition du modèle réalisé et association avec le modèle théorique (figure V.2)

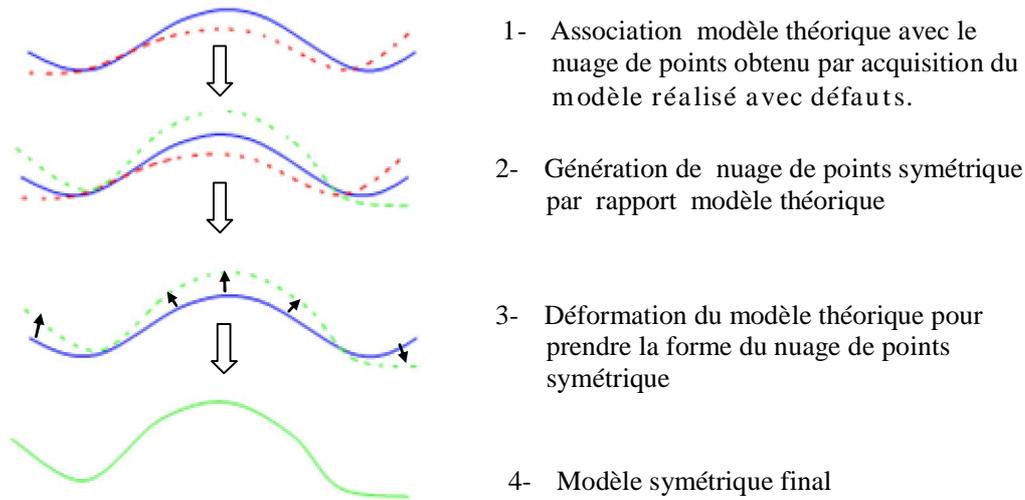


Figure V.2 : Génération du modèle symétrique.

Selon la figure V.2, la première phase étant réalisable avec la méthode ICP présentée précédemment. Pour la deuxième phase le principe est de calculer le point symétrique pour chaque point par rapport au triangle dont la projection verticale appartient.

Ce qui reste à faire donc c'est de trouver une méthode pour déformer le modèle théorique pour prendre la forme du nuage de points symétrique.

V.2. Approximation par éléments finis

Le principe des méthodes d'approximation consiste à remplacer la résolution d'un problème continu à un nombre infini d'inconnues par celle d'un problème à un nombre fini d'inconnues : les coordonnées généralisées a_i . On détermine les coefficients inconnus a_i définissant la "meilleure" approximation en minimisant un critère d'erreur, ou encore en exprimant les conditions d'orthogonalité de l'erreur avec des fonctions de pondération données [4].

Pour construire une fonction « approchée », nous pouvons donc :

- Choisir un ensemble fini de fonctions dépendant de n paramètres a_i : $u(x, a_1, a_2, \dots, a_n)$
- Déterminer les paramètres a_1, a_2, \dots, a_n pour minimiser l'erreur, par exemple en faisant coïncider $u_{ex}(x)$ et $u(x)$ en n points x_1, x_2, \dots, x_n c'est-à-dire en annulant $e(x)$ en ces n points (figure V.3).
 - Les paramètres a_i sont les paramètres généraux de l'approximation
 - Les paramètres u_i sont les paramètres nodaux ou variables nodales de l'approximation

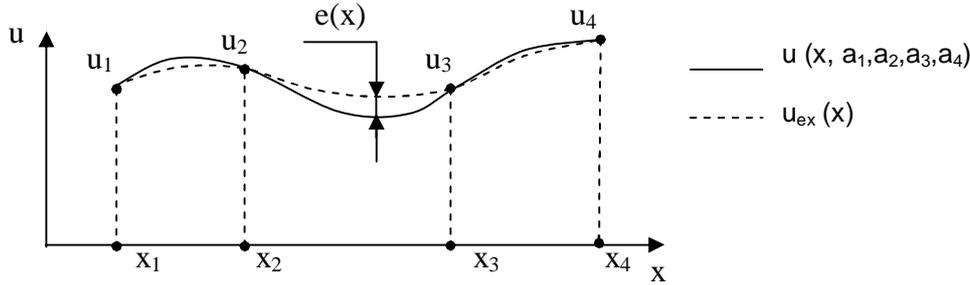


Figure V.3 : Exemple d'une Approximation nodale.

Lorsque le nombre de nœuds, et donc de paramètres u_i , devient important la construction d'une fonction approchée $u(x)$ devient difficile. Le problème se complique encore si le domaine V a une forme complexe et si la fonction $u(x)$ doit satisfaire des conditions aux limites sur la frontière.

La méthode d'approximation par sous-domaines simplifie la construction de $u(x)$ est s'adapte très bien au calcul par ordinateur.

Elle consiste à :

- Identifier un ensemble de sous-domaines V^e du domaine V :
- Définir une fonction approchée $u_e(x)$ différente sur chaque sous-domaine V^e par la méthode des approximations nodales. Chaque fonction peut dépendre des variables nodales attachées à des nœuds situés sur d'autres sous-domaines comme c'est le cas dans l'approximation de type « spline »

la méthode d'approximation par éléments finis est une méthode d'approximation par sous-domaines qui présente les particularités suivantes [4]:

- l'approximation nodale sur chaque sous-domaine V^e ne fait intervenir que les variables nodales attachées à des nœuds situés sur V^e et sur sa frontière.
- Les fonctions approchées $u_e(x)$ sur chaque sous-domaine sont construites de manière à être continues sur V^e et elles satisfont des conditions de continuité entre les différents sous-domaines.
- Les sous-domaines V^e sont appelés des éléments.
- Les points en lesquels la fonction approchée $u_e(x)$ coïncide avec la fonction exacte $u_{ex}(x)$ sont les nœuds d'interpolation ou points nodaux.
- Les coordonnées x_i de ces nœuds sont les coordonnées nodales.
- Les valeurs $u_i = u_e(x_i) = u_{ex}(x_i)$ sont les variables nodales.

Pour appliquer la méthode d'éléments finis il faut donc tout d'abord définir analytiquement la géométrie de tous les éléments, en suite construire les fonctions d'interpolations $N_i(x)$ correspondant à chaque élément.

V.2.1. Exemples

Exemple V.1 : approximation à une dimension par éléments finis

Nous cherchons une approximation de la fonction de la figure V.4 qui passe par les points $u_1(x_1)$, $u_2(x_2)$, $u_3(x_3)$, $u_4(x_4)$.

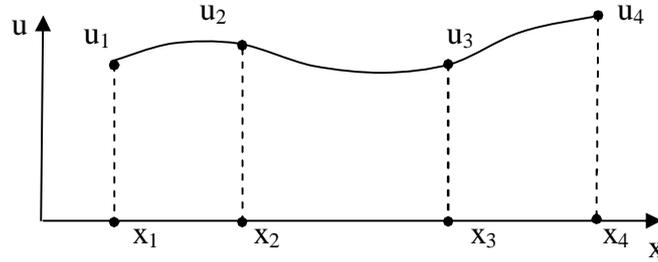


Figure V.4 : Fonction continue.

Définition géométrique des éléments :

Nœuds : 1, 2, 3, 4.

Coordonnées nodales : x_1, x_2, x_3, x_4

Domaine complet : $V : x_1 \leq x \leq x_4$

Éléments : $V^1 : x_1 \leq x \leq x_2$
 $V^2 : x_2 \leq x \leq x_3$
 $V^3 : x_3 \leq x \leq x_4$

Construction des fonctions approchées $u^e(x)$:

Variables nodales : u_1, u_2, u_3, u_4

Fonctions approchées $u^e(x)$ linéaires sur chaque élément.

Élément 1 (domaine V^1) :

$$u^1(x) = N_1 u_1 + N_2 u_2 \tag{V.1}$$

Où N_1 et N_2 sont des fonctions linéaires en x

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} \quad N_1(x_1) = 1 \quad N_1(x_2) = 0 \\ N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad N_2(x_1) = 0 \quad N_2(x_2) = 1 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \end{array} \right. \tag{V.2}$$

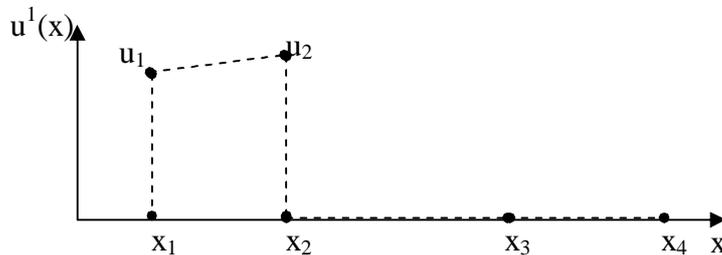


Figure V.5 : Élément 1 (domaine V^1).

Élément 2 (domaine V^2) :

$$u^2(x) = N_1 u_2 + N_2 u_3 \tag{V.3}$$

Où :

$$\begin{cases} N_1 = \frac{x - x_3}{x_2 - x_3} ; \\ N_2 = \frac{x - x_2}{x_3 - x_2} \\ x_2 \leq x \leq x_3 \end{cases} \tag{V.4}$$

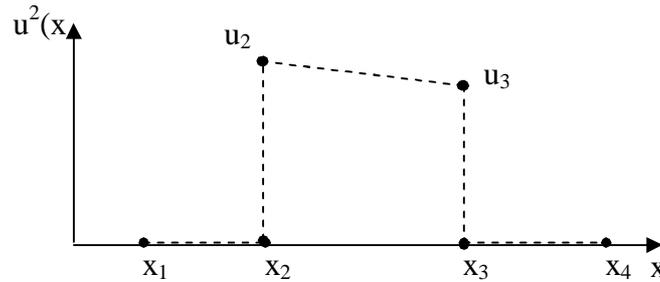


Figure V.6 : Élément 2 (domaine V^2).

Eléments 3 (domaine V^3) :

$$u^3(x) = N_1 u_3 + N_2 u_4 \tag{V.5}$$

Où :

$$\begin{cases} N_1 = \frac{x - x_4}{x_3 - x_4} ; \\ N_2 = \frac{x - x_3}{x_4 - x_3} \\ x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases} \tag{V.6}$$

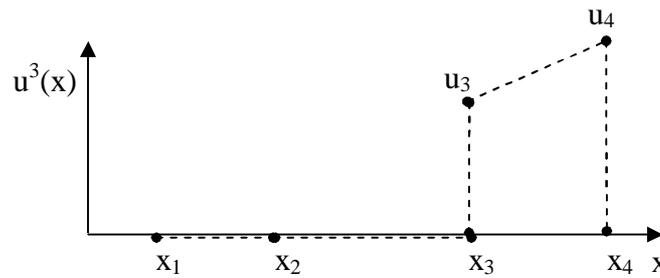


Figure V.7 : Élément 3 (domaine V^3).

Les fonctions $u^e(x)$ et $N_i(x)$ sont différentes pour chaque élément V^e ; ces fonctions sont nulles en dehors de l'élément V^e . La somme des fonctions $u^1(x)$, $u^2(x)$ et $u^3(x)$ donne la fonction approchée $u(x)$ sur l'ensemble du domaine V (figure V.8).

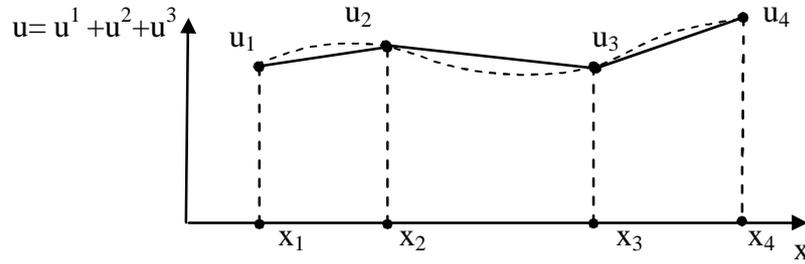


Figure V.8 : Fonction approchée obtenue après assemblage des éléments

Exemple V.2 : approximation d'une fonction en 2D

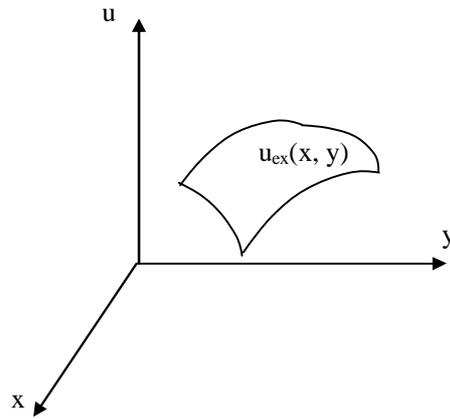


Figure V.9 : Fonction continue exacte.

Nous voulons construire une approximation par éléments finis pour une fonction continue $u_{ex}(x, y)$ (figure V.9) pour cela nous utilisons des éléments triangulaires plans (figure V.10).

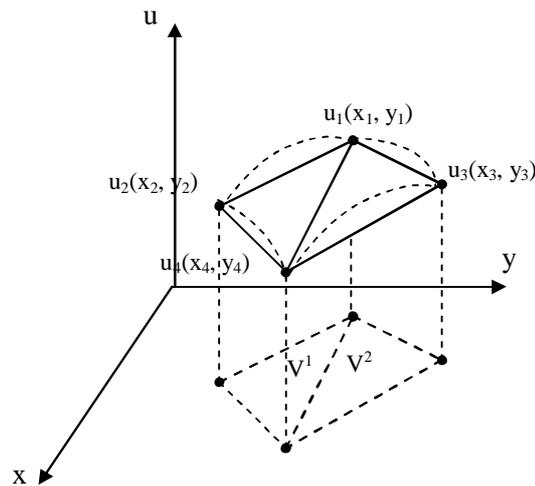


Figure V.10 : Approximation par éléments finis triangulaires de la fonction

Élément V¹ :

Triangle : 1-2-4

Fonction approchée : $u' = N_1(x, y)u_1 + N_2(x, y)u_2 + N_4(x, y)u_4$

V.7

Elément V^2 :

Triangle : 2-3-4

Fonction approchée : $u^i = N_2(x, y)u_2 + N_3(x, y)u_3 + N_4(x, y)u_4$ V.8

Les fonctions N sont des fonctions de base qui prennent la valeur 1 aux nœuds est s'annulent à l'extérieur des éléments.

V.2.2. Résolution d'un problème physique par la méthode des éléments finis

Suivant la formulation du problème physique, les méthodes d'approximation peuvent se classer en deux catégories principales :

Méthodes universelles : utilisables dans le cas d'une formulation locale du problème c'est-à-dire sous forme d'équations aux dérivés partielles avec conditions aux limites associées (méthode de Galerkin, moindre carrés, collocation,...)

Méthodes variationnelles : utilisables dans le cas d'une formulation *globale* du problème c'est-à-dire sous forme de conditions de stationnarité de fonctionnelles ou énergie potentielles (méthode de Ritz, Kantorovitch, Trefftz,...).

Parmi les méthodes variationnelles la méthode Ritz et certainement la plus simple et la plus généralement utilisée. C'est également la plus importante car elle constitue généralement le fondement des méthodes aux éléments finis utilisées en analyse des structures [5].

La solution exacte du problème variationnel est celle qui, appartenant à l'espace des fonctions admissibles satisfaisant les conditions aux limites cinématiques (du type déplacement imposé), rend extrémale l'énergie potentielle totale [6,7].

Étapes de résolution :

- Formulation du problème mathématiquement.
- Maillage : découpage du domaine en éléments.
- Choix des fonctions de base.
- Calcul des matrices élémentaire : k, f, m...etc.
- Assemblage des matrices élémentaires.
- Prise en compte des conditions aux limites sur les inconnus.
- Résolution du système linéaire.
- Détermination des réactions aux limites.

V.3. Cas d'application

V.3.1. Cas à 2D : analyse de contraintes planes

Dans cet exemple nous traitons le cas d'une analyse de contraintes plane [5] selon les étapes vues plus haut.

