

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale polytechnique



Département Génie Mécanique

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème

**ETUDE DE REALISATION D'UN ARBRE A CAMES
SUR UNE MOCN**

Proposé et dirigé par :

Mr I.BELHADEF

présenté par :

SOULIMANE Houcine

Juin 2012

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach

16200 Alger (Algérie)

Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu de nous avoir donné le courage et la patience pour mener ce travail à terme.

MERCI !

C'est un petit mot tout simple, Mais qui pèse lourd

Si nos lèvres l'expriment avec douceur, c'est qu'il prend naissance au fond de nos cœurs

C'est un signe de reconnaissance, qui ne connaît pas l'indifférence !

Merci !

Un petit mot qui fait du bien quand on le prononce, Un petit mot gracieux qui calme et réjouit

Merci ! Merci !

Merci de nous avoir permis de vous dire Merci !

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon promoteur Monsieur Ikhlef BEELHADEF, enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, de m'avoir confié ce sujet, pour son encadrement, sa confiance et ses conseils précieux qu'il m'a toujours apportés. Je le remercie d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien ce modeste travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance et mon profond respect.

J'adresse mes vifs remerciements à toute l'équipe de Génie Mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir toujours été sympa et généreuse avec moi.

Je témoigne mes sincères remerciements et mes respect aux membres de jury Mr MADANI, Mr BOUAZIZ et Mr TAZI d'avoir examiné mon projet de fin d'études.

Je tiens aussi à remercier les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué de près ou de loin à ma formation d'ingénieur, et pour les connaissances qu'ils m'ont transmises tout au long de mon parcours.

**ma plus grande Gratitude s'adresse à mes parents, pour tous leurs sacrifices...
Les mots sont certes, insuffisants, mais vous comprenez que tout un océan de Belles
Lettres ne saurait suffire pour leur dire MERCI.**

Dédicace

A mon père et ma mère, à ma sœur, à mes frères

A mes amis

Je ne serais jamais arrivé là où je suis sans vous

Merci pour tout.

Houcine

Résumé :

La présente étude porte sur l'exploitation des systèmes de CFAO pour la rétro-conception des surface complexes des modèles existants et d'appliquer ces outil a la retro-conception d'un arbre à cames après avoir traité les résultats de retro-conception numériquement, le nuage de points obtenues permet d'obtenir le modèle CAO, puis de le traiter en FAO, pour avoir le programme d'exécution, puis comparer les résultats obtenues et de proposer une méthode programmable pour avoir le programme d'exécution.

Mot clefs:

CAO, CFAO, FAO, DAO, retro-conception, modèle existant, programme execution, arbre a cames, moteur a combustion interne, distribution.

ملخص :

هذه الدراسة تتمثل في استعمال أنظمة التصميم و الصناعة المدعمة بالحاسوب . لإعادة تصميم السطوح الغير مستوية و تطبيق هذه الأدوات لإعادة تصميم عمود الأكمات بعد معالجة النتائج المحصل عليها بالتصميم رقميا . مجموعة النقاط المحصلة عليها تسمح بإنتاج مجسم ثلاثي الأبعاد. بعد ذلك تتم المعالجة بواسطة أنظمة الصناعة الميكانيكية المدعمة بالحاسوب للحصول على برنامج التصنيع . و بعد ذلك تتم مقارنة النتائج المحصل عليها لاقتراح طريقة قابلة للبرمجة للحصول على برنامج التصنيع.

الكلمات المفتاحية

نظام التشكيل و الصناعة المدعم بالحاسوب . التحويل الرقمي . مجسم مهبي . نظام الصناعة المدعم بالحاسوب . نظام التشكيل المدعم بالحاسوب . برنامج التصنيع . عمود الأكمات محرك الاحتراق الداخلي . التوزيع .

Abstract:

This study focuses on the use of CAD/CAM systems for reverse engineering of complex surface of existing models and to apply these tools in the reverse engineering of a camshaft after processing the results of reverse engineering digitally the point cloud obtained provides the CAD model, and then processing in FAO for the implementation program, and then compare the results obtained and propose a method for programmable program execution.

Key words:

CAD/CAM ,preexisting model,CAD,CAM,execution program,camshaft,motor.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralités

I.1	Le moteur à quatre temps :	1
I.1.1	Fonctionnement d'un moteur à quatre temps :	1
I.1.2	La distribution :	3
I.2	La CFAO :	12
I.2.1	Définitions :	12
I.2.2	Les modèles CAO :	13
I.2.3	La chaîne numérique en Fabrication Assistée par Ordinateur :	15
I.2.4	Les formats de description des trajectoires :	16
I.2.5	L'interpolation linéaire :	16
I.2.6	L'interpolation circulaire :	17
I.2.7	L'interpolation polynomiale :	18
I.3	La machines-outils à commande numérique :	18
I.4	La retro-conception :	22
I.4.1	Introduction :	22
I.4.2	Construction d'un modèle :	22
I.4.3	La rétro-conception des objets physiques :	24
I.4.4	L'intégration de la CFAO :	36
I.4.5	Conclusion :	37

CAPITRE II :Modèle existant

II.1	Avant-propos :.....	38
II.2	Modèle existant :	39
II.3	Profil maillé de la came :.....	39
II.4	Traitement numérique des résultats expérimentaux:	41
II.5	Reconstruction du modèle 3D :.....	42
II.5.1	Introduction du nuage de points dans un logiciel CAO (Solidworks) :.....	42
II.5.2	La création du maillage :.....	43
II.5.3	Le bossage du maillage :.....	44
II.6	Reconstruction du modèle entier :.....	44
II.7	Evaluation d'erreur :.....	44

CAPITRE III :Paramétrage et usinage

III.1	Avant-propos :.....	47
III.2	Paramétrage sur CAMWORKS :.....	47
III.3	La stratégie d'usinage :.....	48
III.4	Visualisation de l'usinage :.....	49
III.5	Création du programme d'usinage :.....	50
III.6	Bilan :.....	51
III.7	Paramétrage sur MasterCam :.....	51
III.8	Conclusion :.....	53

CAPITRE IV :Solution proposée

IV.1	Description de la méthode :	54
IV.2	Organigramme de la méthode :	56
IV.3	Les résultats du programme :.....	63

Conclusion générale

Liste des illustrations

Figure I-1 Diagramme du cycle théorique de Beau de Rochas.....	1
Figure I-2 Exemple de distribution avec arbre à cames latéral.....	4
Figure I-3 Définition de la loi de levé théorique	5
Figure I-4 Définition de la loi de levé.....	7
Figure I-5 Composition d'un moteur à explosion interne.	9
Figure I-6 Schéma de distribution à poussoir et linguet.....	10
Figure I-7 Schéma de culbuteur.	11
Figure I-8 Chaîne numérique pour la programmation des trajectoires	16
Figure I-9 Interpolation linéaire	17
Figure I-10 Interpolation polynomiale	18
Figure I-11 Principe de la triangulation.	30
Figure I-12 Principe de la méthode par projection de franges.....	31
Figure I-13 Principe de la photographie.....	32
Figure I-14 Méthode de la Vidéogrammétrie.	33
Figure I-15 Principe de la défocalisation.....	34
Figure I-16 Principe de la méthode du temps de vol.	34
Figure I-17 Principe de la méthode de Tomographie.	35
Figure II-1-arbre à cames utilisé	39
Figure II-2 diviseur et poupée mobile.....	40
Figure II-3- Le déplacement en fonction de l'angle de rotation	40
Figure II-4 Comparaison entre le profil expérimental et le profil numérique.....	42
Figure II-5 Effet de la fonction "assistant de courbures".	43
Figure II-6 Forme final du profil après traitement.	43
Figure II-7 Effet de la fonction "bossage".	44
Figure II-8 La forme finale de l'arbre à cames.	45
Figure III-1 La stratégie d'usinage en spirale.	48
Figure III-2 Parcours de l'outil.	49
Figure III-3 Simulation d'usinage sur la 1 ^{er} , la 4 ^{ème} et la 7 ^{ème} came.....	49
Figure III-4 Début de programme	50
Figure III-5 Les dernières lignes du programme.....	50
Figure III-6 Etat de surface pour un angle de rotation maximum de 5°.....	51
Figure III-7 Forme finale de la came après usinage.	52
Figure IV-1 schéma de la méthode.....	54
Figure IV-2 Simulation d'usinage	63
Figure IV-3 Début de programme.	64

Liste des abréviations

CAO : conception assistée par ordinateur.

FAO : fabrication assistée par ordinateur.

DAO : dessin assistée par ordinateur.

CFAO : conception et fabrication assistée par ordinateur.

PMH : point mort haut.

PMB : point mort bat.

MOCN : machine-outil à commande numérique.

Nomenclature

teta.txt : le fichier qui contient les valeurs expérimental de la rotation.

dep.txt : le fichier qui contient les valeurs expérimental du déplacement.

v_teta : le vecteur qui contient les valeurs expérimental de la rotation.

v_dep : le vecteur qui contient les valeurs expérimental du déplacement.

v_y,v_z :les coordonnées expérimental du profil de la came.

V_teta_i :le vecteur qui contient les valeur numérique de la rotation.

v_regrassion :le vecteur qui contient les valeurs numérique du déplacement.

v_y_regrassion,v_z_regrassion :les coordonnées numérique du profil de la came.

Liste des tableaux

Tableau II-1 Valeurs calculées des paramètres a_i, b_i, c_i .

Tableau II-2 Déplacement angulaire des cames.

Tableau II-3 Valeurs calculée de la moyenne arithmétique.

Introduction générale

Economiquement et techniquement, les nouvelles technologies apportent d'importantes évolutions. Economiquement, l'augmentation de l'effort en conception et en production a imposé une gestion beaucoup plus sévère des coûts. Il est nécessaire de produire une pièce aux moindres coûts de la conception jusqu'à la production.

La forte contrainte économique provoque des répercussions techniques sur les méthodes de conception et de production employées. Les opérateurs doivent trouver des solutions techniques qui satisfont au mieux les contraintes économiques d'où le recours aux techniques de la CFAO et de la retro-conception (Reverse Engineering).

Parmi les nouvelles technologies la numérisation 3D, cette technique est appliquée dans plusieurs domaines : mécanique, architecture ... Notre étude sera consacrée à la mécanique pour des applications dans les domaines de la CFAO et de la rétro-conception du modèle existant.

La numérisation 3D consiste en l'acquisition des coordonnées d'un ensemble de points 3D, représentatifs, de la surface à numériser de la pièce. Pour réaliser cette tâche, il existe de nombreuses techniques afin de prendre en considération des contraintes variées, et de répondre ainsi aux différents besoins.

Le processus de réalisation des pièces de formes complexes par l'usinage est essentiel dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de la fabrication des moules et des matrices. La réalisation des pièces de formes complexes passe par la génération de trajectoires d'usinage, basée sur un modèle CAO, une stratégie d'usinage et une machine-outil à commande numérique donnée. Ce processus a largement été modifié ces dernières années par l'utilisation de nouvelles techniques comme la maquette numérique, c'est-à-dire la modélisation complète du produit et de son procédé dans un système de CFAO, par l'utilisation de nouveaux formats d'interpolation au niveau du directeur de commande numérique et par l'usinage à commande numérique.

Chaque étape du processus s'appuie sur sa propre modélisation de la géométrie de la surface. Les modèles de représentation des formes génèrent des approximations dues aux différents traitements associés à la CAO, à la FAO et à la commande dynamique de la

trajectoire. Le calcul de la trajectoire de l'outil FAO s'appuie sur le modèle CAO, une géométrie d'outil, une stratégie d'usinage (une direction d'usinage et des paramètres de discrétisation (en d'autres termes, une gamme d'usinage)) et un format de description de la trajectoire.

Quel que soit le type d'usinage, à 3, 4 ou à 5 axes, la trajectoire calculée est un ensemble de points caractéristiques de la géométrie de la trajectoire transmis au directeur de commande numérique.

Dans le but de faire avancer notre travail nous avons vu qu'il serait important d'utiliser les moyens de notre école et de faire une étude de rétro-conception d'un arbre à cames usé afin de le rectifier ou d'en produire d'autres après l'avoir modélisé.

Pour arriver au bout de notre travail nous avons commencé par une introduction générale, suivie, au premier chapitre par une étude bibliographique où nous nous sommes intéressés à la constitution des moteurs à combustion interne suivie par une étude de la CFAO où nous avons terminé ce chapitre par citer les différents moyens de la rétro-conception et du mesurage tridimensionnels.

Le deuxième chapitre a été consacré à la mesure topographique des surfaces importantes d'un arbre à cames et au traitement des résultats numériques obtenus expérimentalement afin d'en corriger les défauts de surfaces.

Au troisième chapitre nous nous sommes intéressés à la fabrication assistée par ordinateur.

Le quatrième chapitre a été consacré à la méthode proposée où nous avons présenté notre propre code de calcul, Matlab, qui a pour rôle la création d'un programme d'usinage, en code G, destiné à une MOCN.

Enfin nous avons terminé notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités

I. Généralité :

I.1 Le moteur à quatre temps :

I.1.1 Fonctionnement d'un moteur à quatre temps : [1]

Le moteur thermique est une machine chargée de transformer l'énergie calorifique en énergie mécanique. Son fonctionnement est ainsi régi, à la fois, par des paramètres dynamiques (masse, vitesse, accélération ...) liés à la cinématique du système bielle/vilebrequin, et par des paramètres thermodynamiques (température, pression, volume), liés au principe du mélange gazeux dans la chambre de combustion.

La combustion du mélange gazeux dans le cylindre entraîne le déplacement du piston. Ce dernier, par l'intermédiaire de la bielle, va permettre au vilebrequin de tourner. Un volant moteur en bout du vilebrequin rajoute de l'inertie afin de régulariser la vitesse de rotation du moteur. L'autre extrémité du vilebrequin permet d'entraîner l'arbre à cames et les divers accessoires : pompes, alternateur, climatisation La transmission du mouvement de rotation aux accessoires ou à l'arbre à cames se fait grâce à des courroies, des chaînes ou des pignons. L'arbre à cames actionne les soupapes qui assurent les échanges gazeux dans le cylindre.

Le cycle thermodynamique théorique du moteur à quatre temps a été défini par Beau de Rochas (brevet de 1862) par un graphique pression/volume, (figure I-1)

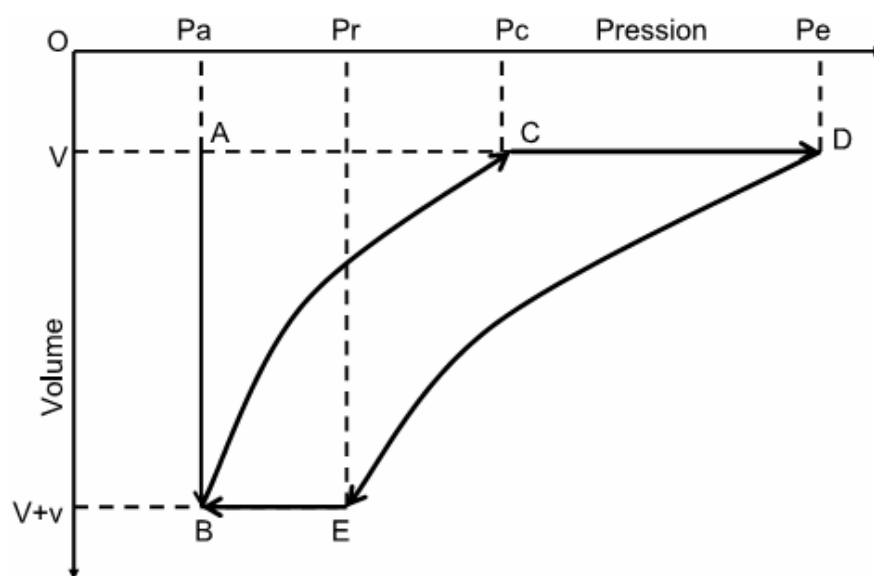


Figure I-1 Diagramme du cycle théorique de Beau de Rochas

Description du cycle :

- AB : la soupape d'admission est ouverte et les gaz sont aspirés pendant la phase descendante du piston. Le volume de gaz dans le cylindre augmente de V à $V+v$ tandis que la pression P_a (pression atmosphérique) reste constante.
- BC : les soupapes sont fermées et le mélange est comprimé pendant que le piston remonte, La réduction du volume de $V+v$ à V provoque l'augmentation de la pression de P_a à P_c .
- C: déclenchement de l'étincelle de la bougie
- CD : explosion du mélange, à volume constant, générant une augmentation brutale de la pression de P_c à P_e .
- DE : détente des gaz brûlés, le piston descend et l'augmentation du volume fait chuter la pression de P_e à P_r .
- EB : la soupape d'échappement s'ouvre et fait chuter la pression résiduelle des gaz à la pression atmosphérique P_a . le piston toujours en bas. il n'y a pas de variation de volume
- BA : soupape d'échappement toujours ouverte, les gaz d'échappement s'échappent pendant la remontée du piston.

Ce cycle théorique repose sur les hypothèses suivantes :

- ouverture et fermeture des soupapes d'admission et d'échappement respectivement au point mort haut (PMH) et au point mort bas (PMB) ;
- les pressions entre cylindre et atmosphère s'équilibrent instantanément ;
- combustion du mélange instantanée, donc à volume constant ;
- aucun transfert de chaleur avec les parois.

Dans la réalité, ces hypothèses ne peuvent, bien entendu, pas être respectées. A l'ouverture des soupapes, les pressions ne s'équilibrent pas instantanément. En effet, l'écoulement gazeux s'effectue avec inertie et frottement, et les soupapes ne peuvent pas s'ouvrir instantanément pour des raisons mécaniques. De plus, la combustion complète du mélange demande un certain temps : l'étincelle permet de démarrer un front de flamme dont la rapidité de combustion dépend de la richesse, des conditions de pression et de température, et de la turbulence.

Les pertes en énergie du moteur à combustion sont également importantes :

- transferts thermiques des parois de la chambre de combustion avec l'extérieur ;
- pertes à l'échappement ;
- pertes mécaniques : frottement des paliers, des pistons et énergie nécessaire à actionner les différents accessoires du moteur ;
- pertes par pompage, lors du remplissage du moteur en gaz frais, à basse pression.
- Le cycle du moteur diesel est assez similaire à celui du moteur à allumage commandé : la principale différence étant que la combustion du mélange gazeux s'effectue de façon spontanée pour le diesel, sous l'effet de l'augmentation de pression. Le taux de compression d'un moteur Diesel, lié au carburant, est environ deux fois plus élevé que celui d'un moteur à essence.
- Les contraintes sur le moteur sont de plus en plus importantes car il faut satisfaire des normes antipollution toujours plus sévères, sans dégrader le niveau des performances. Afin de rejeter moins de dioxyde de carbone (CO_2), qui est un gaz participant à l'effet de serre, il

est nécessaire de diminuer la consommation des véhicules, ce qui impose d'augmenter le rendement thermodynamique du moteur. Afin de réduire les émissions polluantes et la consommation, le turbocompresseur, chargé de comprimer les gaz à l'admission, est un organe de plus en plus utilisé. Cet ajout génère une thermique plus importante et nécessite alors de modifier la distribution.

- Des contraintes plus élevées sur les moteurs vont modifier la dynamique du moteur, et ainsi se répercuter directement sur la distribution, qui va subir des contraintes mécaniques supérieures. De plus, la distribution joue un rôle central dans la combustion du moteur puisque c'est elle qui pilote les échanges gazeux dans le cylindre, et va donc influencer sur le rendement thermodynamique et les émissions polluantes du moteur.

I.1.2 La distribution :

(i) Généralités :

La distribution d'un moteur doit assurer le remplissage des cylindres en gaz frais, puis l'évacuation des gaz brûlés, tout en pouvant maintenir l'étanchéité du cylindre lors des phases de compression et de combustion. La distribution a donc une influence importante sur les performances d'un moteur, et elle est aujourd'hui en partie conçue en fonction de ces deux contraintes. La distribution subit des sollicitations importantes, tant thermiques (elle est au contact de la chambre de combustion), que mécaniques (à un régime moteur de 6000 tr/mn la soupape est actionnée 50 fois par seconde).

Le système de distribution, qui équipe actuellement tous les moteurs alternatifs à pistons, quatre temps, est celui à soupapes actionnées par des cames. D'autres systèmes de distribution peuvent être cités :

- Le système à lumières, utilisé pour les moteurs 2 temps ou les moteurs rotatifs (Mazda RX-8). Ce système est le plus simple puisque le transfert des gaz est commandé par le piston qui obture ou ouvre une lumière : si ce système est économique et léger, il ne permet pas un remplissage très efficace.

- Le dispositif à fourreaux (Knight 1905) : le fourreau est une chemise en acier placée entre le piston et le cylindre dont le mouvement alternatif permet de découvrir des lumières pour le passage des gaz. Ce dispositif a été abandonné en 1940 pour son coût et la faible vitesse de rotation du moteur qu'il autorisait.

- Le système à vanne rotative : entraînée simplement par le vilebrequin ou même par un servomoteur piloté selon le régime (utilisé sur le moteur 2 temps de la Yamaha RD 350 LC). Un boisseau cylindrique, qui possède une encoche, tourne devant la lumière pour autoriser ou arrêter le passage des gaz. Ce système pose cependant des problèmes d'usure du boisseau. La distribution à soupapes est actuellement la plus couramment utilisée sur les moteurs à quatre temps, car par rapport aux autres, elle assure bien le remplissage du moteur tout en étant fiable, simple et peu coûteuse.

Les moteurs actuels emploient maintenant, quasiment tous, des arbres à cames en tête, c'est à dire positionnés au sommet de la culasse et entraînant directement les soupapes via des actionneurs. L'arbre à cames peut avoir également une position latérale (figure I-2) ou centrale pour les moteurs en V (l'arbre est au centre du V, au-dessus du vilebrequin). L'intérêt de cet emplacement est de réduire le système d'entraînement. L'arbre à cames est directement entraîné par le vilebrequin du moteur, à une vitesse deux fois moins élevée, par l'intermédiaire d'une courroie, d'une chaîne, ou plus rarement d'une cascade de pignons. La distance importante entre l'arbre à cames en tête, positionné au sommet de la culasse et le vilebrequin rend ce dispositif d'entraînement plus complexe par rapport à un arbre à cames latéral. Cependant, ces types de distribution ont été presque complètement abandonnés depuis dix ans. Bien que simple, ce système, actionnant les soupapes par l'intermédiaire de tiges, est peu adapté aux moteurs actuels, qui tournent plus vite. En effet, les tiges diminuent la raideur de la commande de soupape, et de surcroît, elles augmentent la masse mobile de la commande de soupape.

