

Républiques Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université MENTOURI Constantine
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique



N° d'ordre : /MAG/2010
Série : /GM/2010

Mémoire
Présentée en Vue d'Obtenir
Le Diplôme de MAGISTER en Génie Mécanique
Option Mécanique Avancée
Conception Intégrée des Systèmes Mécanique et Application Industrielle

Par

Noureddine AZZAM

MISE EN PLACE D'UN MODELE
D'INSPECTION DES SURFACES A GEOMETRIES COMPLEXES EN
VUE D'UNE CORRECTION PROCESS : APPLICATION A L'USINAGE
DES PROTHESES PAR PROTOTYPAGE RAPIDE

Soutenue publiquement le **Mardi 04/Mai/2010**

MEMBRES DU JURY

PRESIDENT DU JURY :	Ahmed BELLAOUAR,	Professeur à l'Université de Constantine
RAPPORTEUR :	Salim BOUKEBBAB,	Professeur à l'Université de Constantine
EXAMINATEUR :	Rachid CHAÏB,	M.C à l'Université de Constantine
EXAMINATEUR :	Idriss AMARA,	M.C à l'Université de Constantine

*Merci à dieu de nous avoir donnés de la volonté,
et de la patience pour réaliser ce travail*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon encadreur Monsieur **Salim BOUKEBBAB**, Professeur au Département de Génie Mécanique à l'Université MENTOURI Constantine, pour m'avoir suivi avec patience et intérêt et pour la confiance qu'il a placé en moi tout au long de ce travail. Ses conseils précieux et ses encouragements m'ont été d'une aide très précieuse dans la réalisation de ce projet.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur **Ahmed BALLAOUAR** Professeur à l'Université MENTOURI Constantine, pour avoir accepté de présider le jury d'examen de ce mémoire. Je remercie également Monsieur **Rachid CHAIB** Maître de Conférences à l'Université MENTOURI Constantine, et Monsieur **Idriss AMARA**. Maître de Conférences à l'Université MENTOURI Constantine pour l'honneur qui m'ont fait d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir consacré de leur temps à la lecture de ce mémoire.

Merci à Monsieur **Smail BENISSAAD** Maître de Conférences à l'Université MENTOURI Constantine et Chef département de Génie Mécanique. Et de manière plus générale, les enseignants chercheurs et personnes du laboratoire de Génie Mécanique.

Mes remerciements s'adressent aussi à Messieurs **Hamlaoui BOUGHOUAS** Professeur à l'Université MENTOURI Constantine, **Yacine**

BENTCHAKER, Enseignant au département de Génie Mécanique à l'Université MENTOURI Constantine, et **Nacer BECILA** pour leur aide considérable.

Merci aussi à tous mes amis de longue date qui se trouvent dispersés dans ce monde, mais qui ont toujours été très près de moi, malgré les kilomètres qui nous séparent.

Je tiens également à remercier toutes les personnes dont la présence et parfois l'aide m'ont été précieuses. Que ceux que je n'ai pas cités trouvent leur place ici.

Enfin, Je tiens à remercier ma famille. Mes parents, pour leur soutien et leur encouragement illimité durant ces longues années d'études. Je voudrais leur témoigner ma profonde reconnaissance. Je remercie aussi les membres de ma famille.

Je désire finalement exprimer toute ma reconnaissance à mes collègues de l'équipe, pour leur soutien, leur esprit d'équipe et leur inconditionnelle bonne humeur.

Noureddine AZZAM

mardi 4 mai 2010

ملخص

تعتبر تكنولوجيا النماذج السريعة من نوع الطابعة الساخنة تقنية حديثة حيث تسمح بصناعة تصميم أو نموذج فيزيائي خاص و معين من خلال ملف مصمم بواسطة برنامج CAO^1 من نوع STL^2 حيث يقسم إلى شرائح رقيقة ثم يتم وضع المادة طبقة بطبقة من أجل الحصول في النهاية على القطعة.

لكن المشكل الأساسي لهذه التكنولوجيا الجديدة ينشئ عندما يكون سمك القطعة صغير جدا، حيث يحدث تشوه في القطعة و نعرف ذلك من خلال مراقبة القطعة بواسطة طريقة الإزاحة للسطح الحقيقي نحو السطح النظري.

في مرحلة الإزاحة نعتد على الخوارزمي ICP^3 . هذا الخوارزمي يسمح بإيجاد التحويل من النموذج الحقيقي إلى النموذج النظري. هذا النظام المساعد يستعمل كمرجع لأجاد المحور الميكانيكي للأطراف السفلية لجسم الإنسان و توجيه قطع العظام الذي يعتبر ليس سهل مقارنة بالطرق التقليدية.

كلمات المفتاح: النموذج السريع، مراقبة الأجزاء الميكانيكية، السطوح المعوجة، الخوارزمي ICP ، بادئة.

¹ Conception Assistée par Ordinateur.

² STéréoLithographie

³ Iterative Closest Point.

RESUME

La technologie du Prototypage Rapide (PR) par impression à chaud est une technique récente permettant de fabriquer une maquette ou un modèle physique particulièrement précis à partir d'un fichier CAO sous format STL en le découpant en tranches puis en déposant de la matière couche par couche pour final obtenir la pièce.

Le problème principal relatif à cette nouvelle technologie consiste, lorsque les épaisseurs des pièces sont faibles, cela engendre une déformation de la génératrice qui ne peut être décelé qu'après contrôle de cette dernière après mise en correspondance du modèle STL avec le nuage de points issus de l'acquisition.

Dans l'étape de mise en correspondance l'algorithme ICP est utilisé en conséquence. Cet algorithme permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition. Ce système d'assistance par la mise en correspondance ayant pour référence l'axe mécanique du membre inférieur et l'orientation des coupes osseuses ce qui n'est pas toujours facile avec les techniques traditionnels.

Mots clés : Prototypage Rapide, Inspection, Surface Gauche, Algorithme ICP, Prothèse de Genou.

ABSTRACT

The technology of Rapid Prototyping by hot impression is a recent technique making it possible to manufacture a model or a particularly precise physical model starting from a file CAD⁴ under format STL by cutting out it in sections then by depositing matter sleeps by layer for final obtaining the part.

The principal problem relative to this new technology consists, when the thicknesses of the parts are reliable, that generates a deformation of the generator which can be detected only after control of the latter after mapping of model STL with the cloud of points stemming from acquisition.

In the stage of stake in correspondence algorithm ICP is used consequently. This algorithm makes it possible to find the transformation going of a model 3D to a whole of data obtained by system of acquisition. This system of assistance by the stake in correspondence having for reference the mechanical axis of the lower extremity and the orientation of the osseous cuts what is not so easy to perform with conventional ancillaries.

Key words: Prototyping Rapid, Inspection, free form surfaces, ICP algorithm, Prosthesis of Knee.

⁴ Computer Aided Design.

TABLE DES MATIERES

MISE EN PLACE D'UN MODELE D'INSPECTION DES SURFACES A GEOMETRIES COMPLEXES EN VUE D'UNE CORRECTION PROCESS : APPLICATION A L'USINAGE DES PROTHESES PAR PROTOTYPAGE RAPIDE

REMERCIEMENTS.....	III
V.....	ملخص
RESUME.....	VI
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIERES.....	VIII
TABLE DES FIGURES.....	X
Liste des Tableaux	XII
INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	1

CHAPITRE I : TECHNOLOGIE DU PROTOTYPAGE RAPIDE

I.1	Introduction	3
I.2	Définition du Prototypage Rapide	4
I.3	Différentes Catégories de Modèle de Prototype.....	6
I.4	Données Numériques	7
I.5	Outils du Prototypage Rapide	8
I.6	Conclusion.....	15

CHAPITRE II : INSPECTION DES PIECES PROTOTYPEES

II.1	Introduction	16
II.2	Dimensions et Tolérances	16
II.3	Définition et Contrôle des Tolérances.....	17
II.4	Les Techniques Utilises en Métrologie 3D	23
II.5	Systèmes de Positionnement	30
II.6	Conclusion.....	32

CHAPITRE III : ASSOCIATION D'UN ELEMENT GEOMETRIQUE A UN NUAGE DE POINTS

III.1	Introduction	33
III.2	Association par le Torseur des Petits Déplacements.....	35
III.3	Méthode Non Linéaires	38
III.4	La Méthode ICP (Iterative Closest Point)	44

III.5 Conclusion..... **47**

**CHAPITRE IV :
TRAITEMENT DES DONNEES DU GENOU**

IV.1 Introduction **48**
IV.2 Applications Sur les Formes Simple **48**
IV.3 Applications Sur Les Formes Complexes **57**
IV.4 Application Sur un Genou **60**
IV.5 Prothèses du genou **70**
IV.6 Conclusion..... **75**

CONCLUSION ET PERSPECTIVES..... **76**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES **78**

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE I :

TECHNOLOGIE DU PROTOTYPAGE RAPIDE

Figure I-1 : Cycle de vie d'un produit	3
Figure I-2 : Processus de Prototypage Rapide	4
Figure I-3 : Les étapes du prototypage rapide.....	5
Figure I-4 : Exemple de triangulation STL.....	7
Figure I-5 : Augmentation de la précision	8
Figure I-6 : Principe de construction d'un objet par empilage séquentiel de couches	9
Figure I-7 : Principe de Stéréolithographie.....	10
Figure I-8 : Principe du flashage de couches	10
Figure I-9 : Principe du procédé FDM de Stratasys.....	12
Figure I-10 : Principe de la fabrication par découpage.....	13
Figure I-11 : Principe de la fabrication de couches par projection	13
Figure I-12 : Principe du frittage de poudre par laser	14

CHAPITRE II :

INSPECTION DES PIECES PROTOTYPEES

Figure II-1 : Tolérances dimensionnelles et angulaires sur une pièce	18
Figure II-2 : Contrôle de tolérances dimensionnelles.....	18
Figure II-3 : Contrôle de tolérances angulaires	19
Figure II-4 : Spécification des tolérances géométriques sur une pièce.....	20
Figure II-5 : Contrôle des tolérances de forme	21
Figure II-6 : Contrôle des tolérances de forme quelconque.....	22
Figure II-7 : Résultat d'une numérisation d'engrenage	24
Figure II-8 : Différentes technologies de numérisation 3D	25
Figure II-9 : Détail d'un palpeur.....	26
Figure II-10 : Principe de la triangulation laser	27
Figure II-11 : Système mis en place pour l'acquisition 3D dans l'infrarouge.....	28
Figure II-12 : Numérisation laser dans l'infrarouge.	28
Figure II-13 : Capteurs à lumière structurée	29
Figure II-14 : La technique de stéréoscopie.....	29
Figure II-15 : MMT de différentes dimensions	30
Figure II-16 : Système d'acquisition sur bras robotisé	31
Figure II-17 : Bras polyarticulé	32

CHAPITRE III :

ASSOCIATION D'UN ELEMENT GEOMETRIQUE A UN NUAGE DE POINTS

Figure III-1 : Petit déplacement du point M_{thi}	36
Figure III-2 : Optimisation d'un plan	38
Figure III-3 : Optimisation d'un cercle.....	38
Figure III-4 : Changement de base	40
Figure III-5 : Distance entre un point 3D et une surface NURBS.....	41
Figure III-6 : Appariement des points les plus proches appartenant à une courbe.....	44
Figure III-7 : L'ICP au plan tangentiel à une surface dans un point connu	45
Figure III-8 : Un échantillonnage favorisé par rapport à l'échantillonnage uniforme	46

CHAPITRE IV:

TRAITEMENT DES DONNEES DU GENOU

Figure IV-1 : Association d'une ligne 2D.....	49
Figure IV-2 : Association d'une ligne 3D.....	50
Figure IV-3 : Association d'un plan	52
Figure IV-4 : Associée d'un cercle par la méthode de la descente de gradient.....	54
Figure IV-5 : Associée d'un cercle par la méthode de Gauss-Newton.....	56
Figure IV-6 : Extrait d'un fichier STL.....	58
Figure IV-7 : Le nuage de points associé au modèle de la surface théorique.....	59
Figure IV-8 : Modèle final.....	59
Figure IV-9 : Evolution de l'erreur résiduelle de distance pour l'algorithme ICP	60
Figure IV-10 : Exemple d'erreurs d'approximations.....	61
Figure IV-11 : L'erreur d'approximations en fonction de nombre de triangles	61
Figure IV-12 : Nuage de point d'un genou	62
Figure IV-13 : Triangulation d'un nuage de point.....	63
Figure IV-14 : Modèle STL d'un genou	64
Figure IV-15 : Superposition du nuage de points et du modèle théorique	68
Figure IV-16 : Modèle finale de genou.....	69
Figure IV-17 : Evolution de l'erreur résiduelle de distance.....	69
Figure IV-18 : Anatomie du genou	72
Figure IV-19 : Prothèse uni-compartimentale	73
Figure IV-20 : Prothèse totale de genou	74
Figure IV-21 : Prothèse charnières	75
Figure IV-22 : Usure d'une prothèse de genou.....	75

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : TECHNOLOGIE DU PROTOTYPAGE RAPIDE

Tableau I-1 : Domaines d'application de la fabrication par couche.....	15
---	-----------

CHAPITRE IV : TRAITEMENT DES DONNEES DU GENOU

Tableau IV-1 : Coordonnées d'un linge 2D.....	49
Tableau IV-2 : Coordonnées d'une ligne 3D.....	50
Tableau IV-3 : Coordonnées d'un plan	51
Tableau IV-4 : Coordonnées d'un cercle.....	52
Tableau IV-5 : Comparaison entre les deux méthodes.....	56

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Dans un monde en perpétuelle évolution, les industries de la mécanique doivent s'adapter à de nouvelles contraintes, telles que la mondialisation des marchés qui entraîne une concurrence accrue. Les critères de choix du client sont la qualité, le prix et le délai de mise à disposition du produit. Le système de production doit donc être capable de réagir en termes de fiabilité, de productivité et de flexibilité.

Pour répondre à ces critères essentiels de réussite, les entreprises ont dû adapter leur processus de conception, mais aussi tenir compte de l'émergence de nouvelles technologies. Ainsi, il devient crucial pour les entreprises de disposer d'outils permettant de matérialiser rapidement les produits en cours de développement, afin de détecter au plus tôt les erreurs de conception, de tester et de valider par l'ensemble des acteurs les différentes solutions techniques retenues. C'est le champ de recherche du Prototypage Rapide (PR).

La technologie du Prototypage Rapide est une technique récente permettant de fabriquer un modèle physique particulièrement précis à partir d'un fichier CAO sous format STL en le découpant en tranches puis en déposant de la matière couche par couche pour final obtenir la pièce. Le problème principal relatif à cette nouvelle technologie consiste, lorsque les épaisseurs des pièces sont faibles, cela engendre une déformation de la génératrice qui ne peut être décelé qu'après contrôle de cette dernière après mise en correspondance du modèle STL avec le nuage de points issus de l'acquisition.

Dans l'étape de mise en correspondance l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) est utilisé en conséquence. Cet algorithme permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre présente la définition et les principes de fonctionnements de la technique de Prototypage Rapide, ayant pour interface un fichier sous format « STL » issu de la CAO. A la fin du chapitre, nous étudions les différents outils du Prototypage Rapide.

Le deuxième chapitre, traite la partie inspection des pièces prototypées (dimensionnelles, angulaires et géométriques). Nous présentons ensuite les techniques utilisées en métrologie tridimensionnelle à savoir : contact, sans contact, triangulation laser,

lumière structurée et la stéréoscopie. Enfin, nous présentons les systèmes de positionnement (MMT, bras robotisé et bras polyarticulé).

Les méthodes d'association d'un élément géométrique à un nuage de points sont présentées dans le chapitre III, on utilisant dans l'étape de mise en correspondance l'algorithme Iterative Closest Point (ICP) est utilisé en conséquence. Cet algorithme permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition.

Enfin dans le dernier chapitre nous présentons la partie programmation avec traitement de cas de surfaces usuelles (ligne 2D, ligne 3D, d'un plan et d'un cercle), ainsi que le cas des surfaces à géométries complexes (Surface gauches). Le chapitre ce termine par une application concernant l'articulation genou du corps humain.

A la fin du mémoire une conclusion avec perspectives sont développés.

CHAPITRE I : TECHNOLOGIE DU PROTOTYPAGE RAPIDE

I.1 INTRODUCTION

Mondialisation des marchés, concurrence de plus en plus vive, réactivité de plus en plus grande de la part des entreprises. Dans ce contexte, une entreprise qui souhaite conserver et/ou acquérir de nouvelles parts de marché doit : Maîtriser ses coûts ; Améliorer la qualité des produits et des études ; Réduire ses délais de développement.

Pour répondre à ces critères essentiels de réussite, les entreprises ont dû adapter leur processus de conception, mais aussi tenir compte de l'émergence de nouvelles technologies. Ainsi, il devient crucial pour les entreprises de disposer d'outils permettant de matérialiser rapidement les produits en cours de développement, afin de détecter au plus tôt les erreurs de conception, de tester et de valider par l'ensemble des acteurs les différentes solutions techniques retenues. C'est le champ de recherche du Prototypage Rapide.

On note l'apparition, en 1986, aux États-Unis de l'ingénierie concurrente. Cette approche permet de prendre en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit (Figure I-1) et de développer conjointement le produit et ses moyens de production. Quatre grandes notions caractérisent l'ingénierie concurrente [CARTER, et al., 1992] :

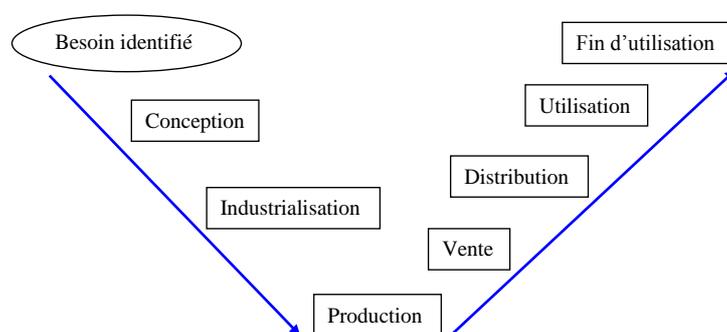


Figure I-1 : Cycle de vie d'un produit

- **Notion de simultanéité** : l'engagement en parallèle des activités (et des tâches), des services (et des métiers) permet de diminuer les gaspillages et les pertes de temps notamment en évitant les temps de passage trop long,

- **Notion de concurrence** : par l'exploration de différentes variantes d'un produit afin de retenir la solution la mieux adaptée au problème posé,
- **Notion de découpage** du projet en sous-projets ayant des interfaces bien identifiées,
- **Notion d'intégration** : concevoir un produit nécessite de faire appel à de multiples compétences métiers (électroniciens, mécaniciens, ...), regroupées au sein d'un groupe projet présent tout au long du cycle de vie du produit.

I.2 DEFINITION DU PROTOTYPAGE RAPIDE

Le Prototypage Rapide (PR) désigne l'ensemble des technologies qui permettent d'obtenir la représentation physique d'un modèle CAO dans un délai très court. Toutes ces technologies sont basées sur le même principe de reconstruction par superposition de couches. Les différences essentielles entre les technologies résident dans les matériaux à disposition et dans l'épaisseur des couches (influant directement sur la vitesse de fabrication et la qualité d'état de surface) [Prototypage, 2010].

Le Prototypage Rapide regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des projets de représentation intermédiaire de la conception de produits : les modèles numériques (géométrie du modèle), les maquettes, les prototypes et les préséries [BERNARD, et al., 1998]. **Figure I-2.**

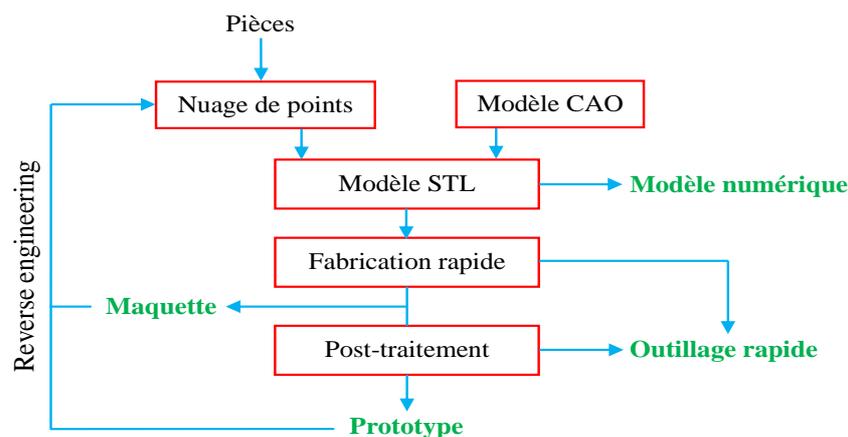


Figure I-2 : Processus de Prototypage Rapide

Le Prototypage Rapide intègre trois notions essentielles que sont :

- **Temps** : l'objectif du Prototypage Rapide est de réaliser rapidement les modèles, dans un but de réduction des temps de développement des produits,
- **Coût** : Le Prototypage Rapide permet de réaliser des prototypes sans qu'il soit nécessaire de recourir à des outillages coûteux, tout en garantissant les performances du produit final,

- **Complexité des formes** : Les machines procédant par ajout de matière sont capables de réaliser des formes extrêmement complexes, irréalisables par des procédés tels que l'usinage conventionnel par exemple.

Le principe général du prototypage rapide [BERNARD, et al., 1998] consiste à décomposer un modèle 3D en couche 2D qui seront fabriquées par différents procédés se caractérisant principalement par l'ajout de matière contrairement aux procédés conventionnels qui se font par enlèvement de matière. Ce découpage en strate en deux dimensions permet d'éliminer les problèmes de réalisation de formes complexes 3D, les surfaces en contre dépouille, inaccessibles. L'empilement des couches se fait soit automatiquement soit manuellement en fonction du procédé de génération des couches. La finition de prototypes nécessite des post-traitements comme le ponçage, l'enlèvement de supports, l'usinage, la peinture ou vernissage ...

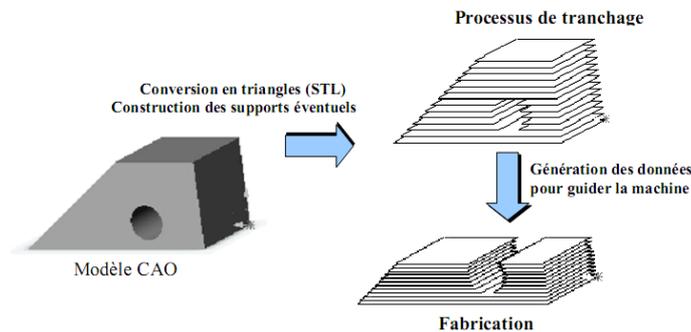


Figure I-3 : Les étapes du prototypage rapide [HERVE, 2004]

Le procédé de prototypage peut se décomposer en cinq étapes [HERVE, 2004] (Figure I-3) :

1. Création ou récupération du modèle CAO en 3D : Les modèles de CAO utilisés sont des modèles surfaciques fermés ou des modèles solides.
2. Interfaçage avec les machines de prototypage : l'interface standard en prototypage rapide est le format STL.
3. Découpage en strates : La direction et le pas de découpage sont deux paramètres importants qui conditionnent la qualité et le coût du prototype.
4. Fabrication du modèle en fonction des techniques utilisées : Certains procédés imposent des supports, d'autres utilisent la matière non utilisée comme support, d'autres permettent d'empiler les prototypes sur la plate-forme de construction.

5. Le post-traitement : les prototypes doivent subir plusieurs opérations de finition comme le ponçage, la suppression des supports, la peinture, le vernissage et même parfois des opérations de reprise par usinage pour obtenir la précision requise.

I.3 DIFFERENTES CATEGORIES DE MODELE DE PROTOTYPE

La conception de produits requiert deux grands types de représentation physique :

- Des représentations permettant de visualiser l'objet,
- Des représentations permettant de valider les fonctions.

A chaque niveau d'avancement du développement du produit correspond un (des) type(s) de modèle et/ou de prototype(s) [BARALDI, et al., 1993].

I.3.1 Modèle de conception

Pour juger la forme d'un objet (l'aspect esthétique), il n'est pas toujours utile que le matériau du modèle soit identique à celui du produit final. On privilégiera l'emploi de matériaux peu coûteux. Avec ces modèles appelés modèle de conception on peut juger l'esthétisme du futur produit, son ergonomie, mais aussi l'employer pour réaliser des études de marché.

I.3.2 Prototype géométrique

Au cours d'un développement de produit, les bureaux d'études doivent effectuer des modifications numériques de forme CAO, voire directement sur le modèle physique. Le prototype géométrique a pour vocation de vérifier la conformité des formes (points de tangences, raccordements des surfaces), et des dimensions avec le modèle numérique de CAO.

I.3.3 Prototype fonctionnel

Le prototype fonctionnel permet, par ses caractéristiques « proche bonne matière », de valider le produit, d'optimiser ses principes d'assemblage et de fonctionnement. La validation de ce prototype permet de lancer la conception des outillages.

I.3.4 Prototype technologique

Les prototypes technologiques « simili bonne matière » ou « bonne matière » sont fabriqués avec un matériau conforme à celui de la fabrication série. Ces prototypes

technologiques permettent de réaliser des tests mécaniques, thermiques, Fabriqué à cinquante exemplaires environ, ils contribuent à la validation du produit, aux choix des opérations de fabrication, ainsi que des moyens de production.

I.3.5 Présérie

Enfin, les prototypes de préséries constituent l'ultime étape avant la fabrication en série. Ceux-ci sont fabriqués à plusieurs centaines d'exemplaires et peuvent être réalisés suivant le procédé de fabrication série.

I.4 DONNEES NUMERIQUES

Les données numériques ont un rôle central dans le PR. Dans un tel processus, il est essentiel que les transferts de données entre les différents outils soient correctement effectués, afin d'éviter toute perte d'information (**Figure I-2**).

I.4.1 Différents types de données

Les outils de numérisation ont pour objectif de recueillir des informations sur la topologie de l'objet à reproduire. Celles-ci se présentent sous la forme de nuages de points (les coordonnées X, Y et Z) aux formats ASCII ou binaire. Ces nuages de points, traités par les logiciels de reconstruction de surfaces, permettent d'aboutir à des modèles surfaciques (Béziers, NURBS, ...), exportables aux formats IGES, VAD, ... ou polyédriques (B-Rep facetté, STL).

I.4.2 Le format STL

Le format STL est un format dédié à la Stéréolithographie introduit par la société 3D Systems en 1987 [DOLENC, 1994], permet de décrire un objet sous la forme d'un polyèdre à facettes triangulaires, la **Figure I-4** en donne un exemple. Aujourd'hui adopté par l'ensemble des fabricants de machines de Prototypage Rapide, il offre l'avantage d'être facilement généré par l'ensemble des outils CAO.

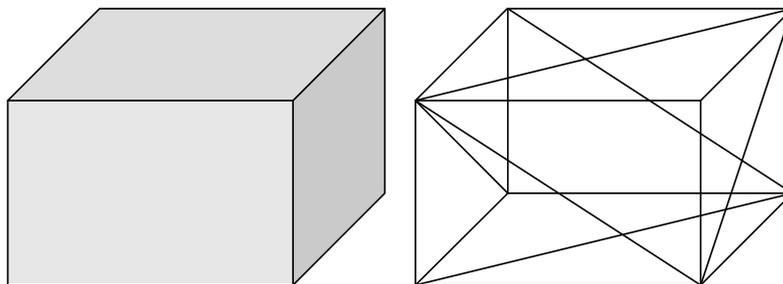


Figure I-4 : Exemple de triangulation STL (12 triangles)

Les surfaces d'un objet (issues d'une conception surfacique ou volumique) sont remplacées par des facettes approxinant la définition géométrique initiale. Les incertitudes générées peuvent être minimisées par l'augmentation du nombre de facettes, les erreurs sont caractérisées par un paramètre « d » représentant la distance des points de la surface à la facette triangulaire associée (**Figure I-4**) [GALLAIS, et al., 1994].