1) choix du maillage :

Nous subdivisons le domaine en éléments finis plans de forme triangulaire (figure V.11).

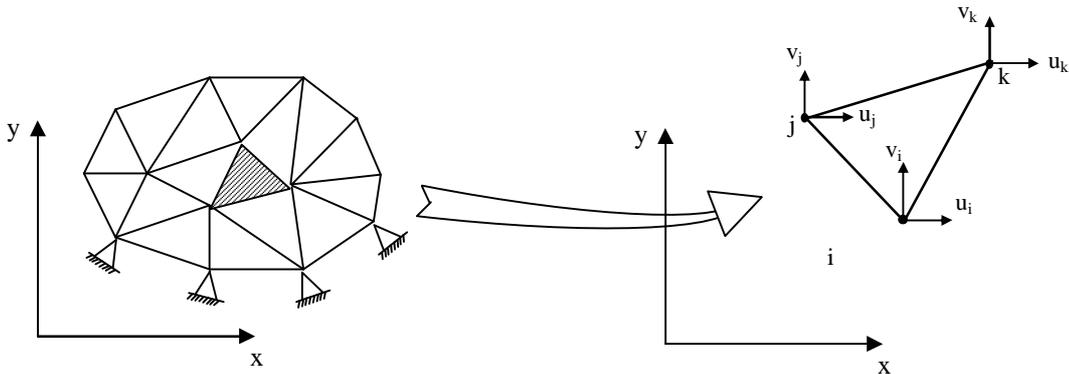


Figure V.11 : Maillage du domaine.

2) approximation du champ de déplacement :

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{N}_1 & \mathcal{N}_2 & \mathcal{N}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathcal{N}_1 & \mathcal{N}_2 & \mathcal{N}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ v_i \\ v_j \\ v_k \end{Bmatrix} \quad \text{V.9}$$

$$[u] = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \quad [q] = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ v_i \\ v_j \\ v_k \end{Bmatrix}, \quad [M] = \begin{bmatrix} \mathcal{N}_1 & \mathcal{N}_2 & \mathcal{N}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathcal{N}_1 & \mathcal{N}_2 & \mathcal{N}_3 \end{bmatrix}$$

$$[u] = [M][q]$$

avec :

$$\begin{cases} \mathcal{N}_1(x,y) = \frac{1}{2A} [(y_k - y_j)(x_j - x) - (x_k - x_j)(y_j - y)] \\ \mathcal{N}_2(x,y) = \frac{1}{2A} [(y_i - y_k)(x_k - x) - (x_i - x_k)(y_k - y)] \\ \mathcal{N}_3(x,y) = \frac{1}{2A} [(y_j - y_i)(x_i - x) - (x_j - x_i)(y_i - y)] \\ 2A = [(x_k - x_j)(y_i - y_j) - (x_i - x_j)(y_k - y_j)] \end{cases} \quad \text{V.10}$$

Pour un état d'équilibre l'énergie potentielle totale est :

$$V = \int_V w[\varepsilon] dv - \int_V f^r u dv - \int_{S_\sigma} P^r u ds \quad \text{V.11}$$

Avec :

$$w[\varepsilon] = w_c[\sigma] = \frac{1}{2} \sigma^T \varepsilon$$

Avec :

$$\sigma = C\varepsilon, \quad \text{pour un état de contrainte plane} \quad C = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$$

$$w[\varepsilon] = \frac{1}{2} \varepsilon^T C \varepsilon$$

$$\varepsilon = D u, \quad D = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = D u$$

Pour un élément fini

$$V^e = \int_V \frac{1}{2} ([\varepsilon]^T [C] [\varepsilon])^e dv - \int_V ([f]^T [u])^e dv - \int_{S_\sigma} ([P]^T [u])^e ds \quad \text{V.11}$$

$$[\varepsilon]^e = [D] [u]^e = [D] [M] [\varrho]^e = [B]^e [\varrho]^e$$

$$[B]^e = [D] [M]$$

$$[B]^e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathcal{J}_{23} & \mathcal{J}_{31} & \mathcal{J}_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathcal{X}_{32} & \mathcal{X}_{13} & \mathcal{X}_{21} \\ \mathcal{J}_{23} & \mathcal{J}_{31} & \mathcal{J}_{12} & \mathcal{X}_{32} & \mathcal{X}_{13} & \mathcal{X}_{21} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$X_{ij} = X_i - X_j$$

$$Y_{ij} = Y_i - Y_j$$

Donc :

$$V^e = \int_{v'} \frac{1}{2} ([q]^T [B]^T [C] [B] [q])^e dv - \int_v [M]^{eT} [A] dv - \int_{S_\sigma} [M]^{eT} [\bar{P}] ds$$

$$V^e = \frac{1}{2} q^{eT} K^e q^e - q^{eT} F^e \quad \text{V.12}$$

Avec

K^e Matrice de rigidité élémentaire

$$K^e = \int_{v'} ([B]^T [C] [B])^e dv = \int_{\substack{\text{aire du} \\ \text{triangle}}} ([B]^T [C] [B])^e dx dy \quad \text{V.13}$$

F^e Vecteur des forces élémentaires

$$F^e = \int_v [M]^{eT} [A] dv - \int_{S_\sigma} [M]^{eT} [\bar{P}] ds \quad \text{V.14}$$

D'où la condition de stationnarité :

$$\nabla_q V^e = \frac{\partial V^e}{\partial q_i} = 0$$

Donc

$$K^e q^e - F^e = 0, \quad \boxed{K^e q^e = F^e} \quad \text{V.15}$$

V.3.2. Cas dynamique

Les équations de Lagrange permettent d'obtenir les équations discrètes du mouvement, soit pour une structure sans amortissement [8] :

$$\frac{\partial}{\partial} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = F_i \quad \text{V.16}$$

A l'échelle élémentaire nous avons

$$U^e = \frac{1}{2} q^{eT} K^e q^e \quad \text{V.17}$$

Et

$$T^e = \frac{1}{2} \int \rho \dot{e}^T \dot{e} dv \quad \text{V.18}$$

Par ailleurs on a : $\mathcal{L}_e = N^e \cdot \mathcal{L}$

D'où

$$T^e = \frac{1}{2} \mathcal{L}^T M^e \mathcal{L} \quad \text{Avec} \quad M^e = \int_{V^e} \rho N^e N^e dv$$

D'où finalement :

$$\boxed{M \mathcal{L} + Kq = F(t)} \quad \text{V.19}$$

V.3.3. Assemblage des éléments

Le but de l'opération d'assemblage est de relier les différents éléments pour former un seul objet continu, mathématiquement ceci revient à assembler les systèmes d'équations élémentaires relatifs à tous les éléments pour construire un seul système contenant toutes les données est les inconnues du problème.

Pour le cas de surfaces il revient à assembler les surfaces élémentaires pour former une seule surface continue (figure V.12)

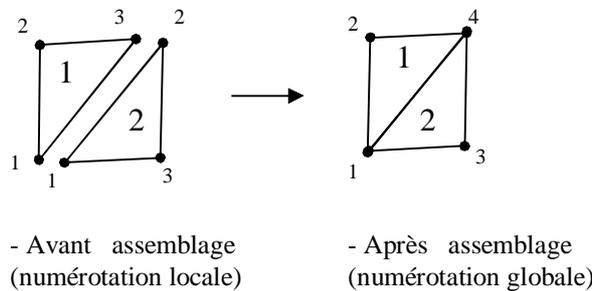


Figure V.12 : Assemblage de deux éléments triangulaires

– le système élémentaire pour l'élément 1 est :

$$\begin{bmatrix} \overset{1}{a}_1 & \overset{1}{a}_2 & \overset{1}{a}_3 \\ \overset{1}{a}_{21} & \overset{1}{a}_{22} & \overset{1}{a}_{23} \\ \overset{1}{a}_{31} & \overset{1}{a}_{32} & \overset{1}{a}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overset{1}{z}_1 \\ \overset{1}{z}_2 \\ \overset{1}{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{1}{b}_1 \\ \overset{1}{b}_2 \\ \overset{1}{b}_3 \end{bmatrix} \quad \text{V.20}$$

– le système élémentaire pour l'élément 2 est :

$$\begin{bmatrix} \overset{2}{a}_1 & \overset{2}{a}_2 & \overset{2}{a}_3 \\ \overset{2}{a}_{21} & \overset{2}{a}_{22} & \overset{2}{a}_{23} \\ \overset{2}{a}_{31} & \overset{2}{a}_{32} & \overset{2}{a}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overset{2}{z}_1 \\ \overset{2}{z}_2 \\ \overset{2}{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{2}{b}_1 \\ \overset{2}{b}_2 \\ \overset{2}{b}_3 \end{bmatrix} \quad \text{V.21}$$

– le système global pour les deux éléments assemblés est :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad \text{V.22}$$

D'après la figure V.12 et la condition présentée au paragraphe précédent, après assemblage on peut écrire :

$$\begin{aligned} z_1 &= z_1^1 = z_1^2 \\ z_2 &= z_2^1 \\ z_3 &= z_3^2 \\ z_4 &= z_4^1 = z_4^2 \end{aligned}$$

Prenons maintenant la première équation des deux systèmes élémentaires, et remplaçons les z_1^1 et z_4^1 par les coordonnées z globales à partir des égalités ci-dessus.

$$\begin{aligned} a_{11}^1 z_1 + a_{12}^1 z_2 + a_{13}^1 z_3 &= b_1^1 \\ a_{11}^2 z_1 + a_{12}^2 z_4 + a_{13}^2 z_3 &= b_1^2 \end{aligned}$$

En faisant la somme des deux cotés des deux équations deux à deux on trouve :

$$(a_{11}^1 + a_{11}^2) z_1 + a_{12}^1 z_2 + a_{13}^2 z_3 + (a_{13}^1 + a_{13}^2) z_4 = (b_1^1 + b_1^2)$$

Par analogie avec la première équation du système d'équation globale, on peut déduire que :

$$\begin{aligned} a_{11} &= (a_{11}^1 + a_{11}^2) \\ a_{12} &= a_{12}^1 \\ a_{13} &= a_{13}^2 \\ a_{14} &= (a_{13}^1 + a_{13}^2) \\ b_1 &= (b_1^1 + b_1^2) \end{aligned}$$

De la même façon on calcule les autres constantes pour aboutir au système d'équation globale des deux éléments assemblés :

$$\begin{bmatrix} (a_{11}^1 + a_{11}^2) & a_{12}^1 & a_{13}^2 & (a_{13}^1 + a_{13}^2) \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 & a_{23}^1 & 0 \\ a_{31}^2 & a_{32}^2 & a_{33}^2 & 0 \\ (a_{31}^1 + a_{31}^2) & 0 & 0 & (a_{33}^1 + a_{33}^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (b_1^1 + b_1^2) \\ b_2^1 \\ b_3^2 \\ (b_4^1 + b_4^2) \end{bmatrix} \quad \text{V.23}$$

V.4. Modèles déformables

Pour réaliser la compensation des défauts telle qu'elle a été décrite dans l'introduction il faudra trouver une méthode basée sur les éléments finis pour effectuer une déformation contrôlée du modèle théorique, cette idée nous a conduit vers les modèles déformables.

Un modèle déformable est une structure (courbe, surface ou volume), paramétrique ou définie par une liste de points issus d'une discrétisation, dont la position est obtenue par la minimisation d'une énergie qui dépend de la distance aux données (points) et de diverses contraintes de régularisation ou fixées par l'utilisateur Il devient alors possible de faire évoluer la géométrie de ce modèle pour qu'il s'adapte sous l'effet de l'attraction des points (figure V.13).

Tout en conservant une forme de référence et ce, sous le contrôle interactif de l'utilisateur [9].

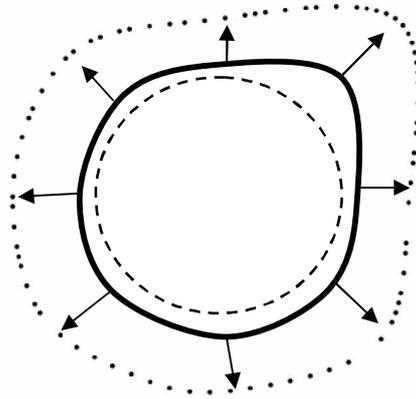


Figure V.13 : Effet des forces d'attraction des points sur la surface du modèle

Dans ce qui suit nous allons voir le cas d'un modèle déformable d'une surface ouverte qui peut être définie par une fonction scalaire $z(x,y)$ ou z est le déplacement latéral de la surface. Une telle surface se comporte approximativement comme une membrane ou une tôle à petite épaisseur dont l'énergie de déformation est donnée par la fonctionnelle suivante :

$$w_p(z) = \iint \alpha_{10} |z_x|^2 + \alpha_{01} |z_y|^2 + \beta_{20} |z_{xx}|^2 + \beta_{11} |z_{xy}|^2 + \beta_{02} |z_{yy}|^2 dx dy$$

Où les indices x et y représentent respectivement les dérivés suivant les directions x et y . Les valeurs des fonctions α_{10} et α_{01} déterminent les tensions respectivement suivant les directions x et y . les fonctions β_{02} et β_{20} fixent la rigidité en flexion respectivement suivant les directions x et y [9].

L'expression V.24 est celle d'une spline contrôlable mais elle peut être attribuée à un matériau définie par les vecteurs des déformations et des contraintes suivants :

$$\varepsilon^j = \left[\frac{\partial z^j}{\partial x}, \frac{\partial z^j}{\partial y}, \frac{\partial^2 z^j}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 z^j}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 z^j}{\partial y^2} \right]^T$$

$$\sigma^j = D^j \varepsilon^j = \begin{bmatrix} \alpha_{10}^j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{01}^j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{20}^j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_{11}^j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_{02}^j \end{bmatrix} \varepsilon^j$$

L'expression de l'énergie totale est :

$$U(z) = w_p(z) + w_{ext}(z)$$

Où

$$w_{ext}(z) = - \iint z f(x, y) dx dy$$

$w_{ext}(z)$ représente le travail des forces externes qui sont la source d'attraction de la surface par les points composant le nuage de points.

La solution est obtenue lorsque l'énergie totale est stationnaire et la surface prend sa forme finale mais il y a le risque d'attendre un minimum local pour cela l'idée est d'aller progressivement vers la solution finale ceci en introduisant un facteur ce qui va rendre le problème dynamique ou d'évolution qui converge lorsque l'énergie totale est minimale et le problème devient stationnaire $\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0$.

L'application des équations de Lagrange nous permet d'obtenir l'équation de comportement suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial z}{\partial t} + \delta_z w_p = f(x, y, t)$$

Le premier terme représente les forces d'inertie, le second terme les forces de viscosité ou d'amortissement avec le coefficient d'amortissement γ , le troisième terme représente les forces d'élasticité et $f(x, y, t)$ les forces de traction des points du nuage [9].

La discrétisation par éléments finis nous permet d'aboutir à la forme matricielle suivante :

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + Kq = F_q \tag{V.25}$$

Où la matrice d'amortissement comme pour la matrice des masses sont définies comme suit :

$$M^e = \int_{V^e} \mu N^e N^e dv \tag{V.26}$$

$$C^e = \int_{V^e} \gamma N^e N^e dv \tag{V.27}$$

Le vecteur des forces nodales :

$$f_q^e = \iint_E N^e f \, dx dy \quad \text{V.28}$$

Où la distribution des forces $f(x,y)$ sur un élément est calculé comme suit :

$$f(x,y) = k \left[\rho - \lambda(x_p - y_p) \right] \quad \text{V.29}$$

Avec ρ est un point du nuage et $\lambda(x_p, y_p)$ sa projection sur la surface.