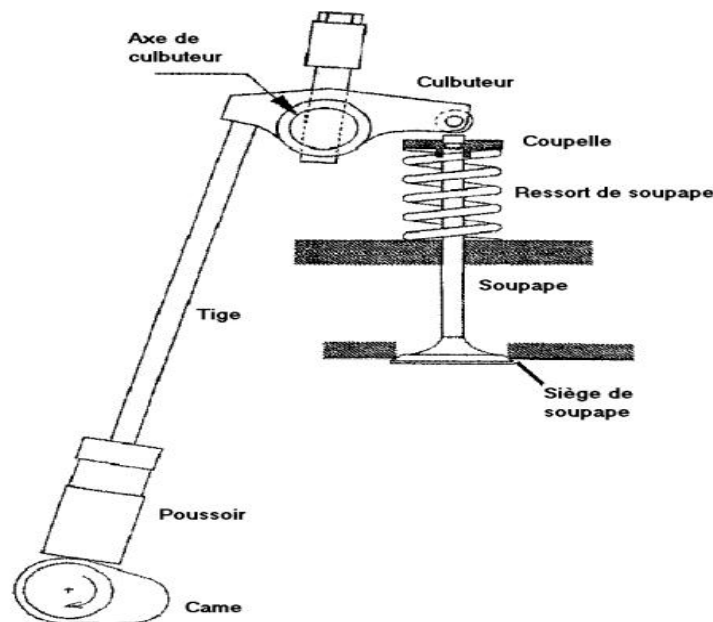


Figure I-2 Exemple de distribution avec arbre à cames latéral

(i) Les mesures sur la distribution :

La levée réelle de la soupape ne doit pas trop s'éloigner de sa définition cinématique. Afin de valider la dynamique de la distribution, il est principalement procédé à des expérimentations, qui permettent également de pouvoir recalibrer les modèles numériques. Parmi les mesures globales, des mesures montrent l'influence des harmoniques de la loi de came sur la dynamique.

(ii) Problématique de la distribution :**1) Création de la loi de levée de soupape :**

La loi de levée de la soupape définit les échanges gazeux du cylindre. Elle est donc importante pour la dynamique et le fonctionnement du moteur. Toutes les recherches, pour faire évoluer la distribution, ont d'ailleurs pour seul but l'optimisation de cette loi. Quel que soit le système de distribution employé, la loi de levée doit être le meilleur compromis entre le remplissage et la tenue mécanique des éléments.

Une loi théorique pour le remplissage serait une loi rectangulaire (figure I-3), mais elle est mécaniquement irréalisable (vitesse et accélération infinies). La loi de levée de la soupape est actuellement calculée à partir du remplissage moteur. Ce qui se traduit par un étalement (durée d'ouverture de la soupape) de la loi et une levée maximum qui sont imposés. Dans ce travail, l'étalement est défini comme la plage angulaire où la levée de soupape est supérieure à 0,7 mm, car le passage des gaz est trop faible en dessous de cette valeur. Les caractéristiques de la loi varient selon le type de moteur, et les conditions de fonctionnement. Par exemple, la loi d'un moteur type sport, ayant un régime maximum élevé, a généralement un étalement important.

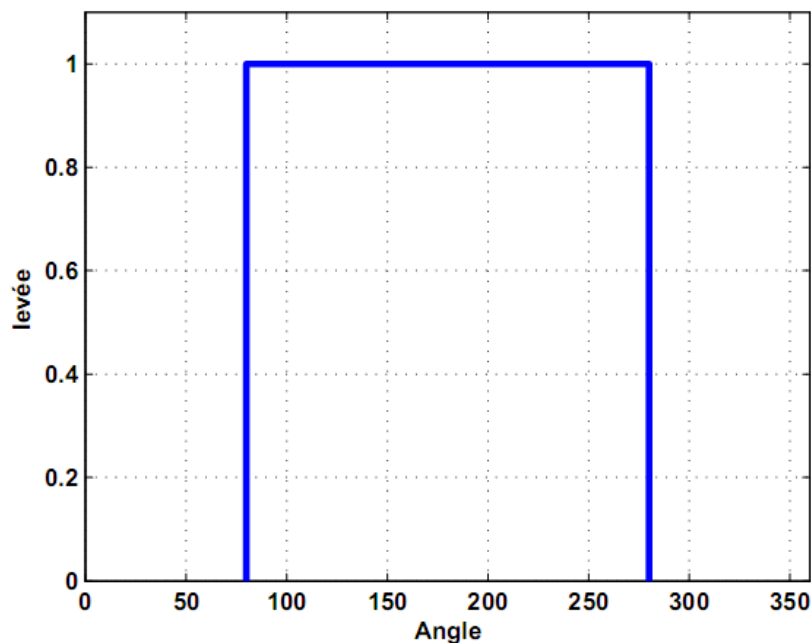


Figure I-3 Définition de la loi de levé théorique

Il existe plusieurs manières de définir une loi de levée : par des polynômes, par des séries de Fourier, ou bien directement, en définissant le squelette d'accélération de la loi. Cette dernière solution est celle qui est actuellement employée chez Renault. La levée est définie ensuite par une double intégration de l'accélération. Cette méthode permet de mieux contrôler la dynamique, et d'éviter le bruit numérique qui serait dû à la dérivation de la levée, si elle était la donnée de départ. De plus, cela permet d'avoir un plus grand nombre de paramètres facilement identifiables (différents étalements, accélérations minimum et maximum, ...).

L'accélération de la soupape (illustrée figure I-4) commence et se termine par des rampes de silence, qui servent à limiter la vitesse d'impact, donc l'énergie du choc, de la came sur l'actionneur en début de levée, et à limiter la vitesse de repos de soupape en fin de levée. La loi d'accélération présentée (figure I-4) est celle d'un moteur équipé d'une distribution à linguets et butées hydrauliques. Les rampes de silence sont plus larges pour les moteurs sans rattrapage de jeu hydraulique car elles doivent compenser les effets de la dilatation quand le moteur monte en température. Sur une distribution à rattrapage de jeu hydraulique, la rampe de silence à l'ouverture est très courte, et peut être éventuellement supprimée, ce qui permet d'améliorer le remplissage. La rampe de fermeture a principalement pour rôle de compenser l'écrasement de la butée en fin de levée.

Pour créer cette loi d'accélération, les deux pics d'accélération sont décomposés (figure I-4) en différents segments qui sont définis par :

- la largeur de rampe de silence ;
- l'accélération maximale de la rampe ;
- les largeurs des 3 segments du pic : montée - plateau - descente ;
- l'accélération maximale du pic.

L'accélération négative, entre les deux pics, peut être définie de deux façons différentes :

- par une forme parabolique : la largeur de la partie négative est définie et la parabole est conçue pour optimiser l'effort minimum qui s'exerce sur le linguet ;
- par une forme rectiligne : décomposée en 4 segments dont la largeur et la pente des trois premiers sont définies, cette méthode permet de mieux façonner l'accélération négative.

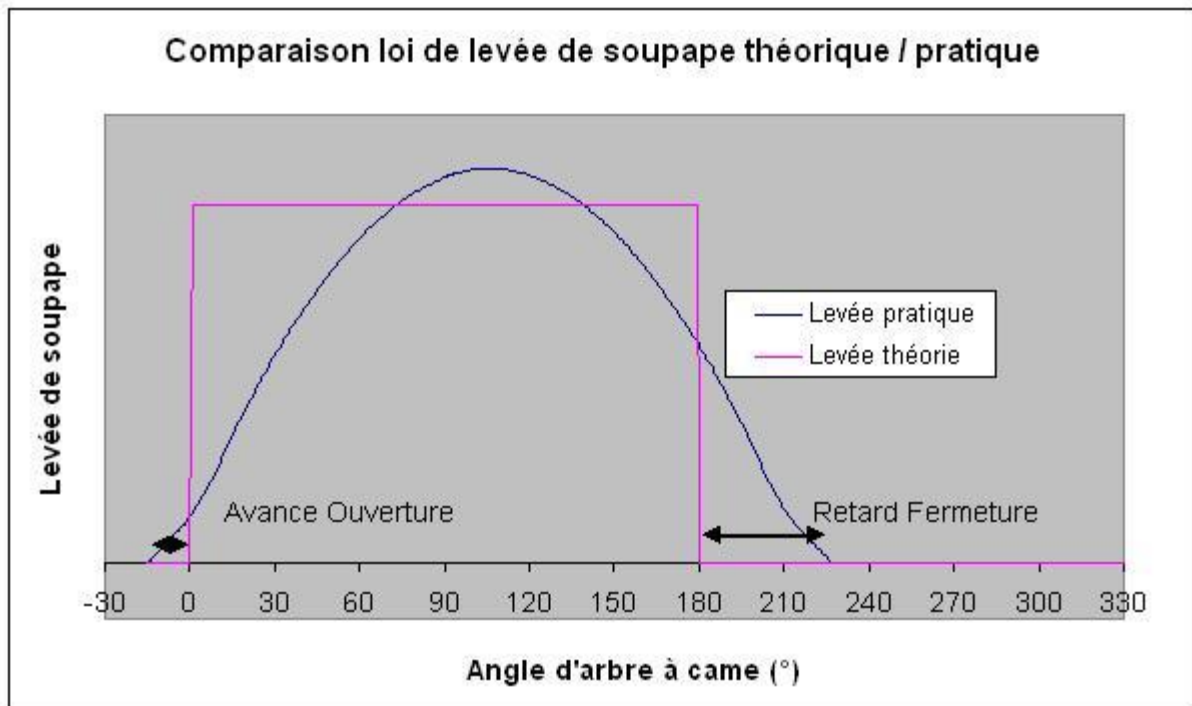


Figure I-4 Définition de la loi de levé

Les intégrales de l'accélération et de la vitesse doivent être nulles sur un tour. Les deux paramètres suivants sont calculés afin que ces conditions soient respectées :

- minimum de l'accélération négative ;
- maximum de l'accélération du second pic.

Enfin, cette courbe, composée en majorité de segments rectilignes, est lissée pour donner la loi d'accélération finale. Cela a donc pour effet de diminuer les jerks (dérivée de l'accélération par rapport au temps), en particulier au niveau des rampes de silence, où ils seraient infinis, ce qui est néfaste au bon comportement dynamique de la distribution.

Les contraintes portent sur la levée maximum et l'étalement, alors que ce sont les résultats de la double intégration. Cela oblige donc à faire plusieurs itérations en modifiant la loi d'accélération avant d'obtenir un résultat satisfaisant. De la levée de soupape et, en connaissant la géométrie de la commande de soupape, on déduit, par un calcul cinématique, le profil de la came. Il est ainsi nécessaire de déterminer quels sont les paramètres de la loi de levée qui permettent d'optimiser l'ouverture de la soupape, sans dégrader le comportement dynamique de la distribution.

Pour la réalisation de l'arbre à cames, les différents angles de calage des cames sont définis en dernier lieu. Dans le cas d'un moteur possédant quatre soupapes par cylindre, les cames admission ou échappement d'un même cylindre peuvent être décalées de deux degrés,

au lieu d'actionner les deux soupapes en même temps, pour diminuer le bruit de la distribution.

(iii) Réalisation de la loi de levée :

Le profil de came crée l'excitation de la commande de soupape, et si l'affolement de la commande de soupape arrive à un régime trop faible, le profil est l'élément qui est modifié en premier. Il faut néanmoins prendre en compte son influence sur la dynamique et le rendement global du moteur lorsqu'il est modifié. Pour toutes les distributions à soupapes, l'accélération de la soupape sur un tour se décompose comme suit : une rampe de silence à l'ouverture et à la fermeture, un premier pic pour l'ouverture de la soupape, une partie négative de l'accélération, et un second pic positif pour la fermeture de la soupape. À partir de ce modèle, de petites variations existent : à la frontière positif/négatif des pics d'accélération, l'accélération marque un palier, ou possède une petite rampe de silence, pour aider à stabiliser le système. De plus, sur ce dernier exemple, la première partie de l'accélération négative décroît de façon progressive, par paliers, afin de diminuer la dynamique. De nombreuses expériences, ou simulations numériques, ont aussi été réalisées de manière à voir quelle était la meilleure méthode pour le calcul du profil de came, toujours dans l'objectif de minimiser des phénomènes dynamiques indésirables tels que le rebond ou l'excès à l'ouverture de la soupape. Une des premières méthodes est la méthode «polydyne» qui crée un profil de came par des polynômes. La construction d'une loi à partir d'une dizaine de polynômes est détaillée par Park [2] qui n'utilise finalement qu'une quinzaine de paramètres pour optimiser la loi, en particulier les vitesses et accélérations maximales. Il existe une autre méthode qui utilise des séries de Fourier pour construire le profil de came. Cette méthode a l'avantage de pouvoir donner plus facilement la réponse fréquentielle du système. Les séries de Fourier sont utilisées par Rover. Essentiellement pour la construction des pics d'accélération de la loi. La méthode «hysdyne» de Kanosaka utilise un modèle simple à une masse, en tenant compte de l'hystérésis pour le trajet de charge du ressort, pour optimiser la définition des harmoniques de la loi de came. Une comparaison des résultats dynamiques, entre les profils de came parabolique, harmonique et cycloïdale, montre que le profil cycloïdal a l'avantage de réduire les pics et les oscillations des efforts. Une des raisons de ce meilleur comportement dynamique vient du fait que le profil d'accélération créé est plus lisse que les deux autres.

Les rampes de silence ont également un rôle important dans la dynamique car elles servent à limiter la vitesse d'impact en début et fin de levée. Il est également préférable que

les jerks (dérivée de l'accélération de la soupape) de ces rampes de silence ne soient pas trop élevés afin de ne pas amplifier les vibrations dans la commande de soupape.

1.5 Les composants

- 1) Axe des culbuteurs
- 2) culasse
- 3) soupapes
- 4) bougies
- 5) bloc
- 6) allumeur
- 7) tiges de commande des culbuteurs
(avec Un moteur à came entête, ces commande n'existe pas.
- 8) pompe à essence
- 9) poussoirs
- 10) arbre à cames
- 11) carter de distribution
- 12) chaîne de distribution
- 13) pompe à huile
- 14) crépine de pompe à huile
- 15) carter d'huile
- 16) joint de carter
- 17) vilebrequin
- 18) volant moteur
- 19) couronne dentée entraînée par le démarreur
- 20) bielle
- 21) axe de piston
- 22) piston
- 23) segments
- 24) cylindre
- 25) joint de culasse
- 26) ressorts de soupapes
- 27) culbuteurs

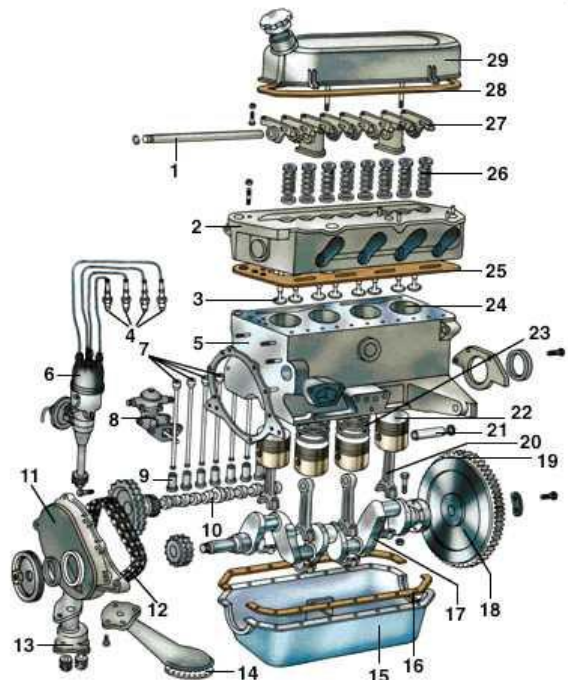


Figure I-5 Composition d'un moteur à explosion interne.

28) joint de cache-culbuteurs

29) cache-culbuteurs

La soupape :

La soupape est finalement l'élément dont il est nécessaire de contrôler le déplacement de façon précise, puisque c'est elle qui régit les échanges gazeux entre la chambre de combustion et l'atmosphère. La soupape se compose de deux parties : la tête et la queue (ou tige).

La tête est l'élément qui permet d'obturer le passage des gaz et qui est au contact de la chambre de combustion. Elle repose sur le siège : pièce spécifique insérée dans la culasse (cette dernière étant en aluminium) pour résister au contact intermittent. Le contact de la tête de soupape avec le siège permet également de refroidir la soupape. La surface de la soupape en contact avec le siège est appelé la portée.

La queue de soupape est raccordée à la tête par un congé de grand rayon en forme de tulipe. La queue est une tige cylindrique qui coulisse dans le guide (en laiton ou en acier fritte).

Les actionneurs :

L'arbre à cames peut commander trois types d'actionneurs : le poussoir, le linguet et le culbuteur.

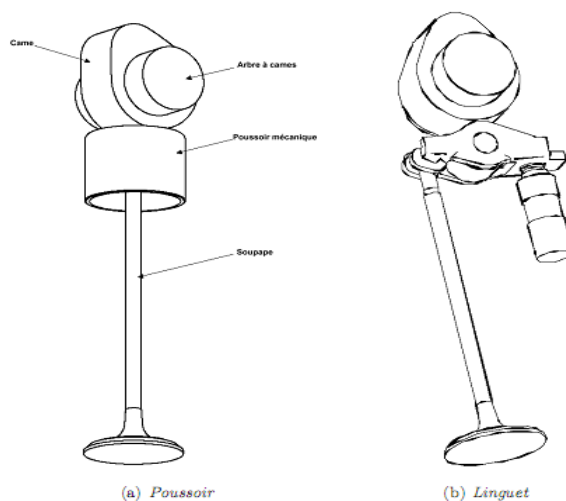


Figure I-6 Schéma de distribution à poussoir et linguet

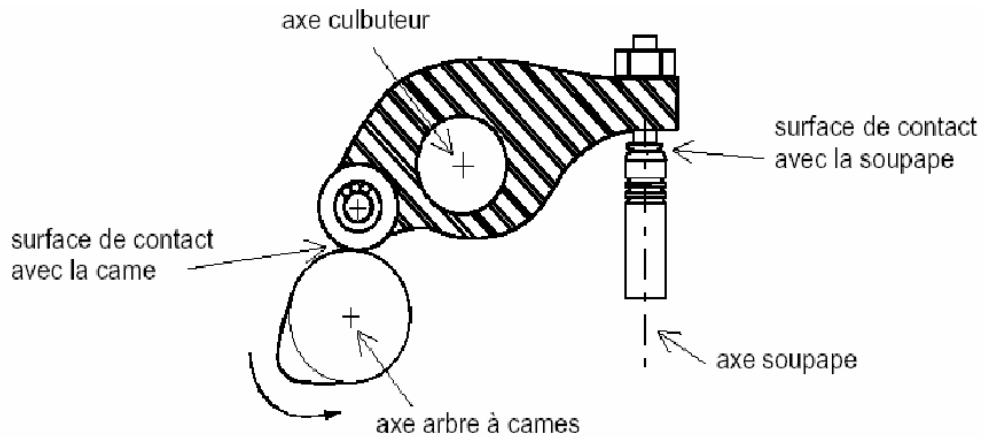


Figure I-7 Schéma de culbuteur.

L'arbre à cames :

L'arbre à cames sert avant tout à commander les soupapes. Il est entraîné par le vilebrequin par l'intermédiaire d'une courroie, d'une chaîne, ou très rarement d'une cascade de pignons. Cependant, l'arbre à cames peut servir également à entraîner un autre élément du moteur, comme une pompe d'injection diesel, la climatisation, ou même à actionner des injecteurs pompes (moteurs TDI Volkswagen). Cela a pour effet d'augmenter les contraintes de l'arbre à cames.

Les arbres à cames peuvent être en fonte, dans ce cas ils sont taillés dans la masse avec les cames. Ils peuvent également être en acier, ils sont alors assemblés : ils sont composés d'un tube, sur lequel sont rajoutés les cames et les embouts, avant d'usiner l'arbre à cames complet. Dans certains cas, rares, où l'arbre à cames est très sollicité mécaniquement, il peut être en acier taillé dans la masse.

L'arbre peut permettre de lubrifier les paliers, et plus rarement la came pour diminuer l'usure au contact de l'actionneur. Pour cela, des conduits sont réalisés dans l'arbre. En dehors d'une conception à rouleaux, l'usure est la plus importante au niveau du contact came-actionneur, une attention spéciale est donc portée aux matériaux employés, ainsi qu'à l'huile.

L'arbre à cames est maintenu dans la culasse par des paliers, généralement au nombre de 5 pour un quatre cylindres. Sur une culasse à 4 soupapes par cylindre, les paliers sont

souvent placés entre les deux soupapes d'un même cylindre, s'il y a assez de place, afin de reprendre au mieux les efforts.

I.2 La CFAO :

I.2.1 Définitions :

Le sigle CFAO signifie Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur. Donner une définition précise de la CFAO est difficile, dans la mesure où de nombreuses définitions parfois contradictoires ont été proposées. En effet la CFAO a pour domaine d'application l'ensemble du processus de conception et de fabrication des entreprises et recouvre donc l'aspect CONCEPTION (bureau d'études, équipes de recherches et développement...), FABRICATION (ateliers...) et LIAISON CONCEPTION-FABRICATION. On peut essayer de définir ainsi indépendamment CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur).

La CFAO pourra être définie comme l'ensemble des outils d'aide informatique aux bureaux d'études et de méthodes depuis l'élaboration du cahier des charges jusqu'à l'établissement des documents nécessaires à la fabrication. Cette définition est la plus générale et permet de considérer la CFAO comme l'ensemble des aides même très ponctuelles apportées à l'entreprise jusqu'à la réalisation du produit (pris dans un sens large).

Deux autres définitions de la CFAO, plus proches de la technique informatique, consistent à dire:

Pour la première, que la CFAO est une technique dans laquelle l'homme et l'ordinateur sont rassemblés pour résoudre des problèmes techniques dans une équipe qui associe étroitement les meilleures qualités de chacun d'eux, de telle sorte que l'équipe travaille mieux que séparément.

Pour la seconde, que la CFAO se préoccupe de la création des données qui décrivent l'objet à convertir par la manipulation de ces données afin d'aboutir à une forme achevée de la conception, et de la génération des informations nécessaires à la fabrication de cet objet .

Ces deux définitions sont intéressantes, car elles permettent d'introduire deux notions importantes :

- le dialogue homme-machine :

C'est à travers ce dialogue que pourront être utilisées au mieux les qualités de l'homme (esprit de synthèse, invention, prise en compte de notions qualitatives) et de l'ordinateur (rapidité de calcul, possibilité de traiter un grand nombre de données à grande vitesse, sorties graphiques, interfaces vers d'autres matériels...) ;

-le modèle, que l'on définira comme la représentation informatique de l'objet en cours de conception ou de fabrication et qui jouera un rôle central dans les systèmes de CFAO. [4]

I.2.2 Les modèles CAO :

Pour tirer de la commande numérique tous les avantages qu'elle pouvait offrir, on s'est rapidement rendu compte qu'il fallait associer, à l'automatisation du processus de fabrication, celle de la conception ; c'est ainsi qu'apparurent les modèles intégrés de CFAO permettant de faire abstraction du modèle physique de l'objet en le remplaçant par un modèle mathématique afin de définir la forme de l'objet, de simuler son fonctionnement et de préparer sa fabrication.