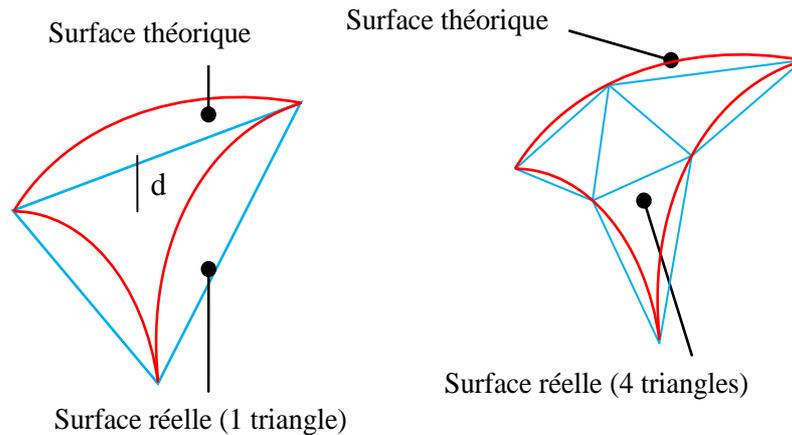


Figure I-5 : Augmentation de la précision

Le format STL nécessite que la modélisation surfacique soit parfaite. Les surfaces doivent être parfaitement fermées et orientées. Si ces deux conditions ne sont pas remplies, le fichier STL sera de mauvaise qualité. Concernant la modélisation volumique, le modèle créé est réalisé à partir d'entités géométriques volumiques et par opérations booléennes, par conséquent parfaitement assemblées.

De nombreux logiciels sont commercialisés : ils ont pour vocation de réparer les fichiers STL défectueux, afin d'éviter de repasser par une phase de CAO pour modifier et corriger le modèle.

I.5 OUTILS DU PROTOTYPAGE RAPIDE

Dans les outils du Prototypage Rapide, nous présentons les procédés de fabrication par couches.

I.5.1 Procédés de Fabrication Par Couches

Les procédés de fabrication par couches utilisent tous le même principe de fabrication. L'objet à réaliser est conçu en utilisant la CAO ou les outils de numérisation, puis il est facetté au format STL. L'opération suivante consiste à définir les sections de l'objet à réaliser par un découpage successif de plans parallèles. La distance entre chaque section correspond à

l'épaisseur d'une couche. Pour reconstituer l'objet, les sections sont empilées séquentiellement les unes sur les autres (**Figure I-6**).

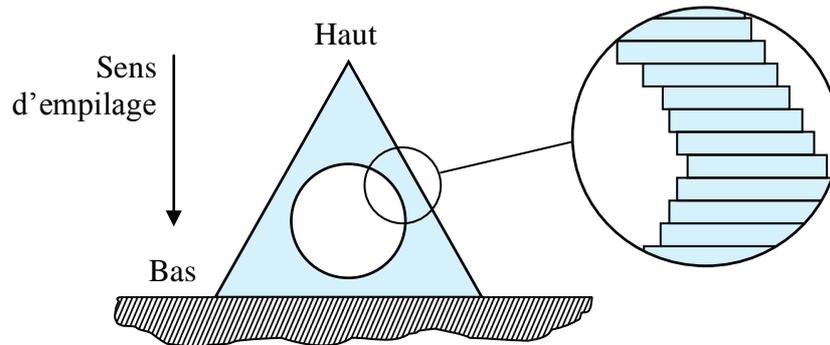


Figure I-6 : Principe de construction d'un objet par empilage séquentiel de couches

Il est à noter que la qualité d'un fichier STL est un facteur important : un objet dont les surfaces jointives sont discontinues présentera sur le fichier STL des trous. En effet, le fichier STL, découpé par des plans parallèles, matérialise des sections à contours polygonaux ouverts, pour lesquels les notions de contours intérieur ou extérieur sont absentes. Aussi, on peut avoir recours aux logiciels spécifiques permettant de réparer les fichiers STL défectueux évitant un passage obligé vers la CAO [MÄKELÄ, et al., 1996].

Selon les procédés, les matériaux employés peuvent être des résines liquides photosensibles (acrylates, époxydes), des matériaux en feuilles (métaux, papier, plastiques), des matériaux Thermofusibles, des cires ou des poudres métalliques, plastiques, céramiques. Il est important de préciser que ces procédés ne permettent pas de disposer de modèle classé « bonne matière » (matière qui est utilisée en production finale). Les caractéristiques mécaniques diffèrent de celles d'un modèle de production.

Pour présenter les différents principes de procédés de fabrication par couches, nous reprenons une typologie proposée par Nonnenmache [NONNENMACHE, 1993]. Elle caractérise l'état initial et final du matériau employé selon trois catégories, qui sont les procédés : liquide/solide ; solide/solide ; poudre/ solide.

I.5.1.1 Procédés liquide/solide

Les procédés liquide/solide utilisent le principe de la Stéréolithographie. La Stéréolithographie a été commercialisée en 1987 par son créateur Charles HULL. Cette jeune technique de Prototypage Rapide consiste globalement à construire une pièce, généralement faite de polymère, couche par couche. Ils se caractérisent par l'emploi d'une résine photosensible liquide qui se solidifie sous l'action d'une source lumineuse UV contrôlée par

ordinateur [ANDRE, et al., 1994]. En l'absence de rayonnement, la solidification cesse instantanément. Il est possible de classer ces procédés en deux catégories selon le mode d'éclairage : Solidification par faisceau laser, dite Stéréolithographie point par point ; Solidification par flashage, dite Stéréolithographie par couches entières.

1.5.1.1.1 Stéréolithographie point par point

Les sources lumineuses employées sont de type laser à héliumcadmium (HeCd, 325nm) ou laser argon ionisé (Ar⁺, 351 et 363nm) contrôlée par ordinateur. Ces derniers sont plus puissants, autorisant une vitesse de fabrication plus élevée.

Le faisceau laser est dévié par des miroirs (Figure I-7), permettant le balayage du faisceau laser dans le plan XY. La solidification de chaque section du modèle est réalisée par balayage point par point.

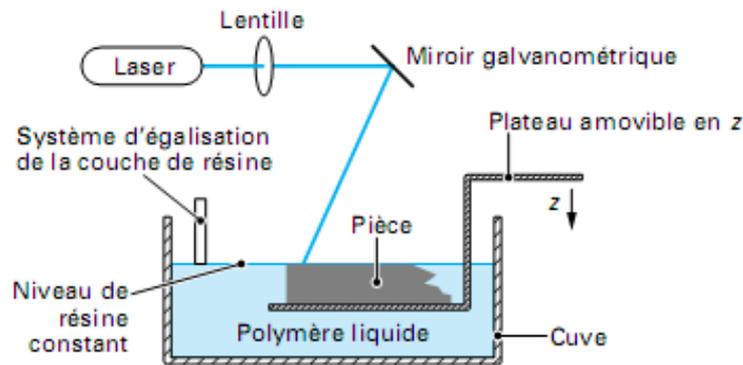


Figure I-7 : Principe de Stéréolithographie

1.5.1.1.2 Stéréolithographie par couches entières :

La source lumineuse est une lampe à ultraviolet contrôlée par ordinateur (Figure I-8). Chaque section du modèle est éclairée par flashage au travers d'un masque (principe du pochoir) [MONY, et al., 1995].

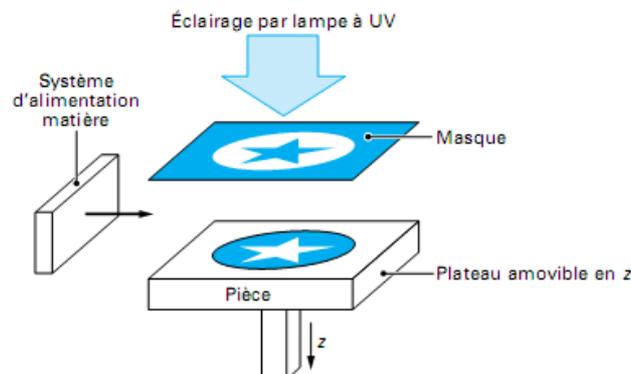


Figure I-8 : Principe du flashage de couches [MONY, et al., 1995]

Ces deux procédés utilisent des résines Photo polymérisables. Les premières résines utilisées étaient uniquement à base d'acrylate.

Aujourd'hui les résines époxydes sont les plus employées. Elles présentent l'avantage de posséder un faible retrait de la matière lors de la polymérisation et d'être utilisables en tant que cire perdue dans le cadre de la fonderie. Plus précises que les acrylates, elles sont néanmoins sensibles à l'humidité et posent certains problèmes pour des pièces à parois fines [STEINMANN, 1996].

Les résines peuvent aussi recevoir une « charge » améliorant leurs caractéristiques mécaniques et thermiques.

- Pour des surfaces en contre-dépouilles, le modèle peut nécessiter, selon le procédé employé, la fabrication de supports.
- L'épaisseur d'une couche est déterminée par le niveau de viscosité de la résine (inférieur au dixième de millimètre). La précision peut atteindre 0,1% par millimètre.
- Certaines pièces nécessitent l'utilisation d'un post-traitement pour une polymérisation à cœur. En effet, le faisceau laser déclenche la polymérisation, celle-ci se poursuit ultérieurement. Le post-traitement permet de l'accélérer et de la stopper.

Les temps d'usinage associés à ce procédé dépendent de la géométrie du contour de chaque couche et de la vitesse du laser. Le procédé est utilisé notamment dans les domaines de l'automobile, de l'aérospatiale et de l'industrie médicale pour la production de prototypes aux coûts et au temps d'usinage réduits [BRETON, 1999].

I.5.1.2 Procédés solide/solide

Les procédés solide/solide se déclinent en trois classes : Extrusion et laminage d'un filament ; Découpage et collage de strates ; Projection de matières.

I.5.1.2.1 Extrusion et laminage d'un filament

Ce procédé a été développé au début des années 90 par la compagnie Stratasys inc. Cette nouvelle technique de PR consiste globalement à construire une pièce couche par couche [BRETON, 1999]. Plus en détail Le principe consiste à extruder un filament de matière à l'aide d'une tête se déplaçant dans le plan XY. La tête est constituée d'une chambre (Figure I-9), chauffant le matériau au-dessus de son point de fusion (la température de la buse est fixée pour que le filament atteigne une température égale à 1°C au-dessus de sa température de fusion), et d'une buse qui permet de déposer et de laminier le filament entre la couche précédente et sa surface plane [MAITRE, 1997]. Le filament au contact de la couche

précédente se solidifie instantanément. Chaque couche est remplie par des balayages successifs de tête.

La tête peut être constituée de deux buses : l'une servant à la fabrication du modèle, l'autre à la fabrication des supports. Les matériaux employés sont des thermofusibles [ABS (polystyrène butadiène acrylonitrile), ABS médical, élastomère, PA (polyamide) ...] et de la cire pour un usage en fonderie à modèle perdu. Aucun traitement spécifique n'est à prévoir.

La vitesse de déposition du filament est de plus de $15''/sec$ et la grosseur du filament est entre 0.001 et $0.05''$. Il est facile de déterminer approximativement le temps d'usinage d'une pièce en divisant son volume par vitesse linéaire de déposition du filament. Le procédé est particulièrement utilisé pour la production de prototypes au coût et au temps d'usinages réduits [BRETON, 1999].

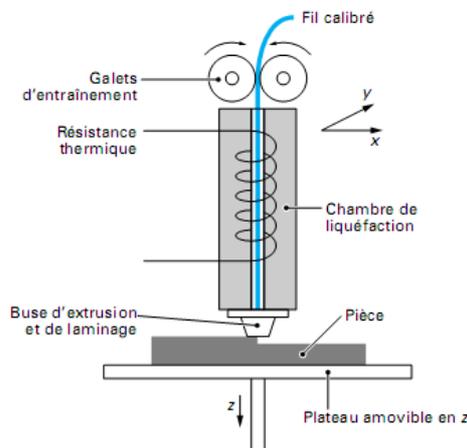


Figure I-9 : Principe du procédé FDM de Stratasys [MAITRE, 1997]

I.5.1.2.2 Découpage et collage de strates

Le principe repose sur le découpage des sections de pièces dans des feuilles ou des plaques de matériaux calibrés (Figure I-10). Chaque section réalisée est ensuite empilée manuellement ou automatiquement. L'assemblage est réalisé par collage, par fusion des matériaux ou mécaniquement [WEINSTOERFFER, et al., 1997].

Le découpage peut être réalisé avec un laser, un couteau, un jet d'eau ... Ce type de technologie peut présenter certaines difficultés pour réaliser des formes creuses. Tous les matériaux se présentant sous la forme d'une feuille peuvent théoriquement être employés. Il faut s'assurer de la compatibilité avec le mode de découpage et d'assemblage.

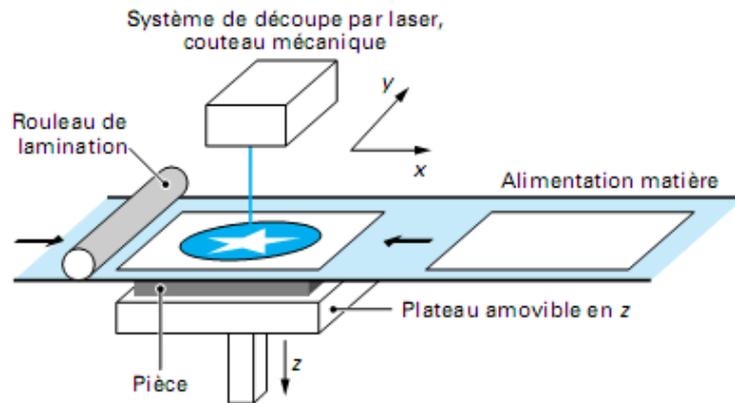


Figure I-10 : Principe de la fabrication par découpage [WEINSTOERFFER, et al., 1997]

I.5.1.2.3 Projection de matières

Le principe utilisé peut être comparé avec la technologie des imprimantes à jet d'encre. Une tête se déplaçant dans le plan XY projette des gouttes de matière liquide à une température au-dessus du point de fusion (Figure I-11) [BROCHU, 1997].

Simultanément, les supports nécessaires à la fabrication du modèle sont fabriqués dans de la cire (nécessitant de doubler le système de projection). Les matériaux utilisables sont la cire et les Thermofusibles. Les supports sont supprimés par dissolution.

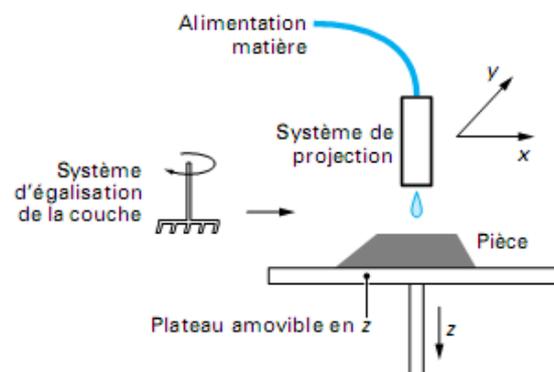


Figure I-11 : Principe de la fabrication de couches par projection [BROCHU, 1997]

I.5.1.1 Procédés poudre/solide

Nous pouvons classer les procédés poudre/solide selon deux catégories : Frittage de poudre ; Projection de liant.

I.5.1.1.1 Frittage de poudre

Le procédé de frittage de poudre utilise un laser (CO_2) pour transformer une poudre en un objet solide par fusion (Figure I-12). Le laser trace la forme de chaque couche en fusionnant la poudre. Les grains qui ne sont pas chauffés assurent le support des couches suivantes en porte à faux. La plate forme de travail descend de l'épaisseur d'une strate, une

nouvelle couche de poudre est étalée par un rouleau mécanique et le cycle recommence pour construire le prototype couche par couche.

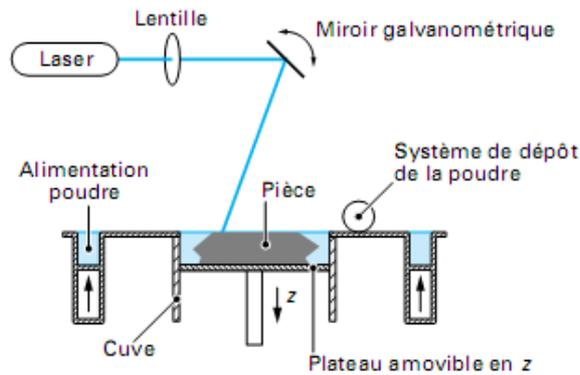


Figure I-12 : Principe du frittage de poudre par laser

Divers types de poudre sont proposés selon les constructeurs de machine [CABRERA, et al., 1995] :

- Plastique (Nylon, ABS, polycarbonate, Nylon composite, polystyrène)
- Métaux (Acier, ...)
- Céramique
- Cire
- Sable.

Les pièces fabriquées par ce type de procédé sont poreuses. Selon l'utilisation souhaitée, les constructeurs de machine proposent de réaliser des infiltrations de matière, afin d'accroître les caractéristiques mécaniques des modèles fabriqués. Selon le type de pièces réalisées, et selon les technologies de fabrication, il peut être nécessaire de fabriquer simultanément des supports pour les parties en contre-dépouilles.

1.5.1.1.2 Projection de liant

Le principe repose sur la projection d'un liant liquide à la surface d'une cuve remplie de poudre. La projection est effectuée grâce à une tête se déplaçant dans le plan XY [TASSE, et al., 1996]. A l'issue de la fabrication d'une section d'objet, le plateau support descend d'une épaisseur. Ce type de fabrication peut nécessiter un traitement thermique afin d'évacuer le liant et fripper la poudre. Les pièces fabriquées peuvent présenter un retrait lors du frittage.

I.5.1.2 Domaines d'application

La société 3D Systems a commercialisé en 1988 la première machine de Prototypage Rapide. Depuis cette date, les ventes n'ont cessé d'augmenter.

Biens de consommation	Automobile	Informatique	Aéronautique	Médical	Université, Recherche	Militaire	Autres
27.8%	17.6%	15.7%	12.6%	9%	6.9%	5.2%	5.3%

Tableau I-1 : Domaines d'application de la fabrication par couche

I.6 CONCLUSION

Le prototypage est indispensable pour valider les différentes étapes de développement d'un nouveau produit. Nous constatons une baisse du nombre de prototypes mais une demande de prototypes de plus en plus techniques, de plus en plus fonctionnels. Les évolutions du Prototypage Rapide s'orientent principalement dans de nouveaux matériaux, de nouveaux procédés et des machines de plus grandes dimensions. Le principe du Prototypage Rapide, la transformation d'un processus 3D en une multitude de processus 2D, est transféré dans la fabrication d'outillage rapide. Ce procédé de fabrication est très intéressant en plasturgie pour valider la phase d'industrialisation où une présérie s'avère suffisante.

CHAPITRE II : INSPECTION DES PIECES PROTOTYPEES

II.1 INTRODUCTION

La réalisation de prototype grâce aux machines de Prototypage Rapide, qui sont associées à des logiciels de CFAO, permet d'obtenir des pièces en quelques heures. Ce gain de temps sera complètement annihilé si on ne peut effectuer le contrôle, donc valider la conception en quelques minutes.

La rapidité du contrôle ne pourra être effective que si l'on dispose de capteurs autres que les capteurs à contact montés sur une MMT. Un seul type de capteur permettra ce gain de temps significatif, ce sont les télémètres laser à balayage. Ils autorisent une vitesse de numérisation de l'ordre de 20000 points par seconde avec des précisions de l'ordre de 25 μ m pour les meilleurs [PRIETO, 2000].

La validité de l'opération d'inspection passe par une connaissance précise des erreurs induites par la mise en correspondance d'une part et de l'incertitude de mesure du capteur utilisé d'autre part, erreurs qui doivent impérativement être négligeables par rapport aux dimensions contrôlées lors de l'inspection.

II.2 DIMENSIONS ET TOLERANCES

La spécification des tolérances est nécessaire parce que des dimensions parfaites ne peuvent jamais être obtenues pour une pièce mécanique réelle. D'autre part, le bon choix des tolérances et une description non-ambiguë du produit sont essentielles à la qualité des produits, ainsi que leur interchangeabilité, et influencent de manière décisive le coût de production [BENEA, 2001].

D'une manière générale, on peut définir l'inspection d'une pièce industrielle comme étant la vérification des dimensions et tolérances imposées lors de sa conception. Les dimensions déterminent les propriétés géométriques d'une pièce, en définissant les tailles, les formes, les caractéristiques, les positions, les orientations et distances entre caractéristiques nominales de la pièce. Comme l'imprécision inévitable des procédés de fabrication fait qu'une pièce ne peut jamais être réalisée rigoureusement conforme aux dimensions fixées par

son concepteur, il est toléré que chaque dimension réalisée soit comprise entre deux dimensions limites, compatibles avec un fonctionnement correct de la pièce. La différence entre ces dimensions définit la tolérance. La définition des tolérances d'une pièce industrielle est aussi importante que sa cotation dans le sens où il n'assure pas seulement sa qualité de réalisation mais également son coût. Ainsi, une pièce est jugée correcte lorsque chacune de ses dimensions est comprise dans les tolérances admissibles [MORON, 1996].

II.3 DEFINITION ET CONTROLE DES TOLERANCES

Une tolérance est une spécification qui définit la variation admissible de dimension ou de géométrie d'un élément. Suivant le domaine considéré, deux types de tolérances sont couramment utilisés :

- Les tolérances dimensionnelles et angulaires.
- Les tolérances géométriques.

Après quelques définitions, nous exposerons la méthodologie utilisée pour le contrôle de ces deux types de tolérances.

Référence : Une référence est un point, une ligne, un plan, ou toute autre surface géométrique à partir de laquelle des dimensions sont mesurées où à laquelle des tolérances géométriques sont mises en référence. Les références ont une forme exacte et représentent un emplacement précis ou fixe aux fins de la fabrication ou de la mesure.

Référence réelle : Une référence réelle est une caractéristique d'une pièce, telle qu'un bord ou une surface, qui forme la base pour des références, ou est utilisée pour établir son emplacement.

Zone de tolérance : C'est la portion d'espace à l'intérieur de laquelle doit se situer l'élément considéré. Une zone de tolérance est un domaine à l'intérieur duquel peuvent varier les caractéristiques dimensionnelles ou géométriques d'un élément. Elle est circonscrite par des lignes ou des surfaces frontières, elles-mêmes définies par des dimensions limites ou par une valeur spécifiée de tolérance.

II.3.1 Tolérances dimensionnelles

Les tolérances dimensionnelles sont exprimées par la différence entre la dimension maximale et la dimension minimale d'une dimension tolérancée. Une tolérance dimensionnelle est une grandeur dépourvue de signe. Elle représente l'intervalle dans lequel

peut varier la dimension effective d'un élément. Elle peut être exprimée par deux écarts définissant les limites supérieure et inférieure de tolérance. La **Figure II-1** montre quelques tolérances dimensionnelles et angulaires [PRIETO, 2000].

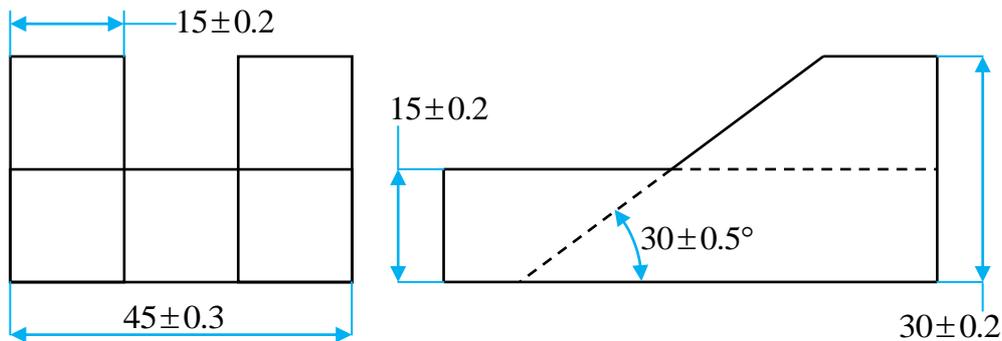


Figure II-1 : Tolérances dimensionnelles et angulaires sur une pièce

II.3.2 Contrôle de tolérances dimensionnelles

Nous pouvons contrôler les tolérances dimensionnelles correspondant à des dimensions comprises entre deux surfaces parallèles, comme celle présentée à la **Figure II-2**.

La **Figure II-2** illustre le processus utilisé pour le contrôle de tolérances dimensionnelles. Pour les sous-ensembles de points liés aux surfaces parallèles qui définissent la dimension à contrôler, nous calculons la distance entre chaque point et sa surface d'attache pour déterminer les valeurs d et t . La dimension mesurée est donc $D \pm \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \end{matrix}$, où D est la distance nominale.

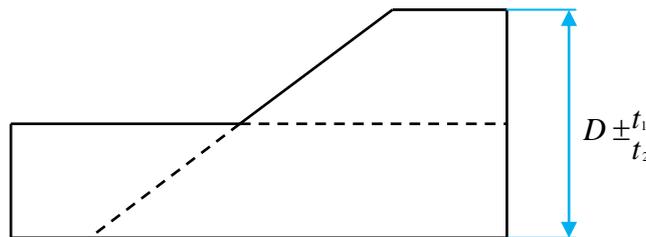


Figure II-2 : Contrôle de tolérances dimensionnelles

Soit d la dimension spécifiée pour la surface sous contrôle, nous dirons que la surface respecte ses spécifications si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$D - t_2 < d < D + t_1$$

II-1

Par exemple dans la **Figure II-1** $d = 30 \pm 0.2$ donc $29.80\text{mm} < d < 30.20\text{mm}$. La surface de l'élément ne doit pas dépasser l'enveloppe de forme parfaite à la dimension au

maximum de matière de **30.20mm**. Aucune dimension locale réelle ne doit être inférieure à **29.80mm**.

II.3.3 Tolérances angulaires

Ce sont la différence entre l'ouverture maximale et l'ouverture minimale d'un angle tolérancé. Une tolérance angulaire est une grandeur dépourvue de signe. Elle représente l'intervalle à l'intérieur duquel peut varier l'ouverture d'un angle. Elle peut être exprimée : par deux écarts définis dans le système d'unité choisi, généralement le degré, par les limites de tolérance angulaire ou par une indication unique supérieure ou inférieure. La **Figure II-1** illustre une tolérance angulaire.

II.3.4 Contrôle des tolérances angulaires

Nous illustrons à la **Figure II-3** la méthode utilisée pour contrôler les tolérances angulaires. Nous déterminons les valeurs α et t pour les sous-ensembles de points liés aux surfaces qui définissent l'angle à contrôler. L'angle mesuré est donc, $\alpha_0 \pm \alpha_2$, où α_0 est l'angle formé par les deux surfaces.

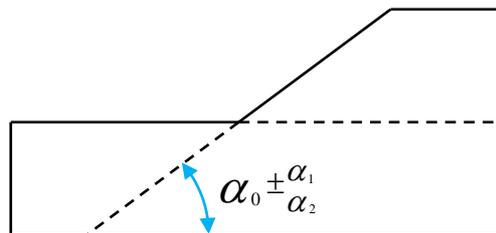


Figure II-3 : Contrôle de tolérances angulaires

Soit α l'angle spécifié. Nous dirons que la spécification est respectée si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\alpha_0 - \alpha_2 < \alpha < \alpha_0 + \alpha_1 \quad \text{II-2}$$

Par exemple dans la **Figure II-1** $\alpha = 30 \pm 0.5$ donc $29.50^\circ < \alpha < 30.50^\circ$. La surface de l'élément ne doit pas dépasser l'enveloppe de forme parfaite à l'angle au maximum de matière de **30.50°**. Aucun angle local réel ne doit être inférieur à **29.50°**.

II.3.5 Tolérances géométriques

Les tolérances géométriques sont l'intervalle maximal admissible dans lequel peuvent varier les caractéristiques géométriques de forme, d'orientation, de position ou de battement d'un élément. Une tolérance géométrique est exprimée sur un dessin par un cadre contenant les caractéristiques du Tolérancement relié à l'élément tolérancé et éventuellement à l'élément de référence par une ligne de repère.