La discrétisation :

Si on utilise pour la discrétisation un élément triangulaire plan de continuité C^1 (figure V.14). Dans cette première étape la surface initiale considérée est une surface plane les variables nodales seront les coordonnées z avec leurs dérivées partielles :

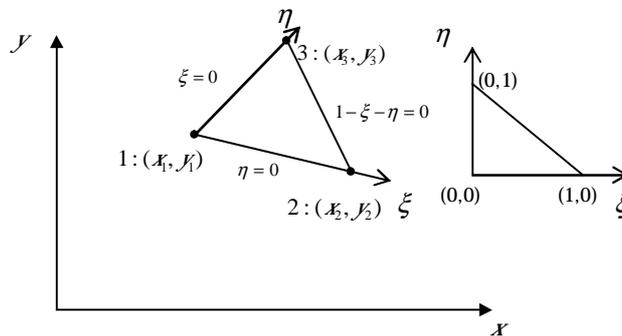


Figure V.14 : Élément triangulaire de continuité

$$q(\lambda) = [z_{,i}, (z_{,x})_{,i}, (z_{,y})_{,i}, (z_{,xx})_{,i}, (z_{,yy})_{,i}, (z_{,xy})_{,i}, (z_{,yy})_{,i}]^T$$

Dans les applications de conception géométrique ou de graphisme le terme d'inertie peut être abandonné dans l'équation globale et ne garder que les termes d'amortissement et d'élasticité

$$C\dot{q} + Kq = F_q$$

L'intégration de cette équation dans le temps peut être effectuée en utilisant un schéma explicite d'Euler du premier ordre [9]. L'évolution du vecteur des variables nodales sera donnée par la relation suivante :

$$q^{(t+\Delta t)} = q^{(t)} + \nabla t (C^{(t)})^{-1} (f_q^{(t)} - k_q^{(t)}) \quad \text{V.30}$$

L'incrément de temps ∇t doit être choisi minutieusement, car trop petit il va ralentir la convergence et trop grand il donne naissance à une instabilité qui risque d'empêcher la convergence.

Le raisonnement effectué jusque là pour une surface ouverte peut être généralisé pour traiter des cas tridimensionnelles avec un modèle de ballon déformable (figure V.15) qui sera défini géométriquement avec une fonction paramétrique [9].

$$x = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]^T$$

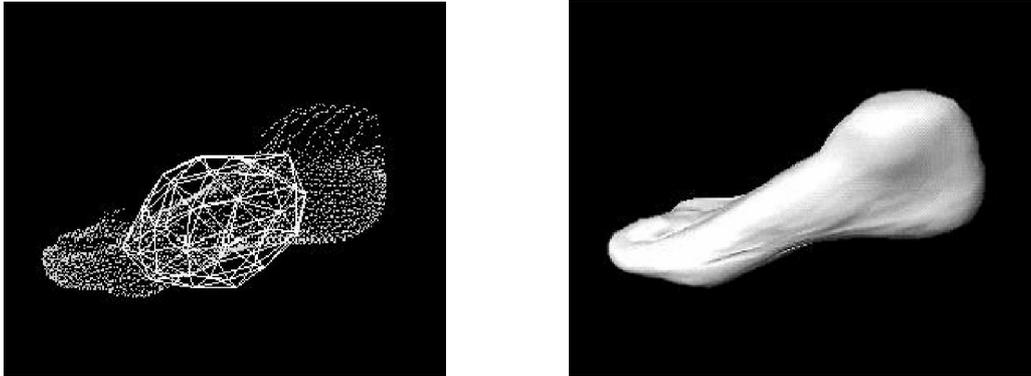


Figure V.15: Modèle du ballon déformable[9]

Et l'énergie de déformation devient :

$$w_p = \iint (\alpha_{10} \|x_u\|^2 + \alpha_{01} \|x_v\|^2 + \beta_{20} \|x_{uu}\|^2 + \beta_{11} \|x_{uv}\|^2 + \beta_{02} \|x_{vv}\|^2) dudv \quad \text{V.30}$$

V.5. Méthode utilisée

La technique des modèles déformables utilisée à l'origine pour simuler graphiquement le comportement d'objet déformable [11], ce qui justifie sa complexité pour ce genre de problèmes, peut être très bien utilisée pour notre problème pour déformer le modèle théorique selon le nuage de points recalculé pour compenser les erreurs et il va sûrement donner de bons résultats.

Mais si nous revenons au problème de départ, qui est l'approximation d'un nuage de points par une surface continue, ce dernier peut être résolu sans passer par la création d'un modèle disposant des propriétés d'un objet physique qui n'est pas notre objectif.

La résolution d'un problème par la méthode des éléments finis, comme nous l'avons vu plus haut, consiste à le faire au niveau des éléments en faisant des approximations puis à calculer la solution globale par assemblage. L'application de ce principe pour notre cas revient à diviser le nuage de points en de petits nuages puis faire une approximation sur chaque nuage de points par une surface élémentaire simple (figure V.16).

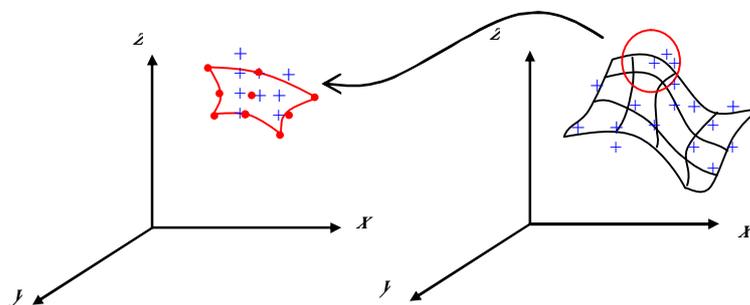


Figure V.16 : Approximation par éléments finis d'une surface

Si nous revenons à l'exemple V.2 et la figure V.10. Nous pouvons déduire une solution au problème d'approximation d'un nuage de points par une surface en remplaçant la surface continue par une autre discrétisée sous forme d'un nuage de points ce qui nous donne la figure V.17.

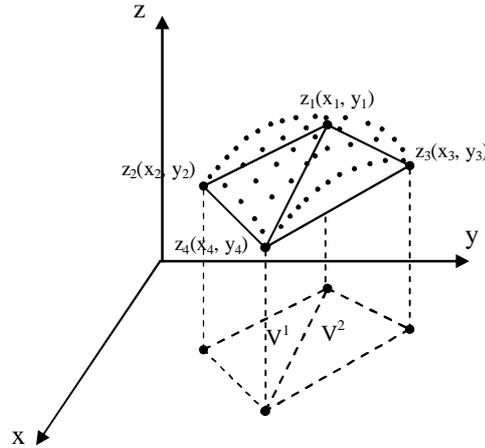


Figure V.17: Principe de l'approximation utilisée

Si nous considérons maintenant un seul élément comme dans la figure V.18 l'approximation est obtenue après optimisation de l'écart e_{p_i} au sens des moindres carrés.

$$e_{p_i} = Z_{p'_i} - Z_{p_i} \quad \text{V.31}$$

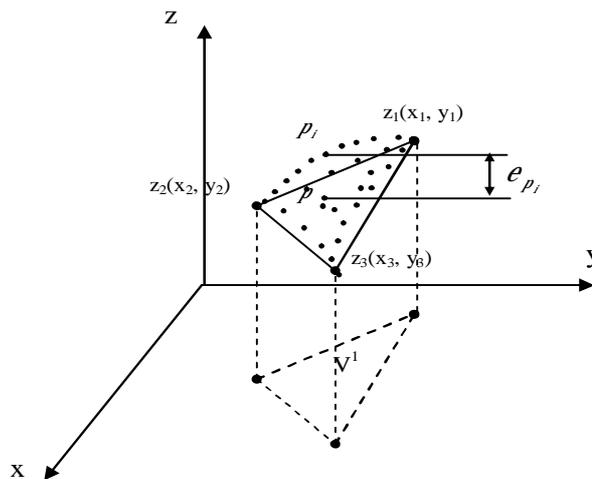


Figure V.18 : Ecart entre un point et un élément

Ceci revient à minimiser $\sum_{i=1}^n e_{p_i}^2$ (n nombre de points) entre le point p_i appartenant au nuage et sa projection p'_i , mathématiquement cela implique que :

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n \dot{e}_{p_i}^2}{\partial z_1} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n \dot{e}_{p_i}^2}{\partial z_2} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n \dot{e}_{p_i}^2}{\partial z_3} = 0 \quad \text{V.32}$$

p_i appartient à l'élément plan triangulaire défini par les trois nœuds. Si nous utilisons une approximation nodale par éléments finis de z_{p_i} , nous obtenons :

$$z_{p_i} = N_1(x, y)z_1 + N_2(x, y)z_2 + N_3(x, y)z_3 \quad \text{V.33}$$

Nous choisissons les fonctions de forme N définies dans V.10

En remplaçant z par sa valeur on obtient

$$e_{p_i} = N_1(x_1, y_1)z_1 + N_2(x_2, y_2)z_2 + N_3(x_4, y_4)z_4 - z_{p_i}$$

Le calcul des dérivées nous donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sum_{i=1}^n \dot{e}_i^2}{\partial z_1} = \sum_{i=1}^n (N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 - z_i) N_1 = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n \dot{e}_i^2}{\partial z_2} = \sum_{i=1}^n (N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 - z_i) N_2 = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n \dot{e}_i^2}{\partial z_3} = \sum_{i=1}^n (N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 - z_i) N_3 = 0 \end{array} \right. \quad \text{V.34}$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \sum N_1 N_1 & \sum N_1 N_2 & \sum N_1 N_3 \\ \sum N_2 N_1 & \sum N_2 N_2 & \sum N_2 N_3 \\ \sum N_3 N_1 & \sum N_3 N_2 & \sum N_3 N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum N_1 z_i \\ \sum N_2 z_i \\ \sum N_3 z_i \end{bmatrix} \quad \text{V.35}$$

Le système d'équations V.35 est linéaire à matrice symétrique, sa résolution par une méthode directe, donne les coordonnées de z_1 , z_2 et z_3 optimales des nœuds 1, 2 et 3. La surface d'approximation globale est obtenue par assemblage des éléments de surfaces.

Exemples 1 : d'approximation de surfaces gauche [12].

La figure V.19 présente le principe de déformation pour le cas d'une surface gauche simple qui commence par une association du nuage de points avec la surface initiale plane puis la déformation de cette dernière avec la méthode par éléments finis pour obtenir à la fin la surface finale.

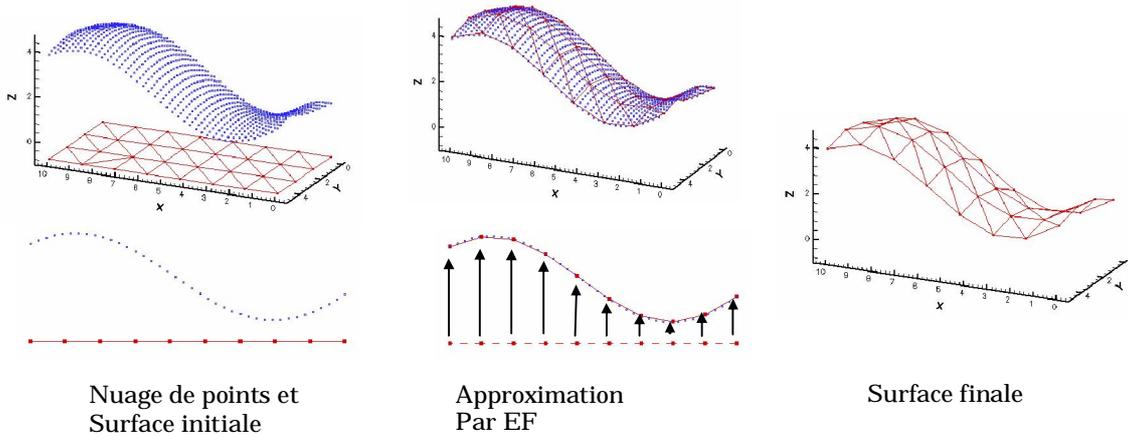


Figure V.19 : Approximation d'une surface ouverte

Exemple 2 : mesure des défauts de formes sur une dent d'engrenage.

L'objectif est de faire une comparaison numérique entre le image de la surface réelle et le modèle théorique est effectuée en vue de faire ressortir les défauts de forme sur les deux flancs d'une dent de la roue dentée de la boîte à vitesses TW55.4 du tracteur CIRTA C6807 (voir Annexe A).

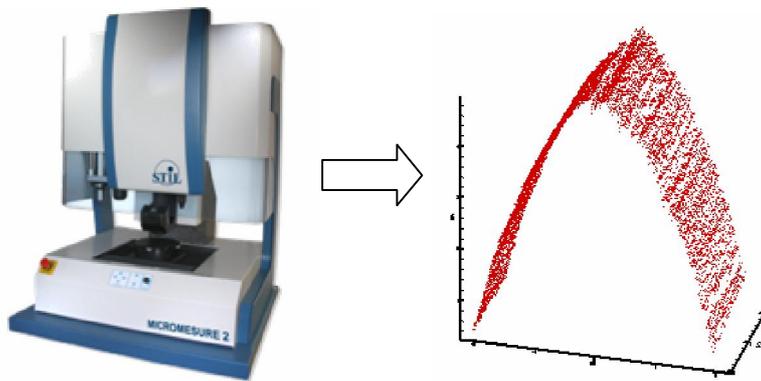


Figure V.20 : Acquisition du modèle réel

Ensuite une surface d'approximation équivalente est calculée par éléments finis.

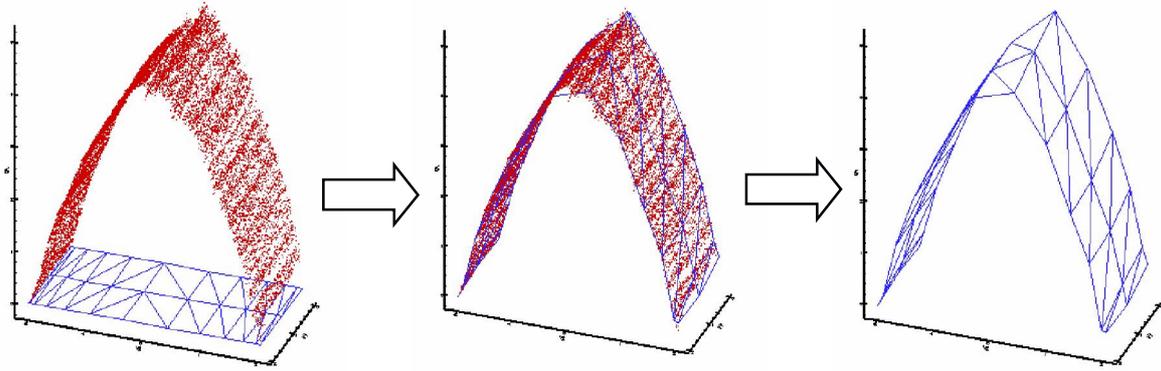


Figure V.21: Création du modèle continu de la pièce réelle par déformation d'une surface par éléments finis

A la fin la comparaison du modèle obtenu avec le modèle théorique, après superposition, nous donne la répartition des erreurs sur les surfaces fonctionnelles de la dent (figure V.22).