Le but étant d'obtenir un raccourcissement des cycles de conception et de fabrication permettant d'avoir un gain de productivité. Les modèles, support de l'usinage sont définis, suivant la complexité de la pièce en système 2.5D surfacique ou volumique.

(i) Les systèmes 2 D et 2.5 D :

La construction d'un modèle 2D relève plus du Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) que de la CAO. L'utilisateur construit différentes vues planes de l'objet. Il n'y a aucun lien entre ces différentes vues, ni aucune aide à la construction et aucun test de cohérence. Dans un système 2.5 D. L'utilisateur a en plus la possibilité d'utiliser une dimension préalablement définie dans une vue comme aide à la construction. En travaillant de cette façon, le modèle final est cohérent. Il est également possible de construire, à partir de différentes vues des perspectives et des isométries.

(ii) Les systèmes surfaciques :

La modélisation surfacique permet de représenter la « peau » d'un objet. Les éléments manipulés sont des entités primitives surfaciques (telles que le plan, le cône, le tore, le cylindre, etc.) ou des surfaces complexes.

Les surfaces complexes, permettant de représenter les formes dites libres ou sculptées. Elles ont été initialement développées dans les domaines de la construction navale, de l'aéronautique et de l'automobile. Coons [5] a été l'un des premiers à proposer un modèle mathématique de description de surfaces gauches. L'idée de Coons a été de proposer une formule permettant de déduire l'équation d'un carreau à partir de l'équation de ses courbes frontières, sans tenir compte de la façon dont sont définies ces courbes.

(iii) Les systèmes volumiques :

Les modèles volumiques, ou solides, sont des composants de modèles complets, à la différence des modèles surfaciques qui sont un ensemble de contours ou de surfaces à usiner, dans une opération particulière. Un modèle solide fournit une information complète et sans ambiguïté sur les caractéristiques géométriques et physiques d'un objet. Ces modèles nécessitent des ressources informatiques importantes et ne sont pas exploitables directement pour l'usinage.

(iv) Les machines-outils à commande numérique (MOCN) et leur cinématique :

Une machine-outil à commande numérique est capable de se commander elle-même et de mesurer avec une extrême précision les déplacements de ses organes mobiles, porte-pièce ou porte-outil. Les équipements de commande numérique se caractérisent par le nombre d'axes, c'est-à-dire de mouvements qu'ils permettent de contrôler simultanément. Le contrôle simultané de plusieurs mouvements est nécessaire pour réaliser avec précision une trajectoire curviligne quelconque dans le plan (contrôle de deux axes) ou dans l'espace (contrôle de trois axes au minimum). La commande numérique comporte alors des dispositifs d'interpolation automatique linéaire circulaire (uniquement dans le plan de référence) ou polynomiale. L'axe sous contrôle de la commande numérique peut correspondre à un mouvement de translation ou de rotation. Dans le cas du fraisage, la machine de base comporte trois axes. Un axe supplémentaire est à prévoir si l'on utilise soit une table tournante soit une broche orientable, cette configuration correspond à une machine quatre axes. Dans le cas d'une machine à cinq axes, l'outil à deux degrés de liberté qui contrôlent son orientation angulaire. L'intérêt de ce mode d'usinage est qu'il permet un meilleur accès à la surface à usiner ainsi qu'une amélioration des conditions de coupe. L'essentiel du parc machine local se compose de MOCN trois axes et c'est ce type de machine que nous considérons.

(v) Modes d'usinage :

Les quatre modes d'usinage sont les suivants :

- usinage en 2 axes 1/2

L'usinage en 2 axes 1/2 suppose des interpolations linéaires et / ou circulaires dans l'un des trois plans principaux de référence, alors que les mouvements dans la direction de la normale à ce plan sont effectués séparément. Deux axes au maximum sont synchronisés.

- usinage en mode 3 axes

L'usinage en mode 3 axes assure le déplacement de l'outil en synchronisant les trois translations.

- usinage en mode 4 axes

L'usinage en mode 4 axes associe les caractéristiques du mode 3 axes et un axe de rotation.

Généralement, il s'agit d'une rotation du porte-pièce. Ce degré de liberté supplémentaire permet de modifier l'orientation relative de l'outil par rapport à la pièce pendant la phase d'usinage.

- usinage en mode 5 axes :

L'usinage de surfaces en mode 5 axes impose la mise en œuvre du calcul de la direction (orientation) de l'outil. L'intérêt de ce mode d'usinage est qu'il offre un meilleur accès à la surface à usiner et des meilleures conditions de coupe.

I.2.3 La chaîne numérique en Fabrication Assistée par Ordinateur : [6]

Le processus d'élaboration des pièces par usinage doit permettre de garantir la fiabilité entre la pièce et les spécifications fonctionnelles exprimant l'idée initiale du designer. D'un point de vue de la chaîne numérique, le processus se découple en quatre activités distinctes (figure I-8). On construit tout d'abord un modèle géométrique à partir des spécifications fonctionnelles, c'est le modèle CAO. Il constitue le modèle de référence de la maquette numérique. Ensuite, les trajectoires de l'outil permettant l'usinage de la pièce ou de son empreinte (dans un moule ou une matrice) sont calculées par le module de Fabrication Assistée par Ordinateur. Il est alors nécessaire de générer le programme compatible avec la commande numérique et la machine-outil utilisées par le biais du post processeur. C'est à priori un maillon faible de la chaîne numérique car chaque post processeur est développé spécifiquement pour une interface d'un couple FAO/ MOCN donnée. Ensuite, la trajectoire

est interprétée par la CN qui établit les consignes de déplacement des différents axes de la machine.

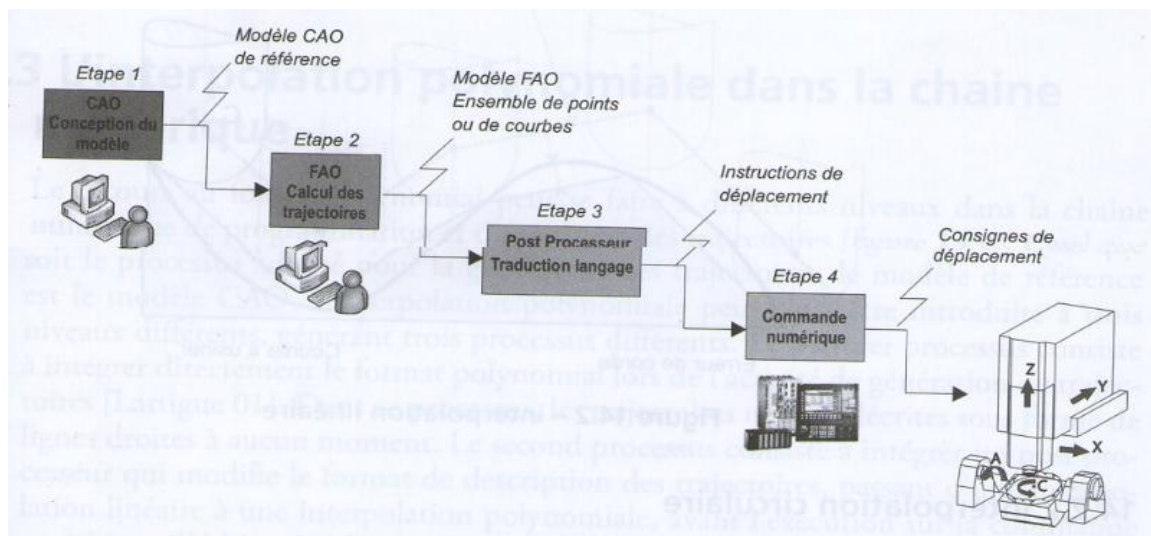


Figure I-8 Chaîne numérique pour la programmation des trajectoires

I.2.4 Les formats de description des trajectoires :

Les directeurs de commande numérique possèdent un langage de description des trajectoires d'usinage qui ne sait pas interpréter le modèle mathématique des courbes utilisé dans les logiciels de CFAO. Il est donc nécessaire de transformer la trajectoire calculée par le logiciel de CFAO. Cette transformation dépend du type d'interpolation gérée par le DCN. Les trajectoires sont actuellement programmables de trois façons différentes : en interpolation linéaire, circulaire ou polynomiale.

I.2.5 L'interpolation linéaire :

Il s'agit, du format le plus communément répandu car il est très simple à établir. L'outil se déplace de point en point, en ligne droite et à une vitesse donnée. La trajectoire d'usinage est transformée en une ligne brisée par le logiciel de CFAO (figure I-9). La distance entre les points d'échantillonnage est fonction de l'erreur de corde (ou tolérance d'usinage) acceptée entre la courbe théorique et le segment de droite suivi. Plus il y a de points, plus l'erreur est faible et plus on approche la trajectoire théorique. Ainsi la distance entre l'enveloppe du mouvement de l'outil et la surface nominale, est nulle uniquement aux points calculés de passage de l'outil. Ailleurs sur la surface, les écarts géométriques résultent de la combinaison de la flèche, de la hauteur de crête et de l'avance par dent. Par contre un nombre trop important de points engendre des fichiers de grande taille et des problèmes de suivi des

trajectoires si la vitesse d'avance programmée est importante. En effet, l'obtention d'une surface de qualité invite à minimiser l'erreur de flèche et donc à diminuer la longueur des segments mais un compromis doit être trouvé vis-à-vis de la capacité de traitement en temps réel de lignes de programme (donc des segments) par la CN. C'est pourquoi s'est développée l'interpolation polynomiale.

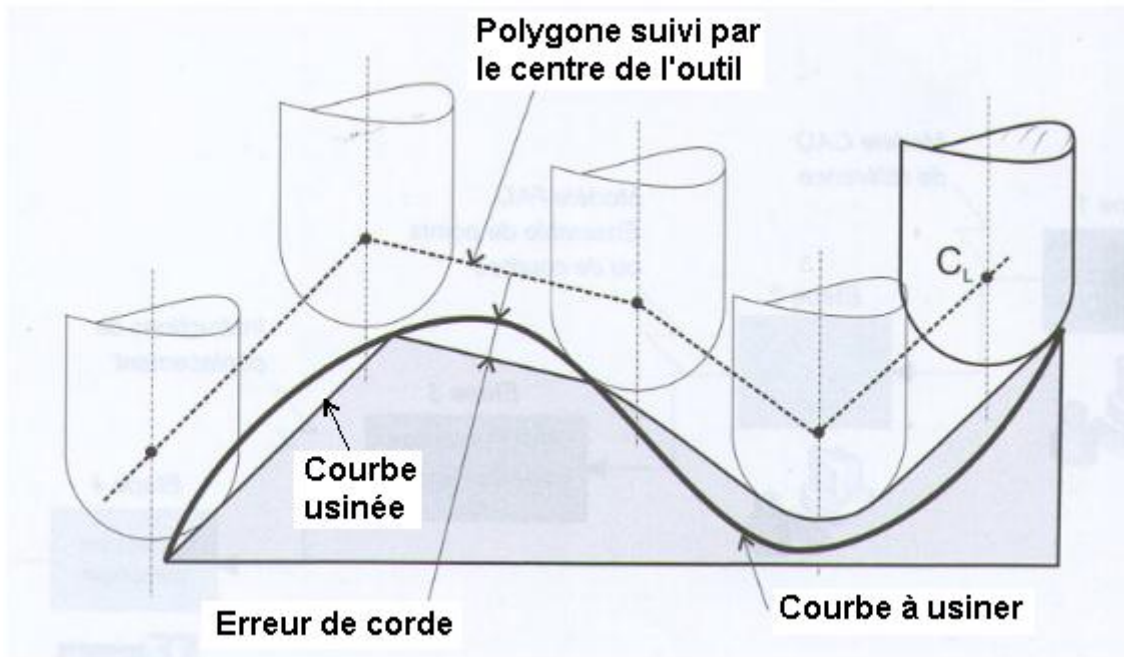


Figure I-9 Interpolation linéaire

I.2.6 L'interpolation circulaire :

L'outil se déplace de point en point, selon des arcs de cercle et à une vitesse donnée. La trajectoire d'usinage est transformée en un ensemble d'arcs de cercles. Cette approche est peu utilisée. Certaines commandes numériques sont capables d'effectuer une interpolation en 3D mais d'autres ne font de l'interpolation circulaire que dans les plans principaux (plan xy ou G17, plan (xz) ou G18, plan (yz) ou G19). Les applications sont donc limitées, par ailleurs, certains logiciels de CFAO sont capables de reconnaître sur une trajectoire des positions circulaires planes et d'y associer des interpolations circulaires.

I.2.7 L'interpolation polynomiale :

Il s'agit de faire passer une courbe au plus près des positions de l'outil posé sur la pièce. La courbe doit respecter l'erreur de corde donnée (figure I-10) et son paramétrage doit être en corrélation avec l'abscisse curviligne pour un meilleur suivi de la trajectoire lors de l'usinage. Auparavant, les portions de trajectoires sans discontinuités sont détectées. En effet, il n'est pas concevable qu'un angle vif soit au milieu d'une courbe continue en courbure, il doit être à la jonction de deux courbes, les courbes sont généralement données sous forme de courbes Bsplines de NURBS ou de polynômes canoniques de degré 3 ou 5, mais ce format n'est pas défini dans le code ISO [iso 6983] et chaque constructeur de CN a donc défini sa propre syntaxe.

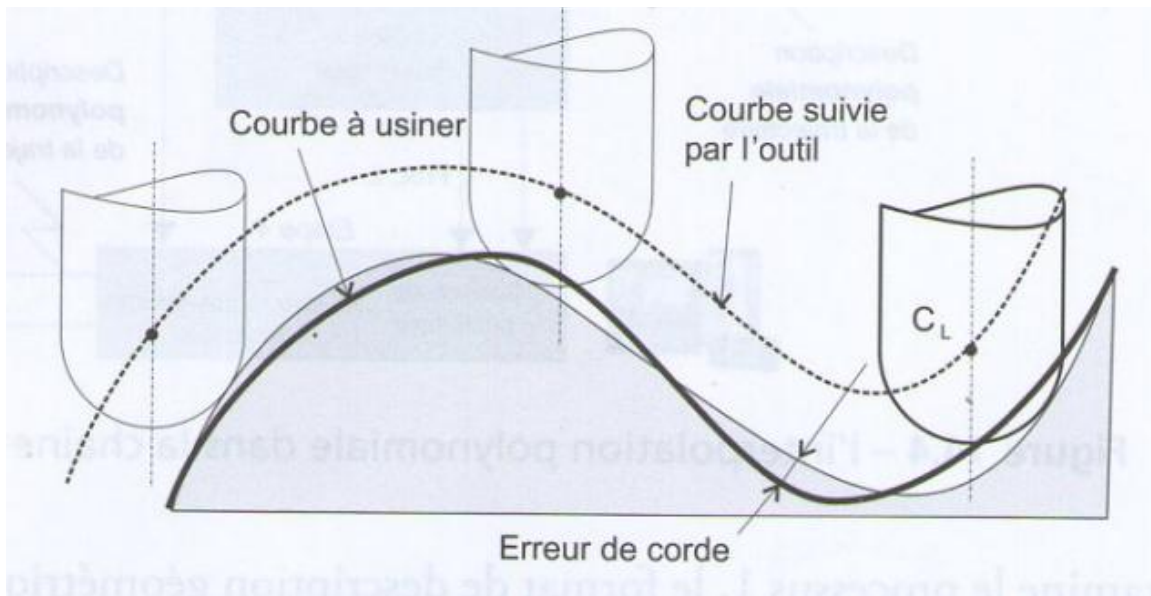


Figure I-10 Interpolation polynomiale

I.3 La machines-outils à commande numérique :

La complexité des surfaces à usiner nécessite diverses orientations et mouvement de l'axe de l'outil et de la pièce dans l'espace. On appelle ces mouvements les degrés de liberté de la machine qui se traduisent par des mouvements de translation (T) et de rotation (R).

Généralement une machine de fraisage est constituée d'axes linéaires qui assurent un déplacement dans le volume de travail suivant 3 directions X, Y et Z. Les axes d'orientation dans l'espace sont le plus souvent des axes rotatifs. La norme la plus souvent utilisés chez les

fabricants est la suivante : les axes sont appelées A, B ou C : A pour un axe tournant autour de X, B autour de Y et C autour de Z [7].

(i) Caractéristiques d'une M.O.C.N :

- La commande numérique est une forme d'automatisation programmable,
- Les actions mécaniques de la machine-outil sont commandées par un programme contenant des données alphanumériques, ces données alphanumériques représentent les positions relatives entre un outil et une pièce ainsi que les instructions nécessaires au fonctionnement de la machine,
- L'outil est un outil de coupe ou tout autre appareil traitant,
- La pièce est l'objet à travailler,
- Les machines à CN sont reprogrammables, les instructions peuvent être modifiées pour faire d'autres tâches.

(ii) Type de machine :

Il existe dans l'industrie, de nombreuses machines ayant différentes structures. Trois types de machines peuvent être distingués :

- **Machines 3 axes :**

Elles sont constituées de trois liaisons prismatiques (p) perpendiculaires entre elles (X, Y, Z).

- **Machines 4 axes:**

En plus des trois liaisons prismatiques (p), les machines 4 axes ont une liaison rotoïde (R) soit autour de X : A, de Y : B ou de Z : C.

- **Machines 5 axes :**

Une cinématique 5 axes consiste à commander un mouvement de trois axes linéaires X, Y et Z en lui associant, combinés simultanément, deux axes rotatifs qui permettent à l'outil de prendre toute orientation dans l'espace.

Les dispositifs permettant de réaliser les déplacements sur 5 axes sont assez variés, on distinguera trois types :

RRPPP : Ce type correspond aux machines disposant d'un plateau assurant 2 rotations.

Exemple :

- Les machines à plateau tilting : 2 axes rotatifs sur la table, c'est une configuration de machine 5 axes à broche verticale et table bi-rotative AC.

PPRR : Ce type correspond aux machines où deux rotations qui sont situées au niveau de la broche. Ces machines sont appelées (à tête twist) :

- Les machines à tête twist : 2 axes rotation sur la tête, tête B/C, tête A/C.
- Les machines universelles : On appelle tête universelle des machines dont les 2 axes sont situés sur la tête et sont concourants.

RPPRR : ce type correspond aux machines dont un axe de rotation est situé sur la tête et un autre au niveau de la table, généralement le plateau est un axe C : tête B et plateau C ou tête A et plateau C.

(iii) Caractéristiques des applications de la CN :

- Production par lots : Taille de lots petite à moyenne (de 1 à plusieurs centaines d'unités)
- Commandes répétées : Des lots de mêmes pièces sont fabriqués à des intervalles de temps aléatoires ou périodiques
- Géométrie de pièces complexes : Surfaces courbées complexes telles que les ailes d'avion et les aubes de turbines

- Grande quantité de métal à enlever de la pièce à usiner : Le volume et le poids des pièces usinées sont réduits par rapport au brut
- Plusieurs opérations d'usinage séparées sur la pièce : L'usinage manuel de telles pièces nécessiterait plusieurs réglages avec une qualité inférieure.
- La pièce est dispendieuse : Lorsque la pièce brute est faite d'un métal cher, ou que les rebuts sont extrêmement chers

(iv) **Avantages des machines à CN : [8]**

- Réduction du temps improductif,
- Accroissement du degré de précision et de répétabilité,
- Réduction des taux de rebuts,
- Réduction de la nécessité de contrôle,
- Possibilité de traiter des géométries complexes,
- Facilité d'adapter les changements techniques,
- Réduction des temps de mise en production,
- Réduction des stocks,
- Réduction des espaces requis.

(v) **Inconvénients des machines à CN :**

- Coûts d'investissement élevés
- Plus d'effort doit être fourni pour la maintenance
- Nécessité de programmation des équipements de CN

Une plus grande utilisation des équipements à CN doit être faite pour maximiser leur rentabilité

I.4 La retro-conception :

I.4.1 Introduction :

La rétro-conception et la fabrication des surfaces à géométrie complexe sont devenues une pratique courante en milieu industriel. Ces surfaces peuvent être conçues par l'une des deux méthodes. Soit la méthode directe qui consiste à faire un relevé d'une dimension à partir d'une référence puis on utilise un logiciel de CAO, soit la méthode indirecte qui consiste à traiter une représentation discrète d'un objet modèle pour aboutir à son modèle CAO. En réalité, beaucoup d'objets et de pièces sont créés avant que leur modèle CAO ne soit donné. En se basant sur ces objets physiques, on peut passer à la génération de leur modèle CAO qui rend la sauvegarde, la modification, la fabrication, l'inspection automatique, la vérification des prototypes et l'analyse plus facile et plus rapide. Le contrôle, par définition, est la comparaison des résultats de la mesure à la définition du produit dans le but de vérifier la conformité de ce dernier face aux intentions de fabrication. L'automatisation de cette fonction est actuellement basée sur une association d'une surface représentant l'élément géométrique de forme idéale à un nuage de points issu d'un procédé d'acquisition représentant la géométrie réelle de la surface.

La comparaison de cette surface associée avec son modèle théorique permet d'identifier les défauts de fabrication ; ainsi procéder aux corrections nécessaires du procédé utilisé.

Dans l'état actuel des logiciels de métrologie, le contrôle des surfaces élémentaires (plan, cylindre, cône, etc....) n'est plus un grand problème. En revanche le contrôle des surfaces gauches reste à maîtriser. C'est dans cette optique que se place notre travail et qui consiste à élaborer une procédure servant à la modélisation et au contrôle des surfaces gauches en vue d'un recalage des moyens de production.

I.4.2 Construction d'un modèle :

Les domaines d'application de la vision par ordinateur sont divers: reconnaissance de formes, inspection d'objets industriels, poursuite d'objets en temps réel, Ces applications nécessitent à la fois une bonne représentation interne de la tâche à effectuer ainsi que des données à manipuler, d'où la nécessité de définir un modèle de référence.

Ce modèle peut être : soit de type descriptif, dont les informations complètes permettent aussi bien d'effectuer l'inspection d'objets industriels que de générer des images de synthèse, soit de type discriminatoire où les informations du modèle sont utilisées pour des applications de type Reconnaissance de Formes. Nous allons nous intéresser maintenant aux modes de création des modèles 3D, ainsi qu'aux critères utilisés pour leur évaluation.

Pour construire un modèle approprié à l'application, il existe deux possibilités. La plus simple est d'adapter un modèle préexistant, l'autre consiste à créer le modèle à partir des données disponibles [9].

(i) Adaptation d'un modèle préexistant :

Dans beaucoup d'applications (essentiellement industrielles) les objets à traiter sont déjà prédéfinis et disponibles dans une base de données (base de données CAO, par exemple).

Ces bases de données qui ont l'avantage d'être complètes et exactes peuvent être ainsi exploitées dans leur intégralité ou dégradées, adaptées, améliorées ou restructurées en fonction de l'application.

(ii) Création d'un modèle :

Au contraire, lorsqu'il n'existe pas de modèle de l'objet traité, il est nécessaire d'en construire un, en exploitant les informations données par des capteurs de vision 2D ou 3D.