La **Figure II-5** illustre quelques tolérances géométriques qui ont été spécifiées pour une pièce.

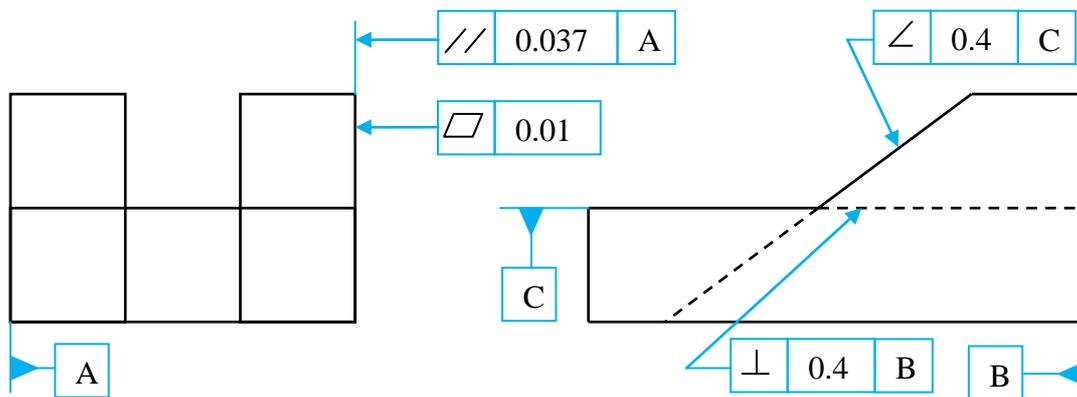


Figure II-4 : Spécification des tolérances géométriques sur une pièce

II.3.5.1 Tolérances de forme

C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de forme d'un élément. Suivant la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux lignes ou par deux surfaces, de forme adéquate, distantes de t entre lesquelles doit se situer la ligne ou la surface considérée. Une tolérance de forme s'applique uniquement à la forme de l'élément tolérancé indépendamment de son environnement, de sa position ou de son orientation. Par exemple, un plan reste un plan qu'il soit horizontal, vertical ou quelconque. L'ensemble des tolérances de forme qui s'appliquent aux surfaces comprend des tolérancements tels que : planéité, cylindricité, surface quelconque [PRIETO, 2000].

II.3.5.2 Tolérances de position

C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de la position d'élément. Suivant la spécification et la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux droites, deux plans un cercle, un parallélépipède ou un cylindre à l'intérieur desquels doit se situer la ligne ou la surface considérée. Un Tolérancement de position limite à la fois les erreurs de position, d'orientation et de forme d'un élément. La zone de tolérance doit être orientée et

mise en position par rapport à un ou plusieurs éléments de référence. Les tolérances géométriques de position forment un groupe qui comprend : la tolérance de localisation, la tolérance de Coaxialité et de concentricité [PRIETO, 2000].

II.3.6 Contrôle des tolérances géométriques

II.3.6.1 Contrôle des tolérances de forme

D'après la définition des tolérances de forme, nous savons qu'elles ne limitent ni l'orientation ni la position de la surface, et qu'elles sont appliquées directement sur la surface sous contrôle sans considérer une surface de référence. Ainsi, nous vérifions les tolérances de forme d'une surface en utilisant seulement les points 3D associés à cette surface. Ce sous-ensemble de points 3D est de nouveau recalé avec le modèle CAO, et la distance entre chaque point 3D et la surface CAO est calculée. La distribution de ces distances est utilisée pour définir la zone de tolérance mesurée. En effet, nous ajustons la valeur moyenne de distribution avec la surface CAO (modèle CAO). En faisant passer deux surfaces parallèles à la surface CAO à une distance de $\pm t$, la tolérance mesurée est donc égale à : $t_m = 2t$. Pour la tolérance de planéité, ces surfaces sont des plans tandis que pour la tolérance de cylindricité, ces sont des cylindres de différents rayons.

Dans la **Figure II-5**, nous présentons schématiquement le contrôle d'une tolérance de planéité. Dans cette figure, la ligne accentuée représente le nuage de points après le recalage.

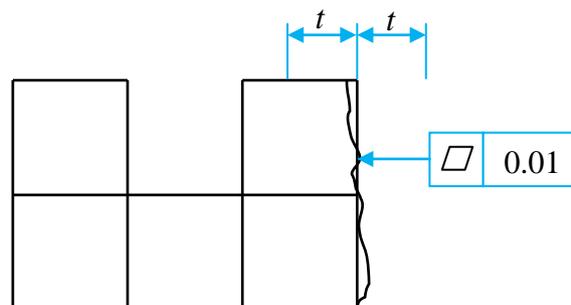


Figure II-5 : Contrôle des tolérances de forme

Les pièces de forme complexe comprennent des surfaces gauches et relativement peu de surfaces planes. Les seules tolérances géométriques spécifiées sur ce type de surface sont des tolérances de forme quelconque, qui sont des tolérances difficilement contrôlables par les techniques traditionnelles de métrologie (réglet, comparateur, ...). Par contre, en utilisant une méthodologie comme celle présentée dans ce travail (ICP), nous pouvons contrôler ces types de tolérances.

La zone de tolérance d'une forme quelconque est limitée par deux surfaces bornant des sphères de diamètre t dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique spécifiée (Figure II-6). Pour le contrôle de ces tolérances, nous utilisons la surface NURBS comme surface spécifiée et le diamètre des sphères t_m , qui définit la zone de tolérance est égale à : $t_m = 2t$.

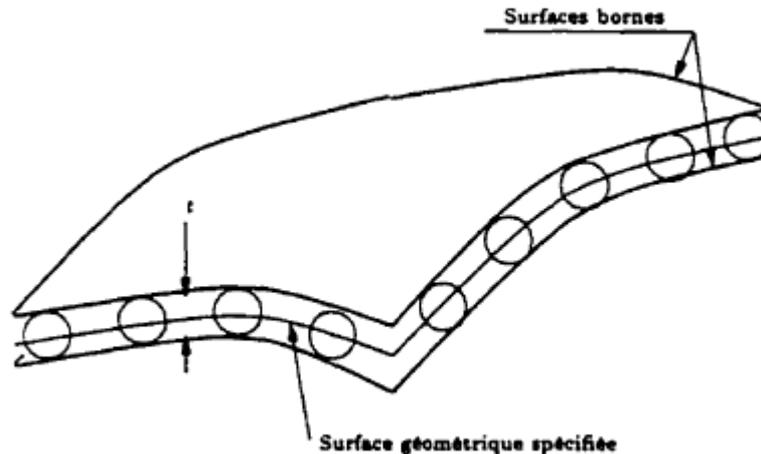


Figure II-6 : Contrôle des tolérances de forme quelconque

Pour toutes les tolérances de forme, nous dirons que la surface est conforme aux spécifications si la relation suivante est satisfaite :

$$t_m \leq t_s \quad \text{II-3}$$

Où : t_m est la distance entre les plans parallèles mesurés et t_s est la distance spécifiée entre les plans parallèles.

II.3.6.2 Contrôle des tolérances de position

Pour assurer la conformité de la surface sous inspection, la relation suivante doit être satisfaite :

$$t_{1s} \leq t_{1m} < t_{2m} \leq t_{2s} \quad \text{II-4}$$

Où : t_{1s} et t_{2s} sont les distances au plan qui définissent la zone de tolérance spécifiée jusqu'à la référence, et t_{1m} et t_{2m} sont les distances de plan qui définissent la zone de tolérance mesurée jusqu'à la référence réelle.

II.4 LES TECHNIQUES UTILISÉES EN METROLOGIE 3D

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. Face à la diversité des applications de l'acquisition 3D il existe actuellement un nombre important de technologie (**Figure II-8**). 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.

II.4.1 Reverse engineering

Le terme anglais « reverse engineering » se décline en français sous différents termes : ingénierie inverse, rétroconception, rétro ingénierie, ..., numérisation tridimensionnelle. La numérisation dans le Prototypage Rapide a deux objectifs [[GARDAN, 1995](#)] :

- Partant d'une forme physique, définir un modèle de CAO,
- Partant de la fabrication (issue d'une CAO dans lequel le modèle est défini), comparer la géométrie du modèle physique à celle du modèle théorique.

Les outils de numérisation de formes tridimensionnelles deviennent de plus en plus incontournables dans la chaîne numérique du Prototypage Rapide. Le principal intérêt des techniques de reverse engineering réside dans le gain de temps de la modélisation de l'objet. Une étude commandée par le US Air Logistic Center (États-Unis) a montré qu'il était possible de réduire de **50 à 60%** le temps de modélisation d'un objet (un élément de structure d'un avion) en pratiquant le reverse engineering comparé à la démarche classique de CAO (création manuelle) [[LEON, 1991](#)]. Aussi, la pratique du reverse engineering s'est généralisée dans l'industrie, tout particulièrement dans le domaine automobile pour des maquettes design, dont la définition numérique ou les plans papiers sont indisponibles.

L'utilisation de ces matériels permet d'acquisition de formes aussi diverses que des ensembles architecturaux, des statues, des formes humaines, des objets usuels, ..., mais surtout des maquettes (réalisées à la main) issues des bureaux de design et de style. Les bureaux d'études disposant de ces maquettes doivent le plus rapidement possible les reconstruire numériquement. Par conséquent, la progression au sein des bureaux d'études est en forte augmentation, accompagnée d'une offre croissante des matériels dont les coûts ont fortement chuté, et sont donc plus accessibles.

Le principe des systèmes d'acquisition repose sur la prise de points issus de la surface de l'objet à numériser (**Figure II-7**). Ces ensembles de points sont traitées au travers de

logiciels de reconstruction de surfaces permettant de définir la surface de l'objet par des entités mathématique (carreaux de Béziérs, B-Splines, NURBS). Exporté vers la CAO, l'objet défini numériquement pourra être modifié, adapté à son environnement, à son architecture interne.

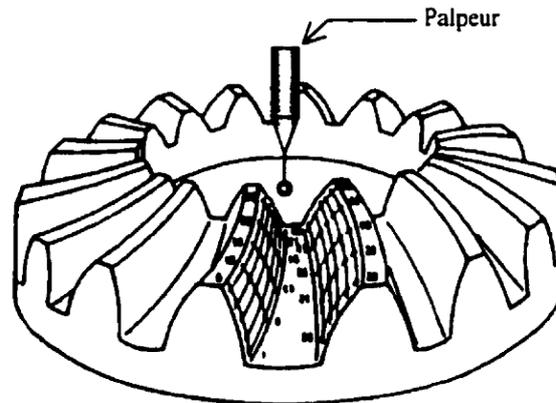


Figure II-7 : Résultat d'une numérisation d'engrenage [THIERRY, 1999]

Des interfaces spécifiques permettent, à partir du nuage de points, de réaliser un maillage STL de l'objet. Par conséquent, le fichier peut être exploité par les différentes machines de Prototypage Rapide, ainsi que les logiciels de programmation d'usinages capables de traiter ce type de fichier. On dispose rapidement de plusieurs répliques conformes à l'originale.

La qualité d'un système d'acquisition de formes 3D se caractérise par les paramètres suivants [HUMBERT, 1997] :

- La résolution : Distance entre deux points de mesure,
- La précision : Erreur maximale entre la position mesurée d'un point et sa position exacte,
- La répétabilité : Ecart maximal entre deux mesures successives d'un même point,
- La rapidité de mesure : Capacité à mesurer toutes les caractéristiques d'un point en un temps donné,
- La rapidité d'acquisition : Temps nécessaire pour obtenir une information exploitable,
- Le nombre de degrés de liberté : Nombre minimal d'axes de déplacements relatifs entre le capteur et l'objet qui sont nécessaires à l'acquisition des points,
- Le volume de travail du capteur : Volume maximal admissible de l'objet à numériser.

Il est important de noter que la précision globale du système d'acquisition est liée à la précision du capteur, ainsi qu'à la précision du dispositif sur lequel il est monté. La nuance qui existe entre la rapidité de mesure et la rapidité d'acquisition provient du temps nécessaire au traitement des informations, en particulier dans le cas d'une acquisition en plusieurs prises.

On distingue deux grandes familles dans les procédés de numérisation (**Figure II-8**) :

- **Avec contact :**

Le capteur est un palpeur mécanique généralement monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle ou un bras articulé. La précision de ce type d'outils peut aller jusqu'au micromètre toutefois les temps de prise de mesure peuvent être relativement longs (1,5 point par seconde pour les palpeurs point par point). Il est à noter que la mise en contact du capteur avec l'objet peut détériorer l'état de surface de l'objet.

- **Sans contact :**

Le capteur n'est jamais en contact avec l'objet à mesurer. Diverses technologies sont disponibles sur le marché : point laser, plan laser, photogrammétrie, Le principal avantage de ces technologies réside dans le temps de prise de mesure (jusqu'à 430000 points par seconde), mais au détriment de la précision (de l'ordre du centième de millimètre).

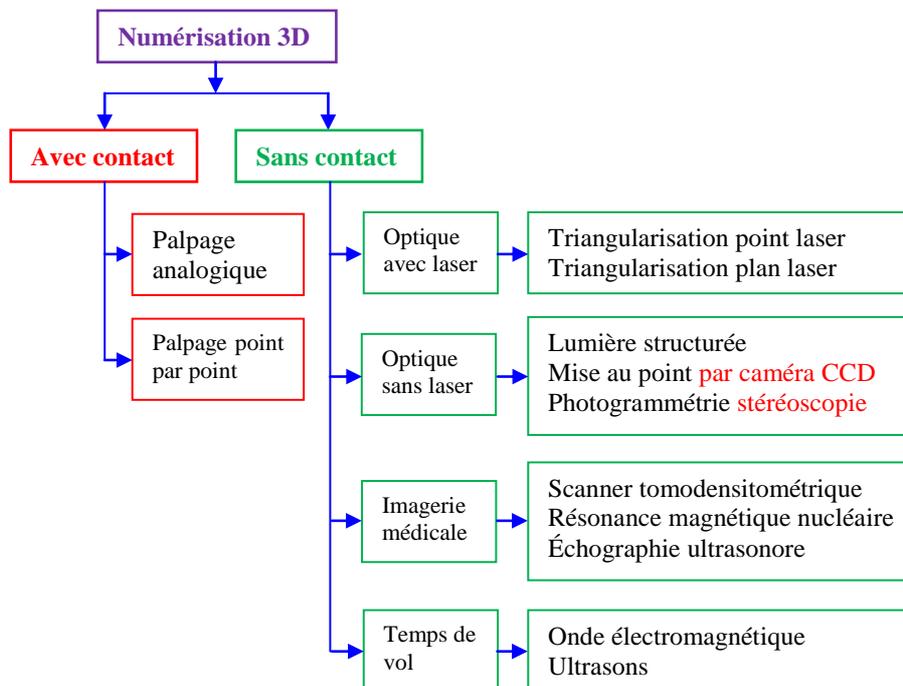


Figure II-8 : Différentes technologies de numérisation 3D

II.4.2 Contact (Palpeur)

La technique de mesure 3D la plus précise est l'acquisition au moyen d'un palpeur (**Figure II-9**). Il existe plusieurs types de palpeurs (palpeur à déclenchement, palpeur résistif,

...) mais la procédure d'utilisation générale reste la même : un signal de déclenchement est généré lors du contact de la bille du palpeur avec l'objet et ce signal provoque la mémorisation de la position de la machine. Cette technique permet d'atteindre une précision de l'ordre du micron, mais celle-ci dépend fortement des performances du système de positionnement utilisé. L'inconvénient majeur est la vitesse d'acquisition, qui est de l'ordre de quelques points par seconde. La mesure par palpeur est utilisée dans l'industrie principalement, pour le contrôle et la rétroconception de pièces mécaniques [LORIENT, 2009].

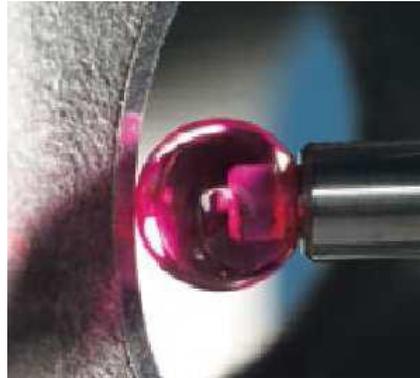


Figure II-9 : Détail d'un palpeur

II.4.3 Triangulation Laser

Il s'agit de projeter soit un point, plan (bande étroite), soit une structure Laser de faible puissance sur la surface de l'objet. L'élément projeté est visualisé par une ou deux caméras CCD⁵ ensuite on étudie l'intersection du faisceau (ou plan laser) avec l'objet ce qui nous permet de calculer les coordonnées des points. En effet, connaissant la position de la source lumineuse par rapport à l'observateur (caméra), il est facile (par trigonométrie) de retrouver la distance du point considéré. Un diagramme simple d'un capteur de triangulation apparaît sur la **Figure II-10**.

Les techniques Laser autorisent une acquisition rapide de quelques centaines à quelques milliers de points par seconde avec une précision du dixième au centième de millimètre (**Figure II-10**). La finesse du ou des points Laser projetés ainsi que le nombre de pixels (matrice ou barrette) des caméras CCD déterminent également la précision du système d'acquisition. Ajoutons 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

⁵ Charge-Coupled Device

peuvent être associés aux absorbante ou réfléchissante nécessitent un traitement préalable [Jautomatise, 2004].

On peut classifier les capteurs par triangulation selon le type de lumière projetée : point, ligne ou motif.

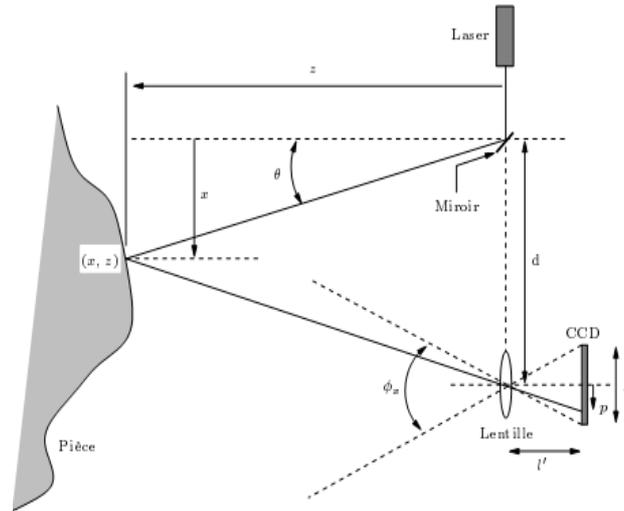


Figure II-10 : Principe de la triangulation laser [BOURDET, 1999]

On peut calculer les coordonnées tridimensionnelles du point lumineux sur l'objet par simple trigonométrie, de la façon suivante :

$$\begin{cases} z = \frac{d.l'}{p + l'.\tan(\theta)} \\ x = z.\tan(\theta) \end{cases} \quad \text{II-5}$$

Où p est la position du faisceau réfléchi sur le capteur CCD, θ est l'angle de déflexion du rayon laser, d la distance séparant la lentille de la source du faisceau laser, et

$$l' = \frac{l.f}{l - f} \quad \text{II-6}$$

Où f est la longueur focale de la lentille et l la distance au plan de l'objet. Supposant que $l = \infty$ alors $l' \cong f$ et dans l'équation II-5, z devient :

$$z = \frac{d.f}{p + f.\tan(\theta)} \quad \text{II-7}$$

II.4.3.1 Triangulation laser dans l'infrarouge

Certaines études en cours utilisent la triangulation laser ligne dans l'infrarouge [SANCHEZ SECADES, 2008]. Le système utilisé est illustré à la Figure II-11. La pièce est chauffée par une impulsion laser haute puissance et une caméra infrarouge observe la ligne de

chaleur sur l'objet (**Figure II-12**). Cette méthode est particulièrement intéressante pour les objets transparents, où la triangulation laser classique est impossible. Toutefois, plusieurs problèmes sont encore à étudier (temps de refroidissement entre chaque impulsion, diffusion de la chaleur dans certains matériaux ...).

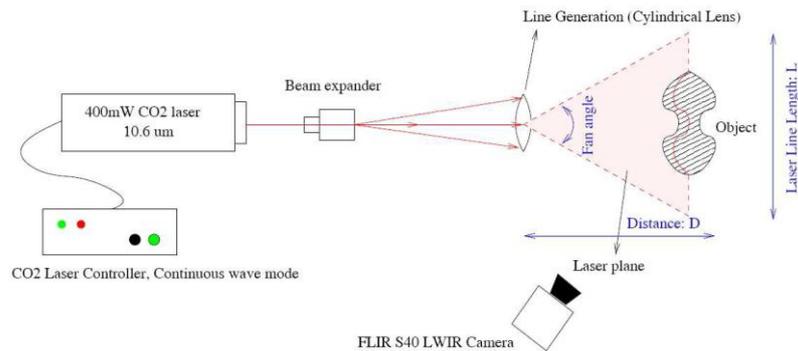


Figure II-11 : Système mis en place pour l'acquisition 3D dans l'infrarouge [LORIOT, 2009]



Verre à pied



Ligne de chaleur



Reconstruction 3D

Figure II-12 : Numérisation laser dans l'infrarouge [SANCHEZ SECADES, 2008].

II.4.4 Lumière structurée

Les systèmes à lumière structurée sont quant à eux basés sur l'analyse de la projection sur l'objet d'une lumière porteuse d'information géométrique [KIM, et al., 1995] [MEYER, 2002]. Ces systèmes sont composés d'une source lumineuse émettrice et d'un récepteur à matrice CCD. Une lumière enrichie par adjonction de trame, de grille ou de franges est projetée sur la scène étudiée (**Figure II-13**). La projection peut être décrite comme une image 2D composée de caractéristiques géométriques simple (bande clair-foncé ...) et parfaitement connues. Le relief de la surface modifie les caractéristiques de la lumière projetée. L'image de la réflexion recueillie est alors composée d'un ensemble de courbes dont la variation d'épaisseur et d'espacement est fonction de la hauteur de la surface. L'analyse de ces variations à l'aide de la triangulation permet de déduire les coordonnées des points de la surface. Il est également possible de projeter une mire d'intensité binaire ou sinusoïdale.

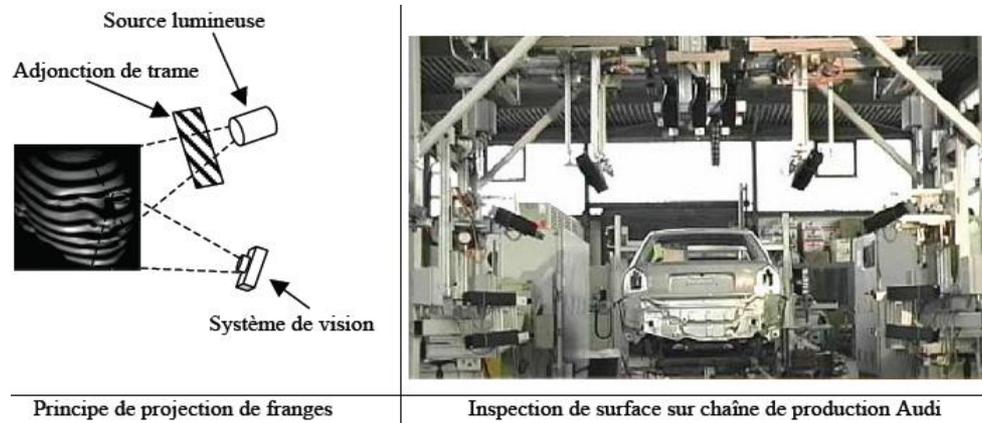


Figure II-13 : Capteurs à lumière structurée [MEHDI-SOUZANI, 2006]

L'avantage de ces systèmes est qu'ils ne nécessitent pas de déplacement du capteur si la taille de l'objet le permet : une seule prise suffit à numériser l'ensemble. Toutefois ils ont des capacités limitées dès lors que l'objet à numériser présente une variation importante de courbure ou possède des ruptures de surface de type escalier. Il est intéressant de noter que ces systèmes sont déployés dans l'industrie pour le contrôle en ligne de production de grande série. On peut citer le cas de Audi qui les utilise pour des contrôles systématiques d'état de surface de la carrosserie en chaîne d'assemblage [MEHDI-SOUZANI, 2006].

II.4.5 La stéréoscopie

La stéréoscopie est une méthode simple d'accès et de mise en place. Associée à un logiciel de traitement puissant, elle est sans nul doute, la solution « sans contact » la plus rapide, la plus économique. Comme la plupart des méthodes existantes, elle restitue une image 3D exploitable sous différents fichiers (STL, ...) Permettant une intégration directe dans un logiciel de CAO/CFAO. A la différence des technologies courantes, elle permet une acquisition sur 360° avec un minimum de matériel et une rapidité de réalisation unique (<1 seconde) mais avec un peu moins de précision (Figure II-14) [Jautomatise, 2004].

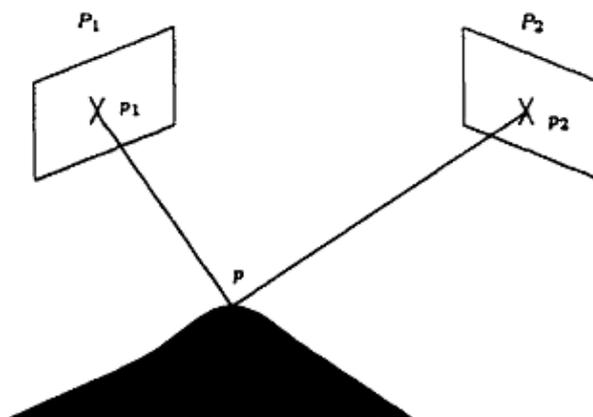


Figure II-14 : La technique de stéréoscopie

La **Figure II-14** illustre le principe de la stéréovision. Tout point P d'une surface visible depuis les deux caméras se projette en P_1 sur le plan image P_1 et en P_2 sur le plan image P_2 . Les plans de coordonnées de l'image des deux points de vue sont reliés par une transformation connue. L'identification des points dans les deux images qui correspondent aux mêmes points 3D dans la scène nous permet de calculer les coordonnées du point 3D [PRIETO, 2000].

II.5 SYSTEMES DE POSITIONNEMENT

Les systèmes d'acquisition décrits précédemment ne peuvent à eux seuls numériser entièrement une pièce. Ils doivent pouvoir être placés à différentes positions autour de celui-ci.

II.5.1 Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

Les systèmes de positionnement les plus utilisés ces dernières années sont les MMT (**Figure II-15**). Ces systèmes possèdent trois axes de translations ainsi qu'un poignet pour orienter le capteur. Ils permettent un positionnement très précis avec une excellente répétabilité (de quelques dixièmes de micron). Les capteurs utilisés sur ces systèmes sont soit des palpeurs, soit des têtes d'acquisition laser. Le volume de travail peut varier de 0,5 à 120 mètres cube environ. Afin de garantir la précision de ces systèmes, ils doivent être utilisés en environnement contrôlé (variation de température, humidité, ...) [LORIOT, 2009].

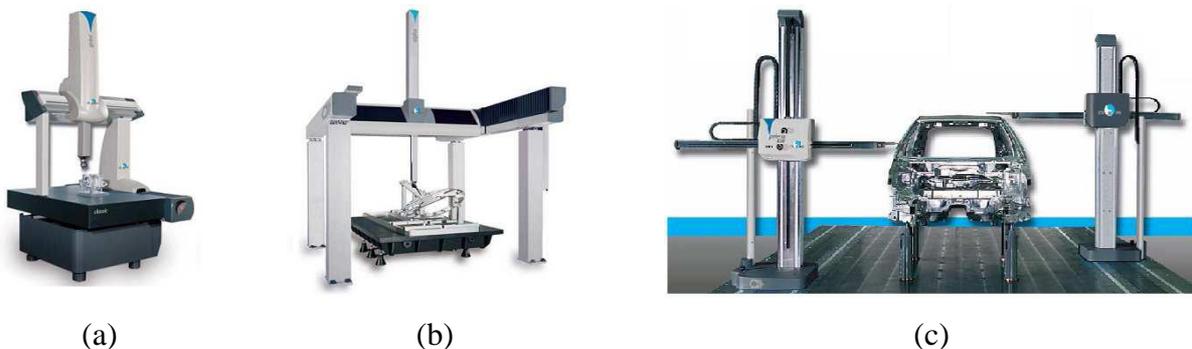


Figure II-15 : MMT de différentes dimensions

Certaines MMT sont également capable de faire de la mesure continue : le palpeur reste en contact avec l'objet et se déplace le long de la surface. Dans ce cas, la précision du système est moindre mais la vitesse d'acquisition est plus élevée. Malgré tout, les palpeurs sur MMT sont utilisés pour du contrôle dimensionnel local (prise de cotes) ou la rétroconception, et non pour une numérisation complète de la pièce.