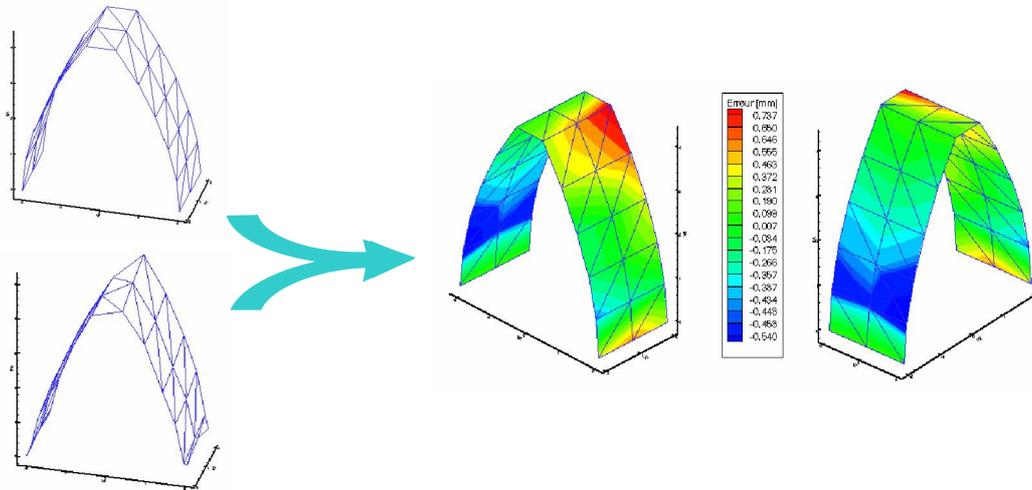


Figure V.22 : Comparaison des modèles théorique et réel pour ressortir les erreurs

Jusque là notre raisonnement est fait pour un écart vertical ce qui nous donne des résultats valables uniquement pour des surfaces ouvertes.

Comme pour la méthode standard pour traiter le cas d'une forme quelconque, donc une position quelconque des éléments, le principe est d'effectuer un changement de repère pour passer à un repère lié au triangle ayant pour axes la normal et deux de ses cotés.

Une des différences de cette méthode par rapport à la méthode standard est que l'assemblage s'effectuera après résolution à l'échelle élémentaire et il a pour but d'assurer la continuité entre les éléments et de les ajuster pour affiner la solution. Cette opération est réalisée en joignant directement les nœuds voisins pour les remplacer par un seul nœud.

Pour un objet 3D au format STL, l'idée est d'effectuer pour chaque élément une association par rapport à un repère lié à l'élément suivant la normale (figure V.23).

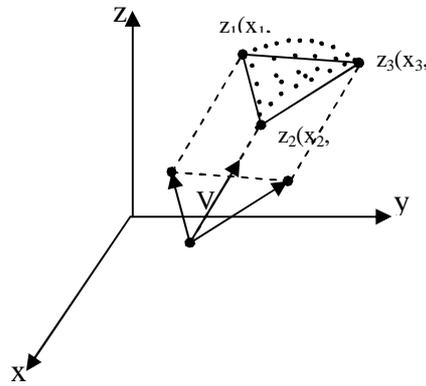


Figure V.23 : Approximation par un élément triangle dans le cas général

La première étape a pour objectif de rapprocher chaque élément à la portion du nuage de points lui correspondant, ce qui va provoquer en contre partie la séparation et leur éloignement les uns par rapport aux autres, la raison pour laquelle la deuxième étape vient pour assembler ou recoller les éléments en rejoignant leurs nœuds voisins (figure V.25).

Exemple :

Ajustement d'une sphère à un nuage de points.

1- association de la sphère au nuage de points :

Nous pouvons calculer un distance moyen entre les points et la surface de la sphère égal à : 7,13 mm

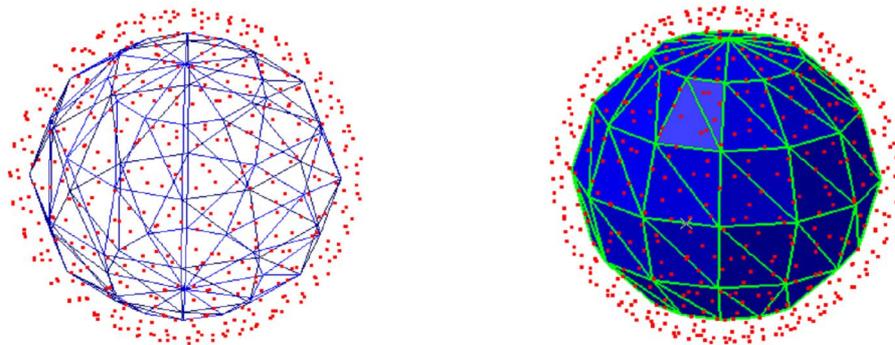


Figure V.24 : Sphère associée à un nuage de points.

2- Approximation avec un élément de la surface de la sphère, du nuage de points lui correspondant

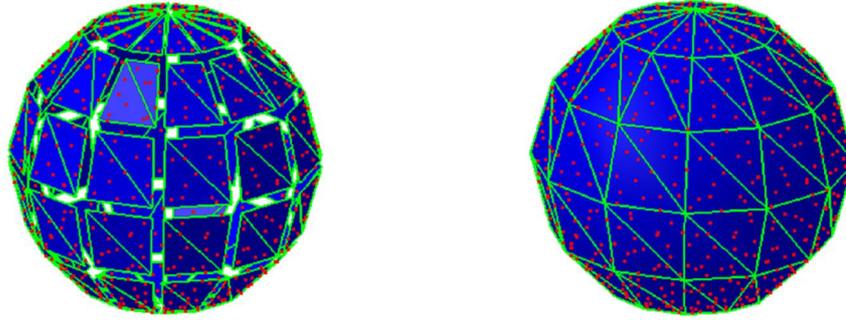


Figure V.25 : Application de la méthode.

- 3- assemblage de différents éléments voisins qui forment la surface les unes avec les autres

Le calcul du défaut de forme moyen, nous donne une valeur de 0,68 mm. Etant données que l'approximation est faite avec des éléments plans, cette valeur peut aussi se voir à la baisse si l'on prend un nombre très grand d'éléments.

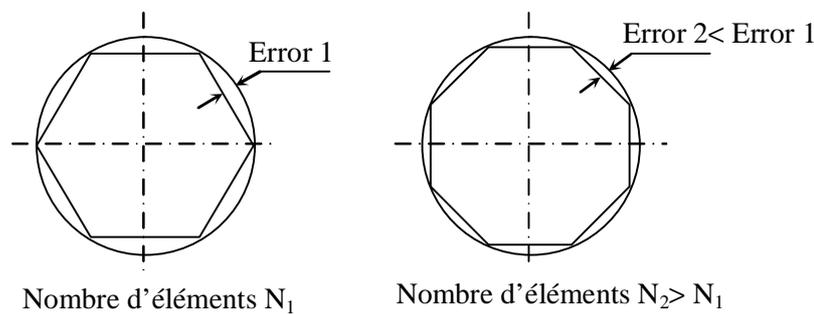


Figure V.26 : Influence du nombre d'éléments sur la précision d'approximation.

V.6. Conclusion

L'application du principe de base de l'approximation par la méthode des éléments finis nous a permis de proposer une méthode d'approximation de nuage de points par déformation de surface 3D comparable à la méthode utilisée pour les modèles déformables mais de principe et mise en œuvre plus simple particulièrement pour notre problème caractérisé par des écarts entre points et surfaces très petits.

L'application de cette méthode pour des surfaces ouvertes ou des objets 3D a permis de modifier les écarts afin d'absorber les futures défauts issu du processus par addition des écarts avec des signes opposés.

V.7. Références bibliographiques

- [1] S.L. Campanelli, G. Cardano, R. Giannoccaro, A.D. Ludovico, E.L.J. Bohez, statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy, journal of computer-aided design 39 (80-86), Elsevier, 2006.

- [2] K. Tong, E. A. Lehtihet, S. Joshi, Software compensation of rapid prototyping machines, journal of precision engineering 28 (280-292), Elsevier, 2004
- [3] H. Bouchenitfa, S. Boukebbab, J.M. Linares, J.M. Sprauel, « Compensation relative deviations in the STL model using the FEM method: Application at the rapid prototyping technology» International Conference on Computer Aided Tolerancing, CIRP-CAT 2009, Annecy, 26-27 Mars, Ecole Polytechnique de la Savoie, Annecy de vieux, France.
- [4] S. S. Rao, The finite element method in engineering, Bergamo press, 1992.
- [5] J.-F. Imbert, Analyse des structures par éléments finie, Cépaduès éditions, 1995.
- [6] L. Champaney, notes de cours du module : approximation numérique pour la physique, département de mécanique, Université de Versailles, St-Quentin en Yvelines, mars 2005
- [7] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu, The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Sixth edition 2005, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [8] G. R. Lui, S. S. Quek, the finite element method a practical course, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
- [9] McInerney, D. Terzopoulos, Finite element techniques for fitting a deformable model to 3D data, T., Proc. Vision Interface '93, Toronto, ON, Canada, May, 1993, pages 70-76.
- [10] T. McInerney, D. Terzopoulos, A finite element model for 3D shape reconstruction and nonrigid motion tracking
- [11] D. Terzopoulos, elastically deformable models, computer graphics, volume 21, number 4, july 1987.
- [12] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, J.-M. Linares, Development of a mathematical procedure for modelling and inspecting complex surfaces for measurement process, Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing, 78 (37-43), Word Scientifique, 2009.
- [13] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, H. Boughouas, J.M.LINARES, Applied Iterative closest Point algorithm to automated inspection of gear box tooth, International Journal of Computer & Industrial Engineering 52 (162-173), Elsevier, 2007.

Chapitre VI

Application industrielle : correction de modèles en prototypage rapide

VI.1. Introduction

Par cette application nous traitons le cas de l'amélioration de la précision pour le procédé d'usinage en prototypage rapide qu'il a de plus en plus d'importance dans la conception et le lancement de nouveaux produits. Mais avant d'entamer les étapes de la méthode utilisée nous allons voir dans ce qui suit un aperçu sur la technologie du prototypage rapide et ces différents procédés.

VI.2. Le prototypage rapide

Le prototypage rapide est défini comme toute technique qui permet la fabrication de pièces dans un délai très court. Le prototypage rapide peut faire en quelques jours ce que le prototypage conventionnel fait typiquement en plusieurs semaines. Les pièces sont généralement fabriquées par ajout de matière couche par couche.

Le prototypage est souvent traité comme partie intégrale du processus de la conception de système, où l'on est censé à réduire le risque et le coût de projet. Souvent un ou plusieurs prototypes sont faits dans un processus de développement itératif et par accroissement où chaque prototype est influencé par l'exécution des conceptions précédentes, de cette façon problèmes ou des insuffisances dans la conception peuvent être éliminés.

La figure VI.1 montre le processus de réalisation d'une pièce par prototypage rapide. La première étape consiste à modéliser la pièce puis à la convertir au format STL par triangulation. Après vérification du modèle STL le fichier de construction sera généré en effectuant un tranchage pour obtenir les couches qui vont être additionnées l'une après l'autre par la machine pour réaliser la pièce.

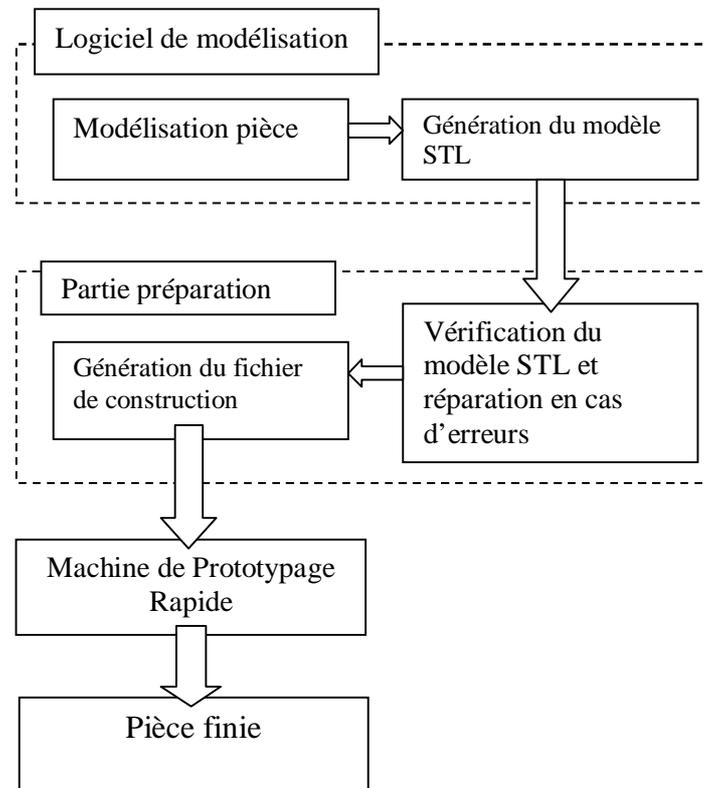


Figure VI.1: Processus de réalisation d'une pièce en prototypage rapide.

Le design et le développement de mécanismes est un processus très complexe. Aussi, la fabrication de prototypes pendant le développement est souvent très utile voire même nécessaire. Dans un tel contexte, l'utilisation du prototypage rapide permet d'économiser un temps considérable et beaucoup d'argent [1].

VI.2.1. Applications

La fabrication d'un prototype est une étape incontournable dans la phase de développement de produits.

Le prototypage rapide permet de valider la conception de la pièce avant lancement en production en :

- Raccourcissant considérablement les délais,
- Economisant l'investissement d'un outillage
- Proposant une diversité des matériaux
- Respectant les formes conçues et définies par le fichier cao fourni.

Les applications sont multiples :

- Validation du design
- Présentation marketing
- Essais fonctionnels
- Essais d'encombrements

- Essais en soufflerie
- Aide à la conception des outillages
- Maquettes échelle réduite
- Modèles pour duplication

VI.2.2. Limitations

- Précision dimensionnelle
- Fini de surface
- Moins résistant et rigide que des pièces en métal

VI.2.3. Les différentes Technologies du prototypage rapide

Il existe plusieurs technologies de prototypage rapide.

VI.2.3.1. Stéréolithographie

Principe : La pièce est construite sur une plate-forme horizontale, plongée dans un liquide plastique monomère. La solidification se produit par photo polymérisation résultant d'un impact de lumière sur la surface supérieure du liquide. La photo polymérisation du monomère est déclenchée par un simple rayon ultra violet ou une lumière dans les fréquences visibles. L'absorption de la lumière par le liquide limite l'épaisseur de polymérisation à quelques dixièmes de millimètre. Ceci correspond à peu près à l'épaisseur des strates. Une fois qu'une couche de monomère est solidifiée, la pièce s'enfonce dans la cuve de la valeur de l'épaisseur de la strate suivante et une nouvelle section est solidifiée. Il y a autant de cycle que de nombre de couches nécessaires pour obtenir l'intégralité du volume de l'objet. A la fin la pièce est séchée au four pour accroître au maximum la résistance du matériau [1].

Rapid Prototyping Manufacturing

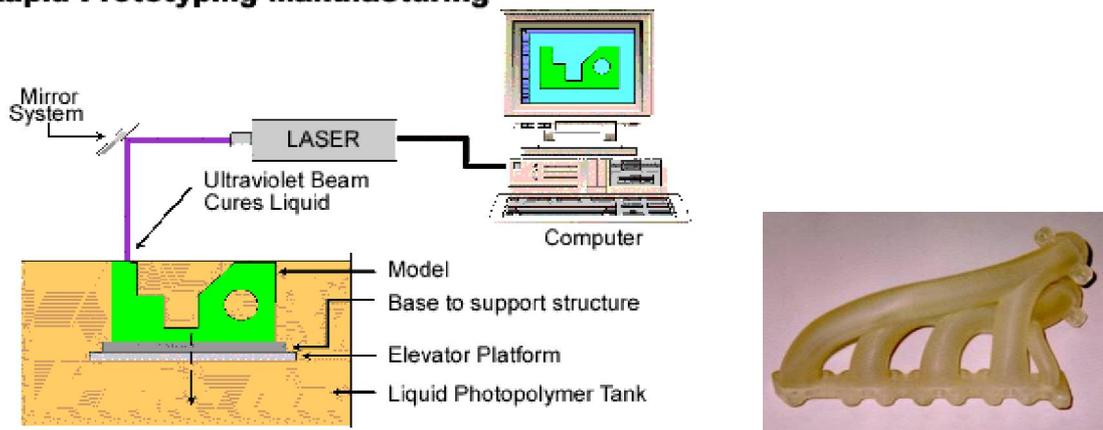


Figure VI.2 : Principe de la stéréolithographie.