Vision 2D :

La construction du modèle d'un objet, s'appuie sur l'utilisation de caractéristiques extraites d'images 2D de l'objet, prises à des points de vue différents (coins, arêtes, ...), entre lesquelles sont établies des relations structurelles. A partir de ces caractéristiques, est bâti un modèle homogène aux données de l'image de la scène à traiter.

Vision 3D :

La vision 3D fournit pour un objet un ensemble de points 3D décrivant ses surfaces. A partir de ces points 3D, peut être construite une triangulation de l'objet, le nombre de triangles créés étant optimisé en fonction de la précision du modèle souhaitée.

On peut également engendrer des modèles surfaciques plus complexes, en segmentant l'ensemble de points 3D. Chacun des sous-ensembles obtenus est interpolé par une surface

plus ou moins complexe (plan, ..., surface NURBS). Cette méthode, appelée Ingénierie inverse, permet à partir de la vision 3D, de produire un modèle géométrique de l'objet numérisé, au format des logiciels de CAO.

Le modèle ainsi constitué, en vision 2D ou 3D, est une approximation de l'objet réel.

L'efficacité de l'application utilisant le modèle dépendra de la richesse et de la précision des détails de la description ainsi obtenue, étroitement liées à la structure et à la qualité de mesure du capteur utilisé. Cette technique permet la constitution de modèles descriptifs d'objets non manufacturés, ou de forme complexe difficilement modélisables par d'autres méthodes. Cependant la lourdeur de construction, la cohérence et la précision de description de l'objet limitent parfois l'utilisation de tels modèles.

I.4.3 La rétro-conception des objets physiques :

L'utilisation d'une modélisation 3D cinématique au service de la conservation du patrimoine industriel et technique est un domaine en émergence.

L'idée initiale des maquettes numériques de patrimoine technique et industriel consiste à utiliser les logiciels de conception de la CAO-3D pour étudier des machines du passé, des mécanismes techniques, des processus de production industrielle, ou encore des matériels scientifiques anciens.

C'est en quelque sorte retourner l'axe des temps et effectuer de la rétro conception. La maquette virtuelle ainsi réalisée apporte une grande fidélité dans la restitution grâce à la qualité de cet outil d'aujourd'hui très utilisé dans le domaine des sciences de l'ingénieur.

La maquette virtuelle constitue en premier lieu un acte de capitalisation des connaissances, rassemblant des informations mécaniques statiques (dimensions des différents éléments), des informations d'assemblage (liaisons entre les pièces, mécanismes), des informations dynamiques et des possibilités d'évaluation des pièces en fonctionnement (résistance des pièces,...) [10].

Par ailleurs, il est aussi nécessaire de comprendre l'objet étudié dans son contexte historique, social, scientifique et technique.

(i) Principe de la rétro-conception :

Le principe de la rétro-conception repose sur la prise d'un nuage de points issu de la surface de l'objet à scanner numériquement ou à palper mécaniquement. Ce nuage de points est traité au travers des logiciels de reconstruction de surfaces permettant d'abord de construire un modèle polygonal (utilisé dans l'usinage, la simulation) et par la suite de générer une surface NURBS, qui est exporté vers un logiciel CAO, l'objet défini numériquement pourra être modifié, analysé et adapté à son environnement et à son architecture interne.

(ii) Les différentes raisons d'utiliser la rétro-conception :

1. La conception originale n'est pas supportée par une documentation suffisante ou adéquate.
2. Le modèle original de CAO n'est pas suffisant pour soutenir des modifications et/ou les procédés de fabrication courante.
3. Le fabricant original n'existe plus ou ne fabrique plus le produit, mais il y a des besoins pour le produit.
4. Composants usés ou cassés pour lesquels il n'y a aucune source d'approvisionnement.
5. Renforcement des fonctionnalités.
6. Analyse des fonctionnalités des produits des concurrents.
7. Amélioration de la performance et/ou les fonctionnalités du produit.
8. Manque de pièces additionnelles (pièces de rechange).
9. Actualisation des matériaux ou des processus de fabrication désuets.

(iii) L'objectif de la rétro-conception :

La rétro-conception a pour objectif :

- de reconstruire un modèle numérique CAO, à partir d'un objet existant,
- de comparer la géométrie du modèle physique à celle du modèle numérique (théorique), à partir d'une fabrication ou d'une duplication rapide (issue d'une conception assistée par ordinateur dans laquelle le modèle est défini).

La rétro-conception est particulièrement avantageuse pour les objets qui possèdent une géométrie ou une forme complexe difficilement modélisable ou impossible à modéliser dans

un logiciel CAO. De tels cas se présentent souvent lorsque les concepteurs créent des objets en employant l'argile, le plâtre, le bois, ou le caoutchouc de mousse... sans dimensions préétablies. Reproduire le modèle CAO pourrait représenter une tâche colossale, et ce, sans aucune garantie que ce modèle CAO sera suffisamment fidèle au modèle sculpté. La rétro-conception fournit alors une solution à ce type de problèmes.

(iv) **Technique de mesure avec contact [10] :**

1) Méthodes directes :

Les méthodes directes consistent à faire un relevé d'une dimension à partir d'une référence.

On peut citer différents moyens de mesures basée sur ce principe :

- **Appareils à traits :** le mètre
- **Appareils à vernier :** le pied à coulisse, colonnes de mesures.
- **Appareils à vis micrométriques :** le micromètre

2) Méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes sont associées à un relevé à l'aide d'un capteur de l'écart entre une pièce à mesurer et un étalon (pièce de référence), c'est donc une mesure par comparaison.

On peut citer différents moyens de mesures basée sur ce principe :

- **Machines à mesurer tridimensionnelles [11]:**

La production automatisée a connu ses dernières années un développement considérable dans toutes les phases de la conception au contrôle, en passant par la fabrication. De ce fait, la conception et la fabrication des surfaces gauches sont devenues une pratique courante dans les milieux industriels ; ainsi la problématique de la conformité des pièces de géométrie complexe se fait ressentir de plus en plus. L'automatisation poussée et la souplesse d'une machine à mesurer tridimensionnelle équipée de palpeur avec ou sans contact a permis

de réduire considérablement le temps d'acquisition et le traitement des mesures en vue de la vérification des spécifications imposées par le concepteur.

Une MMT est une machine à saisir et traiter l'information. Un palpeur se déplace grâce à trois glissières de directions orthogonales et vient au contact des surfaces réelles.

Lors de chaque accostage, le calculateur mémorise les coordonnées X, Y et Z du centre de la sphère de palpation (dans le cas fréquent où le palpeur se termine par une petite sphère).

Les points palpés permettent de déterminer une image de la surface réelle.

A partir des coordonnées saisies, le logiciel de traitement des données va effectuer des opérations mathématiques visant à rechercher les valeurs des dimensions ou des spécifications que l'on cherche à connaître ou à contrôler. Ce traitement mathématique tend à se rapprocher de plus en plus des exigences des normes sans toujours les respecter totalement.

Les architectures les plus fréquemment utilisées sont :

- La structure potence : assez bien adaptée aux grands volumes, elle permet d'accéder à toutes les faces de la pièce mais la flexion du bras lui donne une précision limitée.
- La structure cantilever : Particulièrement adaptée aux petites capacités de mesure, elle permet un bon accès à la pièce.
- La structure portique : C'est de loin la plus répandue, elle permet de traiter de grands volumes et d'accéder aisément aux surfaces.
- Il existe deux types de têtes de palpation :
 - Les têtes de palpation dynamique : au moment du contact entre le palpeur et la surface palpée, se produit dans la tête une rupture de contact électrique qui déclenche l'ordre de lecture de la position de la sphère située à l'extrémité du palpeur (en coordonnées X, Y, Z).
 - Les têtes de palpation statique : Le palpeur actionne trois capteurs internes à la tête, qui délivrent en continu des informations sur la situation de la partie active du palpeur. Ces informations permettent le pilotage des moteurs actionnant les différents mouvements de la machine et permettent donc un palpation en continu des surfaces.

Avantage :

- Rugueur de mesurage.
- Incertitudes de mesurage.
- Capacité de mesurage.
- Productivité.

- **Mesure par un bras manipulateur :**

Les bras de mesure peuvent, grâce à ses six degrés de liberté, atteindre n'importe quel point de la pièce au moyen d'un palpeur situé à l'extrémité du bras.

La mise en contact du palpeur avec la pièce, suivi d'une pression sur le détecteur, capture instantanément les informations en 3D, essentielles à la résolution de problèmes de qualité et d'ajustement.

Exactitude de mesure : 30µm en conditions optimales.

Les bras de mesure sont fabriqués avec des composants fiables et standards.

- Bras en structure compensée.
- Equilibrage interne du bras par ressort doubleffet.
- Disponible en version carbone et Aluminium.
- Version vertical standard et suspendu.
- Compensation automatique de la température environnante.
- Encodeur supportant des environnements machine-outils.
- Connection USB vers le PC.
- Existe en version manuelle.

Les bras de mesure peuvent être facilement installés et utilisés, indépendamment de la surface de travail, ce qui nous permet de conserver le détail de la pièce. La précision du système, garantit la fidélité de la pièce recréée. Par ailleurs, pour le traitement des données, l'utilisation Capture est très conviviale et permet de filtrer le nuage de points.

Les logiciels et systèmes de mesures portables 3D assistés par ordinateur permettant de créer des modèles numériques ou de contrôler des pièces par rapport aux modèles CAO originaux, dans le cadre d'applications nécessitant des mesures 3D détaillées.

- **Comparateur mécanique [12]:**

Le comparateur est constitué d'un cadran gradué avec une aiguille pivotant en son centre. Autour du cadran une lunette comportant un ou plusieurs index peut pivoter manuellement. L'index permet à l'utilisateur de matérialiser le point zéro.

Le comparateur dit à course normale comporte un totaliseur qui indique le nombre de tours effectués par l'aiguille. Par exemple, pour un comparateur ayant une course de 10 millimètres, chaque tour d'aiguille représente 1 millimètre. Si le palpeur se déplace d'un millimètre, l'index du totaliseur marquera un.

Le palpeur est constitué de deux parties : la tige et la touche (on trouve aussi le terme "le toucheau". La touche est vissée au bout de la tige. Il est possible d'utiliser diverses formes de touche et ainsi adapter la forme de l'extrémité à celle de la pièce à mesurer.

Le comparateur est constitué d'une tige mobile en translation. Le déplacement de cette dernière est transmis à un dispositif mécanique transformant la translation de la tige en rotation de l'aiguille. L'angle total de rotation est proportionnel au déplacement en translation de la tige.

Pour effectuer une mesure on met le comparateur à zéro à l'aide par exemple d'une cale étalon. Le corps du comparateur étant fixe l'on place la pièce à mesurer sous le comparateur qui indique alors la différence entre le point de référence et la dimension de la pièce mesurée.

(v) **Techniques de mesure sans contact :**

1) **Méthode optique :**

Dans la suite on présentera essentiellement les méthodes optiques comme moyen utilisé pour faire de la reconstruction de composants.

Néanmoins, il existe d'autres méthodes de mesures sans contact : magnétique, ultra-son, capteurs inductifs, capacitifs, magnéto-acoustiques, radar,...

Pour réaliser le capteur optique, on retrouve toujours les mêmes éléments à savoir :

- Une source lumineuse
- Un détecteur de lumière

La source lumineuse peut être naturelle mais bien souvent il s'agit d'une source artificielle, ces sources artificielles sont souvent des sources lasers, le détecteur le plus largement utilisé est la photodiode, cette cellule transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est utilisée en mode photoconducteur, une photodiode présente un temps de réponse très faible.

Les pièces à éclairer absorbent, diffusent et/ou réfléchissent la lumière incidente selon leur couleur, leur état de surface et leur nature (transparente, opaque, isolante ou conductrice), donc selon les caractéristiques de la pièce à digitaliser, il sera peut être nécessaire de prendre des précautions particulières selon le couple pièce/système optique utilisé.

2) Méthode par triangulation :

Les méthodes de mesures de position des points par triangulation sont basées sur la détermination de l'intersection de deux directions.

- Direction de l'éclairage du point à mesurer sur la pièce (par ex: la direction du faisceau laser).
- Direction d'où l'on voit le point éclairé du système de mesure (la direction de visualisation de la caméra).

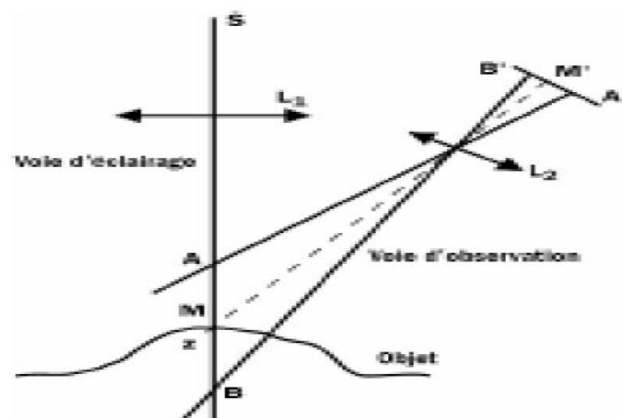


Figure I-11 Principe de la triangulation.

La diode laser S émet un faisceau droit à l'aide d'un collimateur (lentille convergente L_1).

Après réflexion, le rayon incident MM' est focalisé grâce à une lentille convergente L_2 et est capté par une ligne de cellules photosensibles, le capteur photosensible est placé à la même altitude que la diode laser, mais légèrement décalé latéralement de telle sorte qu'un changement d'altitude d'un objet devant le collimateur se traduise par un changement de position du rayon incident au niveau du capteur photosensible.

3) Méthode par projection de franges :

Le principe des méthodes par projection de franges est d'utiliser un projecteur de franges avec une ou deux caméras, le projecteur permet d'éclairer la pièce par des trames (franges) de pas de plus en plus fins afin de désigner les lignes à mesurer et permettre d'enlever les ambiguïtés de mesures.

Le pas ne doit pas être trop fin afin d'éviter un effet de moiré qui pourrait perturber la mesure.

Les images sont alors mémorisées pour chaque réseaux de trames par la (ou les deux) caméra (S).

Le résultat de mesure procure un patch (nuage) de plusieurs millions de points pour une position donnée, la mesure dure quelques secondes et doit être répétée pour différentes positions

Pour repositionner automatiquement toutes les digitalisations des cibles sont alors collées sur la structure de manière aléatoire.

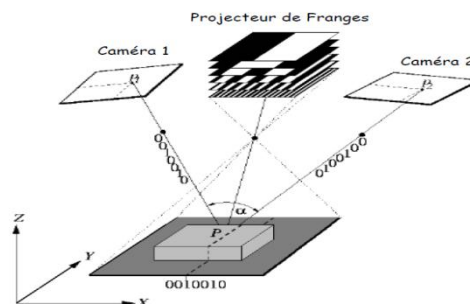


Figure I-12 Principe de la méthode par projection de

4) Méthode de photogrammétrie :

Le mot photogrammétrie vient du grec « photos » (lumière), « gamma ». Cette technique a pour but de déterminer les dimensions, les positions et la forme d'objets, à partir de clichés photographiques (points de vue stéréoscopique).

Par combinaisons mathématiques, ces images fournissent les coordonnées 3D d'une scène

La photogrammétrie est donc une technique de mesure par laquelle les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sont déterminées par des mesures faites sur une ou plusieurs images photographiques prises à partir de positions différentes, Il est alors nécessaire de traiter l'ensemble des points de vue pour reconstituer l'image 3D.

Les points P_i sont les projections des points communs des différentes prises de vue. Les coordonnées 3D de l'ensemble des points sont alors obtenues par triangulation de ces projections et des vues.

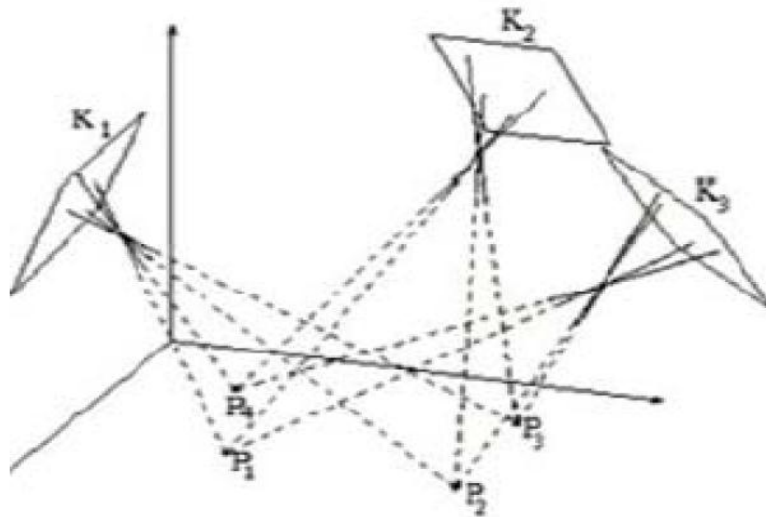


Figure I-13 Principe de la photographie.

5) Méthode Vidéogrammétrique :

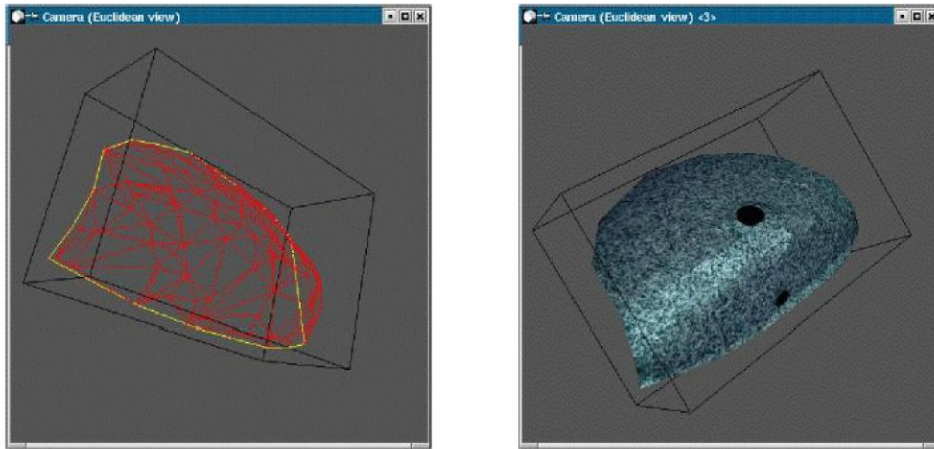


Figure I-14 Méthode de la Vidéogrammétrie.

Le principe de la Vidéogrammétrie est basé sur celui de la photogrammétrie mais en remplaçant l'appareil photo numérique par une caméra numérique (donc une vidéo), ceci permet un traitement en quasi-temps réel et une reconstruction rapide de la pièce

6) Méthode de défocalisation :

Les méthodes de défocalisation regroupent les techniques reposant sur la mesure du flou, lors du processus de formation des images, seuls les rayons réfléchis par l'objet à distance focale du centre optique convergent parfaitement sur le plan image, cette convergence est à l'origine d'une zone nette, alors que l'on observe des zones floues pour les points situés en dehors du plan focal.

La profondeur des points de l'image est déterminée en faisant varier la focale, ou bien en éloignant le capteur de l'objet.

L'acquisition d'images, obtenues pour des hauteurs de focalisation différentes, permet de créer une image de profondeur.

Le système de mesures est composé d'une source lumineuse ponctuelle, d'une lentille de collimation qui permet de réaliser un faisceau parallèle d'une lentille de focalisation (objectif à grande ouverture numérique) qui permet d'éclairer la pièce à mesurer avec un point lumineux très petit (de l'ordre de la résolution de l'appareil).

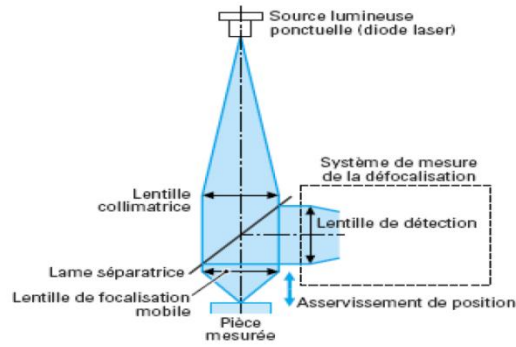


Figure I-15 Principe de la défocalisation.

7) Méthode du temps de vol :

La télémétrie par mesure de temps de vol (télémétrie laser) est une méthode de mesure sans contact basée sur la mesure du temps de propagation d'une impulsion lumineuse entre le capteur et la pièce à mesurer.

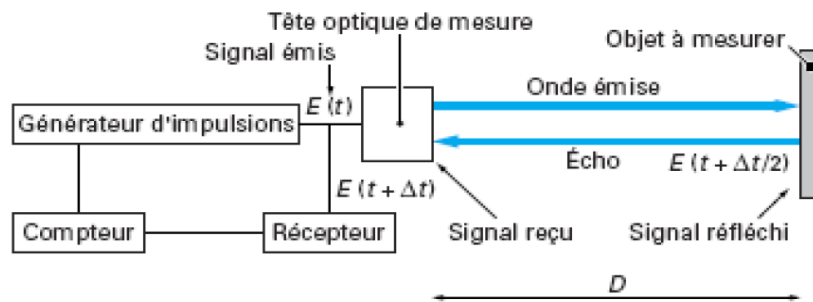


Figure I-16 Principe de la méthode du temps de vol.

- Pour mesurer le temps de propagation qui peut être très court (1 ns pour une distance à mesurer de 15 cm), deux méthodes sont utilisées :
- Pour les grandes distances : une impulsion lumineuse très courte est produite, soit directement par une diode laser, soit à l'aide d'un modulateur optique et un tube laser. Un détecteur mesure l'écho lumineux, le temps entre l'émission et la réception est mesuré

- pour les courtes distances: l'amplitude du faisceau lumineux émis est modulée sinusoïdalement, le retard de phase de l'écho lumineux recueilli est mesuré.

8) Tomographie :

Le principe de la tomographie à rayons X est de placer la pièce à analyser dans l'appareil.

Cet appareil va alors tourner autour de la pièce couche par couche et émettre des rayons X à travers celle-ci.

Pour chaque position angulaire, on sauvegarde la réponse et on reconstitue pixel par pixel l'intersection de ces réponses.

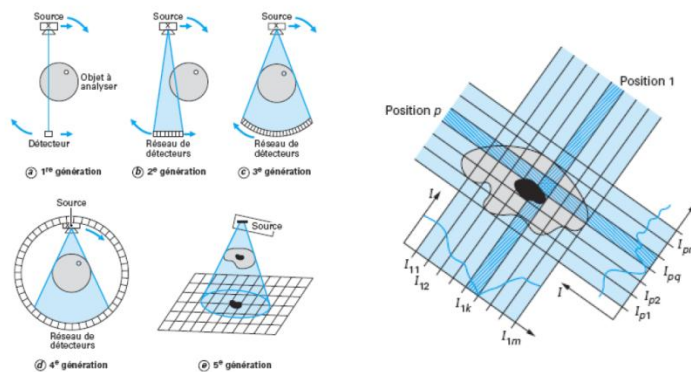


Figure I-17 Principe de la méthode de Tomographie.