II.5.2 Bras robotisé

En milieu industriel, ce sont des bras robotisés (**Figure II-16**) qui permettent le positionnement de systèmes d'acquisition par vue. Leur portée varie de quelques centimètres à quelques mètres. La répétabilité de ces systèmes est de l'ordre d'une centaine de microns. Depuis quelques années, ces bras peuvent porter des capteurs à triangulation laser. Les données acquises sont tout d'abord recalées grâce aux informations de position du robot, puis un second recalage est effectué en fonction du type de scanner [LORIENT, 2009].



Figure II-16 : Système d'acquisition sur bras robotisé

II.5.3 Bras polyarticulé

Les bras polyarticulés sont utilisés pour des applications très variées : contrôle de pièces industrielles, numérisation d'objets archéologique, ... Il s'agit de bras mécanique à six ou sept axes équipés de codeurs permettant de remonter à la position du capteur dans l'espace. Ces bras ont une grande ergonomie, sont assez simple d'utilisation et sont transportables. Leur portée varie de un à cinq mètres. La précision est de l'ordre de quelques centaines voire dizaines de microns. Ils sont utilisés avec un palpeur ou une tête Laser (**Figure II-17**), ce qui permet de réaliser simultanément l'acquisition complète de la forme et la prise de référence (plans, cylindres, ...). Lors du palpement, l'opérateur vient positionner la bille du palpeur sur la surface de l'objet et déclenche manuellement la prise de mesure. Ces systèmes sont de plus en plus couramment utilisés de nos jours. La précision reste toutefois inférieure à celle d'une MMT [LORIENT, 2009].



Figure II-17 : Bras polyarticulé

II.6 CONCLUSION

D'une manière générale, on peut définir l'inspection d'une pièce industrielle comme étant la vérification des dimensions et tolérances imposées lors de sa conception. Les dimensions déterminent les propriétés géométriques d'une pièce, en définissant les tailles, les formes, les caractéristiques, les positions, les orientations et distances entre caractéristiques nominales de la pièce. Comme l'imprécision inévitable des procédés de fabrication fait qu'une pièce ne peut jamais être réalisée rigoureusement conforme aux dimensions fixées par son concepteur, il est toléré que chaque dimension réalisée soit comprise entre deux dimensions limites, compatibles avec un fonctionnement correct de la pièce. La différence entre ces dimensions définit la tolérance.

La rapidité du contrôle ne pourra être effective que si l'on dispose de capteurs autres que les capteurs à contact montés sur une MMT. Un seul type de capteur permettra ce gain de temps significatif, ce sont les télémètres laser à balayage. Ils autorisent une vitesse de numérisation de l'ordre de 20000 points par seconde avec des précisions de l'ordre de 25 μ m pour les meilleurs.

CHAPITRE III : ASSOCIATION D'UN ELEMENT GEOMETRIQUE A UN NUAGE DE POINTS

III.1 INTRODUCTION

Après numérisation de la pièce, nous avons deux ensembles de données, le premier est le modèle CAO au format STL issue de la conception et le second, le nuage de points 3D. Ces données étant exprimées chacune dans leur propre repère, la première opération à effectuer est donc de superposer ces deux ensembles en calculant la transformation (Rotation + Translation) à effectuer c'est ce que l'on appelle la mise en correspondance. Celle-ci repose sur le travail bien connu de Besl et McKay [BESL, et al., 1992], qui en 1992 ont développé une méthode générale précise et facilement implémentable de mise en coresspondance de formes 3D, prenant en compte les surfaces gauches. La méthode est basée sur l'algorithme ICP (Iterative Closest Point), qui ne nécessite qu'un calcul de distance pour trouver le point le plus proche d'une forme géométrique à un point donné.

D'une manière générale, le problème de mise en correspondance 3D s'exprime ainsi : Après avoir choisi une représentation de données, de modèles et de transformation, à partir d'une sélection de primitives dans D et 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 le critère de distance globalement, ce qui nécessite un choix convenable de transformations initiales [MORON, 1996].

Pour définir complètement un problème de mise en correspondance, il est donc nécessaire de déterminer selon [MORON, 1996] :

- La représentation de la transformation rigide recherchée,
- Les primitives de D et M à utiliser pour la mise en correspondance,
- Le calcul de distance associé aux primitives sélectionnées pour D et M,
- La méthode d'optimisation,
- Le critère à minimiser,

- Le choix de la transformation initiale.

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

$$p' = R.p + T \quad \text{III-1}$$

La matrice R 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'ait 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 [MORON, 1996].

Les représentations des transformations rigides les plus utilisées sont suivants :

- Matrice de rotation et Vecteur translation,
- Axe et angle de rotation,
- SVD,
- Angles d'Euler,
- Quaternions,

Les représentations qui font intervenir des axes et 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 présentent des indéterminations [MORON, 1996].

III.1.1 Choix des caractéristiques à mettre en correspondance

Les caractéristiques à associer peuvent être de différents types (points 3D, lignes, ...). 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 télémétriques, 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 [MORON, 1996] (modèle CAO) dans ce cas il peut être soit :

- Un ensemble de courbes ou surfaces implicites,
- Ensemble de courbes paramétriques,
- Un ensemble de triangles,
- Un Ensemble d'éléments géométriques de base (plans, cylindres, sphères, ...),

III.1.2 Principe d'association d'éléments géométrique au nuage de points

L'association d'un élément géométrique idéal à un ensemble de points revient à résoudre un problème mathématique d'optimisation. En effet, les lignes et les surfaces réelles n'étant jamais parfaites, elles sont mesurées par un nombre de points supérieur au nombre minimal nécessaire à la définition mathématique de l'élément géométrique correspondant. Il est donc possible d'associer à un même ensemble de points mesurés, plusieurs éléments géométriques de même type, répondant chacun à un critère exprimant la « meilleure représentation » d'une fonction technologique que l'élément géométrique 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 MMT actuellement utilisées. En effet, le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est le critère des moindres carrés [BOURDET, 1999].

Ce critère permet d'associer un élément idéal à un nuage de points en minimisant la somme des carrés des distances d_i entre ces points et l'élément idéal.

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 \text{ minimal} \quad \text{III-2}$$

n : Nombre de points.

III.2 ASSOCIATION PAR LE TORSEUR DES PETITS DEPLACEMENTS

Le concept de Torseur de Petits Déplacements (TPD) a été développé à l'ENS de Cachan (France) au début des années 1970 pour résoudre le problème d'association d'une surface quelconque à un nuage de points, ce concept général a été ensuite utilisé dans nombreuses applications et plus particulièrement dans de nombreux logiciels de Machines à Mesurer Tridimensionnelle (PROMESUR, METROLOG II, ..., etc.) et dans des logiciels de

simulation cinématique des mécanismes avec prise en compte des défauts (Chaînes de cotes 3D, Mecamaster, ..., etc.) [BOURDET, 1999].

Le petit accroissement de position d'un solide est caractérisé en un point O par un vecteur translation $\vec{D}_0(u, v, w)$ et une matrice de rotation $R(\alpha, \beta, \gamma)$ liés par la relation :

$$\vec{D}_M = \vec{D}_0 + O\vec{M}\Lambda\vec{R} \quad \text{III-3}$$

Le couple de vecteurs : $\{\vec{D}_0, \vec{R}\}$ (vecteur de déplacement en un point O , et matrice de rotation), et la formule fondamentale $\vec{D}_M = \vec{D}_0 + O\vec{M}\Lambda\vec{R}$ (permettant de calculer le vecteur translation d'un point M quelconque du solide) constituent un torseur que l'on appellera dans ce cas TPD.

III.2.1 Calcul des écarts optimisés par le TPD

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 O par un TPD $[T_o] \left\{ \begin{array}{l} \vec{R} \\ \vec{D}_o \end{array} \right\}$ où \vec{R} représente la petite rotation et

\vec{D}_o la petite translation du point O . les écarts suivant les normales \vec{n}_i entre les points mesurés M_i et les points théoriques M_{thi} correspondants sont :

$$\xi_i = M_{thi} \vec{M}_i \vec{n}_i \quad \text{III-4}$$

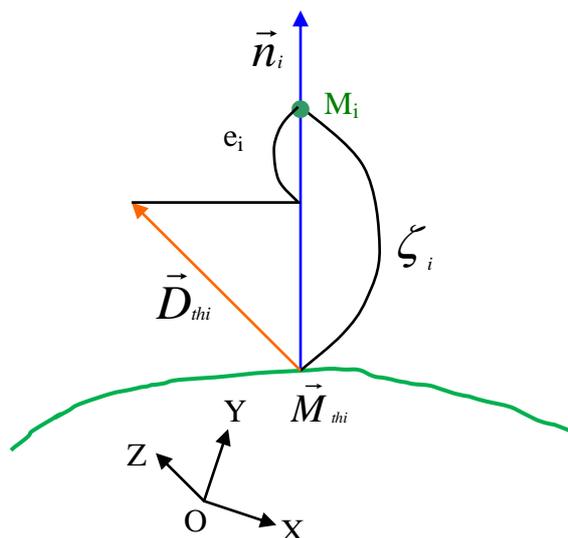


Figure III-1 : Petit déplacement du point M_{thi}

En faisant l'hypothèse d'un petit déplacement, l'écart optimisé e_i sera égal à l'écart ζ_i diminué du déplacement \vec{D}_{thi} du point théorique M_{thi} projeté sur la normale théorique \vec{n}_i .

On remplaçant \vec{D}_{thi} par son expression en termes de TPD, on trouve :

$$e_i = \zeta_i - (\vec{D}_o \cdot \vec{n}_i + (\vec{OM}_{thi} \wedge \vec{n}_i) \cdot \vec{R})$$

En posant $[P_i]_o$ le torseur des coordonnées Plückeriennes de la normale \vec{n}_i au point O on obtient :

$$e_i = \zeta_i - ([P_i]_o \cdot [T_o]) \quad \text{Avec : } [P_i]_o = \begin{cases} \vec{n}_i \\ \vec{OM}_{thi} \wedge \vec{n}_i \end{cases} \text{ et } [T_o] = \begin{cases} \vec{R} \\ \vec{D}_o \end{cases}$$

Il est alors possible de rechercher le petit déplacement significatif $[T_o]$ 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 TPD et des paramètres intrinsèques de la surface ou de la ligne [MARCHÈSE, 2001].

$$W = \sum_{i=1}^n (\zeta_i - ([P_i]_o \cdot [T_i]_o))^2 \quad \text{III-5}$$

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

III.2.2 Optimisation d'un plan

$$\zeta_i = M_i - M_{thi} \quad \text{III-6}$$

$$[T] = \begin{cases} \alpha \\ \beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w \end{cases} \cdot \vec{R}, [P] = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 1 \\ Y_i \\ -X_i \\ 0 \end{cases} \cdot \vec{n}_i, \text{ Avec } \vec{OM}_i = \begin{cases} X_i \\ Y_i \\ 0 \end{cases} \text{ et } \vec{n}_i = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 1 \end{cases}$$

$$e_i = \zeta_i - (\alpha Y_i - \beta X_i + w) \quad \text{III-7}$$

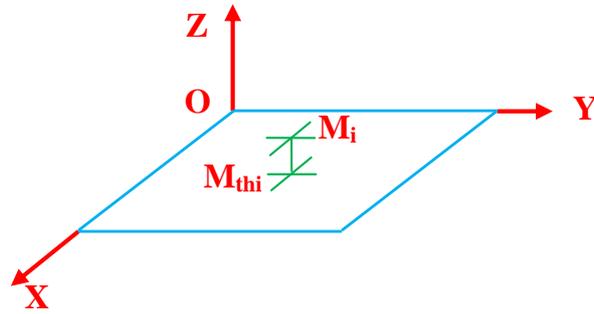


Figure III-2 : Optimisation d'un plan

III.2.3 Optimisation d'un cercle

$$\zeta_i = M_i - M_{thi} \quad \text{III-8}$$

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \bar{R} \\
 [T] \left. \begin{array}{l} u \\ v \\ 0 \end{array} \right\} \bar{D}
 \end{array}
 , [P] \left. \begin{array}{l} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \end{array} \right\} \vec{n}_i
 \end{array}
 , OM_i \wedge \vec{n}_i \text{ et } \vec{n}_i \text{ sont colinéaires}$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} OM_i \wedge \vec{n}_i$$

$$e_i = \zeta_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i) \quad \text{III-9}$$

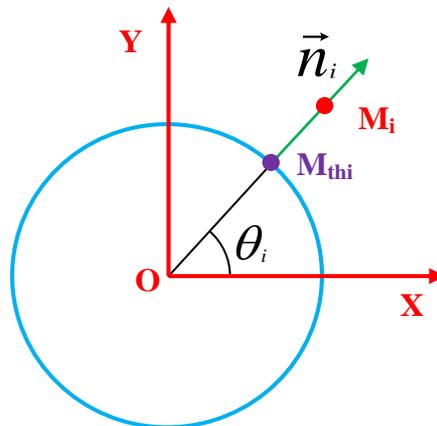


Figure III-3 : Optimisation d'un cercle

III.3 METHODE NON LINEAIRES

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 linéarisation les fonctions qui le constituent, mais nous allons exploiter les formules à l'état brute. 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.

III.3.1 Élément géométrique simple

L'une des étapes les plus difficiles dans une procédure d'association est l'expression des écarts points/surface. L'étape est d'autant plus difficile que la surface est plus complexe. Dans la référence [BOUKEBBAB, 1998] nous trouvons une astuce qui consiste à appliquer un changement de repère vers le centre de gravité du nuage de points, puis un changement de repère pour faire varier l'orientation de l'élément géométrique dans un nuage de points.

III.3.1.1 Surface cylindrique

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

$$O_{cdg} \vec{M}_{i/(O_{cdg}, e_1, e_2, e_3)} = [T] O \vec{M}_{i/(O, e_1, e_2, e_3)} \quad \text{où } [T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_{cdg} \\ 0 & 1 & 0 & -y_{cdg} \\ 0 & 0 & 1 & -z_{cdg} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Par l'utilisation d'un changement de base suivant la matrice 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 :

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

$$O_{cdg} \vec{M}_{i/(O_{cdg}, e_1, e_2, e_3)} = [P] O_{cdg} \vec{M}_{i/(O, e_1, e_2, e_3)}$$

$$\text{D'où : } \begin{Bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{Bmatrix}_{(e'_1, e'_2, e'_3)} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\phi & \cos\psi \sin\phi & -\sin\psi \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ \sin\psi \cos\phi & \sin\psi \sin\phi & \cos\psi \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}_{(e_1, e_2, e_3)}$$

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

$$y_i = d_i - R = F(\phi, \psi, h'_1, h'_2, R) \text{ Avec } d_i = \sqrt{(x'_1 - h'_1)^2 + (x'_2 - h'_2)^2}$$

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

Soit la fonction $f(a_i) = t$ où $a_i = a_i^0 + \Delta a_i$

Ce qui nous donne : $f(a_i) = f(a_i^0) + \sum_{i=1}^N \Delta a_i \cdot \frac{\partial f(a_i)}{\partial a_i}$

L'application sur la fonction $y_i = F(\Phi, \Psi, h'_1, h'_2, R)$ nous donne

$$y_i = F_0(\phi_0, \psi_0, h'_{10}, h'_{20}, R_0) + \sum_{i=1}^5 \Delta a_i \frac{\partial F(\phi, \psi, h'_1, h'_2, R)}{\partial a_i}$$

Avec : $a_i = F(\Phi, \Psi, h'_1, h'_2, R)$ sont les paramètres d'optimisation

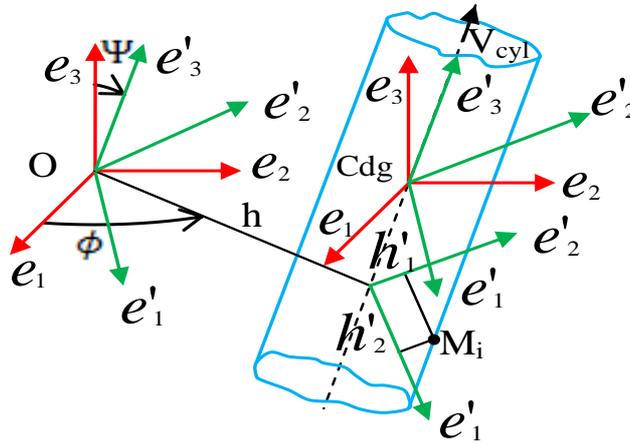


Figure III-4 : Changement de base [BOUKEBBAB, 1998]

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 :

$$\frac{\partial \sum_{k=1}^m y_k^2}{\partial a_i} = 0 \text{ Avec } k = 1 \text{ à } m \text{ points palpés.}$$

III.3.2 Surface gauche

Le problème pour calculer la distance d'un point 3D à une surface NURBS peut être présenté comme suit : trouver un point dans l'espace paramétrique de la surface (u_0, v_0) tel que la distance entre le point sur la surface $\vec{s}(u_0, v_0)$ et le point 3D \vec{r} est minimum dans la direction perpendiculaire au plan tangent au point (u_0, v_0) (Voir la **Figure III-5**).

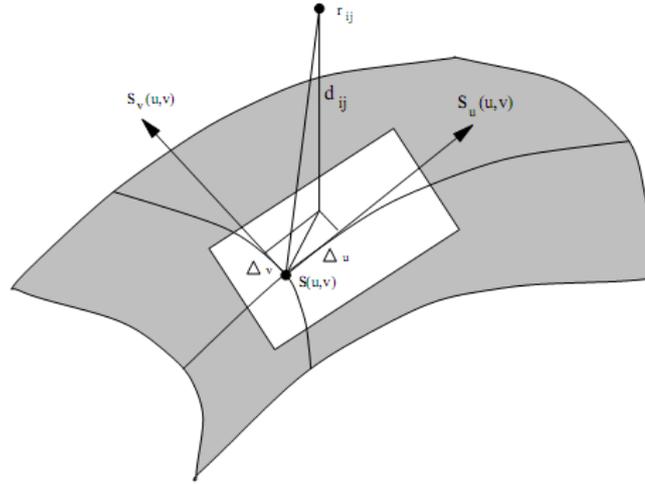


Figure III-5 : Distance entre un point 3D et une surface NURBS

La fonction à minimiser est suivant :

$$\min_{(u_0, v_0)} \left\| \vec{r} - \vec{S}(u, v) \right\|^2 \quad \text{III-10}$$

Un développement en série de Taylor de la surface paramétrique $\vec{S}(u, v)$, donne :

$$\vec{S}(u, v) = \vec{S}(u_0, v_0) + \Delta u \frac{\partial \vec{S}}{\partial u} + \Delta v \frac{\partial \vec{S}}{\partial v} \quad \text{III-11}$$

$$\text{Avec : } \frac{\partial}{\partial u} \vec{S}(u, v) = \frac{AB - CD}{B^2} \quad \text{et} \quad \frac{\partial}{\partial v} \vec{S}(u, v) = \frac{EB - FD}{B^2} ;$$

$$A = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \left(\frac{\partial}{\partial u} N_{i,p}(u) \right) N_{j,q}(v) w_{i,j} \vec{P}_{i,j} ; \quad B = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} ;$$

$$C = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} \vec{P}_{i,j} ; \quad D = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \left(\frac{\partial}{\partial u} N_{i,p}(u) \right) N_{j,q}(v) w_{i,j} ;$$

$$E = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) \left(\frac{\partial}{\partial v} N_{j,q}(v) \right) w_{i,j} \vec{P}_{i,j} ; \quad F = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) \left(\frac{\partial}{\partial v} N_{j,q}(v) \right) w_{i,j} ;$$

$$\frac{\partial}{\partial u} N_{i,p}(u) = \frac{p}{u_{i+p-1} - u_{i-1}} N_{i,p-1}(u) - \frac{p}{u_{i+p} - u_i} N_{i+1,p-1}(u) \quad \text{et}$$

$$\frac{\partial}{\partial v} N_{j,q}(v) = \frac{q}{u_{j+q-1} - u_{j-1}} N_{j,q-1}(v) - \frac{q}{u_{j+q} - u_j} N_{j+1,q-1}(v)$$

n : Est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique u ,

m : Est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique v ,

$\vec{P}_{i,j}$: Les points de contrôle,

$W_{i,j}$: Les poids associés au point de contrôle $\vec{P}_{i,j}$,

$N_{j,p}$ (ou $N_{j,q}$) les fonctions de la base B-Spline.

Le problème de minimisation devient donc :

$$\min_{u_0, v_0} \left\| \vec{r} - \vec{S}(u_0, v_0) - \Delta u \frac{\partial \vec{S}}{\partial u} - \Delta v \frac{\partial \vec{S}}{\partial v} \right\|^2 \quad \text{III-12}$$

Qui peut être exprimé sous forme matricielle par :

$$\min_{(u_0, v_0)} \left\| J\vec{w} - \vec{d} \right\|^2 \quad \text{III-13}$$

Où J est le Jacobienne de $\vec{S}(u, v)$ et est égal à :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_x}{\partial u} & \frac{\partial s_x}{\partial v} \\ \frac{\partial s_y}{\partial u} & \frac{\partial s_y}{\partial v} \\ \frac{\partial s_z}{\partial u} & \frac{\partial s_z}{\partial v} \end{bmatrix} \quad \text{III-14}$$

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} u_0 - u \\ v_0 - v \end{pmatrix} \quad \text{III-15}$$

Est un vecteur qui correspond à la variation de la position précédente.

Si $\vec{d}(u, v)$ est l'erreur entre le point \vec{r} et le modèle paramétrique :

$$\vec{d}(u, v) = \vec{r} - \vec{s}(u, v) \quad \text{III-16}$$

Alors la solution au problème de minimisation correspond à la condition d'Euler :

$$\frac{\partial}{\partial \vec{w}} \left\| J\vec{w} - \vec{d} \right\|^2 = 0 = 2 J^T J\vec{w} - 2 J^T \vec{d} \quad \text{III-17}$$

$$\text{D'où : } J^T J\vec{w} = J^T \vec{d}$$

$J^T \vec{d}$: correspond à la projection du vecteur d'erreur dans le plan tangent. La nouvelle position paramétrique est égale à :

$$\vec{w} = \left(J^T J \right)^{-1} J^T \vec{d} \quad \text{III-18}$$

En utilisant un procédé itératif, on peut calculer la distance du point à la surface en moins de quatre ou cinq itérations. Les paramètres d'initialisation de cette procédure itérative sont trouvés en découpant la surface en N carreaux et en prenant le centre (u, v) du carreau le plus proche du point \vec{r} . Le critère d'arrêt, correspond à la condition d'orthogonalité du vecteur d'erreur et du plan tangent à la surface en ce point, mesurée par les deux conditions suivantes :

$$\gamma = \left| \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{S}}{\partial v}}{\left| \vec{d} \right| \left| \frac{\partial \vec{S}}{\partial v} \right|} \right| \leq \varepsilon, \quad \zeta = \left| \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{S}}{\partial u}}{\left| \vec{d} \right| \left| \frac{\partial \vec{S}}{\partial u} \right|} \right| \leq \varepsilon \quad \text{III-19}$$

Le paramètre ε correspond à la précision avec laquelle on veut que cette condition d'orthogonalité soit respectée et a été fixé à $\varepsilon = 0.1^\circ$.

L'algorithme pour calculer la distance point 3D/surface NURBS peut être résumé comme suit :

1. Calcul de la matrice Jacobienne J (équation III.14),
2. Calcul de \vec{d} (équation III.16),
3. Calcul du vecteur \vec{w} (équation III.15),
4. $(\mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0) = (\mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0) + \vec{w}$,
5. Calcul de γ et ζ (équation III.19),
6. Si $\gamma \leq \varepsilon$ et $\zeta \leq \varepsilon$, alors on arrête, sinon on retourne à l'étape 1.

Une fois que la distance du point 3D à toutes les surfaces a été calculée, les surfaces les plus proches du point sont déterminées. Soit \vec{d}_i la distance minimale du point 3D à la i -ème surface \vec{S}_i .

III.4 LA METHODE ICP (ITERATIVE CLOSEST POINT)

L'ICP est une méthode précise et fiable pour la mise en correspondance de surface gauche. Le but de l'ICP est trouver la transformation rigide qui va correspondre au mieux un nuage de points P et un modèle géométrique X. le processus d'alignement tente de minimiser la somme des carrées des distances entre les points du nuage et leurs correspondants appartenant au modèle. 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 carrées entre les points correspondant [AL SHAWA, 2006].

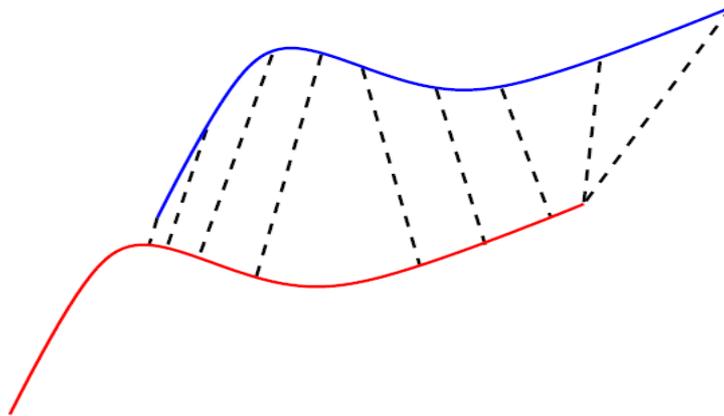


Figure III-6 : Appariement des points les plus proches appartenant à une courbe

Des préliminaires mathématiques sont étudiés [BESL, et al., 1992] pour définir le point le plus proche à un autre point connu. Par exemple la distance entre un point et un ensemble des points est celle minimale entre ce point et chaque point de l'ensemble. Le point de l'ensemble qui rend ce minimum est celui le plus proche, ainsi on peut coupler deux ensemble de points $\{\vec{x}_i, \vec{p}_i\}$. Supposons que R la matrice de rotation et que T le vecteur de la translation, sont les paramètres de la transformation rigide, la fonction à minimiser est :

$$e(R, T) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \vec{x}_i - R \vec{p}_i - \vec{T} \right\|^2 \quad \text{III-20}$$

Algorithme ICP :

1. Pour chaque point de P, chercher son point le plus proche dans X,
2. Avec la correspondance établie en 1, calculer la transformation qui minimise le critère de distance,
3. Appliquer la transformation déterminée en 2 sur les données P,

4. Calculer les changements sur l'erreur globale aux moindres carrés. Si ce changement est inférieur à un certain seuil, alors arrêter, sinon aller en 1.

III.4.1 Variantes de l'algorithme ICP original

Après la présentation de la méthode par BESL et MCKEY [BESL, et al., 1992] 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.