La précision de la pièce est influencée par différents paramètres (une trentaine) dont les principaux sont :

- Le ratio solidification initiale au laser post traitement au four,
- La méthode de balayage du faisceau laser,
- La densité de balayage du faisceau laser,
- La vitesse de séchage au four, ...

Les avantages de la stéréolithographie sont : la confirmité de sa technique et sa rapide. Et ses inconvénients majeurs sont : la translucidité et la fragilité des modèles produits et leurs déformations introduites lors du séchage au four.

VI.2.3.2. Prototypage rapide en fil fondu (Fused Deposition Modeling)

Méthode introduite par la société STRATASYS. Chaque couche est construite par extrusion d'un mince "fil" de plastique ou de cire chauffé juste au dessus (+ 1°C) de son point de fusion. Le filament thermoplastique est déposé par une tête contrôlée en XY. La nouvelle couche se refroidit naturellement par contact avec la couche précédente plus froide (figure VI.3). Ce procédé peut théoriquement être appliqué à n'importe quelle matière thermoplastique. Une pièce peut être facilement construite avec différentes matières et couleurs [1].

Aujourd'hui, ce procédé est disponible sur trois matières :

- La cire, utilisée en coulée de précision
- La cire usinable
- Un matériau de type nylon, abs, polycarbonate

Cette technique est intéressante à plusieurs titres :

- Rapidité,
- Absence de pollution,
- Emploi de matières relativement bon marché.

Les inconvénients en sont l'état de surface granuleux des pièces obtenues et la mauvaise reproduction des petits détails.

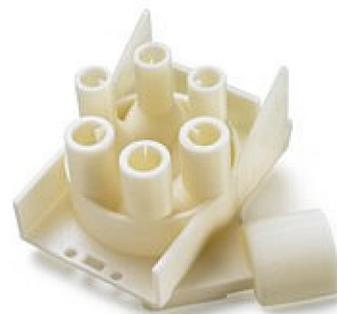
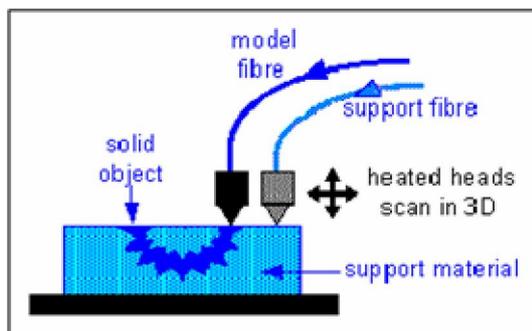


Figure VI.3 : Principe du prototypage rapide en fil fondu [1].

VI.2.3.3. Frittage sélectif au laser (*Selective Laser Sintering, SLS*)

Comme son nom l'indique, le frittage sélectif au laser ("selective laser sintering" ou SLS) utilise un laser très puissant pour transformer une poudre en un objet solide par fusion ou frittage. Comparé à la stéréolithographie, le polymère est remplacé par une poudre préchauffée à une température juste en dessous du point de fusion.

Un laser trace la forme de chaque strate fusionnant de la poudre en couche fine. Les grains qui ne sont pas chauffés ne sont pas affectés et restent comme support pour la couche suivante et d'éventuels porte-à-faux de la pièce. Une nouvelle couche est étalée par un rouleau mécanique, et le cycle recommence (figure VI.4). Ce procédé ne nécessite pas de post-séchage au four. Les applications industrielles d'aujourd'hui traitent les matières thermoplastiques suivantes: PVC, polycarbonate, ABS et nylon [1].

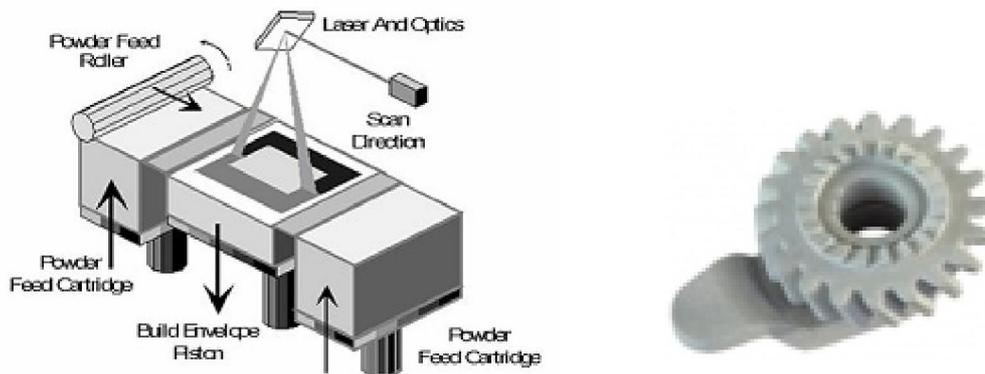


Figure VI.4 : Principe du frittage sélectif de poudre [1]

L'avantage du SLS est que les matériaux utilisés ont des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des photopolymères et le coût de fabrication est faible par rapport à celui de la stéréolithographie. La poudre à la place d'un liquide évite les supports pour des pièces formant des îlots dans des sections spécifiques. Le principal inconvénient est que le SLS n'est pas très précis. La finition en PVC est assez lisse mais d'autres matériaux ont un aspect laminé [1].

VI.2.3.4. Fabrication par laminage (*Laminated object manufacturing*)

La société Hydronetics, qui est devenue depuis Helisys, a mis au point ce procédé de fabrication d'objet par laminage. Les pièces sont fabriquées à partir des sections coupées dans de minces tranches de matériau brut. Ces matériaux peuvent être du plastique, un composite de polyester ou du papier. Chaque couche est empilée et collée avant d'être découpée au laser. On obtient ainsi un bloc, véritable mille feuilles, à l'intérieur duquel se trouve le modèle (figure VI.5). Il suffit alors de l'"éplucher" pour ôter les chutes entourant le modèle ou remplissant les cavités. La puissance et la mise au point de ce laser sont réglées de façon à ce que l'épaisseur de découpe corresponde exactement à celle de la couche de matériau pour éviter d'abîmer la couche inférieure.

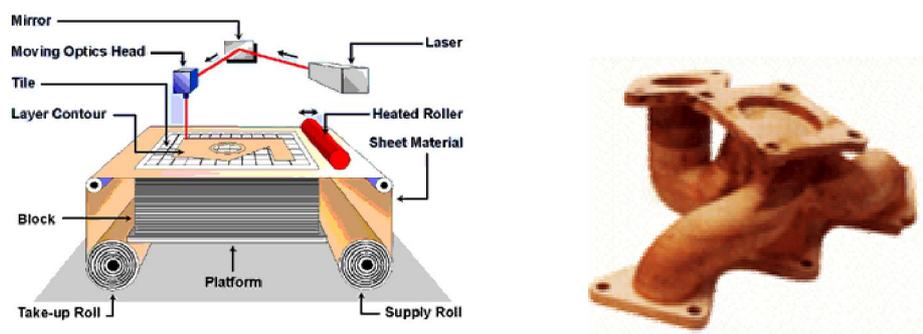


Figure VI.5 : Fabrication par laminage [1].

Ce procédé est cinq à dix fois plus rapide que les autres et garantit une précision de l'ordre de 10% des dimensions totales. Cette rapidité est due au fait que le laser ne balaye que le contour de chaque section et non la surface complète [1].

VI.2.3.5. Impression 3D (3D Printing)

Procédé analogue au Sélective Laser Sintering, mais les grains du matériau en poudre sont ici reliés par un liant liquide. Une tête d'imprimante comprenant une ou plusieurs buses se déplace au dessus d'une couche en projetant des gouttelettes de liant aux points correspondant à la section pour former localement des agglomérats (enVI. 80µm). Le liant pénètre et agglomère la poudre qui devient rigide. La pièce qui sort du bac est plus grande que la pièce finale pour compenser le retrait important (enVI. 10% en moyenne) lors du frittage. Le retrait est facile à maîtriser car il est homogène (figure VI.6). Un post traitement thermique provoque l'évaporation du liant et le frittage véritable de la poudre [1].

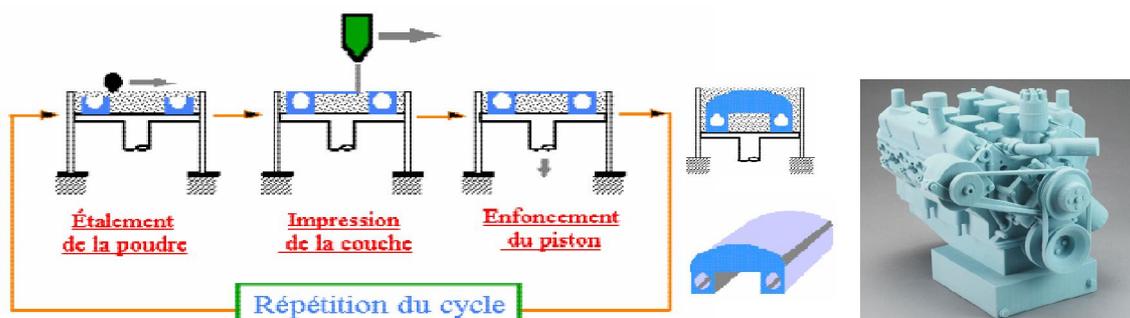


Figure VI.6: Principe de l'impression 3D [1].

VI.2.4. Amélioration des performances

Le prototypage rapide reste un domaine assez nouveau encours de développement pour maîtriser ses techniques et répondre aux exigences des utilisateurs qui sont de plus en plus nombreuses et qui touchent à tous les aspects qualitatifs du produit fini à savoir : l'état de surface, les dimensions, la forme, le temps de réalisation et la résistance.

Les points qu'il faut améliorer dépendent du principe et de la technique utilisée car chacune de ces techniques a ces points forts et ses points faibles

comme nous l'avons vu plus haut la résistance pour la stéréolithographie, l'état de surface pour technique au fil fondu [2] et la précision pour le frittage de poudre [3] [4]. Pour la même raison, les méthodes utilisées pour atteindre les performances recherchées sont différentes et font l'objet de plusieurs travaux de recherche, basées pour la majorité sur le réglage expérimental de paramètres [5] [6], utilisent des méthodes comme celle des plans d'expériences. Les paramètres du processus considérés sont généralement, l'épaisseur des couches, le sens d'orientation de construction et les coordonnées relatives aux différents axes.

D'autres travaux proposent des modèles pour le traitement des erreurs systématiques dans le processus en faisant analogie avec des systèmes comparable dont les erreurs sont un peu plus maîtrisées comme les MMT [7]. Les phénomènes source d'erreurs comme la chaleur sont modélisés en étudiant la répartition de la température au cours de la construction de la pièce. Mais vu la complexité du problème il reste encore difficile de faire un lien entre les paramètres contrôlables d'entrée et les défauts mesurés sur les pièces finies.

VI.3. Cas d'application : amélioration de la précision des pièces réalisées par prototypage rapide avec fil fondu.

Ce cas d'application industrielle est traité en collaboration avec le laboratoire GIBO/UMR6233 de UIT d'Aix-en-Provence (France) qui consiste à proposer une méthode pour améliorer la précision des pièces réalisées par le procédé de prototypage rapide par fil fondu.

La méthode est basée essentiellement sur cinq étapes (figure VI.7). Une première étape dans laquelle nous effectuons une modélisation de la pièce et une conversion au format STL à réaliser avec un logiciel de CAO. Le modèle ainsi obtenu sera fourni à la machine pour être réalisé dans la deuxième étape qui fournira en sortie une pièce physique qui contient des défauts par rapport au modèle théorique les défauts que nous cherchons à minimiser.

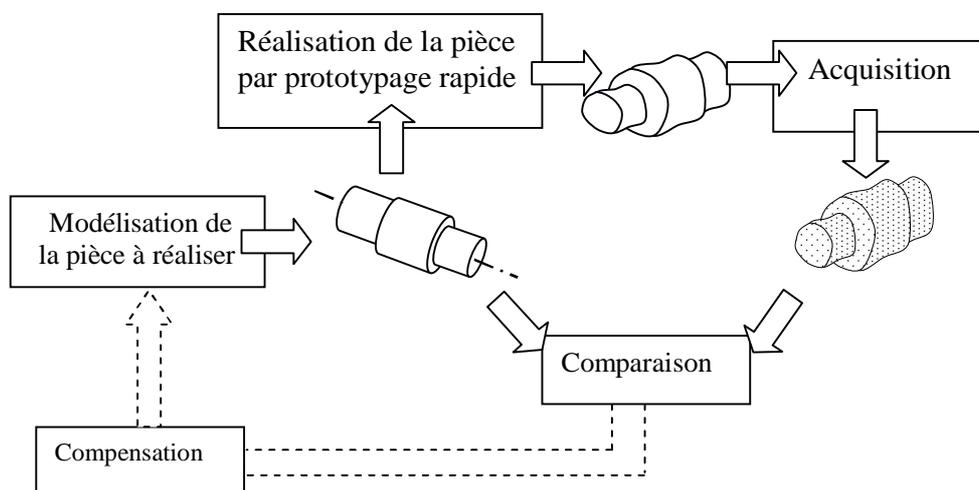


Figure VI.7 : Principe de la méthode utilisée.

Dans la troisième étape, nous effectuons une acquisition de la pièce physique afin de pouvoir la comparer avec le modèle numérique initial dans la

quatrième étape pour ressortir les défauts de fabrication issus de la machines. Dans la cinquième et dernière étape nous essayons d'effectuer une compensation des erreurs en exploitant la méthode exposée dans le chapitre précédent.

VI.3.1. La création du modèle théorique

Pour la réalisation du modèle qui servira à l'usinage de la pièce et plus tard à la mesure des erreurs, le logiciel CATIA a été utilisé en première étape pour construire le modèle solide (figure VI.8).

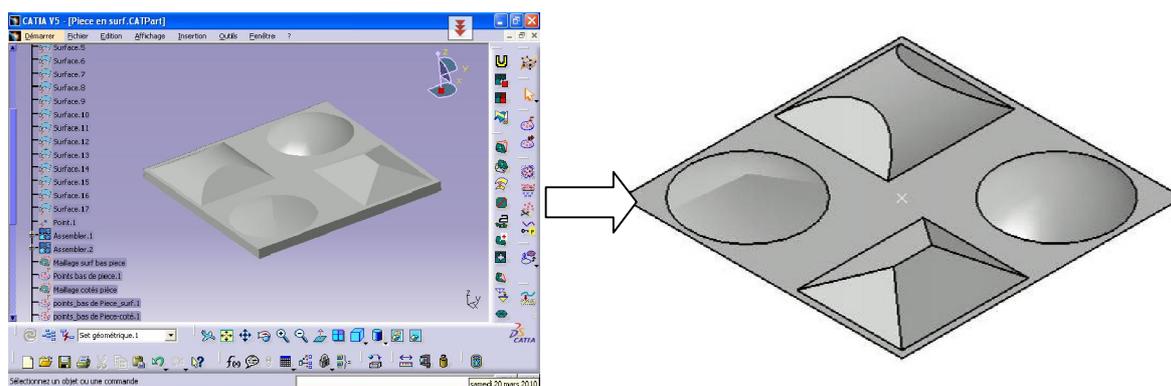


Figure VI.8 : Modèle théorique.

La facettisation de ce dernier permet d'obtenir le modèle STL lors de cette phase le nombre de triangles été choisi grand dans le souci d'obtenir une grande précision et tester les performances de la méthode et du programme pour des conditions représentatives (figure VI.9).