(vi) Description de la problématique scientifique :

Actuellement, les systèmes de numérisation 3D permettent l'acquisition de grands nuages de points représentatifs de la peau d'un objet. De ce grand nombre d'informations, il faut extraire une modélisation cohérente de la surface réelle de l'objet, en vue de son exploitation en rétro conception, copiage ou encore contrôle.

(vii) Outils de reconstruction :

Les outils de la rétro-conception sont doubles :

1. Les techniques (physiques) de mesures.
2. les techniques (numériques) de reconstruction de la pièce.

Une fois qu'une (ou plusieurs) des techniques de numérisation a été effectuée, il est donc nécessaire de procéder à des outils de traitements de ces nuages de points, ces outils permettent :

- L'alignement et le recalage de différents nuages de points.
- Les corrections éventuelles : nettoyage, suppressions des aberrations, lissage.
- La transformation de nuage de points en maillage STL.
- Les traitements du maillage : réduction des bruits, remplissage des trous.
- La fermeture du maillage.
- La création des surfaces et donc la rétro conception de la pièce digitalisée.

(viii) Les difficultés :

- Les méthodes de numérisation peuvent être assez simples et très rapide, notamment les méthodes par triangulation.
- On notera donc que l'acquisition des nuages de points ne pose pas de problèmes lorsque l'on dispose du matériel nécessaire.
- Par contre, le traitement des nuages de points et surtout la reconstruction des surfaces puis des volumes est bien plus complexe qu'il n'y paraît.
- La technicité est donc associée à l'outil logiciel.

I.4.4 L'intégration de la CFAO :

La réalisation d'une pièce à l'aide d'une machine-outil à commande numérique (MOCN) s'effectue à travers une chaîne continue d'informations. On parle dans ce cas de la Conception et de la Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO).

Face à la concurrence internationale et l'accélération du progrès technique, les entreprises doivent continuellement améliorer leur productivité ainsi que la qualité de leurs

produits. Les logiciels de conception et de fabrication assistée par ordinateur (CFAO) deviennent des outils indispensables, d'une part, pour l'automatisation de la production, d'autre part, pour la génération automatique du programme CN. Ces logiciels offrent actuellement un large éventail de typologies d'opérations associés à des générateurs de trajectoires d'usinage de plus en plus performantes. Cependant, une méthodologie permettant de réaliser un choix optimisé du processus d'usinage et ses différents paramètres devient nécessaire. Ceci permettra aux systèmes FAO de générer les trajectoires optimales de l'outil de coupe.

I.4.5 Conclusion :

La rétro-conception est basé sur la prise d'un nuage de points issu de la surface de l'objet à scanner numériquement ou à palper mécaniquement. Ce nuage de points est traité au travers des logiciels de reconstruction de surfaces permettant d'abord de construire un modèle polygonal (utilisé dans l'usinage, la simulation), qui est exporté vers un logiciel de CAO. L'objet défini numériquement pourra être modifié, analysé et adapté à son environnement et à son architecture interne.

L'usinage des surfaces complexes par une machine à commande numérique nécessite une chaîne continue d'informations.

Chapitre 2

Modèle existant

II. Modèle existant :

II.1 Avant-propos :

Dans le but de faire avancer notre travail nous avons vu qu'il serait important d'utiliser les moyens de notre école et de faire la rétro-conception d'un arbre à cames usé.

L'objectif de ce chapitre est de relever le profil des cames d'un modèle existant, en utilisant les outils de retro-conception et de traiter les résultats afin de proposer un profil très proche du profil réel.

Pour atteindre cet objectif on a utilisé les dispositifs suivants pour la retro-conception :

- Pour la mesure :
 - un comparateur au 1/100 pour mesurer la levée
 - un deviseur au 1/10 ° pour la rotation et la mesure des angles
 - la table d'une fraiseuse pour la mesure les côtes axiales des différentes cames

- Pour le traitement numérique :

Le traitement numérique se fait à l'aide d'un logiciel de programmation et d'interprétation (MATLAB), la méthode consiste à proposer une fonction analytique (Gauss) paramétrée qui a une allure proche du profil de la came. Pour effectuer cette tâche on a élaboré un programme en MATLAB qui fait ce travail (ANNEXE B). Il existe des logiciels, tel que REVWORKS, qui le font directement.

Le programme a comme paramètres d'entrée un fichier qui contient les valeurs expérimentales (angle de rotation et déplacements), et comme paramètres de sortie un fichier qui contient le profil de la came (en coordonnées y,z).

II.2 Modèle existant :

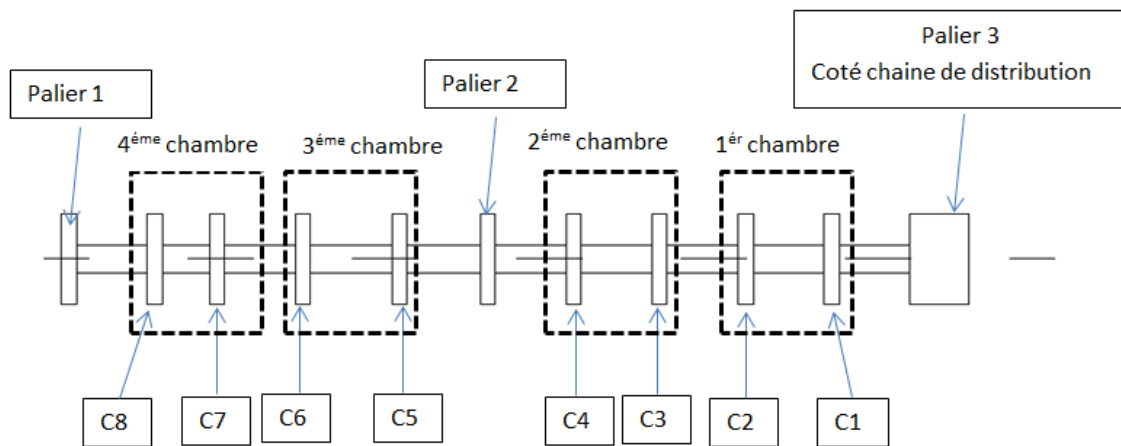


Figure II-1-arbre à cames utilisé

Le modèle existant est un arbre à came d'un moteur 4 temps 4 cylindre (figureII-1), cette pièce est usée et nécessite une rectification afin de la réutiliser.

Ce modèle possède 8 cames (4 admission et 4 échappement), l'ordre d'allumage est donc 1-3-4-2.

La figure si dessous nous donne l'ordre et la répartition des cames le long de l'arbre à cames



Cames échappement : C1-C4-C5-C8

Cames admission : C2-C3-C6-C7

II.3 Profil maillé de la came :

La reconstruction du modèle 3D consiste à retrouver les coordonnées du profil de la came dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'arbre à cames.

L'exploitation du nuage de points après traitement numérique permet d'introduire le modèle dans l'espace d'un logiciel de CAO.

Procédure suivie :

La procédure utilisée pour la prise d'un relevé topographique consiste à faire tourner l'arbre à cames autour de son propre axe et de mesurer la valeur de la levée (côte radiale) en fonction de l'angle de rotation.

Le modèle physique a été positionné et maintenu par un montage mixte à l'aide du mandrin d'un deviseur (figure II-2-A) et d'une contre-pointe (figure II-2-B) sur la table longitudinal d'une fraiseuse, on fixe le palpeur (comparateur) sur le corps (point fixe) de la fraiseuse et on fait varier la valeur de l'angle du diviseur de 5° à 0.5° suivant les zones et on relève le déplacement de l'aiguille du palper, le tableau (T1) dans l'annexe 1 nous donne le déplacement en fonction de l'angle de rotation.



A- Diviseur



B- Poupée mobile

Figure II-2 diviseur et poupée mobile

Le graphe suivant nous donne la variation du déplacement du palper en fonction de l'angle de rotation de la came :

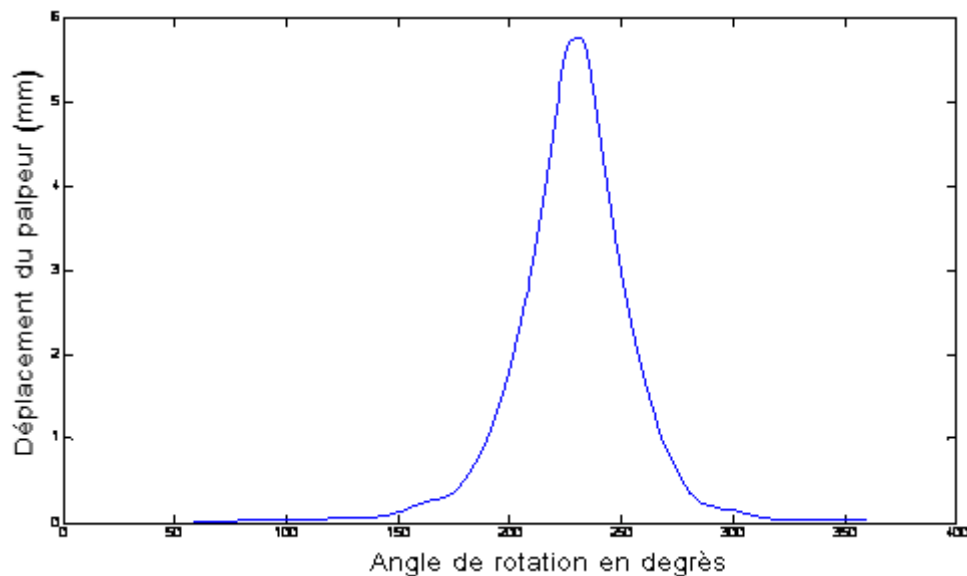


Figure II-3- Le déplacement en fonction de l'angle de rotation

En examinant cette courbe on constate qu'il y a des zones non régulières où la variation est moins bonne, ce problème est dû à la technique de mesure et à l'érosion de la pièce car ces zones sont soumises à des forces de frottements. Notre devoir est de corriger ce problème en se basant sur le traitement des résultats expérimentaux à l'aide d'une méthode numérique.

II.4 Traitement numérique des résultats expérimentaux:

Le traitement des résultats expérimentaux se fait par l'utilisation d'un logiciel de calcul. La méthode consiste à proposer une fonction analytique qui a une allure proche du profil tout en introduisant des paramètres qu'on fait varier, la fonction analytique qui satisfait cette condition est la fonction de Gauss composée (dite cloche de Gauss).

La fonction de Gauss composée s'écrit sous la forme suivante :

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2}$$

Où a_i , b_i et c_i sont des paramètres à déterminer.

y : déplacement.

x : rotation.

La procédure consiste à faire la lissage des résultats expérimental.

Pour déterminer les paramètres de la fonction de gauss il suffit de créer un programme qui détermine ces paramètres (Voir Annexe B). Les valeurs de ces paramètres sont données par le tableau II-2 ci-dessous.

n	1	2	3
a	226.9	5.76	353.7
b	230.1	206.7	229.4
c	15.21	5.819	35.44

Tableau II-1 Valeurs calculées des paramètres a_i , b_i et c_i .

La figure suivante montre les deux allures (expérimentale et numérique).

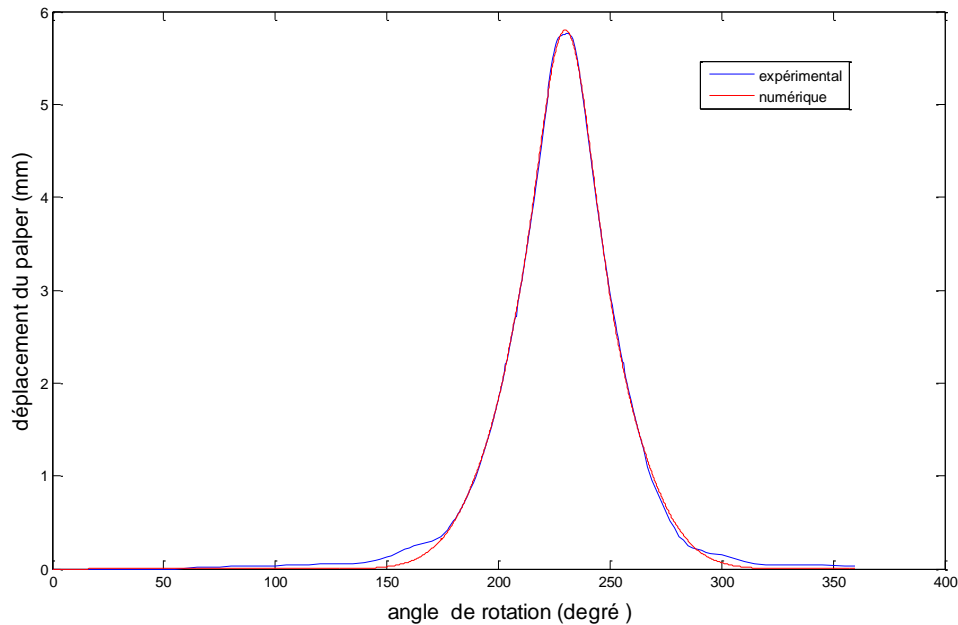


Figure II-4 Comparaison entre le profil expérimental et le profil numérique.

Cette figure montre clairement que la fonction analytique choisie est acceptable, on remarque qu'il y a superposition sur tout le profil excepté quelques intervalles. La différence entre l'expérimental et l'analytique est estimée entre 0 et 5/100 mm.

II.5 Reconstruction du modèle 3D :

Le traitement numérique nous a donné un nuage de points homogène, cette homogénéité va nous aider à créer un modèle 3D très proche du modèle réel.

La reconstruction du modèle 3D passe par 3 étapes :

- a) L'introduction du nuage de points dans l'environnement d'un logiciel de CAO (Solidworks).
- b) La création du maillage.
- c) Le bossage du maillage.
- d) La reconstruction du modèle entier

II.5.1 Introduction du nuage de points dans un logiciel CAO (Solidworks) :

L'introduction des résultats dans le Solidworks se fait à l'aide de la commande « assistant courbures », cette commande permet de créer une courbe à partir d'un data.

La figure suivante montre le résultat obtenu par cette commande.

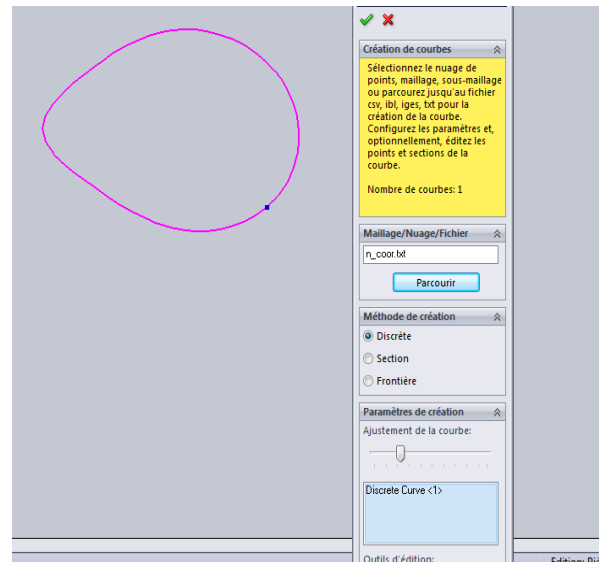


Figure II-5 Effet de la fonction "assistant de courbures".

II.5.2 La création du maillage :

Le maillage va être créé à partir de la courbe créé précédemment, ce maillage est gouverné par des points qui appartiennent à la courbe

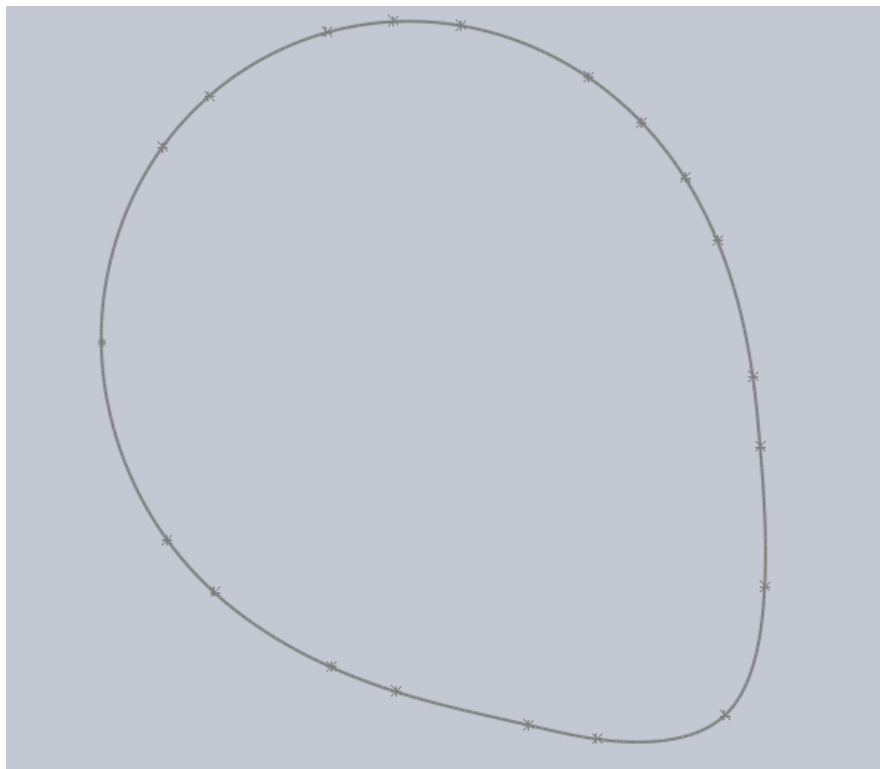


Figure II-6 Forme final du profil après traitement.

On constate que l'outil de maillage n'a pas pris en considération tous les points mais il a pris les points essentiels. Cette technique est importante car elle nous donne la possibilité de créer des maillages avec un minimum de points.

II.5.3 Le bossage du maillage :

C'est la dernière opération pour créer un modèle 3D, elle consiste à créer un bossage à partir du maillage.

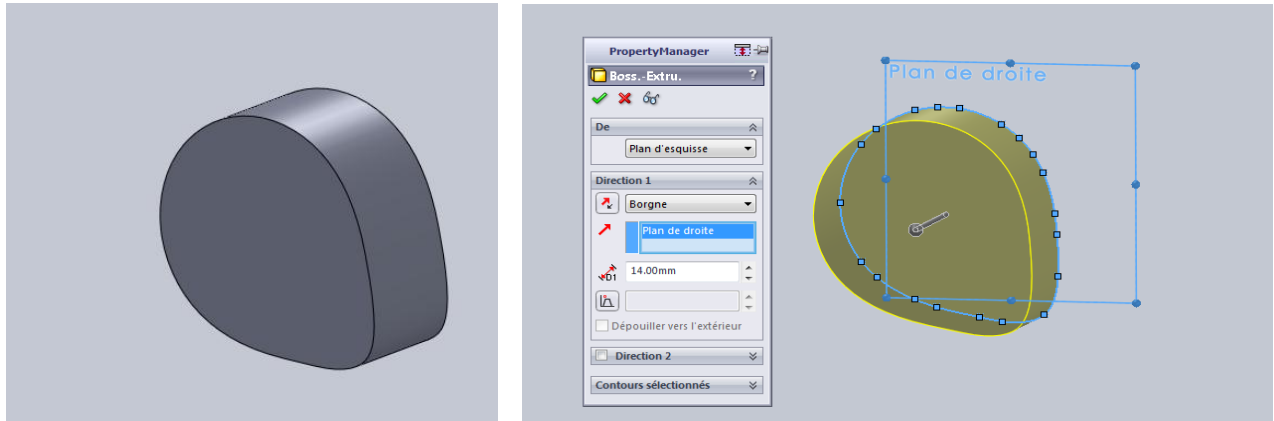


Figure II-7 Effet de la fonction "bossage".

II.6 Reconstruction du modèle entier :

La reconstruction du modèle entier nécessite les angles de déphasage entre les différentes cames.

Pour ce cas il suffit de prendre la première cames à droite C8 (figure 2) comme référence est de mesurer expérimentalement le déphasage.

Le tableau suivant récapitule le résultat expérimental :

N° de la came	8	7	6	5	4	3	2	1
Angle de déphasage	0	117.58	21.83	272.42	0.92	209.75	297.58	181.58

Tableau II-2 déphasage angulaire des cames

II.7 Evaluation d'erreur :

Ces valeurs sont expérimentales, chacune de ces valeurs est entachée d'erreur.

Pour évaluer l'erreur on va procéder comme suit :

Evaluation de la moyenne d'erreur arithmétique au sens des moindres carrée entre l'expérimental et la fonction de modélisation, la méthode sera illustrée dans l'ANNEXE 1.

Les résultats obtenus seront représentés dans le tableau suivant :

Intervalle	[0,360]	[100,200]	[220,240]	[250,320]
Moyenne arithmétique*100 (mm)	3.0964	8.3570	7.6854	2.0145

Tableau II-3 valeurs calculée de la moyenne arithmétique

Evaluation de la moyenne de l'erreur arithmétique dans des intervalles ([130,200], [210,240], [250,320]).

La figure ci-dessus montre la disposition des 8 cames sur un seul axe ainsi que leur déphasage.