Les inconvénients principaux de cette méthode dans sa forme originale [BESL, et al., 1992] est d'une part qu'elle converge vers un faux minimum spécialement lorsqu'il existe beaucoup de bruit dans les données, et d'autre part le grand nombre d'itérations nécessaires à la convergence. Plusieurs solutions ont été mises en œuvre pour surmonter ces inconvénients, comme celle [CHEN, et al., 1992] qui remplace la distance entre les points par celle entre un point et entre le plan tangentiel au deuxième plan ; en d'autres termes elle intègre les normales d'une des deux surfaces dans l'équation III-20.

$$E = \sum \left((\vec{x}_i - R\vec{p}_i - \vec{T}) \cdot \vec{n}_i \right)^2 \quad \text{III-21}$$

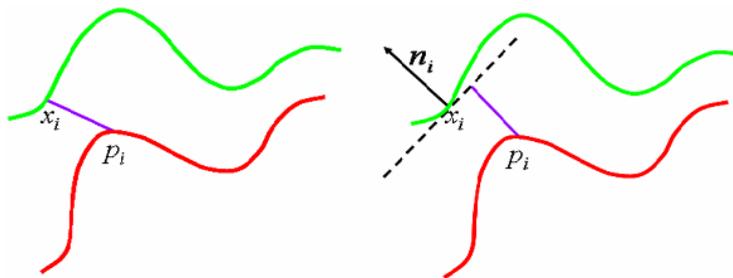


Figure III-7 : Le point le plus proche au plan tangentiel à une surface dans un point connu

[SEUNG-HWAN, et al., 2004] proposent une version de ICP utilisant un sous échantillonnage des points suivant la direction radiale en partant du centre de gravité du nuage de points à échantillonner. Les auteurs montrent que leur algorithme est aussi efficace que l'algorithme classique (sans échantillonnage), et a l'avantage d'être considérablement plus rapide.

[GELFAND, et al., 2003] proposent une méthode originale pour la sélection des points à utiliser dans ICP lors du recalage de deux ensembles de points 3D. Cette méthode se base sur la notation de « stabilité géométrique » du recalage. Cette stabilité concerne le glissement des surfaces à recaler l'une par rapport à l'autre. Les auteurs sont capables

d'estimer les transformations de repère susceptible, de causer un glissement important entre les deux surfaces et donc une instabilité, et choisissent les points des ces surfaces pour lesquels ce glissement est minimum.

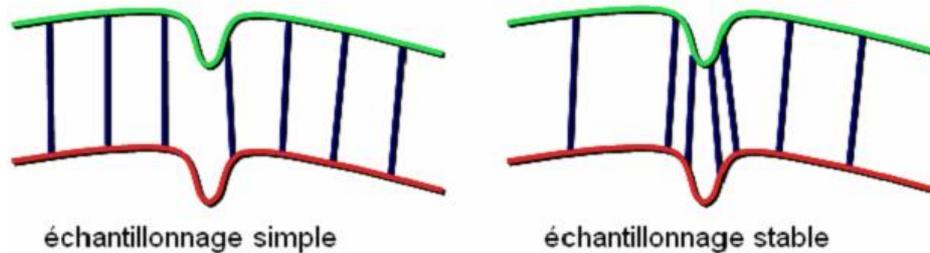


Figure III-8 : Un échantillonnage favorisé par rapport à l'échantillonnage uniforme

[ZHANG, 1992] Abandonne les points qui dégraderont la transformation en introduisant un test statistique à chaque itération. Ce test prend en compte la moyenne des distances et l'erreur moyenne quadratique pour éliminer les points qui ne fournissent pas de bonnes informations. Il existe encore des algorithmes qui essaient d'attribuer un type quelconque de segmentation aux données issues d'ICP. Par exemple [KREBS, et al., 1996] a reconstruit la méthode floue en introduisant à chaque itération une fonction d'adhésion dépendante de la distance aux points modèles, cette fonction intervient dans toutes les étapes de calcul comme facteur de poids ; elle permet de classifier les points soit point objet soit bruit. La méthode fonctionne de façon idéale lorsqu'il s'agit de la reconnaissance d'un objet connu dans un nuage de points.

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 complexes telles que les méthodes de recuit simulé. Dans la plupart des méthodes présentées précédemment, la transformation initiale est supposée proche de la transformation recherchée [MORON, 1996].

Voici quelques solutions pour choisir la transformation initiale :

- Rotation et translation approximativement estimées à partir des axes principaux de l'objet dans chaque vue,
- Raisonnement de P. BESL : 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.

III.4.2 Précision de la méthode de recalage

Moron [MORON, 1996] a étudié l'erreur de la méthode de recalage en fonction du paramètre de convergence de l'algorithme ICP, c'est-à-dire fonction de la valeur de ε . La valeur de celle-ci a été fixée à $\varepsilon = 10^{-8}$.

Les paramètres internes N_s (Nombre de points extraits aléatoirement de l'ensemble de points initiaux et utilisés pour la mise en correspondance) et N_t (Nombre d'essais réalisés dans l'algorithme ICP) interviennent directement dans la précision du résultat fourni par la méthode de recalage. L'influence de ceux-ci sur la qualité du recalage a été évaluée. D'une manière générale, il a été constaté que l'erreur de position diminue lorsque N_t augmente et lorsque N_s diminue. Par ailleurs, le temps de calcul augmente lorsque N_t et N_s augmentent, ce qui se comprend aisément puisque le nombre d'opérations à réaliser augmente proportionnellement à N_t et N_s . Par conséquent, après une évaluation de ces paramètres, MORON a trouvé qu'un bon choix était : N_t égal à 10 et N_s doit être compris entre 10 et 50.

III.5 CONCLUSION

Dans le présent chapitre nous avons fait un tour d'horizon des principales méthodes d'association d'un élément géométrique à un nuage de points. La méthode des TPD 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 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. Tout ça, fait de cette méthode la plus favorite pour être utilisée pour notre problème.

CHAPITRE IV : TRAITEMENT DES DONNEES DU GENOU

IV.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre III nous avons exposé une méthode d'inspection qui utilise le nuage de points issu de la numérisation d'une pièce et son modèle CAO. Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats de l'amélioration de la précision des données lorsque nous utilisons la stratégie d'acquisition et les résultats obtenus lors du contrôle des tolérances sur une pièce.

Nous classons les différentes pièces qui peuvent être inspectées en deux catégories, en fonction de la complexité de leurs surfaces (pièces simple, pièces complexes).

La validation d'un algorithme (ICP) nécessite de tester son efficacité et sa robustesse par sa mise en œuvre sur différents types de données. Celle-ci inclut une étude du comportement de l'algorithme en fonction de ses paramètres internes ainsi qu'une estimation des erreurs de calcul.

IV.2 APPLICATIONS SUR LES FORMES SIMPLE

IV.2.1 Association d'une ligne 2D

Soit $(x(i), y(i))_{i=1,n}$ un ensemble de n ($n \geq 2$) coordonnées d'un profil de surface.

Une ligne dans le plan défini comme $y = a + bx$, où a est l'interception et b est la pente. Puis, une fonction de coût E peut être définie comme somme des distances carré de chaque ordonnée de la ligne. Ainsi E est donné par :

$$E = \sum_{i=1}^n d(i)^2 \quad \text{IV-1}$$

Où $d(i)$ est la fonction de distance d'un point de la ligne donnée par :

$$d(i) = y(i) - a - bx(i) \quad \text{IV-2}$$

Les paramètres de la ligne peuvent être déterminés en **dérivées** partiellement E en ce qui concerne a et b et en résolvant l'ensemble d'équations simultanées données dans l'équation **IV-3** :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a} &= 2(-1)\sum_{i=1}^n (y(i) - a - bx(i)) = 0 \Rightarrow na + b\sum_{i=1}^n x(i) = \sum_{i=1}^n y(i) \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= 2\sum_{i=1}^n (-x(i))(y(i) - a - bx(i)) = 0 \Rightarrow a\sum_{i=1}^n x(i) + b\sum_{i=1}^n x(i)^2 = \sum_{i=1}^n x(i)y(i) \end{aligned} \quad \text{IV-3}$$

Après la résolution de l'équation IV-3, nous obtenons :

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x(i)\sum_{i=1}^n y(i) - n\sum_{i=1}^n x(i)y(i)}{\left(\sum_{i=1}^n x(i)\right)^2 - n\sum_{i=1}^n x(i)^2}, a = \frac{\sum_{i=1}^n x(i)\sum_{i=1}^n x(i)y(i) - \sum_{i=1}^n x(i)^2\sum_{i=1}^n y(i)}{\left(\sum_{i=1}^n x(i)\right)^2 - n\sum_{i=1}^n x(i)^2} \quad \text{IV-4}$$

Exemple 1 : ligne 2D

X(i)	1.1	2.3	3.1	4.3	5.4
Y(i)	0.9	2.1	3.3	4.2	5.1

Tableau IV-1 : Coordonnées d'un linge 2D

Programme :

```
x = [1.1 2.3 3.1 4.3 5.4];
y = [0.9 2.1 3.3 4.2 5.1];
n = size(x, 2);
b = (sum(x)*sum(y)-n*sum(x.*y))/(sum(x)^2-n*sum(x.^2));
a = (sum(y) - b*sum(x))/n;
[b a]
```

Donc : **a = -0.0723, b = 0.9853.**

$$y(i) = 0.9853 * x(i) - 0.0723$$

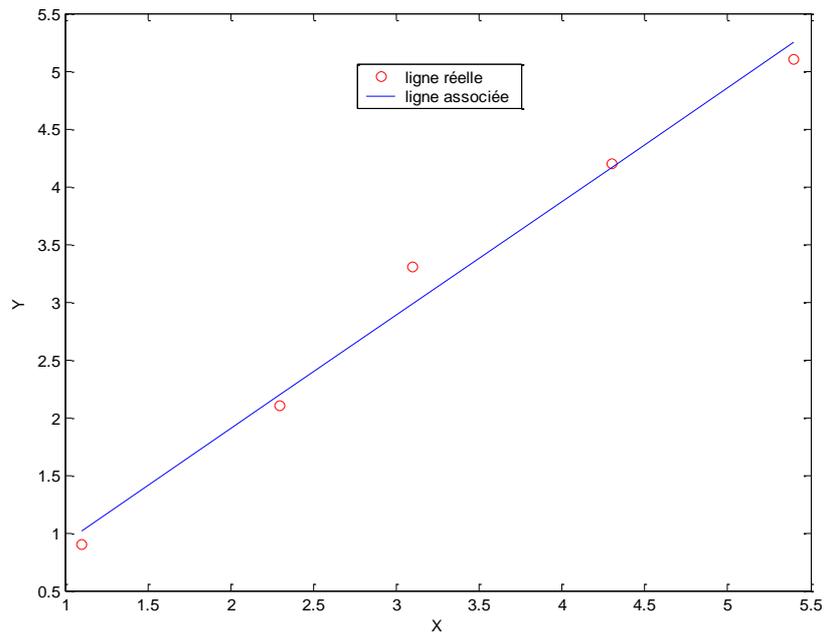


Figure IV-1 : Association d'une ligne 2D

Exemple 2 : ligne 3D

X(i)	0.2	2.3	3.1	4.3	5.4
Y(i)	0.9	2.1	3.3	4.2	5.1
Z(i)	10.1	9.9	10.0	10.2	9.98

Tableau IV-2 : Coordonnées d'une ligne 3D.

Programme :

```

function [a, b, c] = line3D(M)1
clear all; clear close; clc;
M = [1.1, 0.9, 10.1; 2.3, 2.1, 9.9; 3.1, 3.3, 10; 4.3, 4.2, 10.2; 5.4, 5.1, 9.98];
n = size(M, 1);
xc = sum(M(:, 1))/n; yc = sum(M(:, 2))/n; zc = sum(M(:, 3))/n
for i = 1 : n
    A(i, 1) = M(i, 1) - xc; A(i, 2) = M(i, 2) - yc; A(i, 3) = M(i, 3) - zc;
end
[v, d] = eig(A'*A);
a1 = [d(1, 1); d(2, 2); d(3, 3)];
[y, i] = max(a1); a = v(1, i); b = v(2, i); c = v(3, i);
[a b c]
    
```

Une ligne 3D peut être spécifiée par deux paramètres : Un point (xc, yc, zc) sur la ligne et Les cosinus de direction (a, b, c) de la normale.

xc = 3.2400, yc = 3.1200, zc = 10.0360; a = -0.7100, b = -0.7042, c = -0.0033.

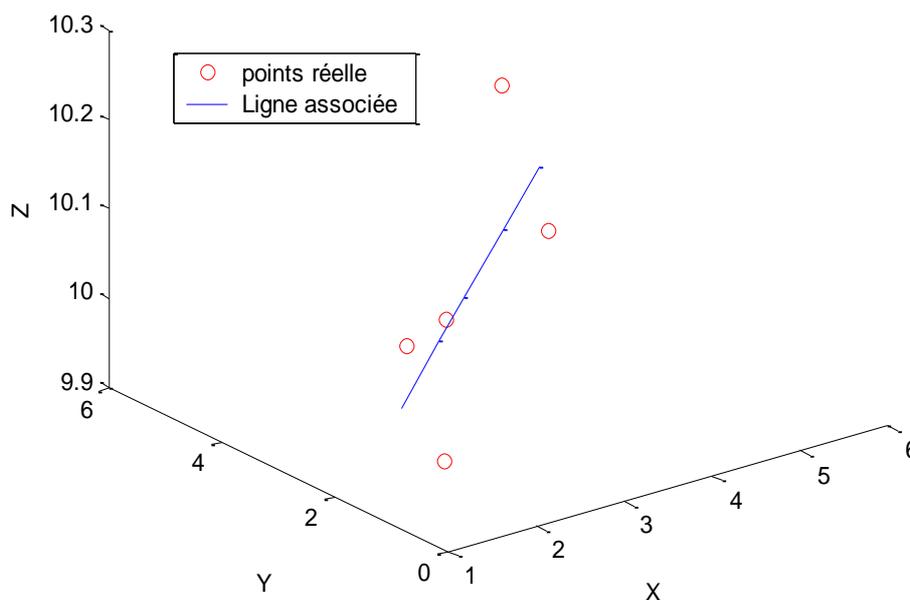


Figure IV-2 : Association d'une ligne 3D

IV.2.2 Association d'un plan

La distance de n'importe que point $[x(i), y(i), z(i)]_{i=1,n}$ ($n \geq 3$) de plan est indiquée par :

$$d(i) = ax(i) + by(i) + cz(i) \quad \text{IV-5}$$

Où les cosinus de direction de la normale de plan sont (a, b, c). La fonction de coût E est réduite au minimum est donc :

$$E = \sum_{i=1}^n d(i)^2 = \sum_{i=1}^n (ax(i) + by(i) + cz(i))^2 \quad \text{IV-6}$$

Exemple 3 :

X(i)	0.2	0.1	-50.1	-50.1	0.1	-50
Y(i)	40.2	0.2	39.8	39.8	0.2	0
Z(i)	19.8	-0.1	20.1	20.1	-0.1	-0.1

Tableau IV-3 : Coordonnées d'un plan

Description d'algorithme :

1. La première étape est de trouver la moyenne des points X, Y et Z.

$$\bar{x} = \sum x_i / n, \bar{y} = \sum y_i / n, \bar{z} = \sum z_i / n$$

2. La matrice A est formulée tels que sa première colonne est $x_i - \bar{x}_i$, la deuxième colonne $y_i - \bar{y}_i$ et la troisième colonne $z_i - \bar{z}_i$.
3. La matrice A est résolue par décomposition de valeur singulière.
4. Un plan est spécifié par $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$, a, b, et c.

Programme :

```
function [a, b, c] = plan(M)
M = [0.2, 40.2, 19.8; 0.1, 0.2, -0.1; -50.1, 39.8, 20.1; -50.1, 39.8, 20.1; 0.1, 0.2, -0.1; -50, 0, -0.1];
n = size(M, 1);
xc = sum(M(:, 1))/n; yc = sum(M(:, 2))/n; zc = sum(M(:, 3))/n;
for i = 1 : n
    A(i, 1) = M(i, 1) - xc; A(i, 2) = M(i, 2) - yc; A(i, 3) = M(i, 3) - zc;
end
[v, d] = eig(A'*A);
a1 = [d(1, 1); d(2, 2); d(3, 3)];
[y, i] = min(a1); a = v(1, i); b = v(2, i); c = v(3, i);
[xc yc zc a b c]
```

Un plan peut être spécifié par un point (Xc, Yc, Zc) sur le plan et les cosinus de direction (a, b, c) de la normale de plan.

$$\mathbf{Xc} = -24.9667, \mathbf{Yc} = 20.0333, \mathbf{Zc} = 9.9500; \mathbf{a} = 0.0054, \mathbf{b} = -0.4490, \mathbf{c} = 0.8935.$$

$$0.0054(x(i) + 24.9667) - 0.4490(y(i) - 20.0333) + 0.8935(z(i) - 9.95) = 0$$

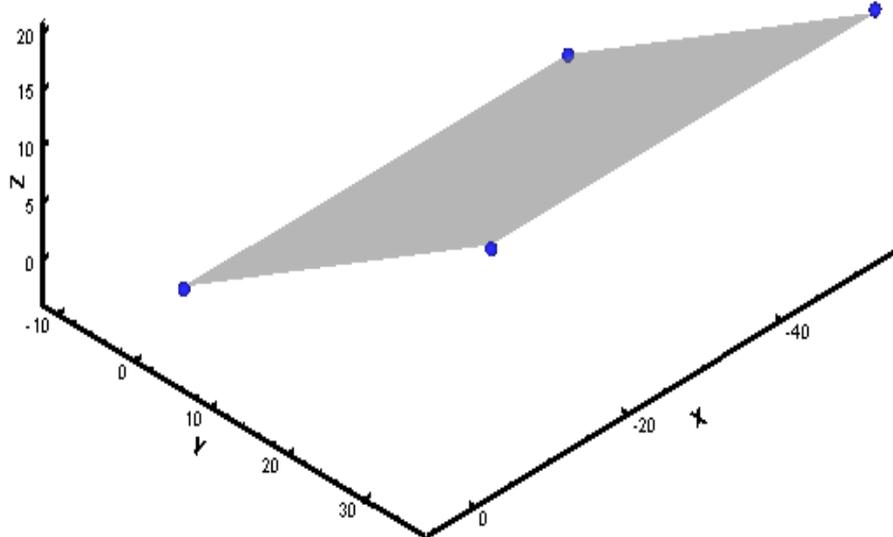


Figure IV-3 : Association d'un plan

IV.2.3 Association d'un cercle

Un cercle peut être spécifié par son centre (x_c, z_c) et son rayon r . n'importe quel point $[x(i), y(i)]_{i=1,n}$ ($n \geq 3$) sur le cercle satisfait :

$$(x(i) - x_c)^2 + (y(i) - y_c)^2 = r^2 \tag{IV-7}$$

La distance radiale de n'importe quel point $(x(i), y(i))$ à un cercle spécifique par x_c, z_c , et r est indiquée par :

$$d(i) = R(i) - r \tag{IV-8}$$

Où :

$$R(i) = \sqrt{(x(i) - x_c)^2 + (z(i) - z_c)^2} \tag{IV-9}$$

La fonction de coût E est donc donnée par :

$$E = \sum_{i=1}^n d(i)^2 \tag{IV-10}$$

La dérivée partielle de E en ce qui concerne x_c, y_c , et r , donne trois équations non linéaires dans les inconnus qui ne peuvent pas être résolus facilement.

Exemple 4 :

X(i)	10.1852	5.3514	-4.7267	-9.7776	-4.6527	5.3107
Y(i)	0.3974	9.1387	8.9215	0.4401	-8.5738	-8.1704

Tableau IV-4 : Coordonnées d'un cercle.

IV.2.3.1 Première méthode : La descente de gradient

La descente de gradient désigne un algorithme d'optimisation. Afin de trouver un minimum local de la fonction à optimiser, cette méthode consiste à progresser par étapes proportionnelles à l'opposé du gradient (ou de son approximation) de la fonction au point courant. A l'opposé, en progressant par étapes dans la direction du gradient, on obtient alors un maximum local de fonction, cette méthode est alors appelée montée de gradient (The Steepest Descent Algorithm).

La descente de gradient est également connue sous noms de **descente de plus forte pente** ou **méthode de la plus grande pente** car l'antigradient définit la meilleure des directions de descente.

La descente de gradient est basée sur l'observation que si une fonction $E(x)$ à valeurs \Re est définie et différentiable (dérivable pour une fonction définie \Re) en un point a , alors $E(x)$ décroît le plus rapidement dans une direction opposée à celle du gradient de E en a , $-\nabla E(a)$. Ainsi, si l'on définit b comme suit :

$$b = a - \lambda \nabla E(a)$$

Pour $\lambda > 0$ suffisamment petit, alors on a $E(a) \geq E(b)$. Ainsi, en conservant cette observation en tête, on peut initialiser l'algorithme à une valeur x_0 , première approximation de la position du minimum local de E , et calculer la séquence x_1, x_2, \dots , telle que :

$$x_{n+1} = x_n - \lambda \nabla E(x_n)$$

Pour un cercle donc :

$$\nabla E = \begin{bmatrix} -2 \sum_{i=1}^n (R_0(i) - r_0)(x(i) - x_{c0}) / R_0(i) \\ -2 \sum_{i=1}^n (R_0(i) - r_0)(z(i) - z_{c0}) / R_0(i) \\ -2 \sum_{i=1}^n (R_0(i) - r_0) \end{bmatrix}$$

Où $R_0(i) = \sqrt{(x(i) - x_{c0})^2 + (z(i) - z_{c0})^2}$

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ z_{c1} \\ r_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c0} \\ z_{c0} \\ r_0 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} -2 \sum_{i=1}^n (R_0(i) - r_0)(x(i) - x_{c0}) / R_0(i) \\ -2 \sum_{i=1}^n (R_0(i) - r_0)(z(i) - z_{c0}) / R_0(i) \\ -2 \sum_{i=1}^n (R_0(i) - r_0) \end{bmatrix}$$

Programme :

```

function [ xc, zc, r] = LSCIPSD (M, xco, zco, ro)
M = [10.1852, 0.3974; 5.3514, 9.1387; -4.7267, 8.9215; -9.7776, 0.4401; -4.6527, -
8.5738; 5.3107, -8.1704];
xco = 0; zco = 0; ro = 10;
eps = 1e-8; flag = 0; lamda = 0.1;
n = size(M, 1);
Eo = sum((sqrt((M(:, 1) - xco).^2 + (M(:, 2) - zco).^2) - ro).^2);
t = 1;
while flag == 0
    for i = 1 : n
        R = sqrt((M(i, 1) - xco)^2 + (M(i, 2) - zco)^2);
        dexo(i) = -2*(R - ro)*(M(i, 1) - xco)/R;
        dezo(i) = -2*(R - ro)*(M(i, 2) - zco)/R;
        dero(i) = -2*(R - ro);
    end
    xco = xco - lamda*sum(dexo);
    zco = zco - lamda*sum(dezo);
    ro = ro - lamda*sum(dero);
    E1 = sum((sqrt((M(:, 1) - xco).^2 + (M(:, 2) - zco).^2) - ro).^2);
    If abs(Eo - E1) < eps
        flag = 1;
    end
    Eo = E1;
    disp(['iteration # ' num2str([t zco xco ro Eo])]);
    t = t + 1;
end
xc=xco; zc=zco;r=ro;
    
```

Un cercle peut être spécifié par son centre (x_c, y_c) et son rayon r .

Après 11 itérations $x_c = 0.216209$, $y_c = 0.343258$, $r = 10.0216$.

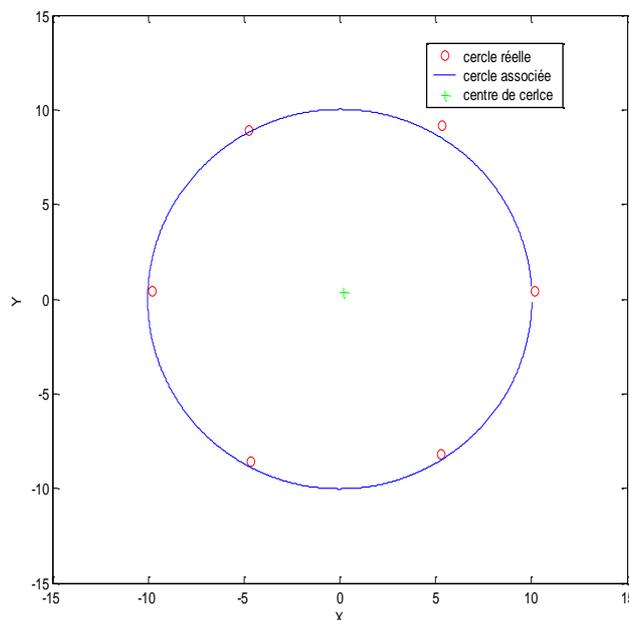


Figure IV-4 : Associée d'un cercle par la méthode de la descente de gradient

IV.2.3.2 Deuxième méthode : Gauss-Newton

L'algorithme de Gauss-Newton est une méthode de résolution des problèmes de moindres carrés non-linéaires. On applique l'algorithme de **Gauss-Newton** pour calculs x_c , y_c et r . donné une première évaluation pour le centre et le rayon (x_{c0} , y_{c0}) et r_0 , nous utiliserons la fonction utilisée l'expansion de Taylor comme :

$$d(i) \approx R_0 - r_0 + (x_{c1} - x_{c0}) \frac{\partial d(i)}{\partial x_{c0}} + (y_{c1} - y_{c0}) \frac{\partial d(i)}{\partial y_{c0}} + (r_1 - r_0) \frac{\partial d(i)}{\partial r_0} \quad \text{IV-11}$$

Où (x_{c1}, y_{c1}) et r_1 sont les nouvelles évaluations à la fin de l'itération.

Après avoir linéarisé la fonction de coût, nous nous rendons compte que nous avons de n équations et trois inconnus, un système linéaire simple de moindres carrés $\mathbf{J}\mathbf{P} = -\mathbf{D}$. La matrice \mathbf{J} s'appelle la matrice de Jacobien.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d(1)}{\partial x_{c0}} & \frac{\partial d(1)}{\partial y_{c0}} & \frac{\partial d(1)}{\partial r_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial d(n)}{\partial x_{c0}} & \frac{\partial d(n)}{\partial y_{c0}} & \frac{\partial d(n)}{\partial r_0} \end{bmatrix}, \mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_{c1} - x_{c0} \\ y_{c1} - y_{c0} \\ r_1 - r_0 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} R_0(1) - r_0 \\ \dots \\ R_0(n) - r_0 \end{bmatrix} \quad \text{IV-12}$$

Description d'algorithme :

1. déterminer les estimations initiales pour le centre et le rayon,
2. Evaluer la fonction de coût E aux évaluations initiales,
3. Calcul la matrice \mathbf{J} et \mathbf{D} ,
4. résoudre $(\mathbf{J}^T \mathbf{J})\mathbf{P} = -\mathbf{J}^T \mathbf{D}$ pour déterminer la nouvelle évaluation du centre et du rayon,
5. Evaluer la fonction de coût E au nouvel ensemble d'évaluations de paramètre.
6. Si la valeur de fonction de coût est plus petite qu'avant l'algorithme converge.