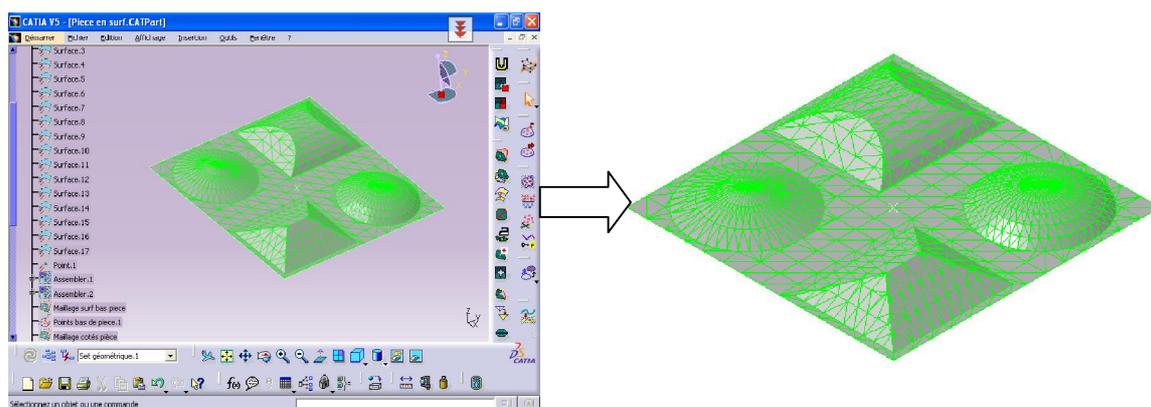


Figure VI.9 : Modèle STL.

La géométrie du modèle a été choisie de façon à contenir plusieurs géométries élémentaires afin de couvrir le maximum de cas de figure et faciliter le contrôle final et la validation des résultats si nous voulons utiliser les techniques classiques d'association pour le faire.

VI.3.2. Fabrication et acquisition du modèle réel

Les pièces sont obtenues avec une machine de prototypage rapide qui fonctionne selon le principe par dépôt de file où la température de la tête d'impression est d'environ 250°C. Sous l'effet de cette température une

déformation de la génératrice est observée dans les zones de faible épaisseur (figure VI.10).



Figure VI.10 : Fabrication du modèle réel.

L'usinage de la pièce était réalisé par l'imprimante 3D DIMENSION SST 1200es qui fonctionne avec une épaisseur de couche de 0,245 mm ou 0,33 mm de matériau ABSplus.

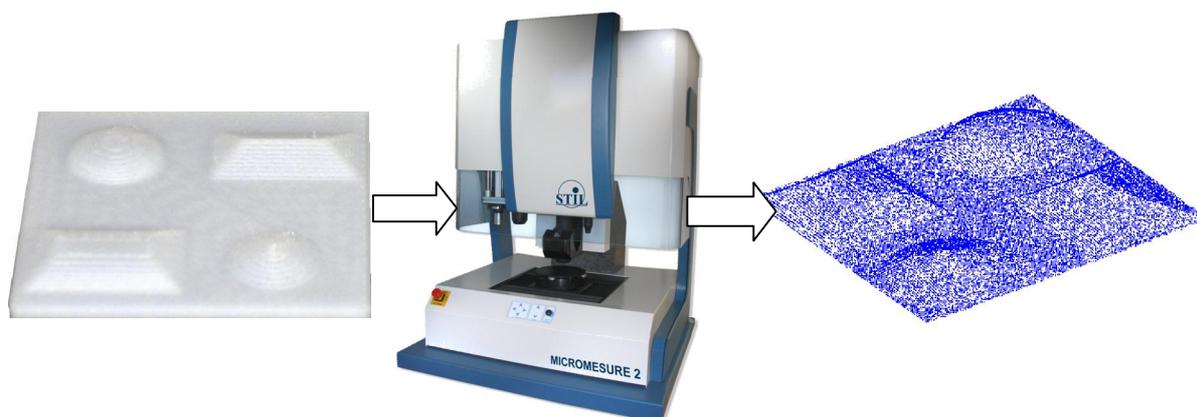


Figure VI.11: Acquisition du modèle réel fabriqué.

La pièce ainsi réalisée la phase d'acquisition peut être effectuée. Le procédé de numérisation choisi est un scanning par capteur optique de haute résolution (CHR) qui fournit une résolution suivant les axes X et Y d'environ 0,1 μm . L'acquisition a été réalisée suivant une grille rectangulaire d'une résolution de 156x784 points pour pouvoir capter tous les défauts possibles (figure VI.11).

VI.3.3. Association du modèle théorique et nuage de points

Les deux modèles étant définis nous pouvons maintenant faire appel à la procédure de mise en correspondance du nuage de points théorique avec la surface au format STL (figure VI.12). Le nuage de point initial étant trop éloigné afin d'aboutir à une association rapide et précise, dans un premier temps ce dernier est rapproché vers le modèle théorique avec un recalage initial manuel.

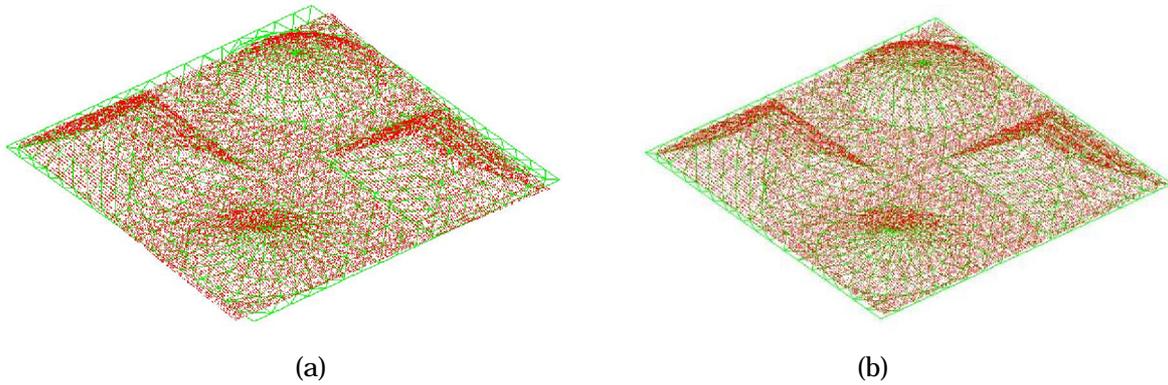


Figure VI.12 : Mise en correspondance initiale (a) et finale (b).

L'application du programme d'association par la méthode tel qu'il est décrit précédemment a permis d'obtenir le résultat de la figure VI.11

VI.3.4. Correction du modèle théorique

Cette étape, telle qu'elle a été décrite plus haut, commence par la génération d'un nuage de points symétrique à la surface de la pièce théorique au format STL. Ceci revient à effectuer une symétrie par rapport aux surfaces triangulaires élémentaires (figure VI.13).

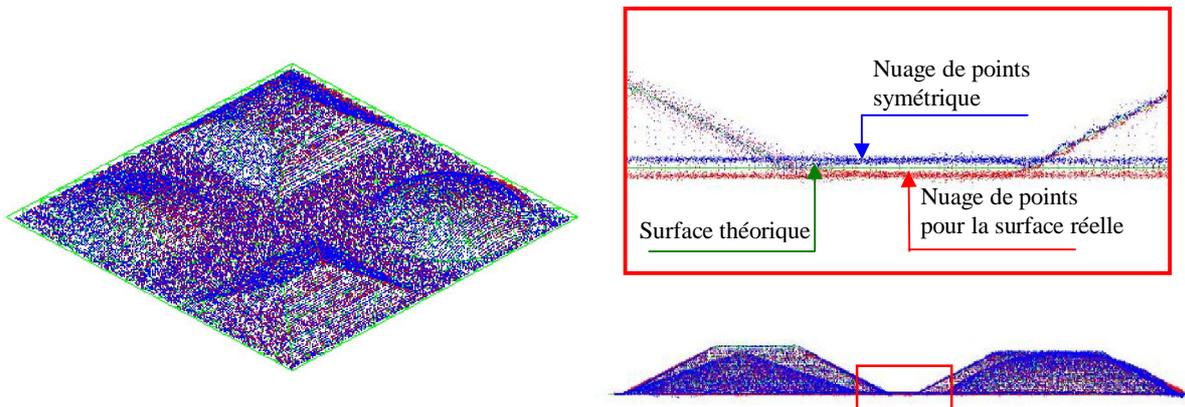


Figure VI.13 : Principe de correction du modèle théorique.

Vient maintenant l'étape principale dans la correction qui est la déformation du modèle théorique en lui ajoutant des erreurs qui vont compenser les erreurs de fabrication. Le résultat final était obtenu pour une seule itération et avec un nombre de triangles suffisant (figure VI.14).

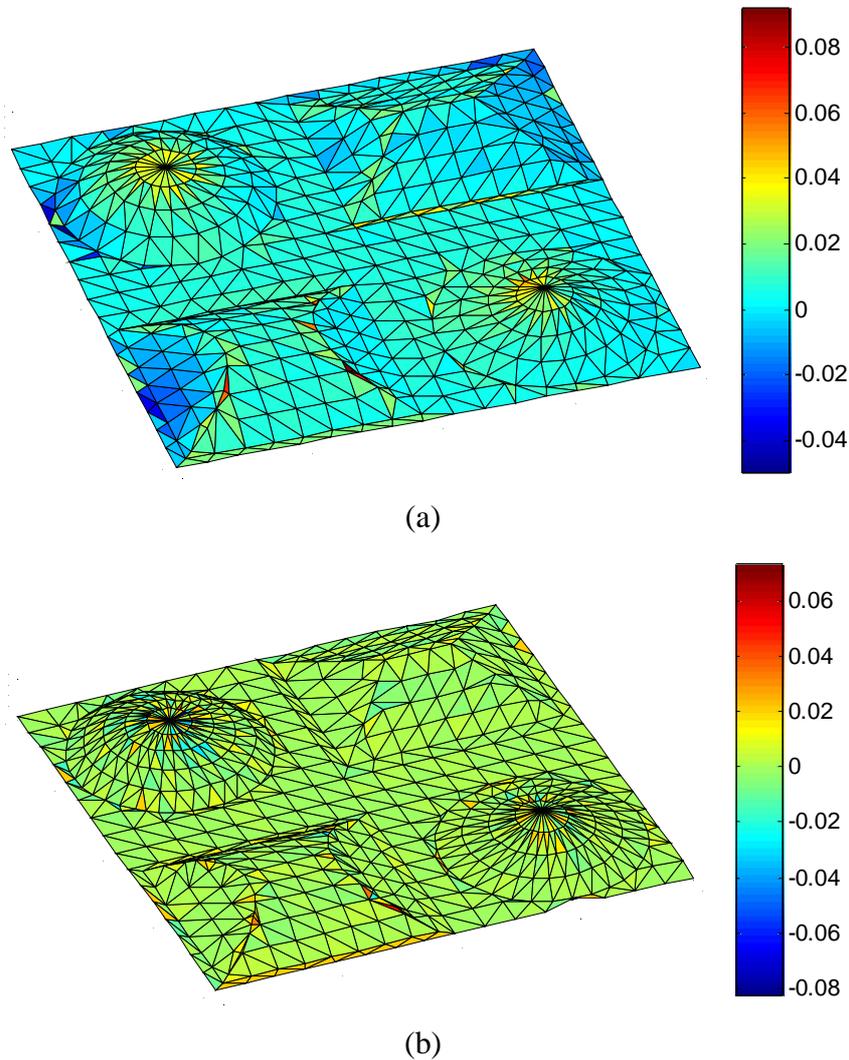


Figure VI.14 : Répartition des écarts entre le modèle théorique et le nuage de point

(a) avant compensation, (b) après compensation.

Avant l'application de la déformation par éléments finis les écarts étaient un peu plus grands avec des tâches sur les formes cylindrique et pyramidale indiquant des écarts plus grands qui peuvent atteindre 0.03mm.

Les sommets des formes sphérique et conique présente des écarts particuliers qui sont dus à un manque de précision de calcul à cause du nombre réduit des points projetés sur chaque triangle vue leurs dimensions réduites dans ces zones.

Après application de la méthode nous pouvons remarquer que les écarts ont été réduites et devenues uniformes sur toute la surface de la pièce.

VI.4. Conclusion

Cette application nous a permis d'évaluer les performances réelles du système qui sont globalement intéressantes vu la précision obtenue dans la phase de mesure des erreurs.

La phase de correction, qui consiste à effectuer une déformation du modèle CAO pour compenser les défauts du processus, s'est traduite par la réduction de l'erreur moyenne sur la surface du modèle.

Le temps d'exécution reste acceptable mais il est possible de l'améliorer en optimisant encore plus le code de calcul.

L'application ainsi faite nous a aussi permis de constater la très bonne correspondance de la méthode au problème traité vu le format STL utilise dans les deux phases, d'association et de correction, ce qui nous pousse à réfléchir à la possibilité de l'adapter d'avantage pour proposer une solution plus spécifique.

VI.5. Références bibliographiques

- [1] http://eliot.utc.fr/Docs/NOTICE_GENERALE/000/0000/00002140/Prototypage_1.0.0.pdf
- [2] D. Ahna, H. Kimb, S. Leec, Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing, *journal of materials processing technology* 209 (664–671), Elsevier, 2009.
- [3] R. B. Patil, VI. Yadava, Finite element analysis of temperature distribution in single metallic powder layer during metal laser sintering, *Image and Vision Computing* 25 (1174–1184), Elsevier, 2007.
- [4] K. Lu, M. Hiser, W. Wu, Effect of particle size on three dimensional printed mesh structures, *Powder Technology* 192 (178–183), Elsevier, 2009.
- [5] K. Tong, E. A. Lehtihet, S. Joshi, Software compensation of rapid prototyping machines, *Precision Engineering* 28 (280–292), Elsevier, 2004.
- [6] S.L. Campanelli, G. Cardano, R. Giannoccaro, A.D. Ludovico, E.L.J. Bohez, Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy, *Computer-Aided Design* 39 (80–86), Elsevier, 2007.
- [7] K. Chockalingama, N. Jawahara, U. Chandrasekar, K.N. Ramanathana, Establishment of process model for part strength in stereolithography, *journal of materials processing technology* 208 (348–365), Elsevier, 2008.
- [8] H. Boughouas, S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, I. amara, « Control by virtual gauge of skew surfaces for correction process », Volume 31, *The International journal of Advanced Manufacturing Technology* (2007), (Edition de revue: Springer), ISSN 0268-3768
- [9] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, H. Boughouas, « Approximation par éléments finis des surfaces gauches en vue d'une reconstitution de forme », 7ème Congrès de Mécaniques, Casablanca 18-21 Avril 2005, édité par le CNRST, Volume 01.

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était de faire une étude sur l'automatisation de la fonction contrôle dans une perspective de production automatisée et proposer une solution répondant au maximum au critère d'intégration. Ceci nous impose un maximum de cohérence avec les standards et les normes issus des avancés réalisés dans les autres phases du processus de production, à savoir la phase de conception et la phase de fabrication.

L'analyse du problème et la recherche bibliographique effectuées nous ont montré son caractère complexe et pluridisciplinaire. Pour vérifier une spécification imposée d'une façon automatique il faut passer par plusieurs étapes qui commencent par une lecture des données du problème inscrites selon un modèle et une norme précise. Ces données doivent être traduites en termes de tâches simples qu'il faut planifier. Ces dernières consistent à effectuer une acquisition de données géométriques, obtenues selon une technique optique ou par contact, qu'il faut traiter pour les convertir en résultats de mesure clairs. Cette conversion est réalisée par association ou comparaison avec des modèles numériques définis selon un format précis. Le problème se complique d'avantage si nous voulons exploiter les résultats du contrôle pour intervenir sur le processus afin de corriger les erreurs éventuelles.