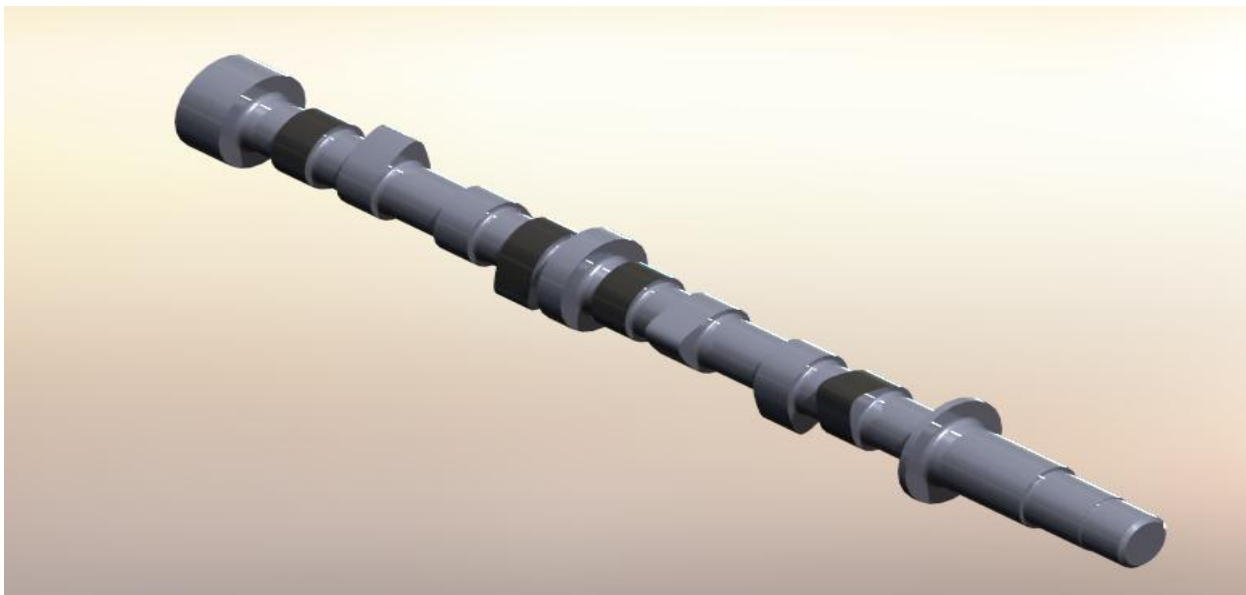
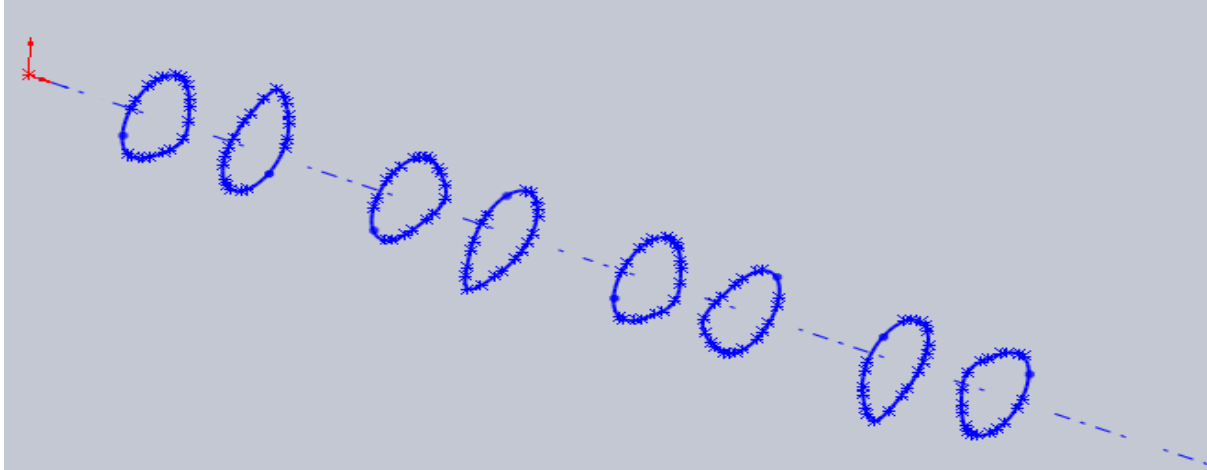


Figure II-8 La forme finale de l'arbre à cames.

Cette pièce sera considérée comme pièce brut, elle nécessite une finition afin de la réutiliser, pour cela on va définir la surépaisseur de finition e , cette quantité dépend de l'état de la pièce (notre modèle physique) (degré de dégradation de la pièce).

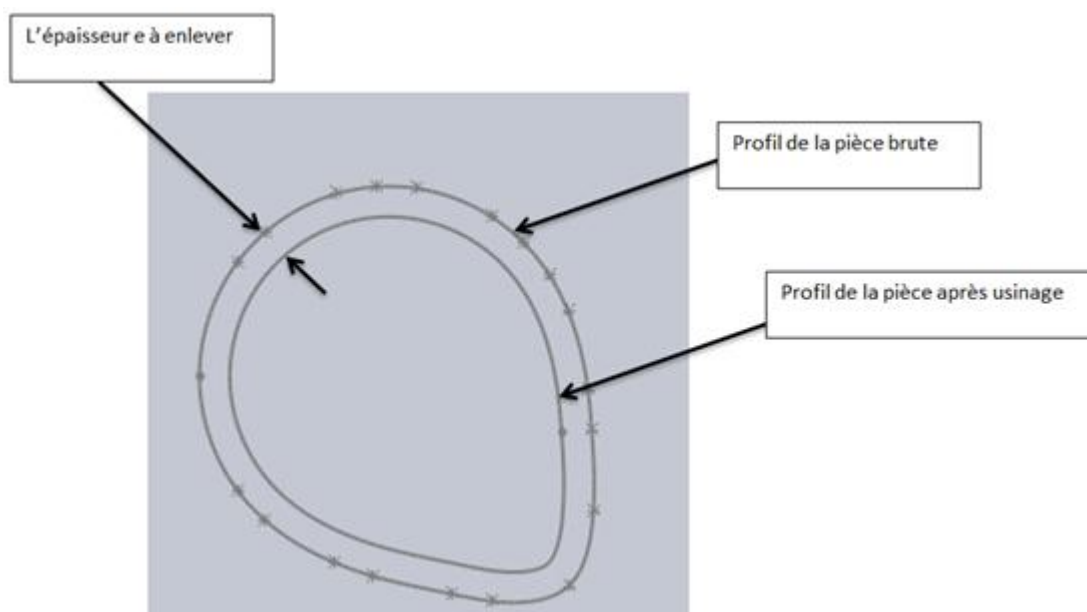


Figure II-9 Le profil de la came après rectification

Pour évaluer cette quantité e il faut maximiser la différence entre le profil réel et le profil après modélisation.

La différence maximale entre le profil expérimental et le profil numérique est de 15/100 mm, pour effectuer une rectification sur l'arbre à came il faut choisir une épaisseur supérieur à 15/100 mm, dans notre cas on peut choisir une épaisseur de 20/100 mm

Si la pièce est trop dégradée on procède à la reproduction complète de la pièce, dans ce cas on garde le profil numérique.

Chapitre 3

Paramétrage

Et Usinage

III. Paramétrage et usinage :

III.1 Avant-propos :

Le paramétrage se fait à l'aide d'un logiciel de CFAO tel que CAMWORKS ou MASTERCAM,

Chaque logiciel de CFAO a ses avantages et inconvénients. Dans cette étude nous allons essayer d'utiliser les deux logiciels et de faire une comparaison afin de proposer la meilleure méthode.

III.2 Paramétrage sur CAMWORKS :

Le logiciel CamWorks de FAO permet après avoir défini les entités d'usinage, de visualiser des parcours d'outil et de générer un programme ISO à l'aide d'un post processeur.

Pour générer les opérations des parcours d'outil, et le code CN de Fraisage, on doit suivre les étapes suivantes, qui sont le minimum requis pour usiner correctement la pièce.

1. Ouvrir un fichier Pièce et ouvrir le volet des formes usinables CamWorks.
2. Définir le brut :

On peut définir le brut de deux façons. La première c'est de définir le brut comme un cylindre qui enveloppe l'arbre à cames, et la deuxième consiste à définir le brut comme une pièce forgé ou moulé. La deuxième consiste à créer une pièce sous un fichier SLT qui sera considérée comme brut et qui a la même forme que l'arbre à cames avec une surépaisseur de fonderie qu'on va enlever par usinage.

Dans notre cas on va travailler avec la deuxième façon.

3. Choix du matériau :

Dans le but de réaliser un prototype même partiel de notre produit nous avons pris, comme matériau, un alliage d'aluminium de nuance 6160. CamWorks appliquera, ensuite, les paramètres de coupe (vitesses et avances appropriées).

4. Définir la machine et la CN :

Le choix de la machine va induire tout le reste des calculs des cycles et du code machine. Les paramètres de la machine sont renseignés dans la base de données technologiques, la capacité (volume usinable), les vitesses (vitesses d'avances et fréquences de rotation Maxi), le nombre d'axes simultanés, le contrôleur qu'utilise-la machine.

Le choix de la machine est nécessaire car on a à faire à un usinage 4 axes donc la machine doit être à 4 axes, l'axe de la pièce (l'arbre à cames) correspond à l'axe des x donc la machine utilisé est une machine à axes de rotation A.

La définition de la machine spécifie le type d'usinage qui doit être réalisé pour le modèle (fraisage) et le contrôleur associé de la machine-outil (post-processeur) pour la création appropriée du programme CN.

5. Configurer la pièce en fraisage : le but c'est de choisir le plan de travail. Dans notre cas le plan choisit c'est le plan de dessus.
6. Insérer formes multi surfaces : les formes multi surfaces correspondent au cames. On définit ces formes en spécifiant soit le profil (la courbe ou la surface de la came), soit en cliquant sur la surface de la came.

III.3 La stratégie d'usinage :

Dans notre cas on n'aura pas besoin de l'ébauche car on suppose que la pièce est déjà usiné (on va procéder à la rectification) donc on passe directement à l'opération de finition.

L'usinage se fait en spirale, came par came, la figure suivante montre une came avec le parcours d'outil en spirale.

L'outil choisie est une fraise plane avec un diamètre de 20 mm.

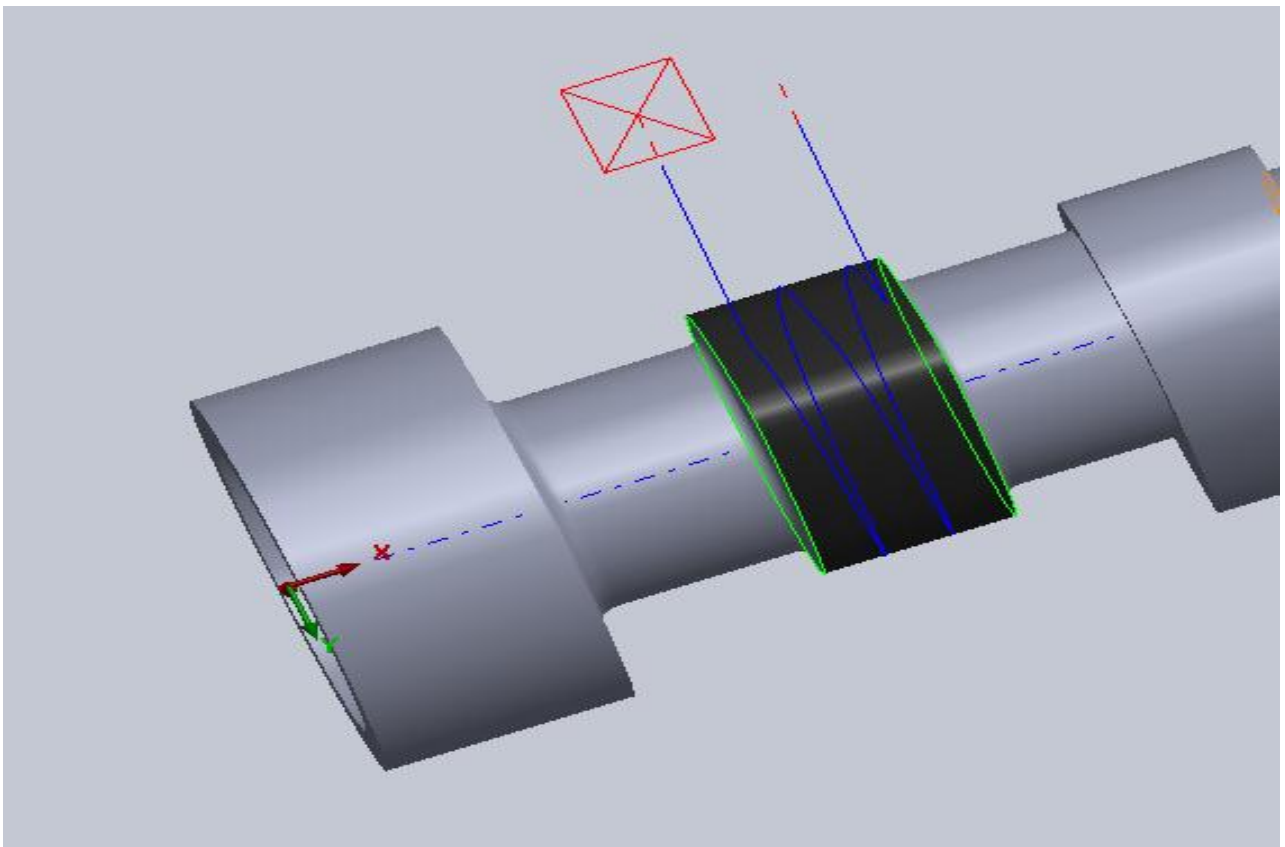


Figure III-1 La stratégie d'usinage en spirale.

La figure suivante montre l'arbre en entier avec le parcours de l'outil.

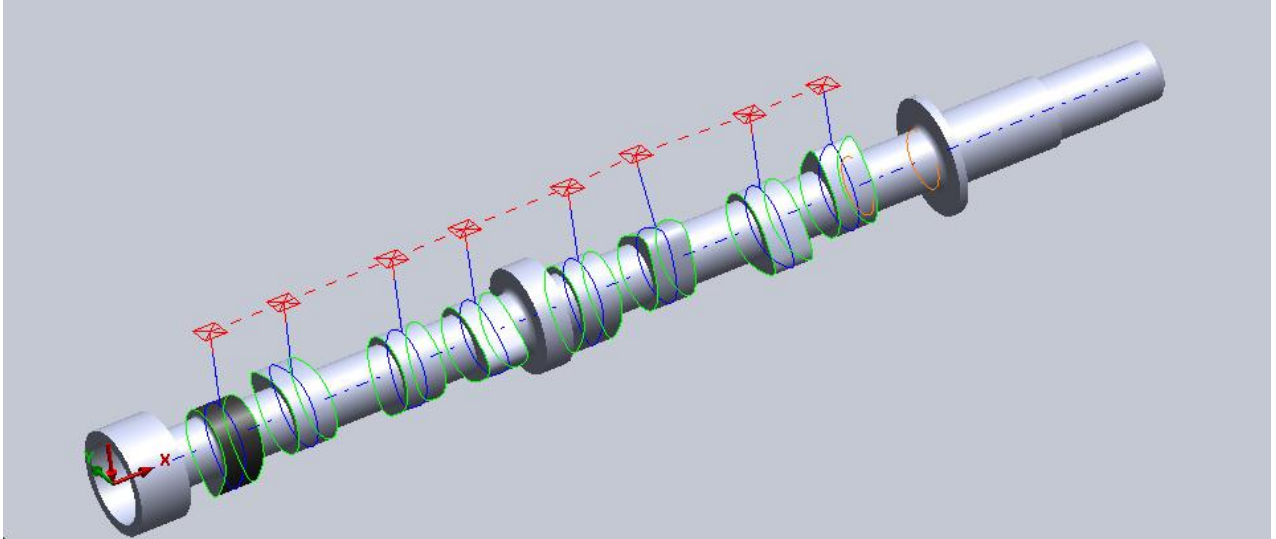


Figure III-2 Parcours de l'outil.

- ✓ La trajectoire en bleu est la trajectoire où l'outil est actif (aminé d'une rotation).
- ✓ La trajectoire rouge est la trajectoire d'avance rapide de l'outil.

III.4 Visualisation de l'usinage :

Les outils de CFAO nous donnent la possibilité de visualiser en temps rapide l'usinage en simulation, cette technique est très importante car elle nous permet de visualiser et de suivre l'évolution de l'usinage, et de corriger tous type de problèmes comme le problème de collision.

La figure suivante montre une simulation d'usinage de notre arbre à came :

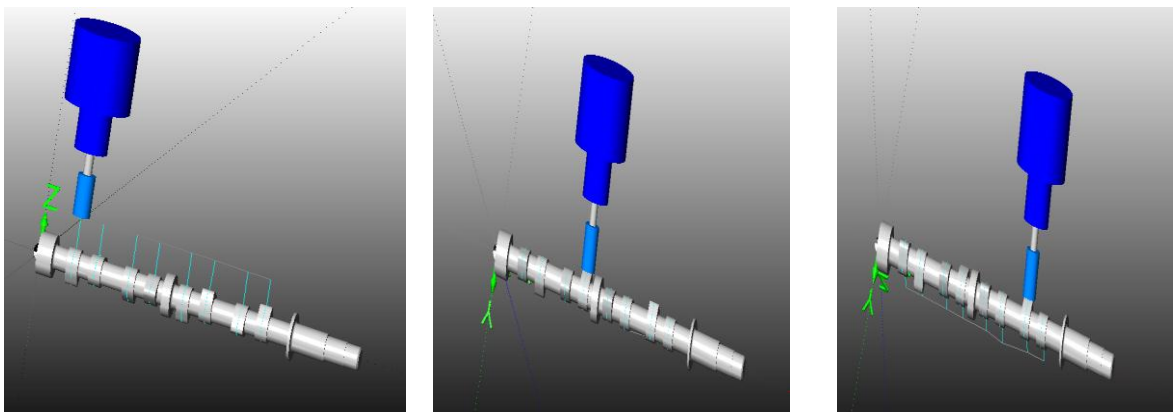


Figure III-3 Simulation d'usinage sur la 1^{er}, la 4^{ème} et la 7^{ème} came.

III.5 Création du programme d'usinage :

Le programme généré ne satisfait pas les conditions imposé (machine 4 axes avec axe A), en visualisant le programme généré par le logiciel on remarque qu'il a travaillé avec l'axe B (V. Séquences 11 et 12 figure III-4).Ce problème est dû au paramétrage du logiciel, si on choisit la méthode « usinage multi surfaces » le logiciel travail par défaut avec une machine 5 axes.

Dans ce qui suit nous présentons quelques lignes du début et de la fin du programme généré par notre logiciel de CFAO en l'occurrence CAMWORKS.

```
O0001
N1 G21
N2 (10 MM 2 FLUTE HSS BALL NOSE E.M.)
N3 G91 G28 X0 Y0 Z0
N4 T41 M06
N5 S666 M03
N6 G90 G54 G00 X41. Y-.229
N7 Y-.186
N8 G43 Z189.1 H41 M08
N9 G01 Y-.085 Z169.1 F5.
N10 Y-.063 Z169.101 B-.7476 F3.333
N11 Y-.22 Z169.108 B-3.6227
N12 Y-.343 Z169.12 B-5.9308
```

Figure III-4 Début de programme

Le début de programme donne les informations d'usinage telles que la vitesse de rotation de la broche, la vitesse d'avance et le diamètre de l'outil.

```
N852 Y.353 Z169.121 B6.3972
N853 Y.23 Z169.109 B4.0857
N854 Y.108 Z169.102 B1.761
N855 Y-.079 Z169.1 B0
N856 Y-.23 Z189.099 F5.
N857 G00 Y-.283
N858 Z196.599 M09
N859 G91 G28 Z0
N860 G28 X0 Y0
N861 M30
```

Figure III-5 Les dernières lignes du programme.

CAMWORKS nous permet aussi de calculer l'état de surface à obtenir. La figure III-6 visualise l'état de surface de la came après usinage dans le cas d'une rotation maximale de 5°.

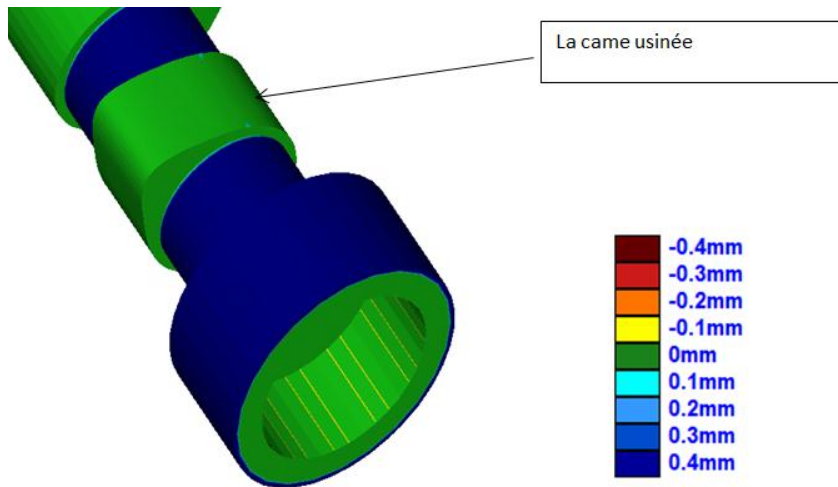


Figure III-6 Etat de surface pour un angle de rotation maximum de 5°.

En se référant à l'échelle ci-dessus on remarque que la rugosité est comprise entre 0 et 0.1mm et +0.1mm. L'état de surface peut être raffiné de plus en plus si on réduit la variation de l'angle de rotation maximum de l'arbre.

La valeur de l'état de surface influence directement sur la taille du fichier du programme d'exécution. Si on améliore l'état de surface on augmente la taille du fichier du programme d'exécution. Il faut donc faire un compromis entre la rugosité et le temps d'exécution.

III.6 Bilan :

Le paramétrage sous CAMWORKS nous a conduits à travailler avec une machine 5 axes. Ce type de machine n'existe pas en Algérie donc notre étude, à ce niveau, reste théorique.

L'usinage avec une machine 5 axes est très satisfaisant, la qualité de surface et le temps d'usinage sont bonnes. Il nous permet aussi de résoudre le problème d'interférence.

Le temps d'usinage de chaque came est estimé à 4 minutes.

III.7 Paramétrage sur MasterCam :

Le paramétrage sur MasterCam se fait de la même façon que CAMWORKS. La définition de la surface à usiner se fait en spécifiant la commande 'contour'.

Les résultats obtenues en utilisant ce logiciel ne sont pas satisfaisantes, on constate après simulation d'usinage qu'il y a un problème d'interférence, ce problème est lié directement à la stratégie d'usinage.

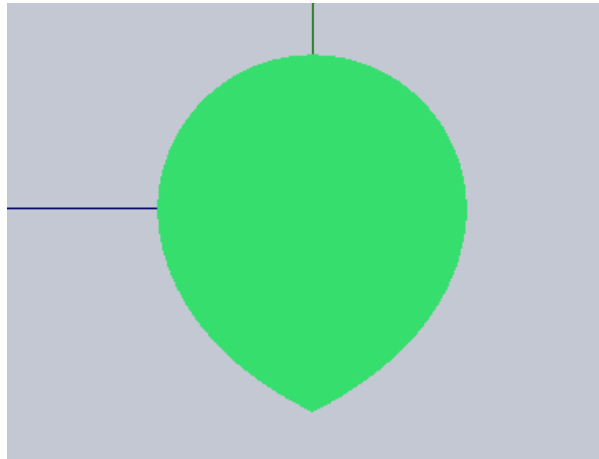


Figure III-7 Forme finale de la came après usinage.

La figure III-7 montre la forme finale après usinage, en examinant cette forme on constate que cette forme ne convient pas avec la forme de la came, cette erreur est due au problème d'interférence.

Pour corriger ce problème, il faut changer le type de machine en machine 5 axes.

La figure suivante montre le début du programme d'usinage. En examinant ce programme on remarque qu'il a respecté les conditions d'usinage imposée (machine 4 axes avec axe A).

```

%;
O0000(T);
(DATE=DD-MM-YY - 30-05-12 TIME=HH:MM - 12:27);
(MCX FILE - T);
(NC FILE - F:\T.NC);
(MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024);
( T242 | 8. BALL ENDMILL | H0 );
N100 G21;
N110 G0 G17 G40 G49 G80 G90;
N120 T2 M6;
N130 G0 G90 G54 X74.9 Y0. A103.024 S3500 M3;
N140 G43 H2 Z61.;
N150 Z41.;
N160 G1 Z12.504 F300.;
N170 Z12.543 A258.661 F2000.;
N180 Z12.648 A268.969;
N190 Z12.803 A276.442;
N200 Z12.994 A282.528;
N210 Z13.211 A287.682;
N220 Z13.417 A291.595;
N230 Z13.616 A294.713;
N240 Z13.811 A297.324;
N250 Z14.021 A299.762;

```

Début du profilage

III.8 Conclusion :

Ce chapitre nous a donné une idée claire sur l'utilisation des logiciels de FAO.