Programme :

```
function [xc, yc, r] = LSCPGN(M, xco, zco, ro)
M = [10.1852, 0.3974; 5.3514, 9.1387; -4.7267, 8.9215; -9.7776, 0.4401; -4.6527, -8.5738; 5.3107, -8.1704];
xco = 0; zco = 0; ro = 10;
eps = 1e-8; flag = 0; t = 1; n = size(M, 1);
Eo = sum((sqrt((M(:, 1) - xco).^2 + (M(:, 2) - zco).^2) - ro).^2);
while flag == 0
    for i = 1 : n
        R = sqrt((M(i, 1) - xco)^2 + (M(i, 2) - zco)^2);
        j(i, 1) = -(M(i, 1) - xco)/R; j(i, 2) = -(M(i, 2) - zco)/R; j(i, 3) = -1;
```

```

    d(i, 1) = -(R - ro);
end
p = j\d;
xco = xco + p(1); zco = zco + p(2); ro = ro + p(3);
E1 = sum((sqrt((M(:, 1) - xco).^2 + (M(:, 2) - zco).^2) - ro).^2);
if abs(Eo - E1) < eps
    flag = 1;
end
Eo = E1;
disp(['iteration # ' num2str([t xco zco ro Eo])]);
t = t + 1;
end

```

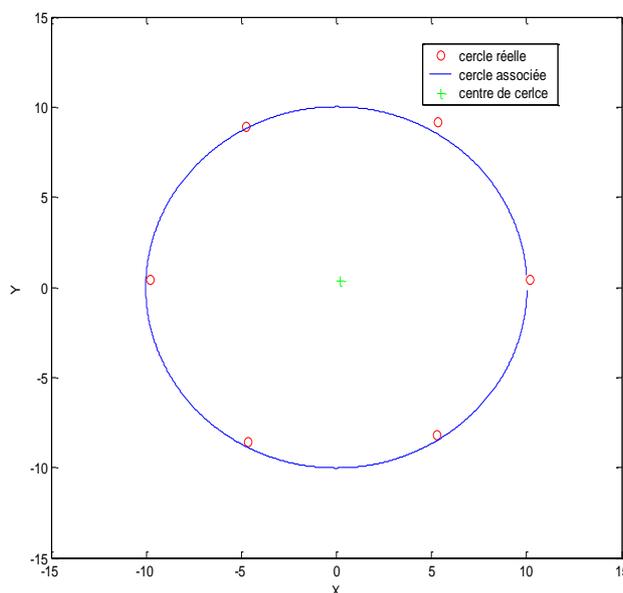


Figure IV-5 : Associée d'un cercle par la méthode de Gauss-Newton

Un cercle peut être spécifié par son centre (x_c, y_c) et son rayon r .

Après 3 itérations $x_c = 0.216221$, $y_c = 0.343275$, $r = 10.0216$.

	Gauss Newton	La descente de gradient
Nombre d'itérations	3	11
Xc	0.216221	0.216209
Yc	0.343275	0.343258
R	10.0216	10.0216
E	0.0739122	0.0739122

Tableau IV-5 : Comparaison entre les deux méthodes

On ce qui concerne la convergence, l'algorithme de Gauss-Newton est plus rapide que l'algorithme de la descente de gradient.

IV.3 APPLICATIONS SUR LES FORMES COMPLEXES

IV.3.1 Schéma de conception

A l'entrée du programme on trouve les données du problème à savoir le modèle théorique de la surface gauche et le nuage de points. Concernant le modèle théorique au format STL il est donné sous forme d'un fichier texte obtenu, par exemple, par l'exportation d'un modèle 3D vers le format STL à l'aide d'un logiciel de CAO (CATIA V5). Pour le modèle numérique de la surface réelle il est lui aussi sous forme texte généralement au format VDA obtenu par le logiciel qui accompagne l'outil d'acquisition utilisé (MMT, triangulation laser, ... etc.). Après la lecture des données d'entrée contenues dans les fichiers texte, le programme va effectuer l'opération d'association du modèle théorique avec le nuage de points puis calcule l'écart final points/surface pour chaque point et transfère tous les résultats ainsi que le modèle théorique dans un fichier texte sous une forme reconnue par le logiciel qui va être utilisé pour la visualisation.

Pour la réalisation du programme nous avons utilisé la version 6.5 de Matlab® qui est un environnement de calcul très puissant comprenant des outils de calcul pour des domaines très variés allant du calcul algébrique aux réseaux de neurones. Il dispose aussi d'un interpréteur permettant de développement de programme et d'outils personnels.

IV.3.2 Cas d'une surface gauche

L'évaluation que nous proposons a été réalisée en utilisant un modèles CAO [Référence bibliothèque de logiciel DeskArtes 3Data Expert 8.1] : Surface gauche (Visage 3D) (**Figure IV-6**) à mettre en correspondance avec des ensembles de points les décrivant de façon exacte. Afin de se placer dans les meilleures conditions pour étudier la méthode, nous n'utiliserons que des points « synthétiques », c'est-à-dire générés artificiellement sur les surfaces de l'objet (pas de bruit), et des modèles STL présentant une faible erreur de modélisation. A l'état initial, les points 3D et le modèle CAO sont confondus, nous appliquons une transformation initiale T_0 connue sur ces points afin de les séparer du modèle, la transformation à retrouver est alors la transformation inverse $[T_0]^{-1}$.

Les calculs ont été effectués sur PC portable doté d'un processeur Intel (R) Pentium (M) CENTRINO 1.73GHz, avec 1GB de RAM.

Le modèle au format STL il 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. Ce fichier

contient les sommets (vertex₁ X₁ Y₁ Z₁) et la normale (facet normal₁ n₁, n₂, n₃) orientée vers l'extérieur pour chaque triangle **Figure IV-6**.

```

solid id
facet normal 0.996758 0.079836 0.009973
outer loop
vertex 60.979919 -7.301900 24.365601
vertex 61.123100 -9.055910 24.096500
vertex 60.981350 -7.296000 24.175400
endloop
endfacet
facet normal 0.996642 0.080855 -0.012958
outer loop
vertex 61.123100 -9.055910 24.096500
vertex 61.120960 -9.048330 23.979200
vertex 60.981350 -7.296000 24.175400
endloop
endfacet
....
    
```

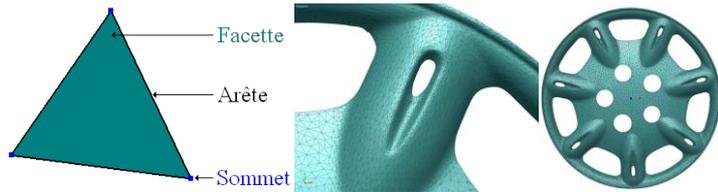
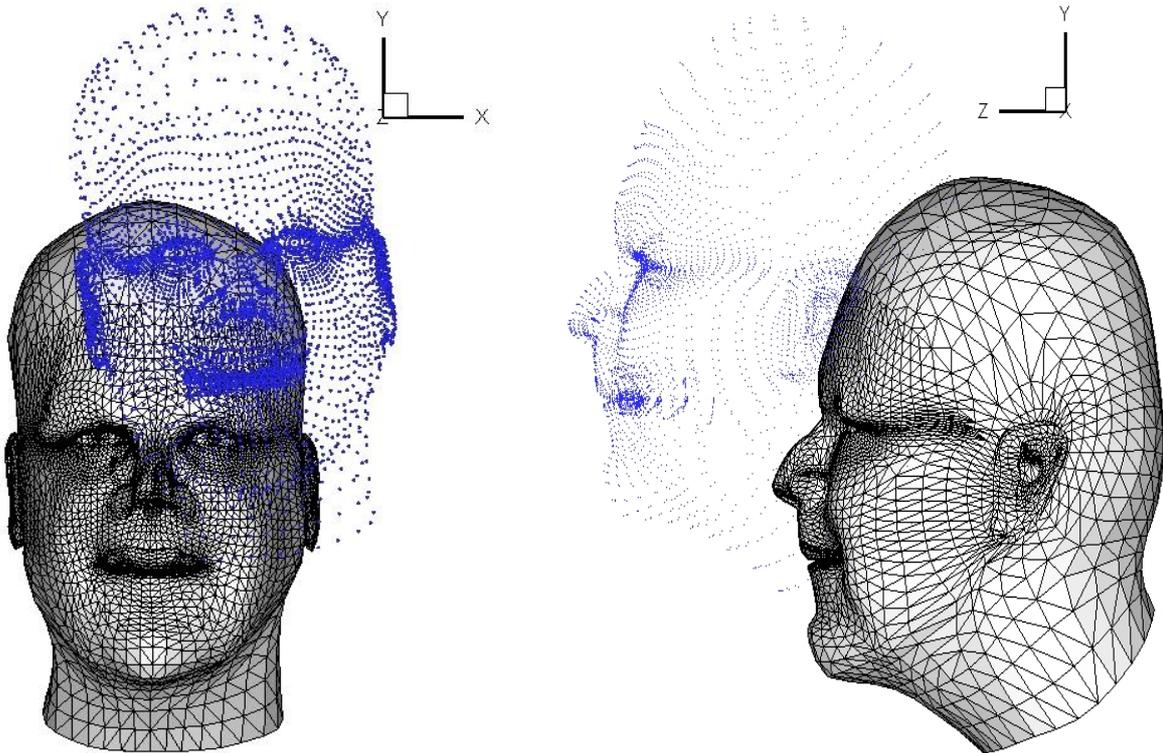


Figure IV-6 : Extrait d'un fichier STL

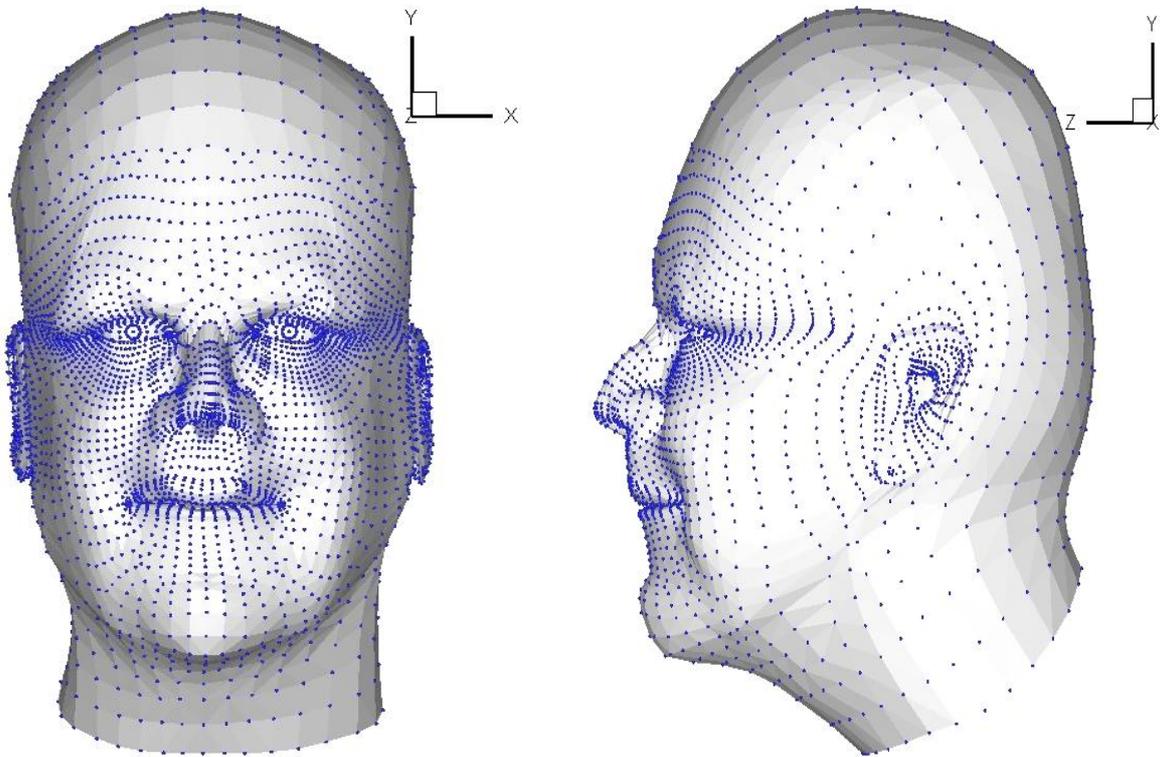
A partir du fichier STL on peut extraire un nuage de points représentant les sommets des nœuds relatif à chaque triangle. Par l'application d'un dégauchissage (rotation et translation) initiale suivant les différents axes (X, Y et Z).

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Modèle STL} \\ \text{Translation initiale} \\ \text{Rotation initiale} \end{array} \right.$: 10362 Triangles	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Données 3D} \\ N_t \\ N_s \end{array} \right.$: 31086 Points
	: {10, 20, 30}		: 10
	: {1°, 3°, 5°}		: 30

On obtient la première configuration présente dans la **Figure IV-7**. L'application de la démarche inverse de mise en correspondance permet le recalage du nuage de points avec le modèle STL facettisé.



(a) Position initial



(b) Position après 11 itérations

Figure IV-7 : Le nuage de points associé au modèle de la surface théorique au format STL

La **Figure IV-7et IV-8** illustre quelques résultats du recalage entre un nuage de points d'une pièce et son modèle CAO en format STL, en utilisant la méthode ICP.

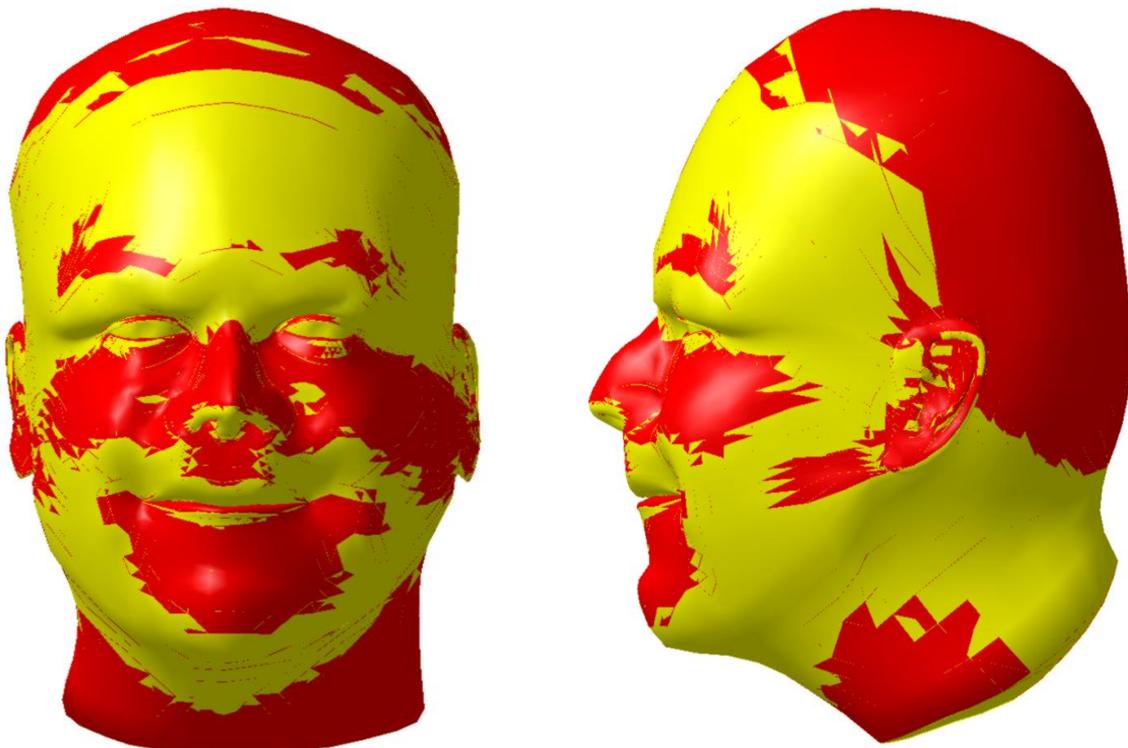


Figure IV-8 : Modèle final

La distance à minimiser est la suivante : $e(R, T) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \vec{x}_i - R \vec{p}_i - \vec{T} \right\|^2$

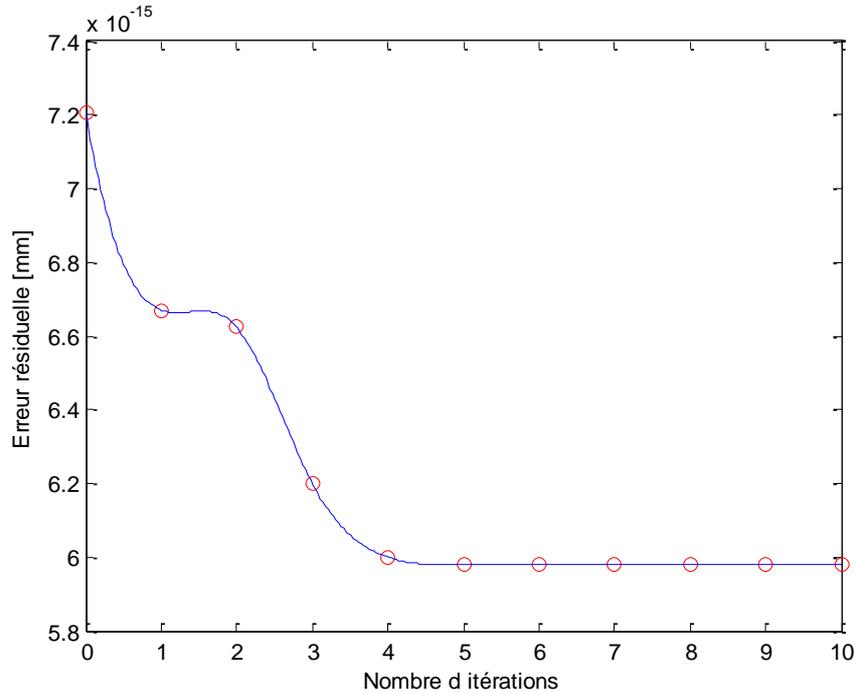


Figure IV-9 : Evolution de l'erreur résiduelle de distance pour l'algorithme ICP

La **Figure IV-9** montre les erreurs résiduelles de distance, entre les points appariés, pour ICP, en fonction des itérations de l'algorithme. Dans le cas d'ICP le programme converge rapidement sur une solution stable après un maximum de cinq itérations. L'erreur maximale après convergence est de l'ordre de **7.2063e-015mm** ce qui est très acceptable pour un bon nombre d'applications. Si on observe la variation du nombre de triangles qui forment la surface théorique, on peut dire qu'il n'a pas une influence.

IV.4 APPLICATION SUR UN GENOU

Dans cette application, une fabrication de partie par la technologie Prototypage Rapide est traitée. Ce processus est employé pour la fabrication du modèle physique commençant d'un fichier de format STL obtenu par la Conception Assistée par Ordinateur, parce que l'interface de données standard entre le logiciel de CAO (CATIA V5) et les machines est le format de fichier STL qui rapproche la forme d'une partie ou l'assemblée employant des éléments triangulaires.

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Modèle STL} \\ \text{Translation initiale} \\ \text{Rotation initiale} \end{array} \right.$	$: 361935 \text{ Triangles}$ $: \{10, 20, 30\}$ $: \{0^\circ, 0^\circ, 0^\circ\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Données 3D} \\ \mathbf{N}_t \\ \mathbf{N}_s \end{array} \right.$	$: 181742 \text{ Points}$ $: 15$ $: 30$
---	---	--	---

L'erreur de calcul globale est une contribution de ces deux types d'erreurs :

- Erreur de la méthode de mise en correspondance seule,
- Erreur de modélisation STL.

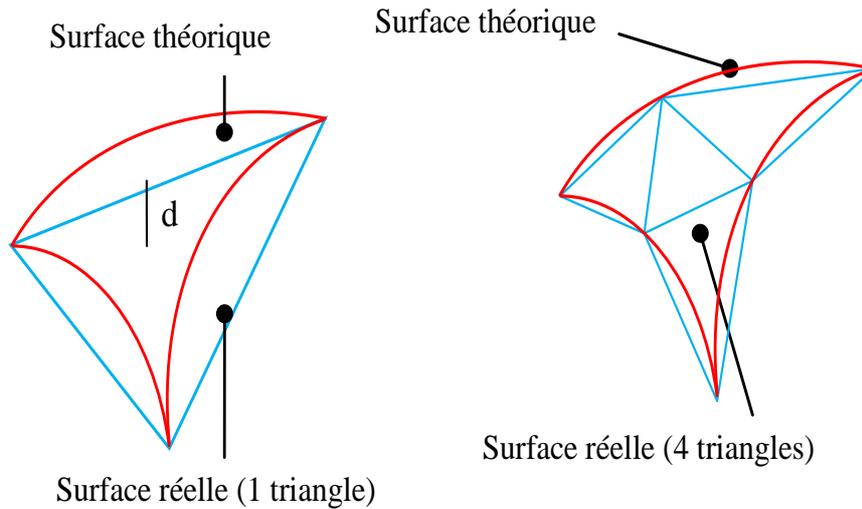


Figure IV-10 : Exemple d'erreurs d'approximations

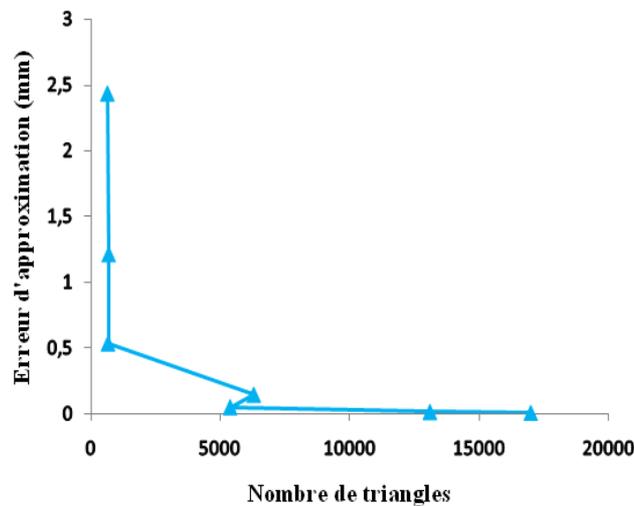


Figure IV-11 : L'erreur d'approximations en fonction de nombre de triangles

La **Figure IV-11**, représente l'évolution du nombre de triangles STL en fonction de l'erreur maximale d'approximation souhaitée. D'un point de vue global, le nombre de triangles STL augmentent lorsque l'erreur d'approximation diminue, surtout dans les zones de faible courbure de surface. Compte tenu des règles de modélisations STL à respecter, pour des erreurs d'approximation proches, cette règle n'est pas toujours vérifiée (**Figure IV-11**), ceci s'explique par une réorganisation totale des triangles.

Pour diminuer l'erreur globale de calcul en choisissant $\epsilon = 10^{-8}$ (erreur de la méthode de mise en correspondance seule) et comportant un grand nombre de triangles (erreur de modélisation STL).

IV.4.1 Nuage de points

Tous les scanners 3D effectuent l'acquisition d'un nuage de points (**Figure IV-12**). Chaque point est représenté au minimum par ses coordonnées X, Y et Z. Le processus de reconstruction géométrique de la pièce débute par une étape d'acquisition des surfaces réelles **Figure IV-12**. Les données nécessaires sont principalement un fichier des points palpés. A partir de cet instant la correspondance entre le modèle théorique et réel peut être effectuée.

Les données acquises ne peuvent être utilisées directement : elles présentent du bruit de mesure, des données inutiles (environnement) ... Elles doivent donc être traitées afin d'être utilisables.

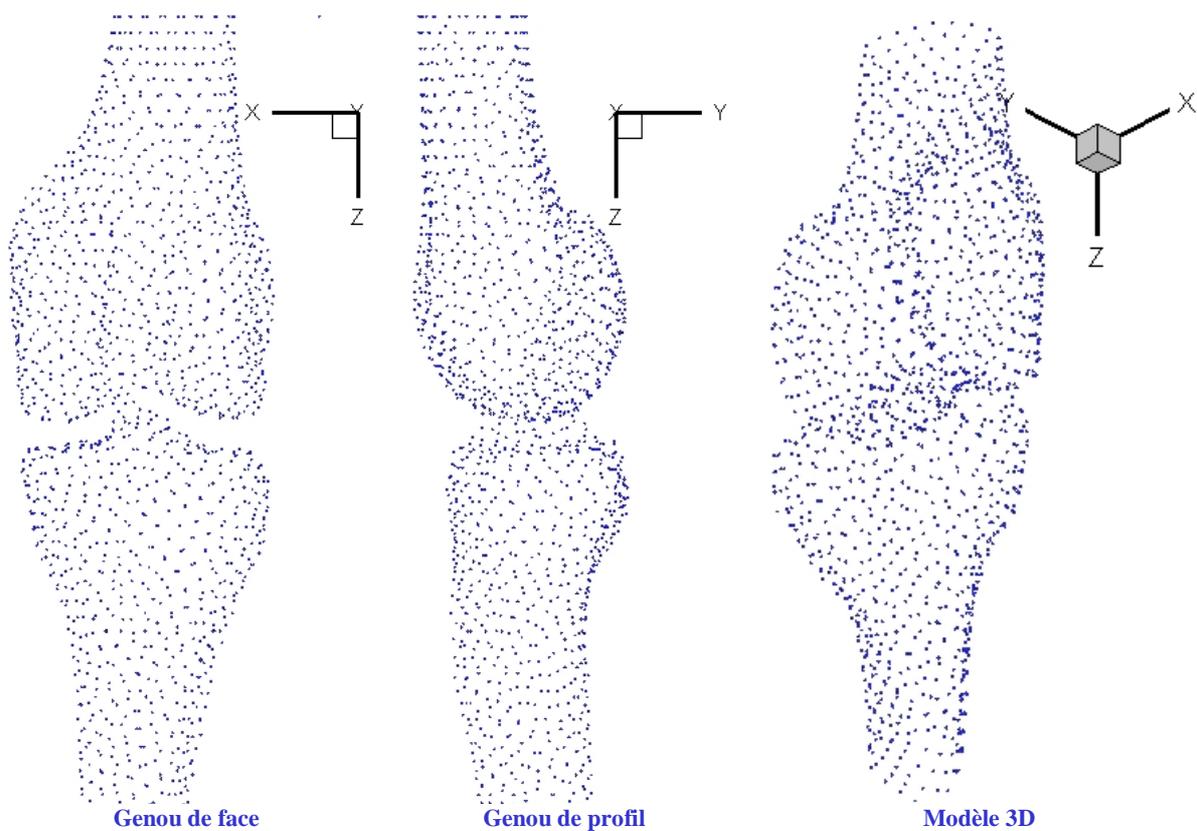


Figure IV-12 : Nuage de point d'un genou

Une fois les données, elles peuvent être triangulées, en fonction d'application visée [HOPPE, 1995]. Cette opération permet de passer d'un nuage de points à un modèle maillé (STL) (**Figure IV-13**). Deux types de triangulation peuvent être différenciés : la triangulation 2D et la triangulation 3D.

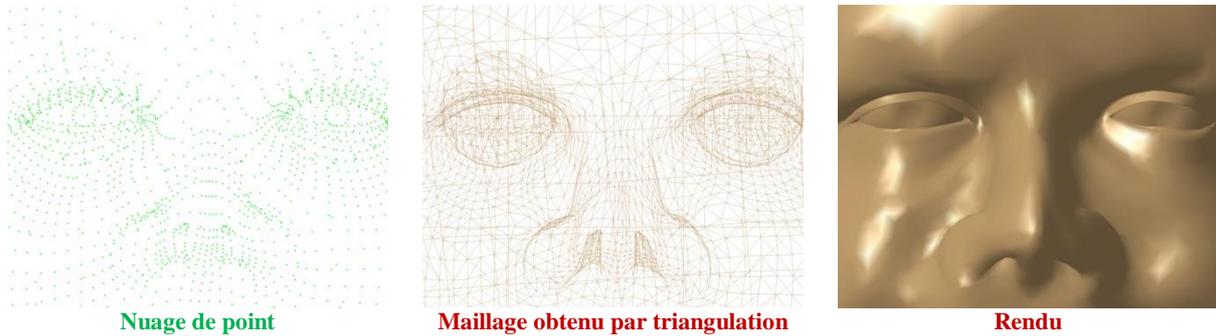


Figure IV-13 : Triangulation d'un nuage de point

Le principe général de la triangulation 2D est la projection du nuage de points 3D sur un plan 2D, suivant la direction de la prise de vue [BOISSONNAT, et al., 1993]. Cette triangulation ne fonctionne que sur une prise de vue unique et non sur nuage de points complet.

En triangulation 3D, plusieurs méthodes existent [FREY, et al., 1996] (comme la tétraédrisation), basées sur une approche volumique ou surfacique [GAYRE, 2003]. Ces triangulations permettent de mailler un nuage de points complet. Elles nécessitent généralement un nuage dense et homogène.