Sous la lumière de cette analyse, une étude des principales phases du contrôle a été effectuée à savoir la phase d'acquisition, la modélisation et l'échange de données et finalement l'association et la comparaison des modèles obtenus dans les premières phases. Cette partie avait pour objectif de survoler les différentes techniques utilisées et choisir celle répondant au mieux à notre objectif initial.

Cette étude nous a conduit vers une solution bâtie autour d'une acquisition avec un procédé optique, choisi pour sa vitesse d'acquisition et sa précision. Cette acquisition donne en sortie un nuage de point représentant la pièce à contrôler. Une deuxième phase composée d'une association, avec une variante proposée de la méthode ICP, et une comparaison du modèle théorique sous un format STL choisi quant à lui pour sa simplicité et sa capacité de représentation.

La solution a été testée sur le procédé de prototypage rapide que nous avons choisi pour sa rapidité, sa simplicité et la nature des défauts qu'il génère. Les étapes de la solution ainsi exécutées ont permis de terminer la répartition des défauts sur la pièce et localiser les zones les plus critiques. Par la suite l'application de la méthode des éléments finis a permis de modifier le modèle CAO en triangulation STL de façon à réduire les défauts dans la pièce finale.

A travers ce travail, avec son volet analyse, nous avons pu acquérir une image globale et claire du problème d'automatisation et constater sa complexité, ses multiples composantes de domaines différents, allant de l'acquisition à la modélisation et gestion de données en passant par les méthodes numériques de calcul avec toutes leurs contraintes. Nous avons aussi pu survoler les différentes solutions existantes pour chaque problème et les issues possibles permettant d'aboutir à une solution.

La solution proposée, malgré la simplicité de son principe de base, a donnée des résultats encourageants particulièrement pour la méthode de compensation proposée et le problème d'application traité lui correspondant très bien. Toutefois elle contient certaines faiblesses qui se résument principalement dans la lenteur d'exécution due à l'algorithme utilisé et limitation à la détermination des défauts de formes. Cette solution est conçue pour être ouverte et acceptant toute amélioration possible.

Les perspectives issues de ce travail

Comme tout autre travail de recherche il n'amène jamais vers une fin mais il déclenche toujours des actions pour améliorer ses résultats ou élargir leurs champs d'application et que nous pouvons résumer pour notre cas comme suit :

- Optimiser d'avantage l'algorithme de calcul pour réduire le temps d'exécution en améliorant la structuration de données et les méthodes de recherche.
- Elargir le champ d'application de la solution pour traiter les autres types de défauts géométriques
- Etudier la décomposition du défaut globale avec une analyse par éléments finis afin de revenir aux sources d'erreurs initiales pour un processus de fabrication à plusieurs phases.
- Convertir les programmes de calcul élaborés sous forme de logiciels autonomes ou sous forme de composants intégrables dans des logiciels de CFAO.

Annexe A

Dans cette nous présentant la méthode utilisée pour la mesure des défauts de forme sur les deux flancs d'une dent de la roue dentée de la boîte à vitesses TW55.4 du tracteur CIRTA C6807 fabriqué au niveau du Complexe Moteurs et Tracteurs de Oued Hamimime Constantine.



Figure A.1 : partie de la roue avec la dent à contrôler

La phase d'acquisition a été effectuée au laboratoire EA(MS)2 de L'IUT d'Aix-en-Provence (France). A la fin un fichier contient les coordonnées des points est fourni (figure 13).

VDAFS VERSION	: 2.0	00001020					
-----ANGABEN UEBER DEN ABSENDER-----					00001030		
SENDERFIRMA	: METROMECC SOFTWARE AG				00001040		
ANSPRECHPARTNER	: ---				00001050		
- TELEFON	: (081) 257 07 00				00001060		
- ADRESSE	: COMERCIALSTRASSE 20, CH-7007 CHUR, SCHWEIZ				00001070		
ERZEUGENDES SYSTEM	: METROSOFT CM				00001080		
ERZEUGUNGSDATUM	: 24/.02./2003				00001090		
SENDE-FILENAME	: DENT_CMT				00001100		
-----ANGABEN UEBER DAS TEIL-----					00001110		
PROJEKT	: ---				00001120		
OBJEKTKENNUNG	: PIECE USINER: CONSTANTINE				00001130		
VARIANTE	: MESURE: 1 / ???				00001140		
VERTRAULICHKEIT	:				00001150		
GUELTIGKEITSDATUM	:				00001160		
-----ANGABEN UEBER/FUER DEN EMPFAENGER-----					00001170		
1	Dialogue : détermination de la droite d'intersection						
2	Droite, Intersection : 3 , Elém: 2, 1						
3	## droite d'intersection 3 devient la						
4	## direction secondaire du repère						
5	## axe X						
6	Activer direction secondaire : SCP, +X, PO: Z, Elém: 3						
7	Mémoriser le système de coordonnées : SCP, 1/1dent						
8	Charger le système de coordonnées : SCP, 1/1dent						
9	## palpage du coté gauche le plan avant						
10	## étant situé face à nous						
11	Mesure surface point : 4, Pts:466 Référence: 0/0						
12	PP >	-609.253	20.178	-0.722	-0.931	0.004	0.366
13	PP >	-609.294	16.643	-0.751	-0.931	0.004	0.366
14	PP >	-609.321	17.139	-0.810	-0.931	0.004	0.366
15	PP >	-609.347	17.634	-0.870	-0.931	0.004	0.366
16	PP >	-609.374	18.130	-0.929	-0.931	0.004	0.366
17	PP >	-609.399	18.626	-0.989	-0.931	0.004	0.366
18	PP >	-609.424	19.122	-1.048	-0.931	0.004	0.366
19	PP >	-609.448	19.618	-1.109	-0.931	0.004	0.366

Figure A.2 : Une partie du fichier de points

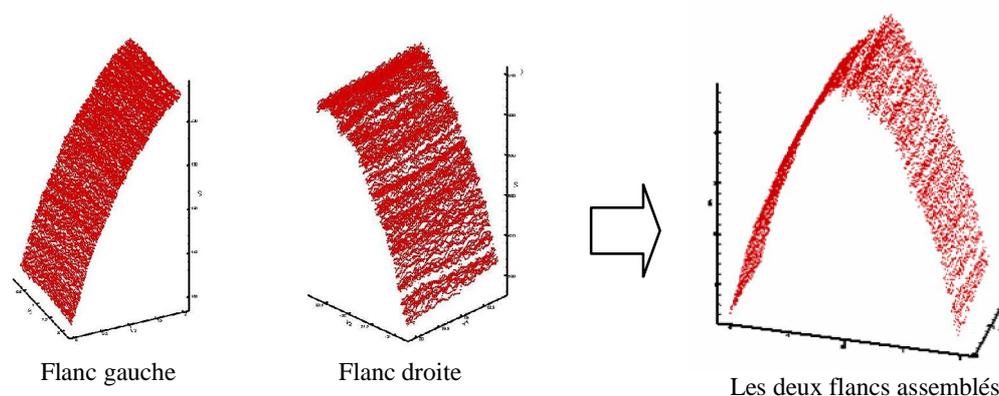


Figure A.4 : Nuage de points de la dent obtenu par acquisition

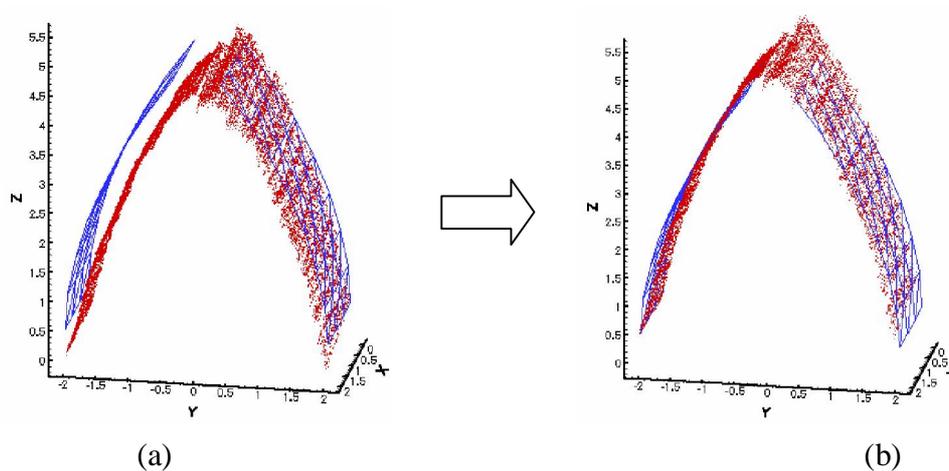


Figure A.5 : Association du nuage de points avec le modèle théorique :

(a) association initiale, (b) ajustement final

A la fin, le calcul des distances entre points et surface du modèle théorique, après association, nous donne les erreurs de forme sur les deux flancs de la dent.

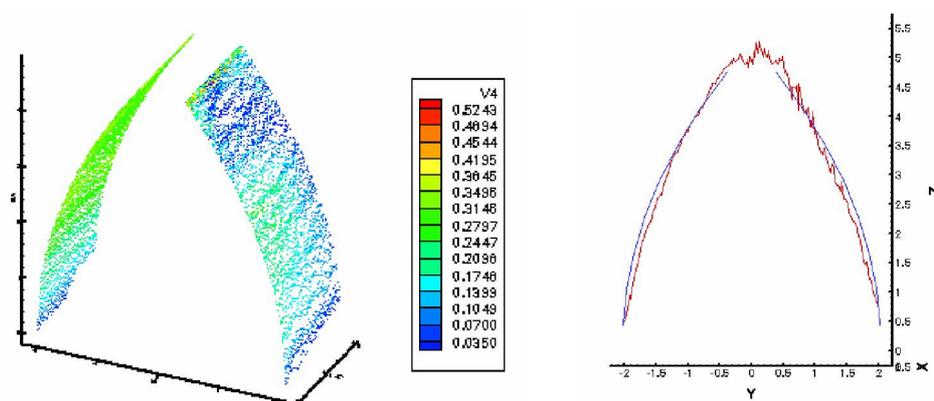


Figure A.6 : Erreurs de forme sur les flancs de la dent

Annexe B

Dans cette annexe nous présentons la structure interne du code ainsi que les formats de données utilisés dans ce travail.

1. Choix du langage

Le programme était développé en MatLab sous l'environnement de la version 7.1. Ce choix est justifié par les deux points suivants :

- Le but final de ce travail n'est pas de réaliser un logiciel mais de tester un algorithme de calcul ce qui rend l'utilisation d'un interpréteur suffisante au lieu d'un compilateur qui fournit un exécutable.
- Le nombre considérable de fonctions disponibles sous MATLAB auxquelles on peut faire appel directement ce qui permet d'économiser beaucoup d'efforts et de temps.

L'inconvénient majeur de ce choix réside dans la lenteur d'exécution avec MatLab qui ne nous donne pas une idée précise sur la vraie vitesse d'exécution du programme.

2. Structure du programme

En plus des étapes de l'algorithme, pour déterminer la structure du programme il faut prendre en considération d'autres points :

- prévoir une structure qui facilite le test du programme et la détection des sources d'erreurs.
- Utiliser des fonctions qui peuvent être utilisées pour d'autres programmes.
- Réaliser une structure ouverte permettant une intégration facile de nouvelles fonctions pour un développement éventuel de l'algorithme.

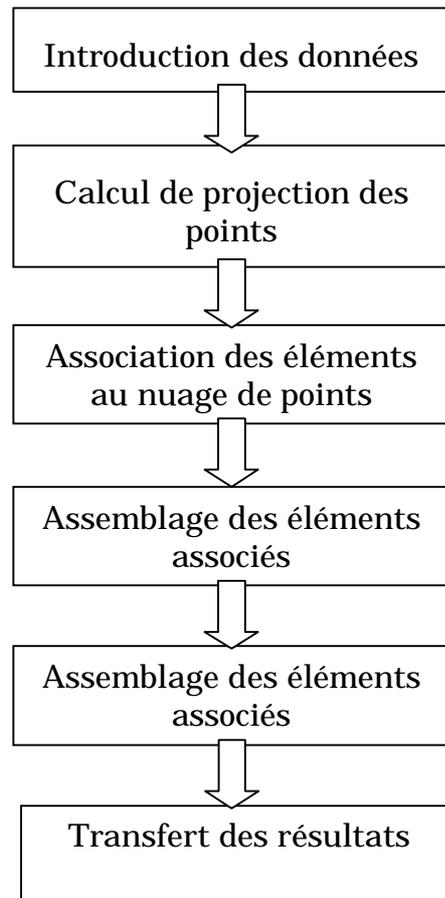


Figure B.1 : Structure du Programme développé

I.2. Lecture des données

Dans cette partie le fichier de points au format .ASC et celui de la surface au format .STL sont lus et chargés respectivement dans des tableaux à trois et deux dimension. Le Format .ASC est un format standard utilisé par le logiciel CATIA que nous utilisons pour sauvegarder les nuages de points obtenus par acquisitions.

I.3. Calcul de projection des points

Dans cette partie les points et leurs projections relatifs à chaque élément triangulaire sont calculés et organisés de façon à préserver la correspondance triangle-points.

I.4. Association des éléments au nuage de points

Dans cette partie l'association de chaque triangle avec la partie du nuage de points qui lui correspond est effectuée indépendamment des autres triangles.

```
!  
! ASCII généré par Digitized Shape Editor/CATIA  
!  
! Without Scans  
! Point Format           = 'X %f Y %f Z %f'  
!  
! Total number of points = 1600  
!  
X -22,956240 Y -40,000000 Z 0,256962  
X -20,356861 Y -40,000000 Z -0,793530  
X 31,500532 Y -40,000000 Z 1,612149  
X -17,096781 Y -40,000000 Z 1,316019  
X -12,513007 Y -40,000000 Z 1,118953  
X 22,618057 Y -40,000000 Z 1,554115  
X -15,919655 Y -40,000000 Z 0,174697  
X 21,584106 Y -40,000000 Z 1,857421  
X -3,505528 Y -40,000000 Z 1,633964  
X 6,719947 Y -40,000000 Z 0,657286  
X 13,283093 Y -40,000000 Z 0,758014  
X -8,058874 Y -40,000000 Z 1,561493  
X -9,140933 Y -40,000000 Z -0,366906  
X -38,000446 Y -40,000000 Z 0,831446  
X -1,566041 Y -40,000000 Z 1,924888  
X -23,719275 Y -40,000000 Z 0,504637  
X -18,621695 Y -40,000000 Z 0,117470  
X -23,291702 Y -40,000000 Z -0,045648  
X -35,622547 Y -40,000000 Z 0,819373
```

Figure B.2 : Extrait d'un fichier .ASC

I.5. Assemblage des éléments associés

L'objectif de cette partie c'est de réassembler les éléments en joignant les nœuds des éléments voisins.

I.6. Affichage des résultats

A la fin de cette partie nous obtenons la surface théorique en couleur pour indiquer les erreurs de forme.

Etant impossible d'afficher le format STL avec l'information d'erreur directement sous CATIA ou sous MatLab une fonction a été réalisée pour effectuer cette tâche.