En plus de l'utilisation des logiciels de FAO nous avons établi notre propre code de calcul qui peut être généralisé à n'importe quel modèle d'arbre à cames.

Chapitre 4

Solution proposée

IV. Solution proposée :

En utilisant CAMWORKS nous avons rencontré un problème où, dans le programme généré, on constate l'existence d'une instruction non désirée. Ce problème se traduit par l'appel d'un axe B, alors que nous avons configuré notre logiciel pour travailler sur un centre d'usinage à 4 axes.

La solution que nous avons proposée consiste à établir un programme en MATLAB qui a pour rôle la génération du programme d'exécution de la pièce

IV.1 Description de la méthode :

La solution est purement géométrique, elle consiste à approcher le profil de la came par des segments de droites et d'orienter chaque segment (faire une rotation à partir d'une méthode basée sur les transformations ponctuelles) pour que le segment soit perpendiculaire à l'axe de rotation de la fraise, cette méthode a 3 paramètres : la rotation de la pièce et les déplacements de l'outil suivant les axes des Y et celui des Z.

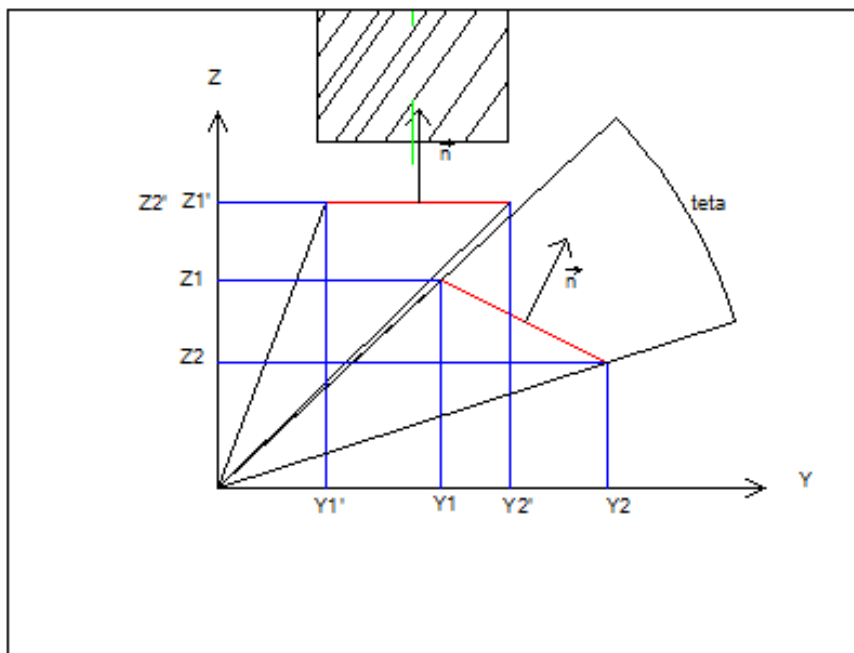
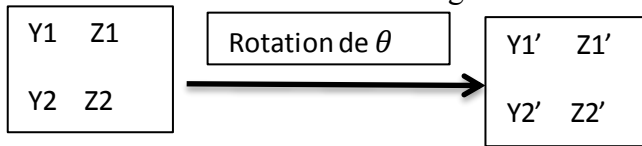


Figure IV-1 schéma de la méthode.

Pour cela on doit définir l'angle de rotation θ (angle de rotation du segment) :



$$\left\{ \begin{array}{l} Y1' = Y1 * \cos(\theta) - Z1 * \sin(\theta) \\ Z1' = Y1 * \sin(\theta) + Z1 * \cos(\theta) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y2' = Y2 * \cos(\theta) - Z2 * \sin(\theta) \\ Z2' = Y2 * \sin(\theta) + Z2 * \cos(\theta) \end{array} \right.$$

Les coordonnées $Y1'$, $Z1'$, $Y2'$, $Z2'$ sont les nouvelles coordonnées du segment. Ces nouvelles coordonnées sont obtenues en utilisant la méthode de transformation ponctuelle.

La condition qu'il faut satisfaire pour avoir la perpendicularité de la fraise avec l'axe de rotation est la suivante :

$$Z2' = Z1'$$

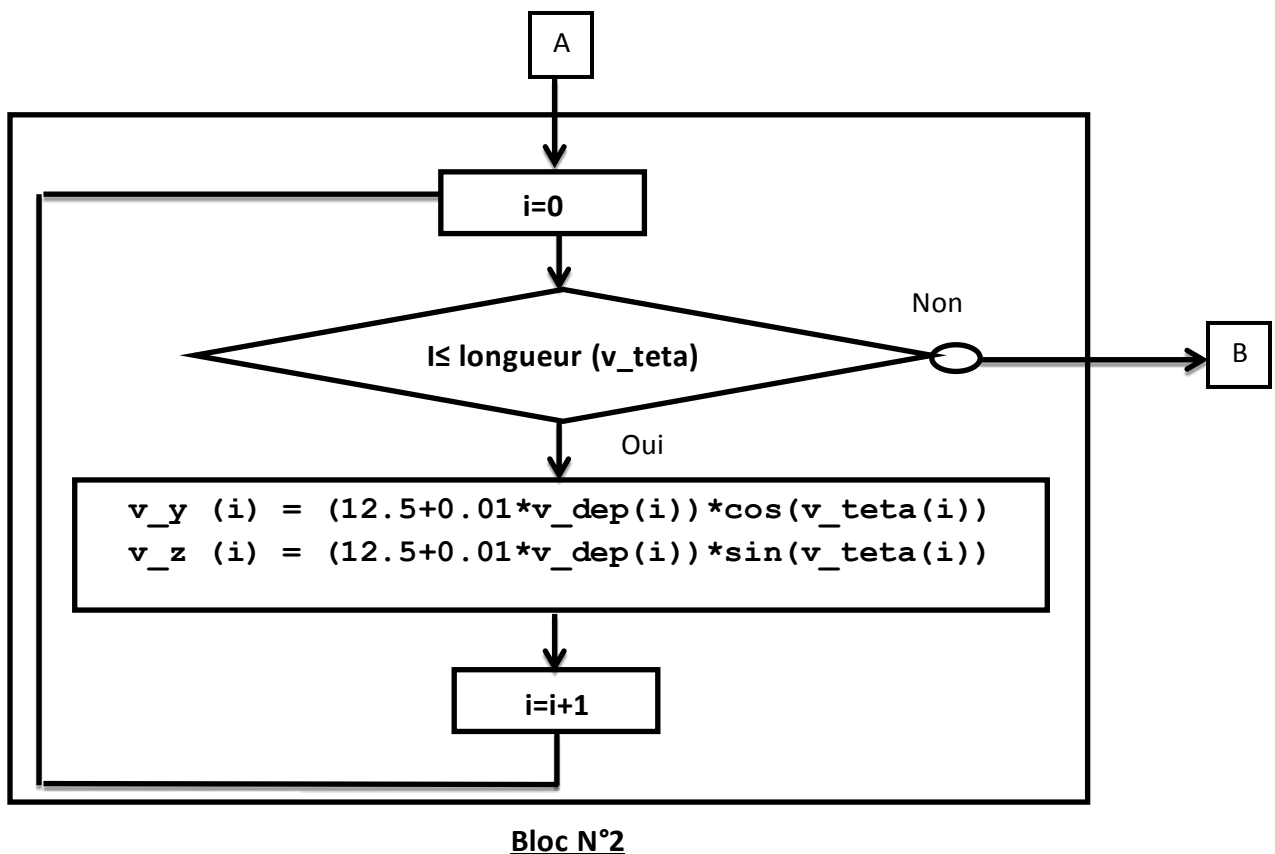
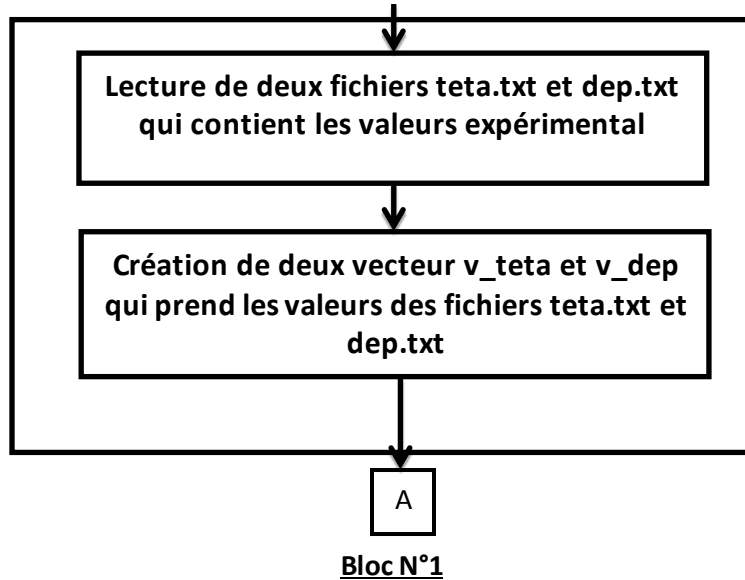
De cette égalité on tire :

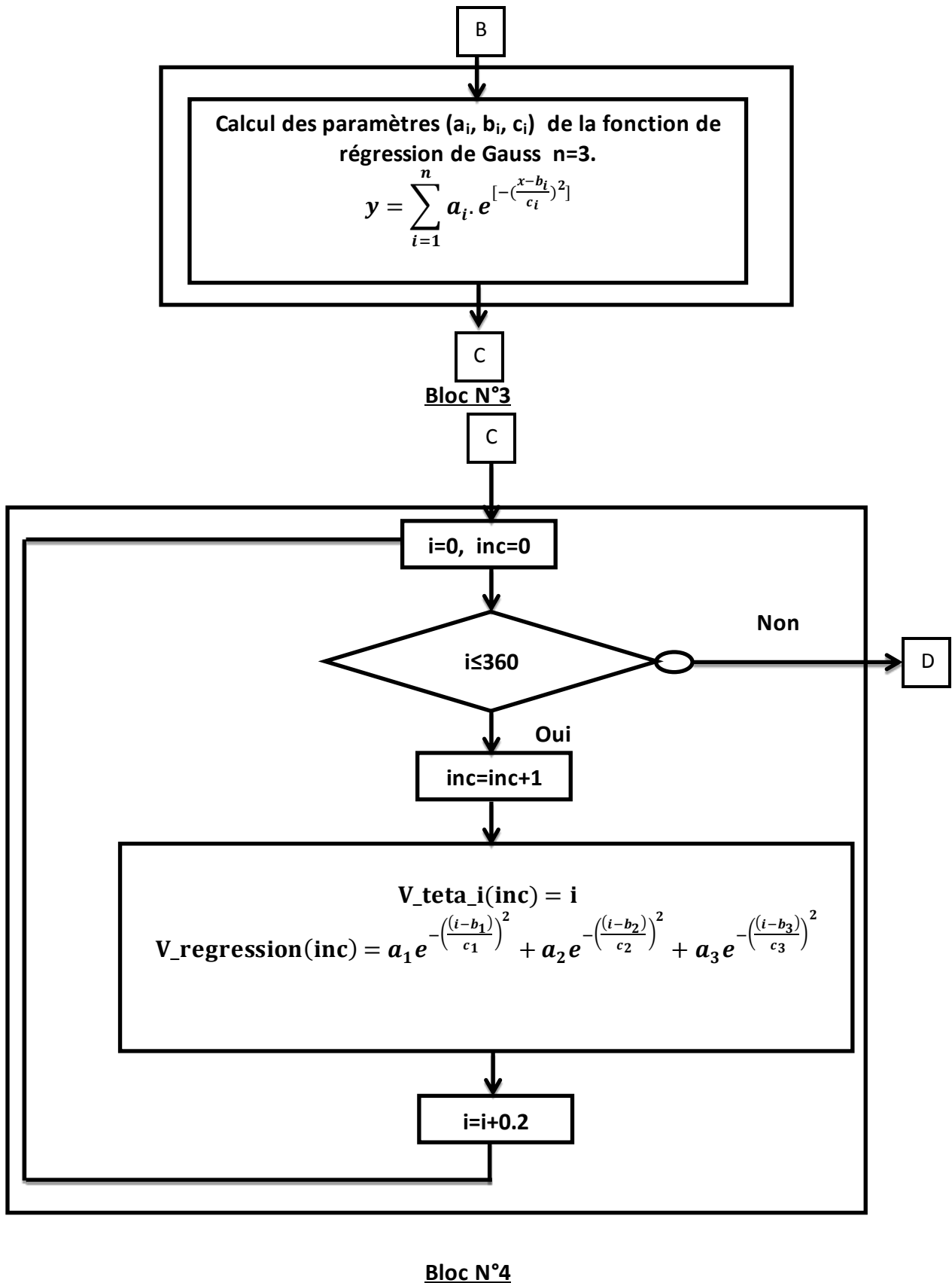
$$\theta = \tan^{-1} \frac{Z2 - Z1}{Y1 - Y2}$$

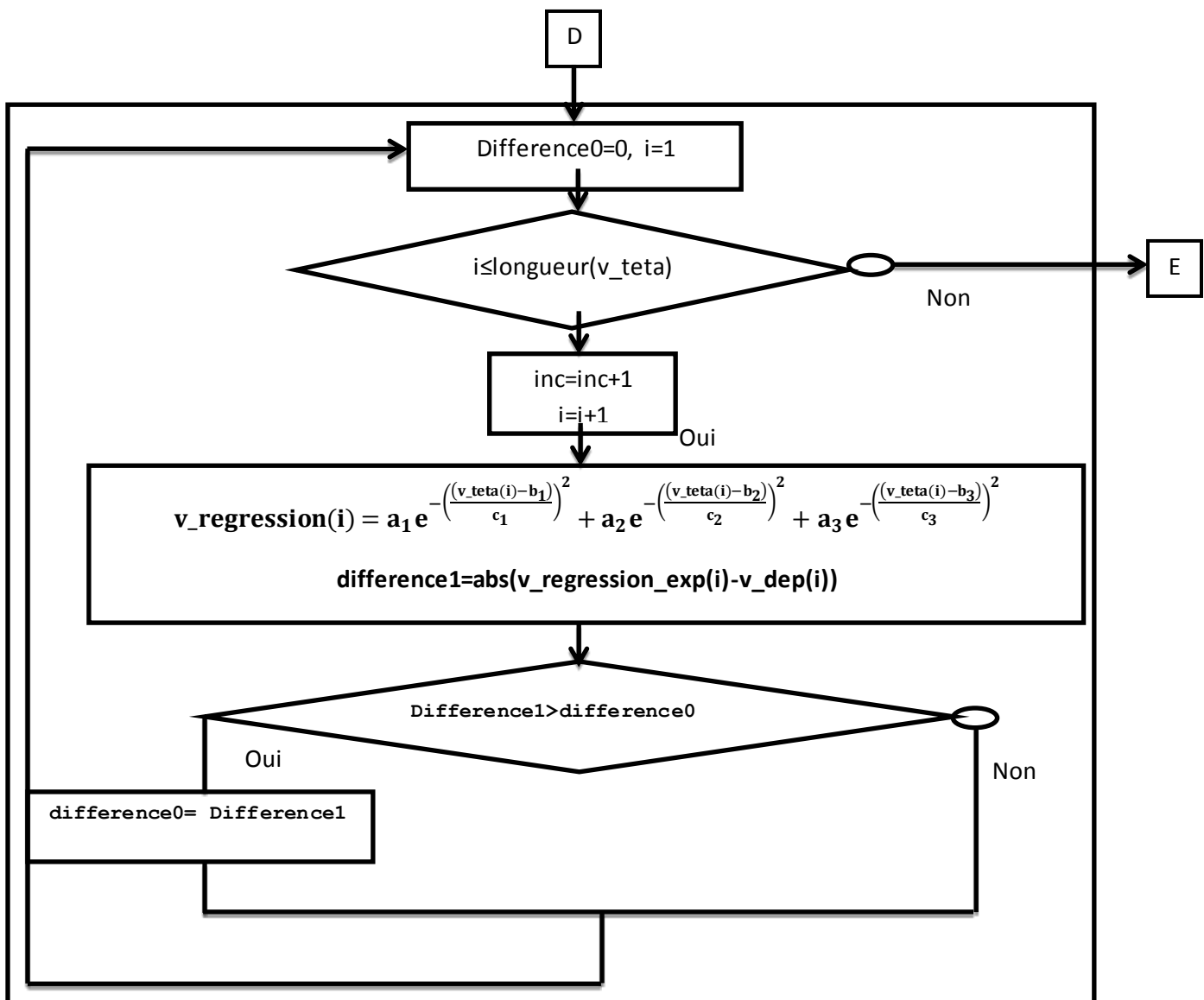
IV.2 Organigramme de la méthode :

Le programme est composé de plusieurs bloc, l'objectif de ce programme est de générer le programme d'usinage afin d'usiner la pièce.

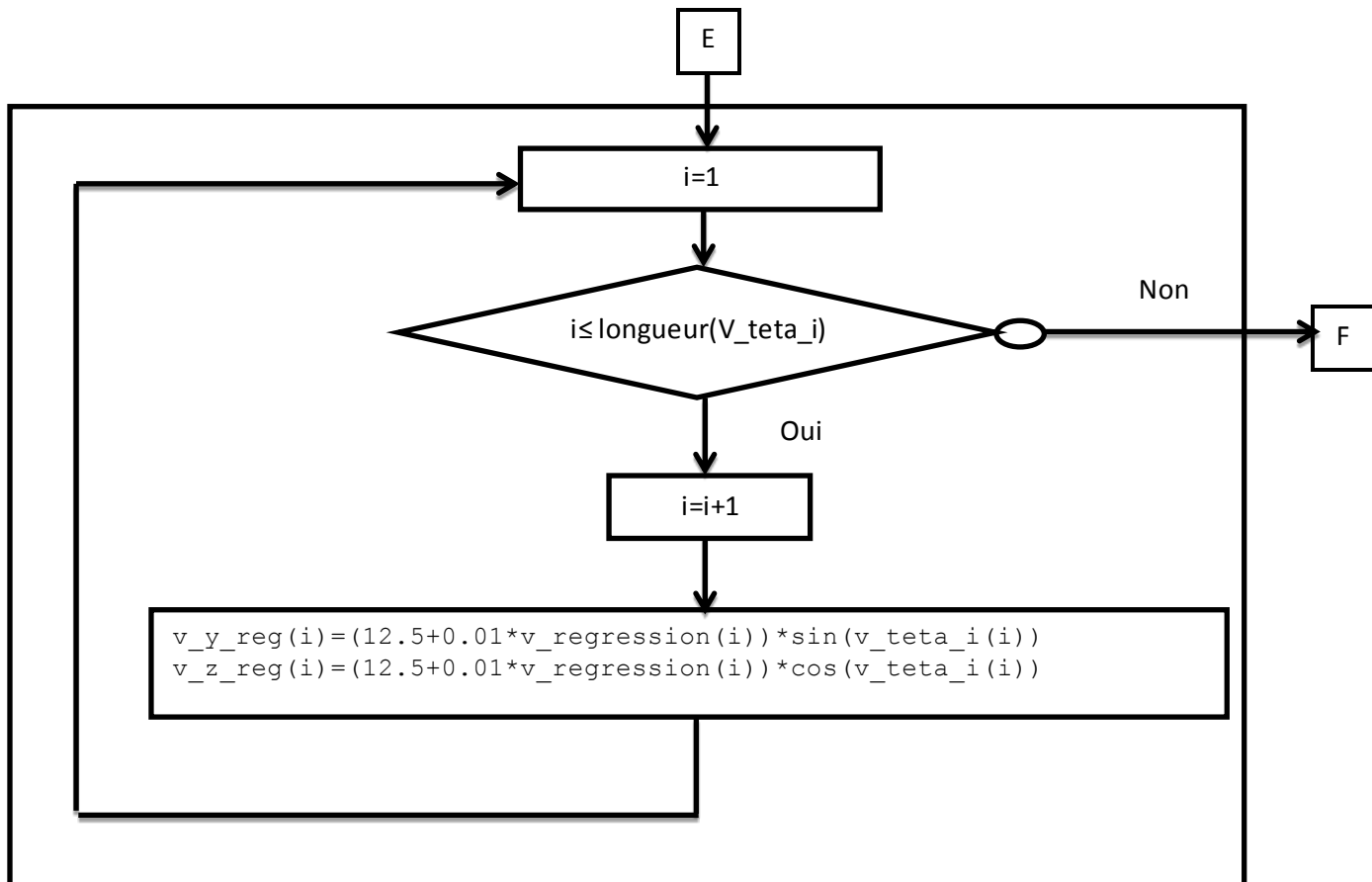
Afin de comprendre mieux le programme on va décomposer le programme en blocs