IV.4.2 Modèle théorique

Les maillages utilisés sont des maillages triangulaires (où chaque facette est représentée par un triangle, **Figure IV-14**). Cette représentation est la plus courante en Prototypage Rapide. Un modèle STL est constitué de sommets (point), d'arêtes et de facette. Les caractéristiques topologiques importantes sont les trous, le genre et le nombre de composantes connexes. Une arête n'appartenant qu'à une seule facette est appelée « bord » (ou « frontière »). Un polygone créée par des bords forme un trou de maillage (un objet réel ne peut avoir un trou de maillage). Le genre d'un objet correspond au nombre de trous(s) topologique(s) qu'il possède. Chaque facette d'un maillage possède une normale, correspondant au vecteur normal au plan supportant la facette.

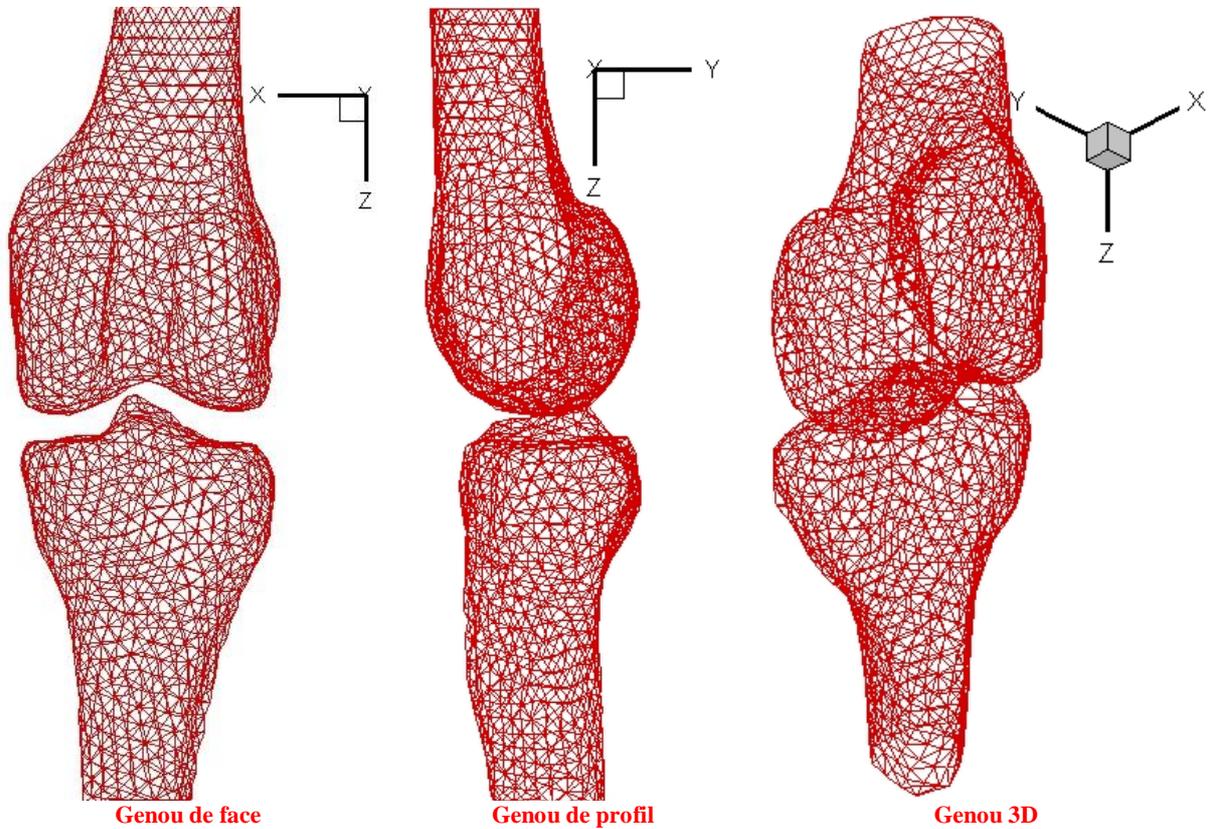
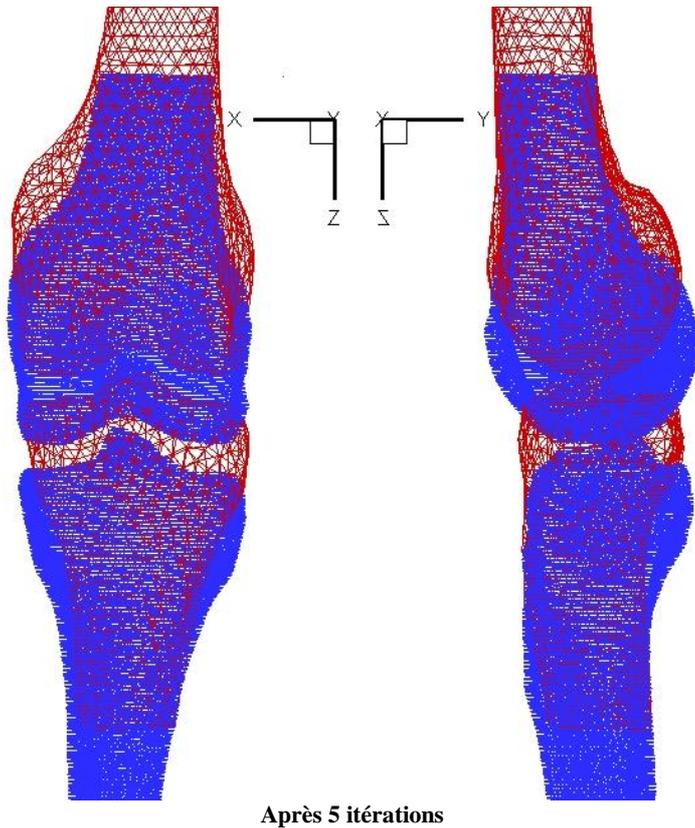
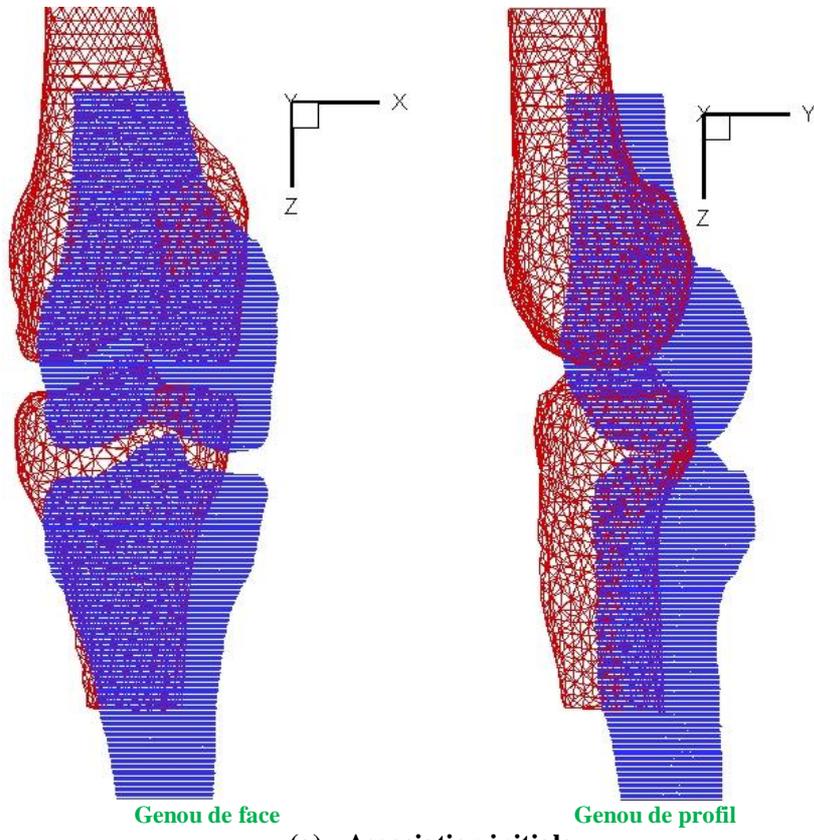
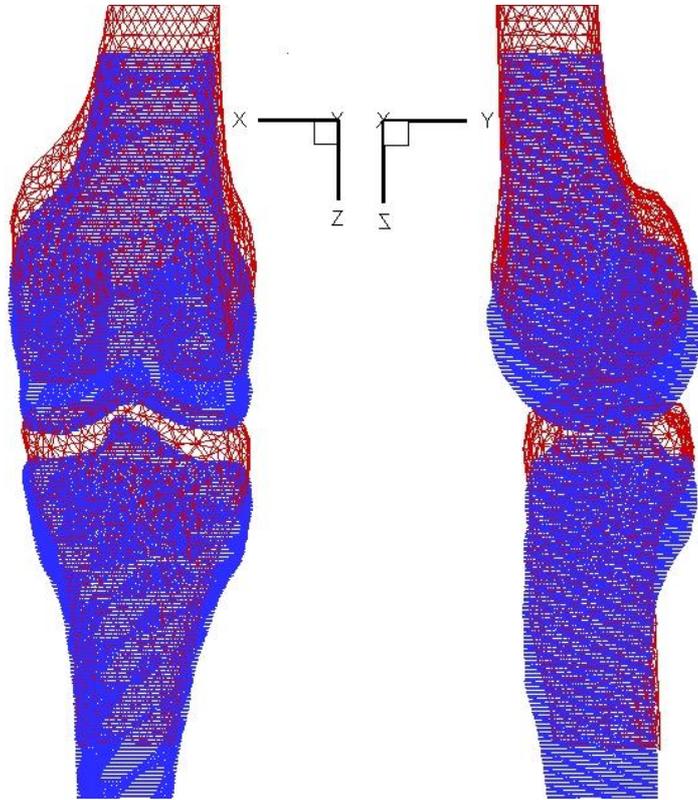


Figure IV-14 : Modèle STL d'un genou

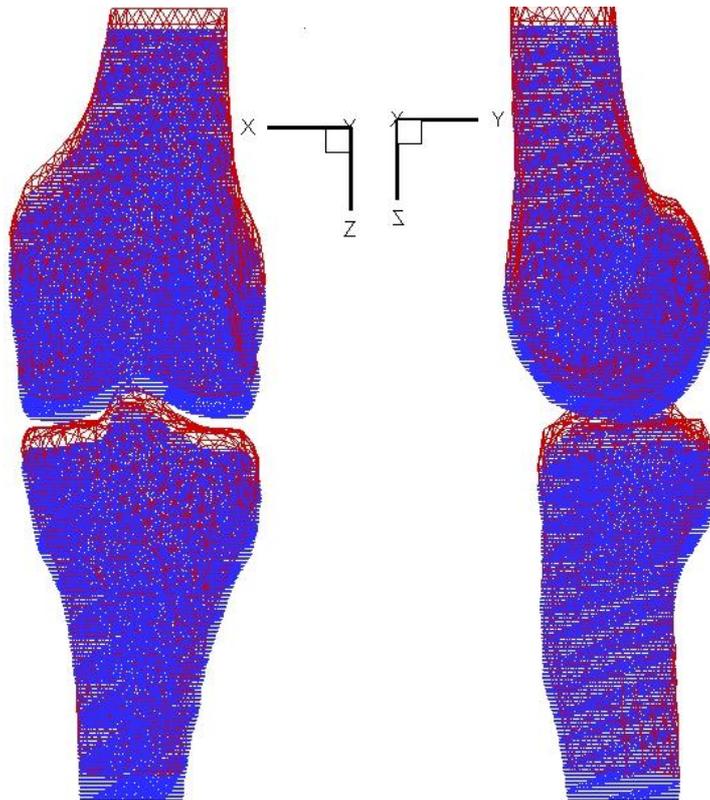
IV.4.3 Association entre nuage de points et son modèle CAO

Après la numérisation de la pièce, nous avons deux ensembles de données, le premier est le fichier CAO issu de la conception et le second, le nuage de points 3D. L'opération qui consiste à superposer ces deux ensembles en calculant la transformation rigide (rotation + translation) est celle que l'on appelle le recalage ou la mise en correspondance. L'application de l'algorithme ICP va permettre de minimiser les écarts entre les points palpés et le modèle théorique STL.

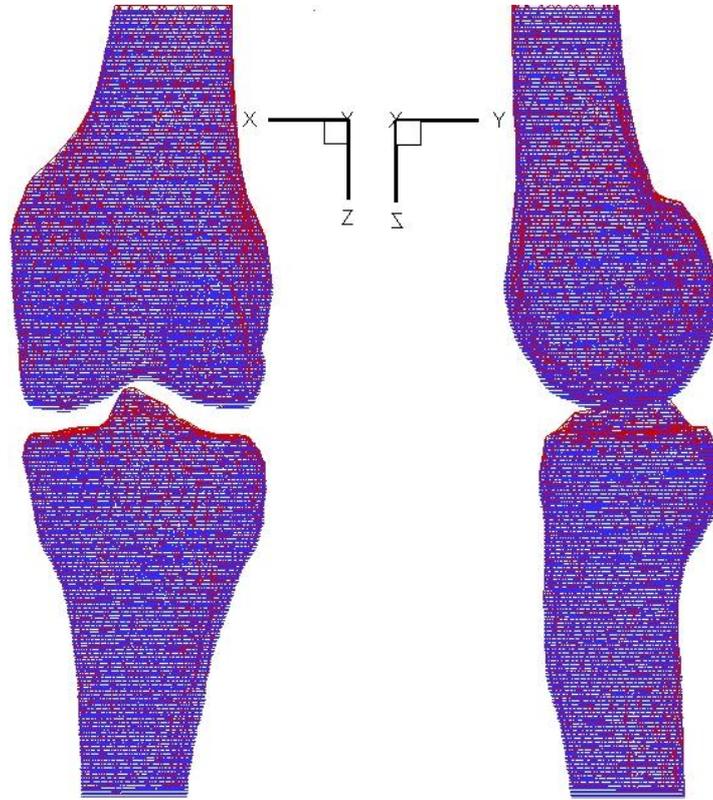




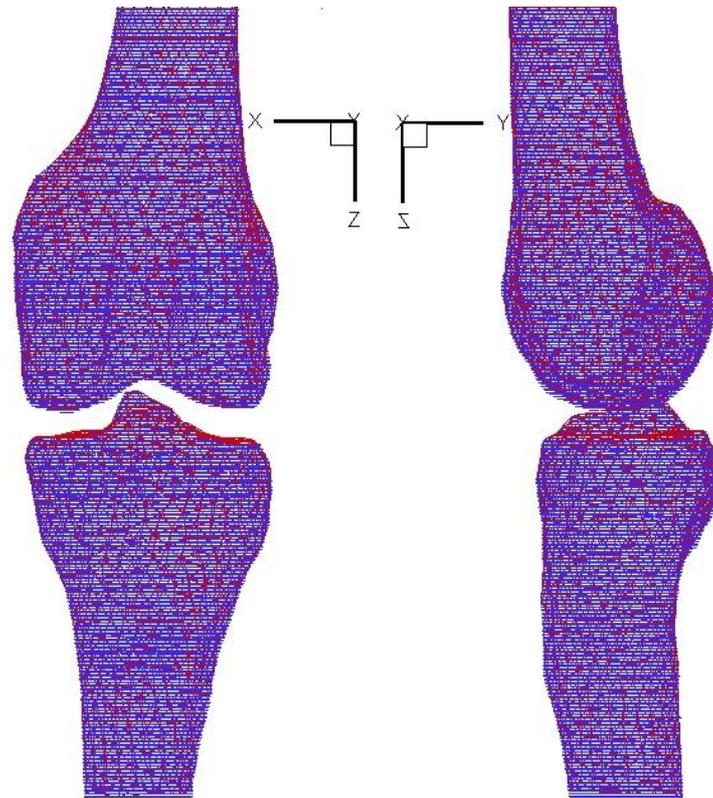
Après 10 itérations



Après 15 itérations



Après 20 itérations



Après 25 itérations

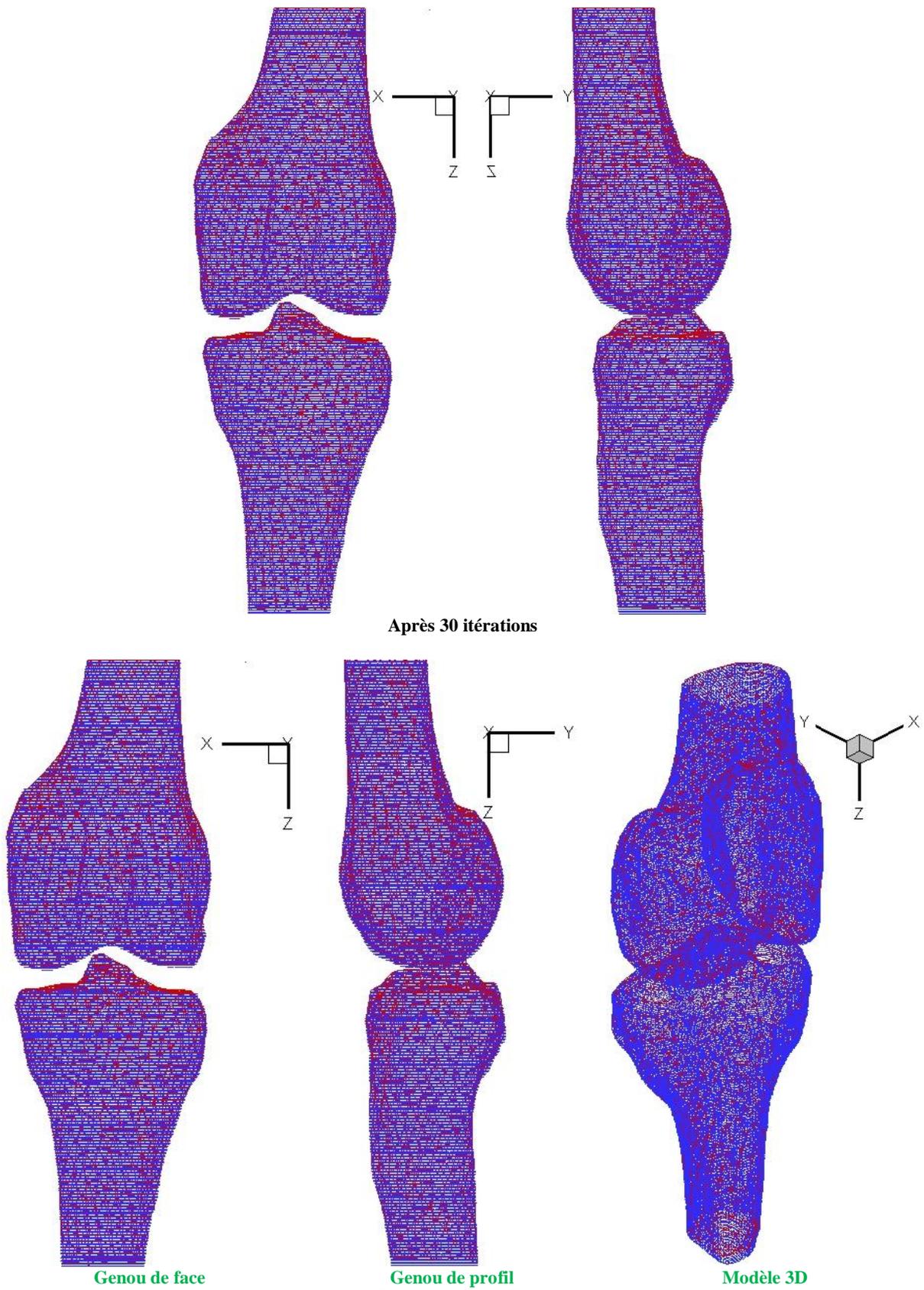


Figure IV-15 : Superposition du nuage de points et du modèle théorique

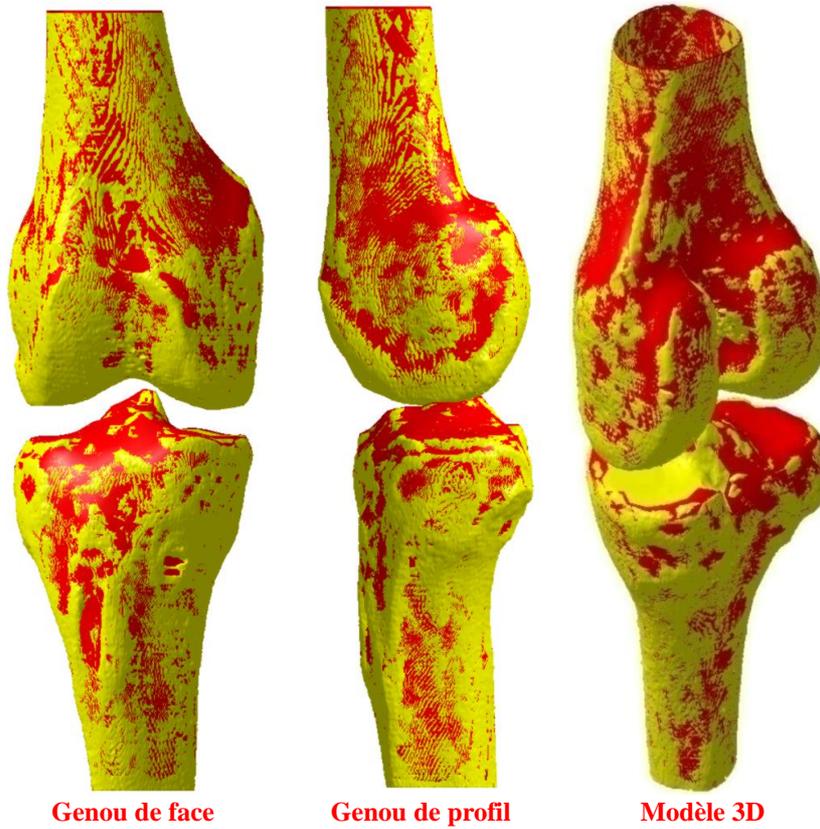


Figure IV-16 : Modèle finale de genou

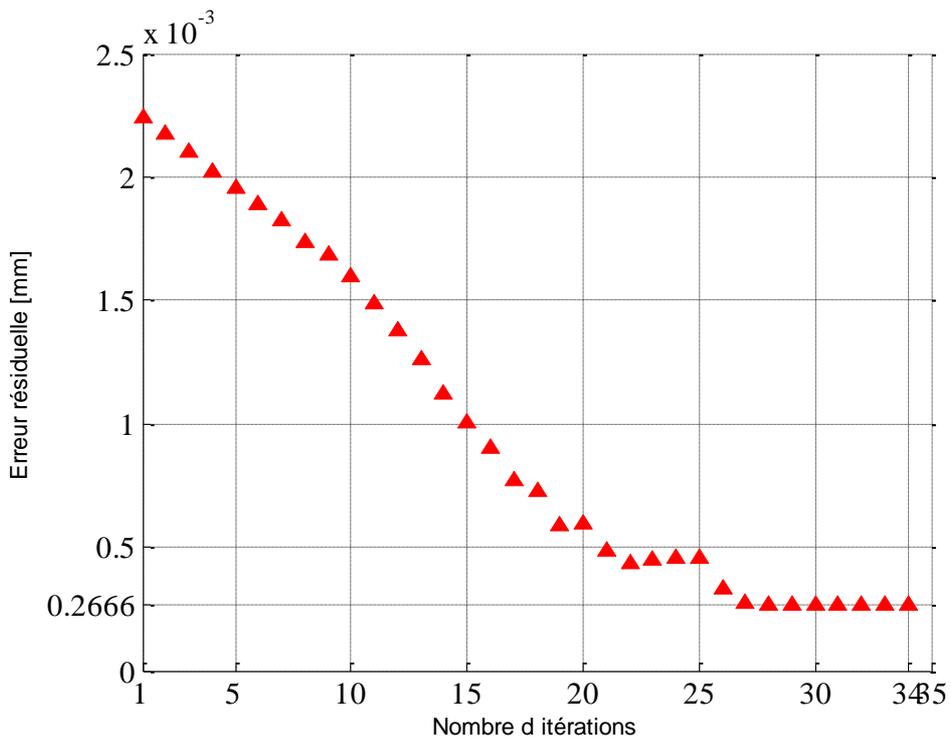


Figure IV-17 : Evolution de l'erreur résiduelle de distance

La **Figure IV-17** montre les erreurs résiduelles de distance, entre les points appariés, pour ICP, en fonction des itérations de l'algorithme. Dans le cas d'ICP le programme converge rapidement sur une solution stable. L'erreur maximale après convergence et de

l'ordre de Micron $0.2666\mu\text{m}$ ce qui est très acceptable pour un bon nombre d'applications. Si on observe la variation du nombre de triangles qui forment la surface théorique, on peut dire qu'il n'a pas une influence.

D'où nous déduisons la déviation min = $0,0005456\mu\text{m}$ et la déviation max = $0,0038006\mu\text{m}$. Donc le défaut de forme égal la déviation max moins la déviation min en valeur absolu.

$$|\text{déviati} \text{on max} - \text{déviati} \text{on min}| = |0.0038006 - 0.000546| = 0,003255\mu\text{m}.$$

Ce que l'on peut dire c'est que la méthode qu'on propose pour le contrôle des surfaces gauches est une méthode générale pour le contrôle de pièces mécanique comprenant des surfaces gauches. Son application pour le contrôle du défaut de forme d'un genou a donné bon résultats.

En effet, plusieurs types d'intervention chirurgicale en orthopédie et en traumatologie peuvent, dès aujourd'hui, bénéficier de méthode de mise en correspondance. Il s'agit par de l'aide apportée à la mise en place des prothèses de hanche ou de genou, ou encore à la réalisation de gestes chirurgicaux.

Dans l'étape de mise en correspondance l'algorithme ICP est utilisé en conséquence. Cet algorithme permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition. Ce système d'assistance par la mise en correspondance ayant pour référence l'axe mécanique du membre inférieur et l'orientation des coupes osseuses ce qui n'est pas toujours facile avec les techniques traditionnels.

IV.5 PROTHESES DU GENOU

IV.5.1 Historique

L'arthroplastie du genou est une opération aujourd'hui classique. Si l'on excepte les premières tentatives historiques (GLÜCK en 1890, les frères JUDET en 1947, MAJNONI d'IMIGNANO en 1951), c'est autour des années 1960-1970 qu'apparaissent (WALDIUS, SHIERS, GUEPAR), elles évoluent, en raison des fréquents descellement liés aux fortes contraintes et aux difficultés de reprises, en prothèses semi-charnières (BOUSQUET), puis à pivot (GSCHWEND), puis en prothèses de glissement grâce à l'imagination de nombreux auteurs (GUNSTON) utilisant le principe du surfaçage copié sur l'implant uni-compartmentaire de MARMOR. Les difficultés de mise en place d'une uni-compartmentaire

sur les deux compartiments et leur instabilité expliquent l'évolution ultérieure vers les prothèses bi- ou tri-compartimentaires semi-contraintes.

Les prothèses semi-contraintes par leur dessin et leur cinétique assurent une certaine stabilité au genou, aidées en cela par la participation des formations capsuloligamentaires périphériques. L'histoire de ces prothèses commence vers 1970 avec la Géomédic de la Freeman-Swanson. Ces prothèses conduisent à de fréquents échecs par instabilité et usure précoce du polyéthylène.

La première prothèse moderne au début des années 1980 la Total Condylar d'Insall, sacrifie le ligament croisé postérieur et est dotée d'un épais plateau tout polyéthylène. Son évolution avec un système de postéro-stabilisation [INSALL, et al., 1982] marque un important progrès sur la stabilité, car elle dispose d'une came antirecul. Ce modèle, toujours utilisé aujourd'hui, est à l'origine d'un débat jamais clos sur l'opportunité de conserver ou non le ligament croisé postérieur.

En 1982, Hungerford, Krackow et Kenna [HUNGERFORD, et al., 1982] développent une prothèse conservant le ligament croisé postérieur (PCA Primary) mise en place sans ciment et une instrumentation de pose dite « universelle ». Cette instrumentation associe des guides de coupes, des dispositifs de contrôle des axes permettant de faire une opération reproductible. Le succès est immédiat. Dès lors se développe une série d'instrumentations ancillaires destinée à faciliter la mise en place des prothèses.