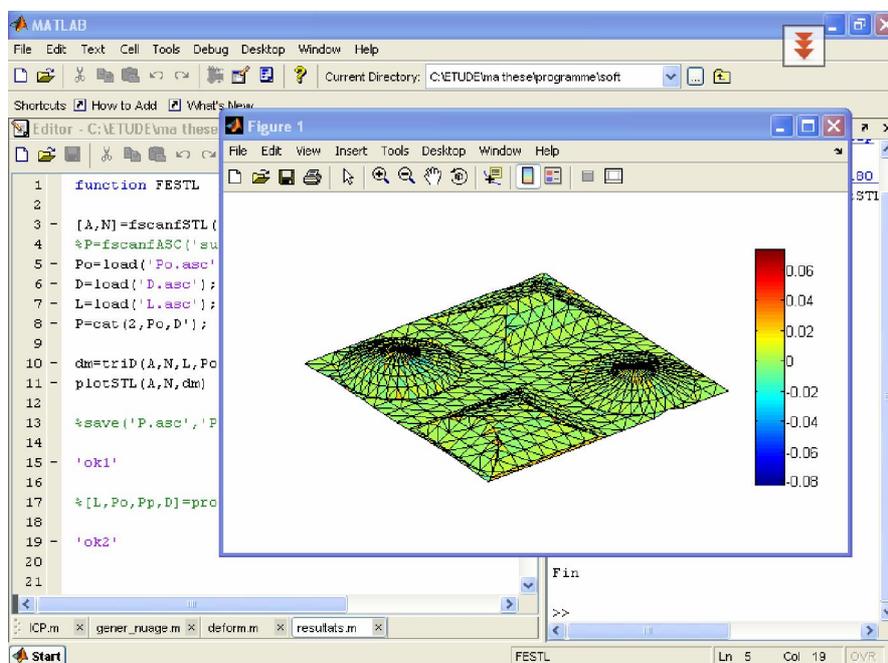


Figure B.3 : Affichage des résultats

I.7. Transfert des résultats

En plus de l'affichage, la surface finale est sauvegardée au format STL les autres résultats comme les écarts calculés et la projection des points sont sauvegardés sous format texte pour d'éventuelles analyses.

Bibliographie

Chapitre I : Le contrôle automatisé et les erreurs de fabrication

- [1] M. L. Zani, Un contrôle dimensionnel en production... oui, mais dans une "juste mesure", *Revue Mesures* 749 (43-46), Novembre 2002.
- [2] X. Zexiao, W. Jianguo, Z. Qiumei, Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (1474–1486), Springer, 2005.
- [3] M. L. Zani, Contrôle tridimensionnel : les caméras volent la vedette aux palpeurs tactiles, *Revue Mesures* 743 (33-38), Novembre 2002.
- [4] VI. Sundararajan, P.K. Wright, Volumetric feature recognition for machining components with freeform surfaces, *Computer-Aided Design* 36 (11–25), Elsevier, 2004.
- [5] D. McFarlane, S. Sarmab, J. L. Chirna, C.Y. Wonga, K. Ashton, Auto ID systems and intelligent manufacturing control, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (365–376), Elsevier, 2003.
- [6] J. Barreiro, S. Martínez, J.E. Labarga, E. Cuesta, Validation of an information model for inspection with CMM, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (819–829), Elsevier, 2005.
- [7] J. Barreiro, J.E. Labarga, A. Viza'n, J.Ri'os, Information model for the integration of inspection activity in a concurrent engineering framework, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (797–809), Elsevier, 2003.
- [8] T. Dereli, H. F. Filiz, A note on the use of STEP for interfacing design to process planning, *Computer-Aided Design* 34 (1075–1085), Elsevier, 2002.
- [9] F. Zhao, X. Xu, S. Xie, STEP-NC enabled on-line inspection in support of closed-loop machining, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24 (200–216), Elsevier, 2008.
- [10] F. Zhao, X. Xu, S.Q. Xie, Computer-Aided Inspection Planning—The state of the art, *Computers in Industry xxx (xxx–xxx)*, Elsevier, 2009.
- [11] J.P. Choi, B.K. Min, S.J. Lee, Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system, *Journal of Materials Processing Technology* 155–156 (2056–2064), Elsevier, 2004.
- [12] T J Ko, J W Park, H S Kim, S H Kim, On-machine measurement using a noncontact sensor based on a CAD model, *Int J Adv Manuf Technol* 32 (739–746), Springer, 2007
- [13] F. Prieto, N. Grégoire, T. Redarce, R. Lepage, A. Jutard, S. Doré, Contrôle Automatique sans Contact de Pièces Manufacturées, Troisième Congrès International de Génie Industriel, Montréal (Canada), 26-28 mai 1999, Presses International Polytechnique, vol. 2, pp. 683-692.

- [14] M. L. Zani, Des chemises impeccables grâce à la vision, *Revue Mesures* 744 (52-55), Avril 2002.
- [15] B Kuhlenkötter, M Sdahl, Automated inspection system for headlamp reflectors, *Int J Adv Manuf Technol* 32 (500–504), Springer, 2007.
- [16] K. Tong, E. A. Lehtihet, S. Joshi, Software compensation of rapid prototyping machines, *Precision Engineering* 28 (280–292), Elsevier, 2004.
- [17] J. K. Rai, P. Xirouchakis, Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (629–643), Elsevier, 2008.
- [18] A. Dugas, J. J. Lee, and J. Y. Hascogt, An Enhanced Machining Simulator with Tool Deflection Error Analysis, *Journal of Manufacturing Systems* Vol. 21/ No. 6, 2002.
- [19] K. Kim and M. K. Kim, Volumetric accuracy analysis based on generalized geometric error model in multi-axis machine tools, *Mech. Mach. Theory* Vol.26, No.2 pp. 207-219, 1991.

Chapitre II : L'acquisition tridimensionnelle (3D): principe et technique

- [1] VI. Moron, Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996.
- [2] <http://www.optic-3d.com/retroconception>
- [3] Lavio PRIETO, Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1999.
- [4] <http://www.laser-ndt.com/profilometry.html>
- [5] http://www.evasion.inrialpes.fr/people/Lionel.Reveret/M2R07/M2R_scanner.html
- [6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Scanner_3D
- [7] Frankowski, G. Chen, M. Huth, Optical Measurement of the 3D-Coordinates and the Combustion Chamber Volume of Engine Cylinder Heads Proc. Of "Fringe 2001", pp. 593 – 598
- [8] <http://www.geodesie-maintenance.com/fr/photogrammetrie.php>
- [9] M. Bouaziz, Contribution au contrôle d'engrenages sur machine à mesurer, Thèse de doctorat d'état, Ecole national polytechniques, Décembre 1995.

Chapitre III : La modélisation géométrique

- [13] VI. Moron, Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996.
- [14] N. Magnenat-Thalmann, Cours sur la modélisation d'objets solides & surfaces implicites et objet mous.
- [15] L. PRIETO, Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1999.
- [16] http://www.icab.fr/new_art1.htm
- [17] www.antea.fr/antea/logiciels/itedo/pdf.../format_igs.pdf
- [18] <http://guide-cfao.infometiers.org/documents/exploiter/step.doc>

- [19] www.iso.org/iso/fr/iso_cafe_step.htm
- [20] www.hes-imec.ch/cnmp/.../STEP-NC_UTGV_2004.pdf
- [21] F. Zhao, X. Xu , S.Q. Xie, Computer-Aided Inspection Planning—The state of the art, *Computers in Industry xxx (xxx–xxx)*, Elsevier, 2009.
- [22] Z.-C. Lin and J.-J. Chow, Integration planning model of IDEF0 and STEP Product in a CMM measuring system, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17 (39–53), Elsevier, 2001.
- [23] J. Wolf, M. Vitr and C. Brecher, Closed-loop CAPP/CAM/CNC process chain based on STEP and STEP-NC inspection tasks, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 19 (570-580), Elsevier, 2006.
- [24] L. Ali, S.T. Newman and J. Petzing, Development of a STEP-compliant inspection framework for discrete components, *Proceedings of the Institutions of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219 (557–563), Elsevier, 2006.

Chapitre IV : L'association d'un élément géométrique à un nuage de points

- [1] VI. moron, Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996.
- [2] S. Boukebbab, Contribution à l'étude des discontinuités présentes dans les mécanismes en vue d'une coopérative-engineering, thèse de doctorat, ENSAM d'Aix en Provence, Juillet 1998.
- [3] P. Bourdet, Logiciel des machine a mesurer tridimensionnelles, technique de l'ingénieur, R 1316, Editions techniques.
- [4] P. Bourdet, Cour sur la Spécification Géométrique des Produits (GPS), Département de Génie Mécanique de L'École Normale Supérieure de Cachan, Février 2001
- [5] T. M. Tucker, T. R. Kurfess, Newton method for parametric surface registration, Part I. Theory, *ELSEVIER, computer-aided design*, p.107-114, 35(2003).
- [6] T. M. Tucker, T. R. Kurfess, Newton method for parametric surface registration, Part V. Experimental validation, *ELSEVIER, computer-aided design*, p.115-120,35 (2003).
- [7] J. J. Dennis, R. Schnabel, Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations. Philadelphia: SIAM, 1996.
- [8] H. Talbi, A. Layeb, Un réseau neurones pour la mise en correspondance des primitives en recalage d'images, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en informatique, département d'informatique, université Mentouri, Constantine, Juin 2000.
- [9] P. Besl, N. McKay, A Method for Registration of 3-D shapes, *Trans. PAMI*, Vol. 14, No. 2, 1992.
- [10] S. Lavalee, R. Szeliski, Recovering the position and orientation of free- form object from image contours using 3D distance maps. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, N°4, p.378-390, 1995.
- [11] S. Weik, Registration of 3-D Partial Surface Models Using Luminance and Depth Information, *Proc. 3DIM*, 1997.

- [12] T. Masuda, K. Sakaue, N. Yokoya, Registration and Integration of Multiple Range Images for 3-D Model Construction, Proc. CVPR, 1996.
- [13] S. Rusinkiewicz, M. Levoy, Efficient Variants of the ICP Algorithm, Stanford University.
- [14] K. Pulli, Multiview Registration for Large Data Sets, Proc. 3DIM, 1999.
- [15] P. J. Rousseuw, A. M. Leroy, Robust registration & Outlier Detection, New York: John Wiley& Sons, Wiley Series in probability and statistics, 1987.
- [16] C. Dorai, J. Weng, A. K. Jain, Optimal registration of multiple range views. I proceeding, 12th International Conferences on Pattern Recognition, Los Alamos, California: IEEE Computer Society press, p.569-571, 1994.
- [17] Z. Zhang, Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. International journal of computer Vision, Vol. 13, N°2, p. 119-152, 1994.
- [18] H. Bouchenitfa, S. Boukebbab, H. Boughouas, « Mise en place de modèle pour gabarit virtuel pour surface gauche », Conférence Internationale de Mécaniques Avancées, CIMA'2004, 30 Novembre-02 Décembre 2004, Boumerdes, Algérie, 2004.
- [19] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, J.M. Linares, «Towards an automated inspection method of complex surface by using the Iterative Closest point algorithm» 13^{ème} Congrès International de Métrologie, 19-21 Juin 2007, Lille, France

Chapitre V : Analyse et compensation des erreurs

- [1] S.L. Campanelli, G. Cardano, R. Giannoccaro, A.D. Ludovico, E.L.J. Bohez, statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy, journal of computer-aide design 39 (80-86), Elsevier, 2006.
- [2] K. Tong, E. A. Lehtihet, S. Joshi, Software compensation of rapid prototyping machines, journal of precision engineering 28 (280-292), Elsevier, 2004
- [3] H. Bouchenitfa, S. Boukebbab, J.M. Linares, J.M. Sprauel, « Compensation relative deviations in the STL model using the FEM method: Application at the rapid prototyping technology» International Conference on Computer Aided Tolerancing, CIRP-CAT 2009, Annecy, 26-27 Mars, Ecole Polytechnique de la Savoie, Annecy de vieux, France.
- [4] S. S. Rao, The finite element method in engineering, Bergamo press, 1992.
- [5] J.-F. Imbert, Analyse des structures par éléments finie, Cépaduès éditions, 1995.
- [6] L. Champaney, notes de cours du module : approximation numérique pour la physique, département de mécanique, Université de Versailles, St-Quentin en Yvelines, mars 2005
- [7] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu, The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Sixth edition 2005, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [8] G. R. Lui, S. S. Quek, the finite element method a practical course, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.

- [9] McInerney, D. Terzopoulos, Finite element techniques for fitting a deformable model to 3D data, T., Proc. Vision Interface '93, Toronto, ON, Canada, May, 1993, pages 70-76.
- [10] T. McInerney, D. Terzopoulos, A finite element model for 3D shape reconstruction and nonrigid motion tracking
- [11] D. Terzopoulos, elastically deformable models, computer graphics, volume 21, number 4, july 1987.
- [12] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, J.-M. Linares, Development of a mathematical procedure for modelling and inspecting complex surfaces for measurement process, Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing, 78 (37-43), Word Scientifique, 2006.
- [13] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, H. boughouas, J.M.LINARES, Applied Iterative closest Point algorithm to automated inspection of gear box tooth, International Journal of Computer & Industrial Engineering 52 (162-173), Elsevier, 2007.

Chapitre VI : Application industrielle : correction de modèles en prototypage rapide

- [1] http://eliot.utc.fr/Docs/NOTICE_GENERALE/000/0000/00002140/Prototypage_1.0.0.pdf
- [2] D. Ahna, H. Kimb, S. Leec, Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing, journal of materials processing technology 209 (664–671), Elsevier, 2009.
- [3] R. B. Patil, VI. Yadava, Finite element analysis of temperature distribution in single metallic powder layer during metal laser sintering, Image and Vision Computing 25 (1174–1184), Elsevier, 2007.
- [4] K. Lu, M. Hiser, W. Wu, Effect of particle size on three dimensional printed mesh structures, Powder Technology 192 (178–183), Elsevier, 2009.
- [5] K. Tong, E. A. Lehtihet, S. Joshi, Software compensation of rapid prototyping machines, Precision Engineering 28 (280–292), Elsevier, 2004.
- [6] S.L. Campanelli, G. Cardanoa, R. Giannoccaroa, A.D. Ludovicoa, E.L.J. Bohezb, Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy, Computer-Aided Design 39 (80–86), Elsevier, 2007.
- [7] K. Chockalingama, N. Jawahara, U. Chandrasekarb, K.N. Ramanathana, Establishment of process model for part strength in stereolithography, journal of materials processing technology 208 (348–365), Elsevier, 2008.
- [8] H. Boughouas, S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, I. amara, « Control by virtual gauge of skew surfaces for correction process », Volume 31, The International journal of Advanced Manufacturing Technology (2007), (Edition de revue: Springer), ISSN 0268-3768
- [9] S. Boukebbab, H. Bouchenitfa, H. Boughouas, « Approximation par éléments finis des surfaces gauches en vue d'une reconstitution de forme », 7ème Congrès de Mécaniques, Casablanca 18-21 Avril 2005, édité par le CNRST, Volume 01.

Résumé :

Avec l'ouverture des marchés et l'augmentation de la concurrence, les critères de qualité et de flexibilité sont devenus décisifs pour la préservation et l'élargissement des parts de marché. Afin de répondre à ces exigences, la production automatisée s'impose comme solution. Cette dernière a connu un développement considérable dans ses phases de conception et de fabrication mais la fonction contrôle reste à maîtriser. Dans ce travail nous traitons l'automatisation de la fonction contrôle, non seulement dans sa phase de détermination des erreurs, mais aussi dans sa phase d'analyse et de traitement de ces erreurs par compensation, car l'objectif final n'est pas de mesurer des erreurs mais de corriger des défauts. A la fin, nous proposons une application pour le cas du prototypage rapide.

Mots clés : erreurs de fabrication, production automatisée, compensation des erreurs, prototypage rapide.

Abstract:

With the opening of markets and the increased of competition the criteria of quality and flexibility have become crucial to the maintaining and expansion of market share, for this reason production automation solution is needed. Automated production has known in recent years a considerable development in all these phases (from design to inspection passing through the manufacturing process) with a greater or lesser degrees but inspection function is still late. In this work we deals with the automation of the inspection function, not only in the phase of errors determining but also the phase of analysis and treatment of errors with compensation because the final goal is not the measure of errors but the correct of defects. At the end we propose an application to the case of rapid prototyping.

Keywords: manufacturing errors, automated production, error compensation, rapid prototyping.