Il faut signaler aussi que dès 1977, Buechel et Pappas [BUECHEL, et al., 1989], à la suite des travaux d'O'Connor et Goodfellow [GOODFELLOW, et al., 1978] en 1974 sur l'uni-compartimentaire, développent le concept très différent d'une prothèse tri-compartimentaire à plateaux mobiles (New Jersey).

IV.5.2 Anatomie du genou

L'articulation du genou est une articulation supportant le poids du corps humain. Le genou naturel est composé de trois parties :

- L'extrémité inférieure du fémur qui a la forme de deux roues accolées : les condyles,
- L'extrémité supérieure du tibia, en plateau,
- La rotule : petit bouclier situé sur l'avant du fémur.

Les ligaments maintiennent en contact le fémur et le tibia : en périphérie ce sont les ligaments latéraux, ligament latéral interne et ligament latéral externe. Au centre du genou sont situés les ligaments croisés : ligament croisé postérieur, et ligament croisé antérieur.

Le fonctionnement du genou est complexe. Cette articulation doit en effet être mobile tout en restant stable. Les mouvements du genou sont essentiellement des mouvements de flexion (le genou plie) et des mouvements d'extension (le genou se redresse). S'y associe un mouvement de rotation. Les ménisques et les ligaments permettent de conserver la stabilité, sans entraver la mobilité.

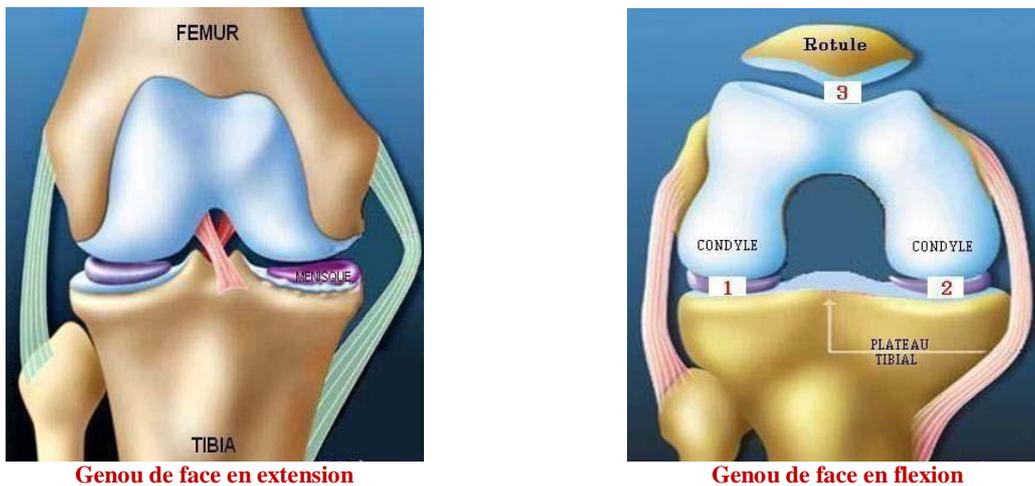


Figure IV-18 : Anatomie du genou

Le remplacement de l'articulation du genou par une prothèse a considérablement amélioré la qualité de vie d'un grand nombre de personnes atteintes d'arthrose soit primitive, soit secondaire à un traumatisme (fractures articulaires, lésions ménisco-ligamentaires graves) ou de maladies inflammatoires comme la polyarthrite.

La prothèse de genou est constituée aujourd'hui d'éléments métalliques (pièces fémorale et tibiale) séparés par un coussinet central en plastique. Ce coussinet remplace le cartilage de glissement usé de l'articulation afin de restaurer un mouvement indolore et aussi proche que possible de la normale.

Le chirurgien peut proposer le remplacement d'un seul des trois compartiments du genou s'il s'agit d'une arthrose strictement uni-compartimentale (prothèse uni-compartimentale). Dans la grande majorité des cas, l'arthrose est globale, atteignant les 3 compartiments du genou. Le chirurgien proposera alors une prothèse totale (tri-compartimentale).

IV.5.3 Différents types de prothèses du genou

Les prothèses du genou se répartissent en trois grands groupes : les prothèses partielles (demi-prothèses), les Prothèses Totales du Genou (PTG) et les prothèses contraintes, ou prothèses charnières.

IV.5.3.1 Prothèses partielle de genou

La prothèse uni-compartmentale est une prothèse partielle. Elle remplace le cartilage usé d'un seul côté du genou, entre le fémur et le tibia, sans toucher à l'autre compartiment fémoro-tibiale ou à la rotule. Ceux-ci doivent être sains. La prothèse uni-compartmentale reproduit tous les mouvements naturels du genou. Son fonctionnement se fait par glissement.

Les critères pour une prothèse uni-compartmentale :

- L'usure articulaire touche un seul compartiment fémoro-tibial,
- Le genou doit être stable : le ligament croisé antérieur est intact,
- Il n'existe pas de forte surcharge pondérale ou d'ostéoporose,
- Le membre inférieur est modérément arqué. La courbure de jambe est idéalement de 5° ou moins,

Si ces critères ne sont pas respectés la « petite » prothèse risque de subir des contraintes trop grande et de se déceler rapidement.

La prothèse uni-compartmentale elle se compose de deux parties :

- Un élément tibial constitué d'un plateau métallique recouvert d'une semelle polyéthylène. Celui-ci recouvre la seule moitié usée du plateau tibial,
- Un élément fémoral métallique qui s'applique, sans résection, sur le condyle correspondant.

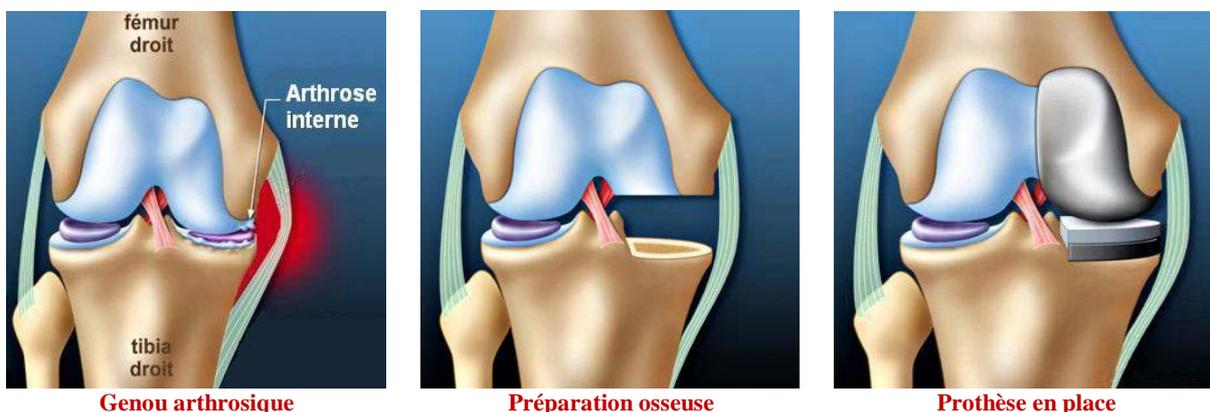


Figure IV-19 : Prothèse uni-compartmentale

IV.5.3.2 Prothèses totale de genou

La prothèse totale de genou (PTG) remplace la totalité du cartilage usé. Celle-ci reproduit les mouvements naturels du genou dans les trois plans de l'espace. La mise en place s'effectue après une recoupe osseuse enlevant dans le même temps le cartilage articulaire usé ainsi qu'une fine couche d'os qui est égale à l'épaisseur de la prothèse. Fonctionnement se fait par glissement. Elle nécessite la conservation des ligaments latéraux.

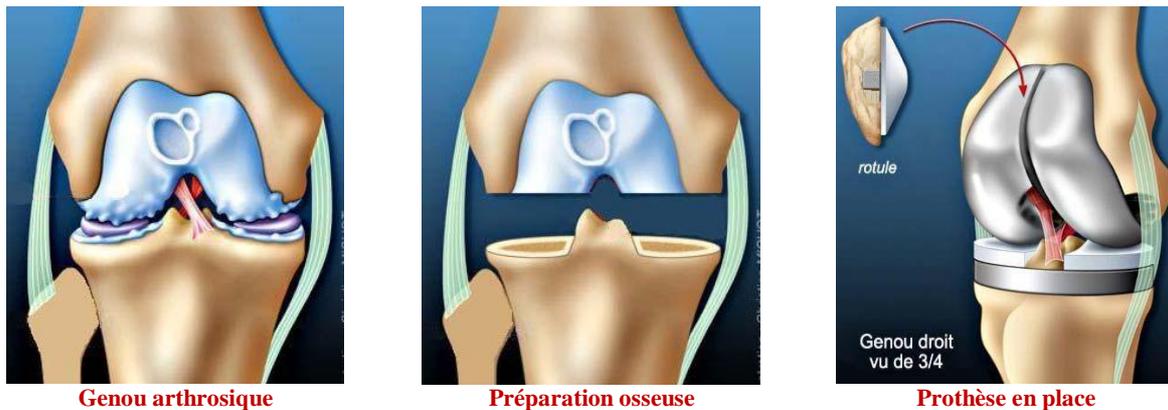


Figure IV-20 : Prothèse totale de genou

La prothèse totale de genou se compose de trois parties :

- Un élément fémoral métallique qui s'emboîte sur l'extrémité inférieure du fémur,
- Un élément tibial qui se pose en plateau sur le tibia. Il se compose d'une base laquelle s'insère une semelle polyéthylène,
- Un médaillon rotulien polyéthylène y est ajouté si nécessaire.

IV.5.3.3 Prothèses contraintes (prothèses charnières)

Il reste enfin un dernier groupe de prothèses représenté par les prothèses charnières : elles sont constituées de deux composants, tibial et fémoral, munis d'une longue tige pour leur fixation à l'intérieur de l'os, réunis par une charnière qui permet les mouvements de flexion et d'extension du genou ; fémur et tibia sont donc étroitement reliés l'un à l'autre par cette prothèse, plus contraignante que les précédentes, mais qui a l'avantage d'empêcher tout mouvement de latéralité.

Une amélioration a été apportée par les prothèses charnières rotatoires : elles sont munies d'un dispositif mécanique qui autorise la rotation entre fémur et tibia.

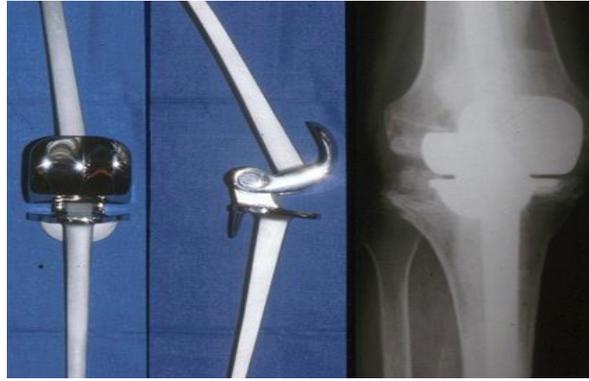


Figure IV-21 : Prothèse charnières

IV.5.4 Durée de vie d'une prothèse de genou

Comme le genou naturel la prothèse de genou fonctionne par glissement : lors de chaque mouvement le nouveau fémur métallique effectue un passage sur le plateau tibial polyéthylène. Ces mouvements à répétition vis-à-vis de ces corps étrangers est la principale cause du décèlement prothétique. Dans la très grande majorité des cas le décèlement survient au-delà de la vingtième année pour une prothèse totale. Ce délai est parfois de **10 à 15** ans pour la prothèse uni-compartmentale qui est plus fine.

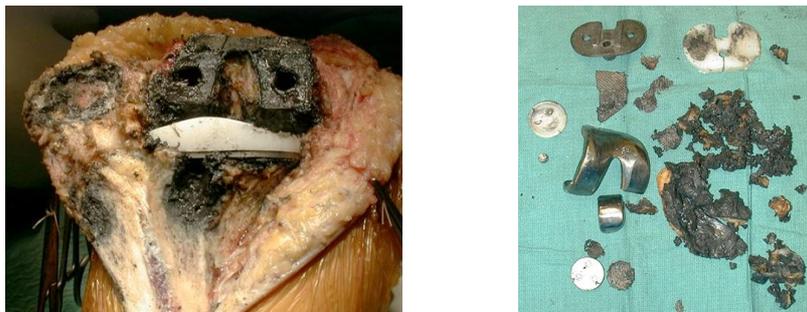


Figure IV-22 : Usure d'une prothèse de genou

IV.6 CONCLUSION

Ce que l'on peut dire finalement c'est que la méthode qu'on propose pour le contrôle des surfaces gauches est une méthode générale pour le contrôle de pièces mécaniques comprenant des surfaces gauches et/ou de surfaces élémentaires (Cylindriques, Sphériques, ... etc.). Son application **utilisée** pour le contrôle des différents types d'éléments mécaniques. On peut dire aussi que les résultats ont été suffisamment bons mais ils peuvent être améliorés d'avantages au niveau des précisions.

Nous avons établi que **10** itérations de l'algorithme ICP ($N_t = 10$) sont suffisantes et que le nombre de points (N_s) extraits aléatoirement dépend de la complexité de l'objet et doit être compris entre **10** et **50**.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le Prototypage Rapide désigne l'ensemble des technologies qui permettent d'obtenir la représentation physique d'un modèle CAO dans un délai très court. Toutes ces technologies sont basées sur le même principe de reconstruction par superposition de couches. Les différences essentielles entre les technologies résident dans les matériaux à disposition et dans l'épaisseur des couches (influant directement sur la vitesse de fabrication et la qualité d'état de surface).

D'une manière générale, on peut définir l'inspection d'une pièce industrielle comme étant la vérification des dimensions et tolérances imposées lors de sa conception. Les dimensions déterminent les propriétés géométriques d'une pièce, en définissant les tailles, les formes, les caractéristiques, les positions, les orientations et distances entre caractéristiques nominales de la pièce. Comme l'imprécision inévitable des procédés de fabrication fait qu'une pièce ne peut jamais être réalisée rigoureusement conforme aux dimensions fixées par son concepteur, il est toléré que chaque dimension réalisée soit comprise entre deux dimensions limites, compatibles avec un fonctionnement correct de la pièce. La différence entre ces dimensions définit la tolérance.

La rapidité du contrôle ne pourra être effective que si l'on dispose de capteurs autres que les capteurs à contact montés sur une MMT. Un seul type de capteur permettra ce gain de temps significatif, ce sont les télémètres laser. Ils autorisent une vitesse de numérisation de l'ordre de 20000 points par seconde avec des précisions de l'ordre de 25 μ m pour les meilleurs.

Concernant les méthodes d'association ou de mise en correspondance nous avons exposé les plus utilisées pour le cas tridimensionnel. La méthode des petites déplacements qui impose l'utilisation d'un repère local afin d'obéir à la condition des petites déplacements qui limite son exploitation pour des nuages de points un peu éloignés de la surface réelle, mais avec moins de complexité pour les traitements mathématiques. La méthode non linéaire quant à elle offre théoriquement la possibilité de réaliser une association entre un nuage de points et une surface assez éloignée l'un de l'autre, mais la nature non linéaire du problème dans ce cas pose des difficultés de stabilité et de convergence. On a vu aussi la méthode ICP avec un peu de détail et on a trouvé que en plus de son caractère non linéaire est sa simplicité elle est très

adapté au modèle de surface choisi c'est-à-dire le modèle STL ce qui nous a poussé à l'utiliser.

Nous avons adopté la solution de SVD pour notre étude, puisqu'elle nécessite moins de temps à s'exécuter sur Matlab®. [LORUSSO, et al., 1995] ont démontré empiriquement que la méthode SVD produit des résultats légèrement plus précis que celle des quaternions, ce qui est très important dans notre cas, où on affine la superposition entre deux nuages de points.

Ce que l'on peut dire finalement c'est que la méthode qu'on propose pour le contrôle des surfaces gauches est une méthode générale pour le contrôle de pièces mécaniques comprenant des surfaces gauches et/ou de surfaces élémentaires (Cylindriques, Sphériques, ... etc.). Son application **utilisée** pour le contrôle des différents types d'éléments mécaniques. On peut dire aussi que les résultats ont été suffisamment bons mais ils peuvent être améliorés d'avantages au niveau des précisions.

Nous avons établi que **10** itérations de l'algorithme ICP ($N_t = 10$) sont suffisantes et que le nombre de points (N_s) extraits aléatoirement dépend de la complexité de l'objet et doit être compris entre **10** et **50**.

Algorithme ICP permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition. Ce système d'assistance par la mise en correspondance ayant pour référence l'axe mécanique du membre inférieur et l'orientation des coupes osseuses ce qui n'est pas toujours facile avec les techniques traditionnels.

Les distances entre la surface nominale et les points mesurés (c'est-à-dire les défauts de forme) **sont** calculés après que les étapes d'alignement soient nécessaires pour corriger les erreurs cumulées pendant la phase de fabrication. Pour l'étape de correction du modèle STL, la technique d'éléments finis appliquée aux objets déformables **doit être** utilisée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AL SHAWA, Majd. 2006.** *Consolidation des nuages de points en lasergrammétrie terrestre.* Strasbourg : Mémoire du MASTER de recherche, 2006.
- ANDRE, J et CORBEL, S. 1994.** *Stéréolithographie.* Polytechnica, 1994.
- BARALDI, U et DORMAL, T. 1993.** *Va de mecum des technologies du prototypage rapide.* Liège : CRIF, 1993.
- BENEA, Romulus. 2001.** *Contribution à l'analyse tridimensionnelle de tolérances en design et fabrication.* Canada. 2001.
- BERNARD, A et TAILLANDIER, G. 1998.** *Le prototypage rapide.* Paris. hermès, 1998.
- BESL, P et MCKAY, N. 1992.** A method for registration of 3D shapes. *Trans. Vol. 14, 2.* 1992.
- BOISSONNAT, J D et GEIGER, B. 1993.** *Threedimensional reconstruction of complex shapes based on the delaunay triangulation.* Conference, PP 964-975 : Biomedical image processing and biomedical visualization. vol 1905 of presented at the society of photo-optical instrumentation engineers. 1993.
- BOUKEBBAB, Salim. 1998.** *Contribution à l'étude des discontinuités présentes dans les mécanismes en vue d'une coopérative-engineering.* Thèse ENSAM d'Aix-en-Provence. France. 1998.
- BOURDET, Pierre. 1999.** *Logiciel des machines à mesurer tridimensionnelles.* France. technique de l'ingénieur, 1999. R 1316.
- BRETON, Isabelle. 1999.** *Investigation des procédés non-traditionnels pour la fabrication de moules.* Canada : Thèse Université Laval, 1999.
- BROCHU, P. 1997.** When precision counts?, dans actes des 6^{ème} assises européennes du prototypage rapide. 1997.
- BUECHEL, FF et PAPPAS, MJ. 1989.** New jersey low contact knee replacement. Ten years evaluation of meniscal bearing. *Orthop Clin North America* 20. 1989.
- CABRERA, M et ROUSSEAU, E. 1995.** *Les derniers développements de machines EOS pour la stéréolithographie et le frittage laser de poudres.* dans actes des 4^{ème} assises européennes du prototypage rapide, 1995.
- CARTER, D E et STRIWEL BAKER, B. 1992.** *CE Concurrent engineering. The Product Development Environment for the 1990s.* Wesley publishing company, ICN, 1992.
- CHEN, Y et MEDIONI, G. 1992.** *Object modelling by registration of multiple range images.* Issue 3 : Image and vision computing. Vol 10. 1992.
- DOLENC, A. 1994.** *Overview of Rapid Prototyping Technologie in Manufacturing.* Helsinki University of technology : National technical information service, 1994.
- FREY, P, BOROUCHE, H et GEORGE, P. 1996.** *Tétraédrisation de delaunay basée sur une approche frontale.* Technical report, INRIA. 1996.
- GALLAIS, E et NEVEU, F. 1994.** *Les métiers et la conception assistée par ordinateur, de l'idée à l'objet.* Hermès, 1994.
- GARDAN, Y. 1995.** CAO, Design et prototypage, dans actes des 4^{ème} assises européennes du prototypage rapide. 1995.
- GAYRE, F. 2003.** *Contributions au tatouage de maillages surfaciques 3D.* Université catholique de Louvain : PhD thesis, TELECOM Paris, 2003.

- GELFAND, N, RUSINKIEWICZ, S et LEVOY, M. 2003.** *Geometrically stable sampling for the ICP algorithm.* Canada : In proc, 2003. IEEE 3DIM.
- GOODFELLOW, J et O'CONNOR, J. 1978.** *The mechanics of the knee and prosthesis design.* J bone J surg. 1978.
- HERVE, Bonnefoy. 2004.** *Le frittage polymere-metal.* Charleville-Mézières : IFTS, Pôle de Haute Technologie, 2004.
- HOPPE, H. 1995.** *Surface reconstruction from unorganized point.* University of Washington : PHD thesis, 1995.
- HUMBERT, D. 1997.** Les différentes technologies de numérisation et capteurs associés, Numérisation 3D, . Actes des conférences. 1997.
- HUNGERFORD, DS, KENNA, RV et KRACKOW, KA. 1982.** *The porous-coated anatomic total knee.* North America : Orthop clin, 1982.
- INSALL, J N, LACHIEWIECZ, P et BURNSTEIN, A H. 1982.** *The postero stabilized condylar prosthesis.* J bone joint surg, 1982.
- Jautomatise. 2004.** Acquisition 3D. <http://www.jautomatise.com/articles/rn19p28a32.pdf>.
- KIM, D S, PAPALAMBROS, P Y et WOO, T C. 1995.** *Tangent normal and visibility cones on Bézier surfaces.* Computer Aided Geometric Design. pp. 305-320. Vol. 12.1995.
- KREBS, B, SIEVERDING, P et KORN, B. 1996.** *A fuzzy ICP algorithm for 3D free form object recognition.* Vienna : Proceedings of the 13th international conference on pattern recognition. Vol A. 1996.
- LEON, J. 1991.** Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO. Hermès, 1991.
- LORIOT, Benjamin. 2009.** Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Le Creusot, France. 2009.
- LORUSSO, A, EGGERT, DW et FISHER, RB. 1995.** *A comparison of four algorithms for estimating 3D rigid transformations.* British Machine Vision Conference. 1995.
- MAITRE, D. 1997.** Evolution des technologies de stratagèmes, dans actes des 6^{eme} assises européennes du prototypage rapide. 1997.
- MÄKELÄ, I et DOLENC, A. 1996.** Des cartes rapides : un système rapide de prototypage logiciel, dans actes des 5^{eme} assises européennes du prototypage rapide. 1996.
- MARCHÈSE, Jean-Hugues. 2001.** *Spécification géométrique des produits (GPS).* Cachan : Technique de l'ingénieur, 2001.
- MEHDI-SOUZANI, Charyar. 2006.** *Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur critères de qualité.* Cachan France : Thèse de doctorant de l'école nationale supérieure de cachan, 2006.
- MEYER, A. 2002.** *Segmentation de nuage de points suivant les lignes caractéristiques.* Rouen : Thèse de doctorat Institut National des Sciences Appliquées, 2002.
- MONY, C et DJEAPRAGACHE. 1995.** *Quand les lampes UV remplacent le rayon laser, Instantanés techniques.* Revue trimestrielle des techniques de l'ingénieur, n° 34, 1995.
- MORON, Véronique. 1996.** *Mise en correspondance de données 3D avec un modèle CAO : Application à l'inspection automatique.* Lyon France. Thèse Automatique industrielle : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), 1996.
- NONNENMACHE, François. 1993.** La stéréolithographie en question - Rapport sur l'état du prototypage rapide en 1993. France. 1993.

- PRIETO, Flavio. 2000.** *Méetrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact.* Montréal, Canada : PhD thesis Université du Québec, Montréal, 2000.
- Prototypage, Rapide. 2010.** www.lna-proto.com/prototypage_rapide/principe-28.htm.
- SANCHEZ SECADES, L A. 2008.** 3D scanning of non-opaque objects by means of infrared imaging. Bourgogne : Master' thesis, 2008.
- SEUNG-HWAN, Kim, et al. 2004.** *Reducing computation time for range image registration using radial distance down-sampling.* Fukuoka Japan : proceedings 10th korea-Japan Joint workshop frontiers of computer vision FCV, 2004.
- STEINMANN, B. 1996.** Epoxy resins for stereolithography with reduced vater sensitivity, dans actes des 5^{eme} assises européennes du prototypage rapide. 1996.
- TASSE, J, FORGERIT, Y et REYMOND, V. 1996.** Caractéristiques de la machine soligen et process de mise en oeuvre, dans actes des 5^{eme} assises européennes du prototypage rapide. 1996.
- THIERRY, GUERTIN. 1999.** Mesure expérimentale de l'erreur de transmission cinématique d'engrenages spiro-coniques et hypoides. Canada. 1999.
- WEINSTOERFFER, M, et al. 1997.** Evolution du procédé de stratoconception, dans actes des 6^e assises européennes du prototypage rapide. 1997.
- ZHANG, Z. 1992.** Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. Comput vision, 1992.

RESUME

La technologie du Prototypage Rapide par impression à chaud est une technique récente permettant de fabriquer une maquette ou un modèle physique particulièrement précis à partir d'un fichier CAO sous format STL en le découpant en tranches puis en déposant de la matière couche par couche pour final obtenir la pièce.

Le problème principal relatif à cette nouvelle technologie consiste, lorsque les épaisseurs des pièces sont fiables, cela engendre une déformation de la génératrice qui ne peut être décelé qu'après contrôle de cette dernière après mise en correspondance du modèle STL avec le nuage de points issus de l'acquisition.

Dans l'étape de mise en correspondance l'algorithme ICP est utilisé en conséquence. Cet algorithme permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition. Ce système d'assistance par la mise en correspondance ayant pour référence l'axe mécanique du membre inférieur et l'orientation des coupes osseuses ce qui n'est pas toujours facile avec les techniques traditionnels.

Mots clés : Prototypage Rapide, Inspection, Surface Gauche, Algorithme ICP, Prothèse du Genou.

ABSTRACT

The technology of rapid prototyping by hot impression is a recent technique making it possible to manufacture a model or a particularly precise physical model starting from a file CAD under format STL by cutting out it in sections then by depositing matter sleeps by layer for final obtaining the part.

The principal problem relative to this new technology consists, when the thicknesses of the parts are reliable, that generates a deformation of the generator which can be detected only after control of the latter after mapping of model STL with the group of dots resulting from acquisition.

In the stage of mapping algorithm Iterative Closest Point is used consequently. This algorithm makes it possible to find the transformation going of a model 3D to a whole of data obtained by system of acquisition. This system of assistance by the mapping having for reference the mechanical axis of the lower extremity and the orientation of the osseous cuts what is not so easy to perform with conventional ancillaries

Key words: Prototyping Rapid, Inspection, free form surfaces, ICP algorithm, Prosthesis of Knee.

ملخص

تعتبر تكنولوجيا النماذج السريعة من نوع الطابعة الساخنة تقنية حديثة حيث تسمح بصناعة تصميم أو نموذج فيزيائي خاص و معين من خلال ملف مصمم بواسطة برنامج CAO من نوع STL و يقسم إلى شرائح رقيقة ثم يتم وضع المادة طبقة بطبقة من أجل الحصول في النهاية على القطعة. لكن المشكل الأساسي لهذه التكنولوجيا الجديدة ينشئ عندما تكون سمك القطعة صغير جدا, حيث يحدث تشوه في القطعة و نعرف ذلك من خلال مراقبة القطعة بواسطة طريقة الإزاحة للسطح الحقيقي نحو السطح النظري.

في مرحلة الإزاحة نعتمد على الخوارزمي ICP . هذا الخوارزمي يسمح بإيجاد التحويل من النموذج الحقيقي إلى النموذج النظري. هذا النظام المساعد يستعمل كمرجع لأجاد المحور الميكانيكي للأطراف السفلية لجسم الإنسان و توجيه قطع العظام الذي يعتبر ليس سهل مقارنة بالطرق التقليدية.

كلمات المفتاح: النموذج السريع, مراقبة الأجزاء الميكانيكية, السطوح المعوجة, الخوارزمي I C P, بادئة.