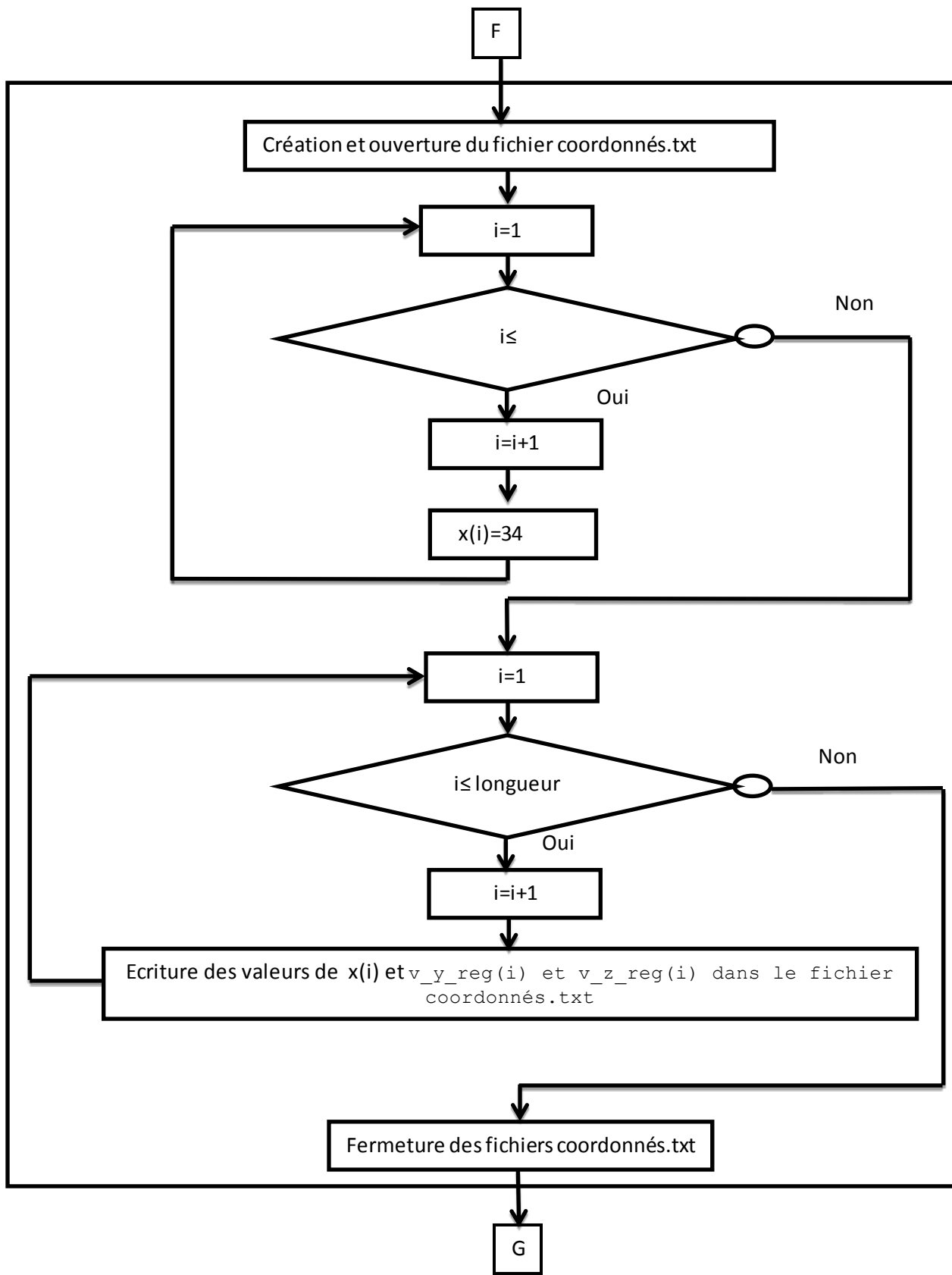




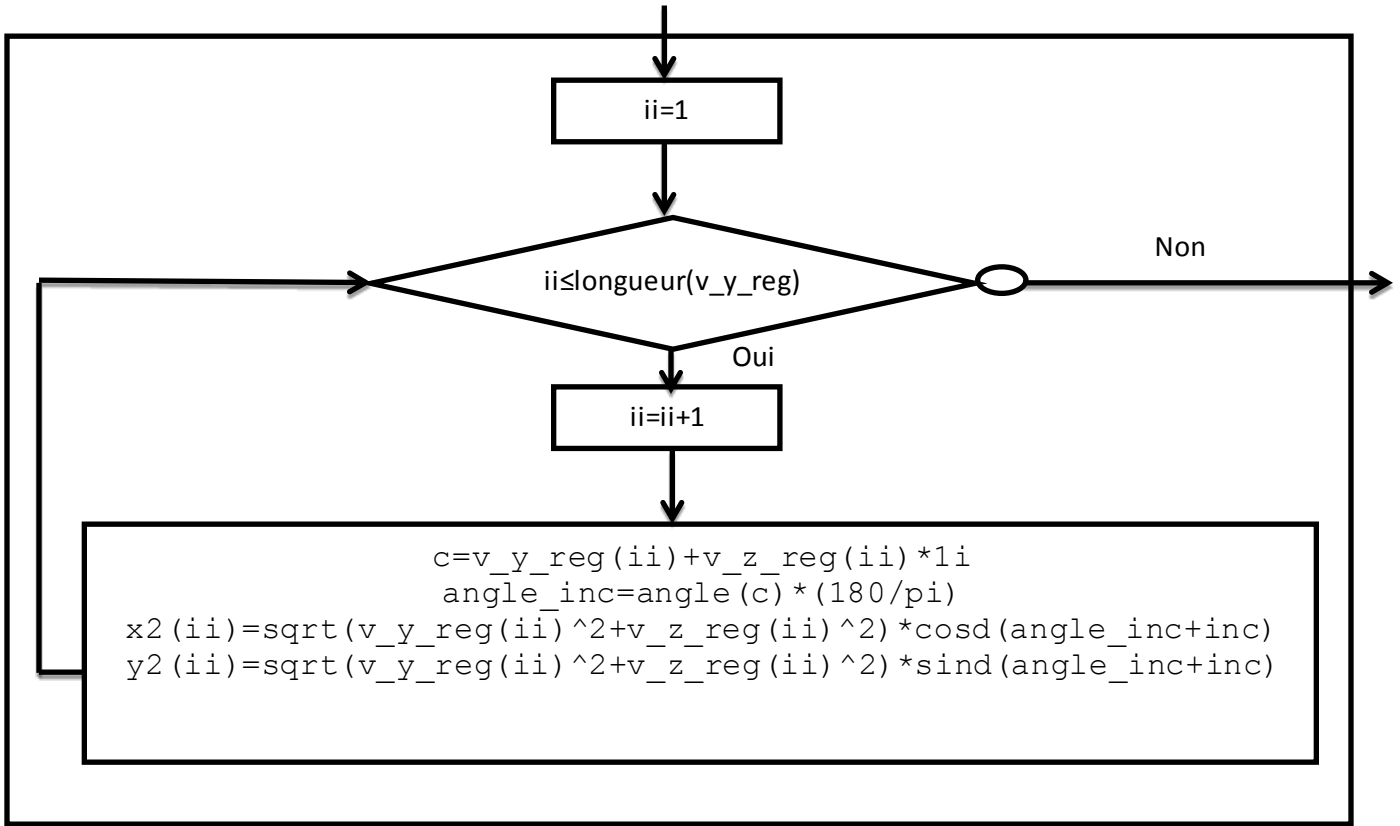


Bloc N°5

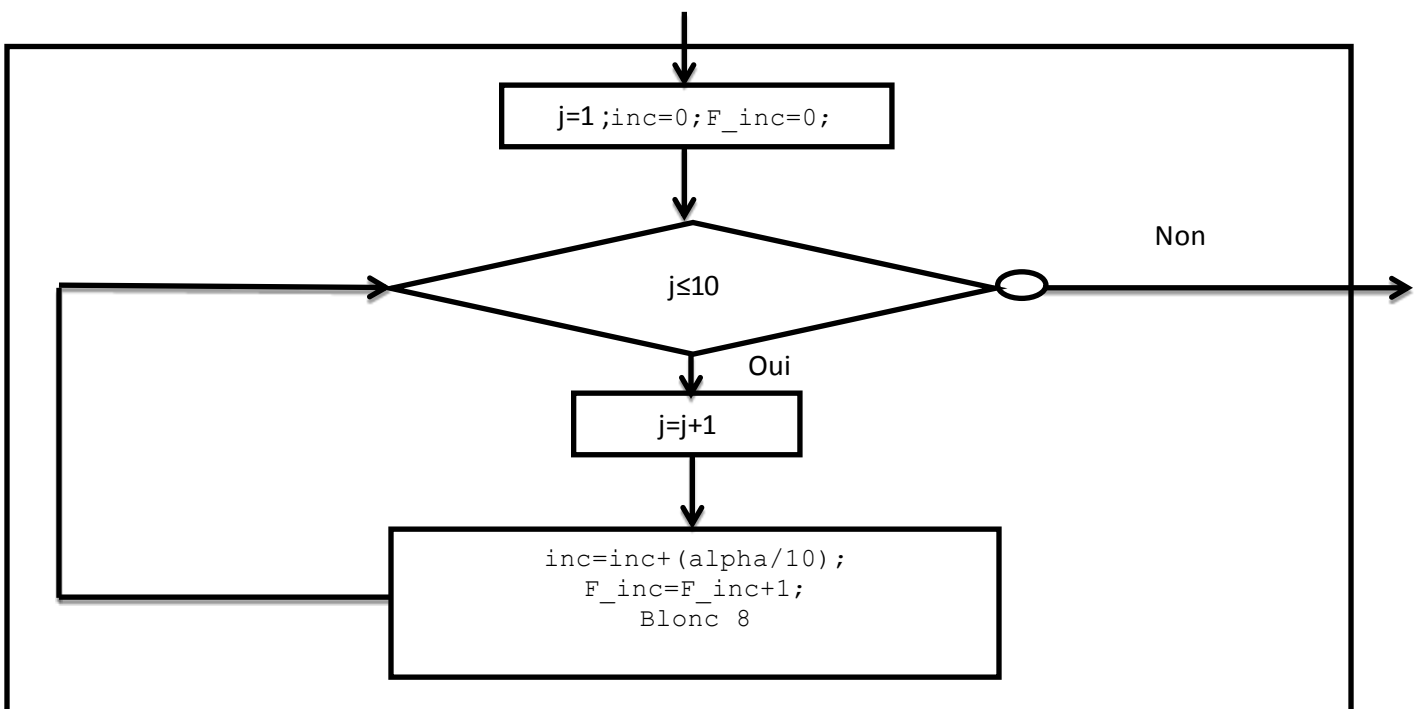
**Bloc N°6**



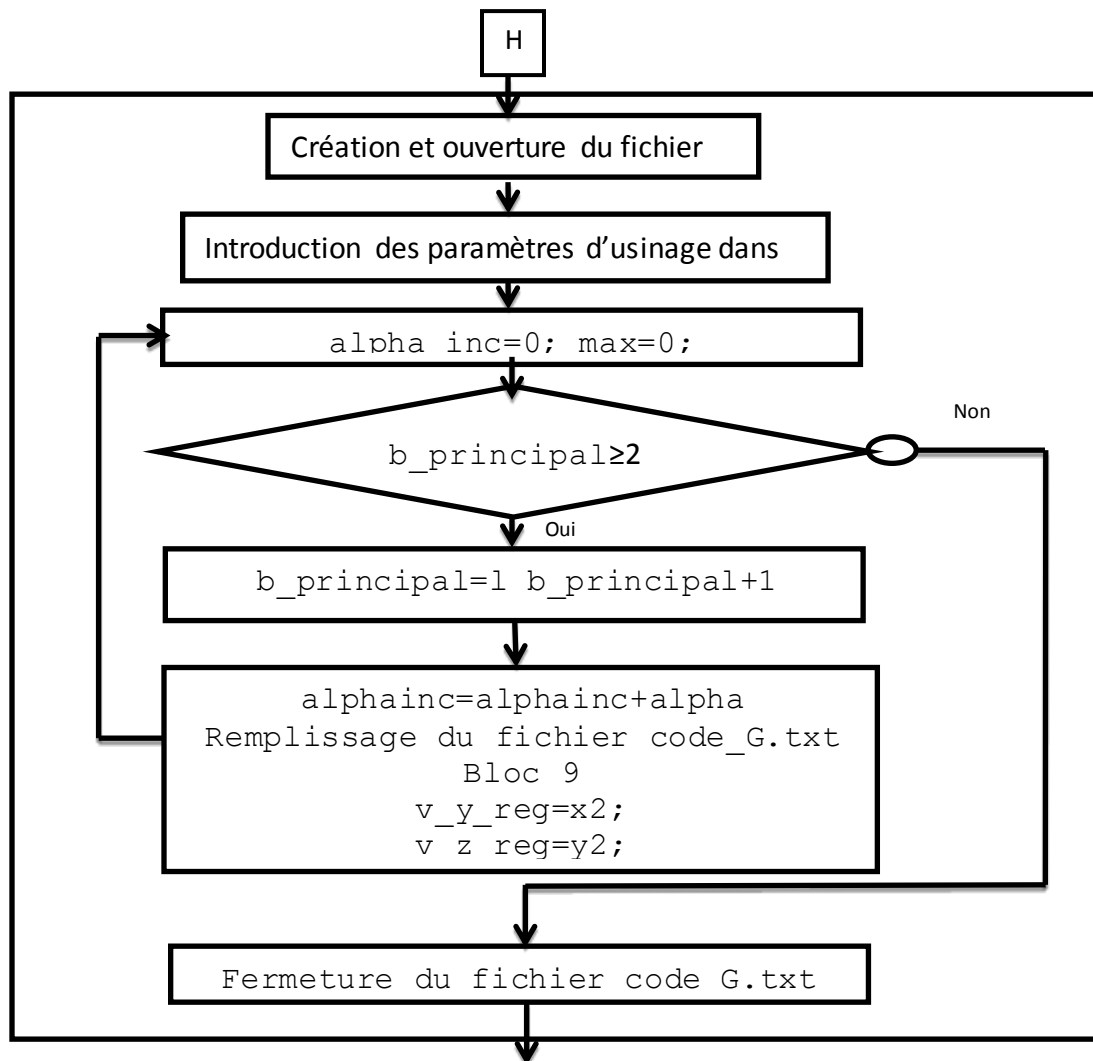
Bloc N°7



Bloc N°8



Bloc N°9

**Bloc N°10**

IV.3 Les résultats du programme :

Le programme travail d'une façon itérative,le nombres d'itération corespond à la taille du vecteur qui défini le profil de la came,chaque itération va modifier ce vecteur donc on aura une nouvelle orientation pour chaque itération.La figure suivante montre la came en plusieurs position :

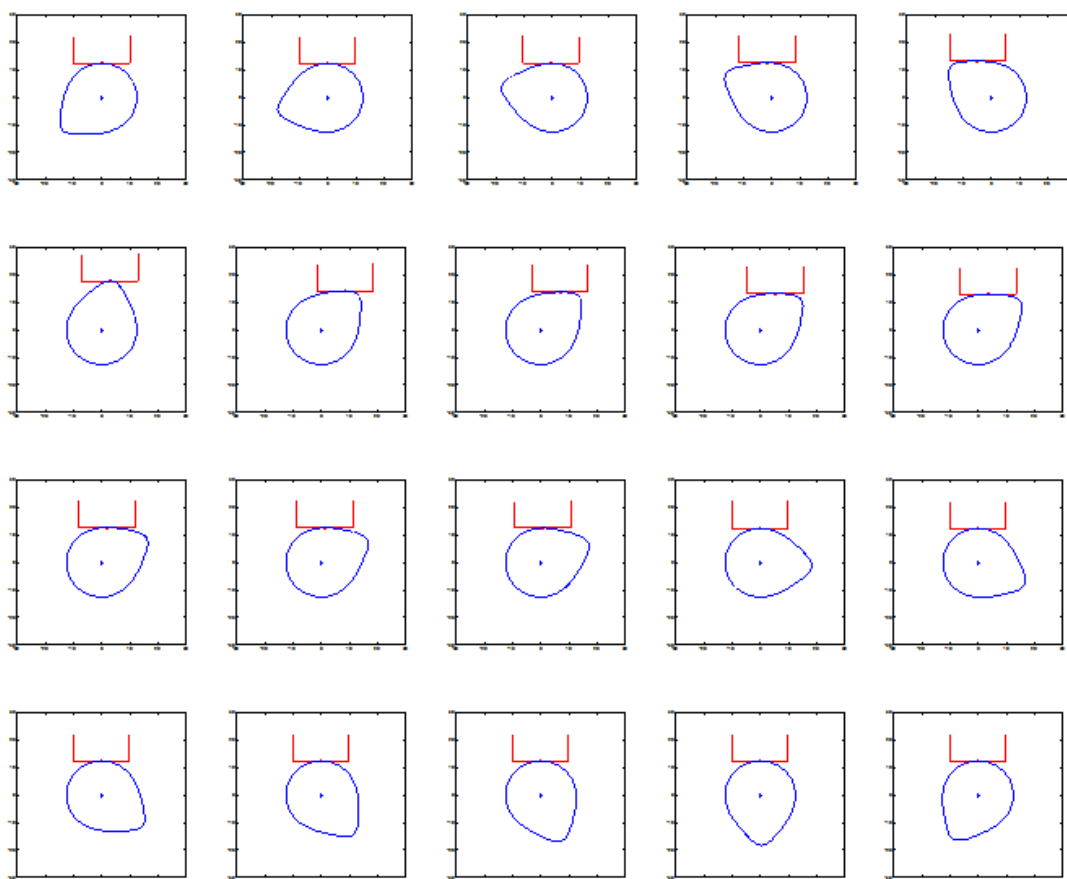


Figure IV-2 Simulation d'usinage

Le résultat final de ce programme est un fichier appelé code_G.txt qui contient le programme d'usinage, ce programme est fait pour une machine 4 axes avec comme quatrième axe (A).

La figure suivante montre le début du code d'usinage créé par le programme

```
O0000 (T);
 (DATE=DD-MM-YY - 10-06-12 TIME=HH:MM - 23:58);
 (MCX FILE - T);
 (NC FILE - F: (MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024);
 ( T242 |      8. BALL ENDMILL | HO );
N1 G21;
N2 G0 G17 G40 G49 G80 G90;
N3 T2 M6;
N4 G0 G90 G54 X74.9 Y0. A103.024 S3500 M3;
N5 G43 H2 Z61.;
N6 Z41.;
N7 G1 Z12.504 F300.;
N8      Y2.000      Z12.500      A-0.100
N9      Y1.978      Z12.500      A-0.300
N10     Y1.978      Z12.500      A-0.500
N11     Y1.978      Z12.500      A-0.700
N12     Y1.978      Z12.500      A-0.900
N13     Y1.978      Z12.500      A-1.100
N14     Y1.978      Z12.500      A-1.300
```

Figure IV-3 Début de programme.

Cette figure montre clairement l'utilisation du mot A ce qui signifie que ce programme est destiné à une machine 4 axes (avec axe A). Ce programme nous permet de réaliser une seule came. Pour réaliser tout l'arbre à came (le reste des cames) il suffit de considérer une partie de ce programme comme un sous-programme et de l'appeler à chaque fois tout en ajoutant des lignes pour passer d'une came à une autre (déplacement de l'outil suivant X et rotation (déphasage) de la pièce.

Nb : Dans le cas où on utilise un sous-programme il faut prendre la précaution de travailler en relatif.

Conclusion générale

Ce travail nous a donné la possibilité de nous familiariser avec des logiciels de CFAO et de les utiliser pour des tâches d'inverse-engineering.

Les défauts de surface dans notre modèle nous ont poussé à utiliser les méthodes numérique afin de corriger le problème de forme ce qui nous a conduit à créer un programme générale de traitement numérique.

La modélisation par les fonctions de CAO nous a permis d'éliminer plusieurs points en gardant les points pilotes de la courbe de profil, cette technique est pratique surtout si on n'a pas utilisé les techniques de traitement numérique, mais c'est un élément puissant de la CAO.

L'utilisation de FAO nous a permis de générer un programme d'exécution de l'arbre à cames. Un problème c'est apparu, c'est fait que le programme généré on remarque l'appel de l'axe B malgré que nous avons configuré un centre de fraisage à axe A.

Pour pallier à ce problème nous avons suivi une démarche consistait à créer un programme informatique qui prend en charge tout le processus du traitement numérique, des résultats expérimentaux jusqu'à la création du programme d'usinage de l'arbre à came.

On peut dire que le programme créé en MATLAB peut être généralisé à n'importe quel autre arbre à came.

En perspectives, nous souhaiterons dans l'avenir que d'autres travaux auront lieu dans ce domaine, dans le but de généraliser ce code de calcul à d'autres surfaces complexes, et pourquoi pas concevoir un module de FAO.

ANNEXE A

Tableau T1 :

Tableau des résultats expérimental de la came numéro 8 :

Rotation (degré)	Déplacement (1/100mm)	Rotation (degré)	Déplacement (1/100mm)	Rotation (degré)	Déplacement (1/100mm)	Rotation (degré)	Déplacement (1/100mm)	Rotation (degré)	Déplacement (1/100mm)
0	0	182	59	216	400	241	451,5	269	95
5	0	183	63	216,5	410	241,5	441,5	271	84
10	0	184	67	217	418	242	431,5	273	73
15	0	185	72	217,5	426,5	242,5	422	275	62
20	0	186	77	218	436	243	413	277	52
25	0	187	83	218,5	445	243,5	404	279	44,5
30	0	188	87,5	219	454	244	394,5	281	35
35	0	189	93	219,5	463,5	244,5	385,5	283	31
40	0	190	99,5	220	473,5	245	378	285	25,5
45	0	191	106,5	220,5	483	245,5	369	287	23
50	0	192	114	221	491	246	361	289	21
55	0	193	121,5	221,5	500	246,5	352	291	19,5
60	1	194	129,5	222	509,5	247	343,5	293	18
65	1,5	195	138	222,5	518	247,5	335	295	17
70	2	196	145	223	526	248	327,5	300	15
75	2	197	154	223,5	534,5	248,5	320	305	12
80	3	198	163,5	224	542,5	249	312	310	8
85	3	199	173	224,5	550	249,5	303,5	315	6
90	3	200	183	225	555	250	296	320	4
95	3	200,5	189	225,5	560	250,5	289	325	4
100	3,5	201	193	226	565	251	283	330	4
105	4	201,5	199	226,5	569	251,5	275	335	4
110	4	202	204	227	571	252	269	345	4
115	4,5	202,5	210	227,5	572,5	252,5	262,5	355	3,5
120	5	203	221	228	573,5	253	255	360	3,5
125	5	203,5	221,5	228,5	574	253,5	249		
130	5,5	204	227	229	575	254	242		
135	6	204,5	233	229,5	575	254,5	235		
140	7	205	240	230	575,5	255	229		
145	9	205,5	246	230,5	576	255,5	223		
147	10	206	252	231	576	256	221,5		
150	12,5	206,5	259	231,5	576	256,5	211		
152	14	207	265	232	575	257	205		
154	17	207,5	271,5	232,5	574	257,5	200		
156	19	208	272	233	573	258	194		
158	21	208,5	285	233,5	570	258,5	189		
160	23	209	292	234	565,5	259	184		
162	24,5	209,5	299	234,5	561	259,5	179		
164	26	210	306	235	554	260	173,5		
166	27	210,5	312	235,5	548	260,5	168		

168	29	211	320	236	541	261	163,5
170	30	211,5	328	236,5	532	261,5	158
172	32	212	336	237	523	262	153,5
174	35	212,5	344,5	237,5	514	262,5	148,5
176	39	213	352	238	506	263	144
177	42	213,5	360	238,5	497	263,5	140
178	44	214	368	239	488,5	264	135
179	48	214,5	375,5	239,5	478,5	264,5	131,5
180	51,5	215	384	240	470	265	126,5
181	54,5	215,5	392	240,5	460	267	110

ANNEXE B :

Ce programme a pour rôle de trouver les paramètres de la fonction de Gauss avec n=3:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2}$$

Les paramètres d'entrée:

Les paramètres d'entrées sont deux fichiers qui contiennent les valeurs expérimentales (angle de rotation et déplacement du palper).

Les paramètres de sortie :

Les paramètres de sortie sont les paramètres de la fonction de Gauss et les deux graphes (expérimental et numérique).

```
clear,clc
% BLOC 1
% lecture des données experimental a partir des deux fichiers teta et dep
% teta.txt est un fichier qui contient les valeurs expérimental de l
angle de rotation
% dep.txt est un fichier qui contient des valeurs experimental du
% déplacement du palper en fonction de l angle de rotation
f_teta=fopen('D:\essai\teta.txt','r');
f_dep=fopen('D:\essai\dep.txt','r');
% BLOC 2
% conversion des données des fichiers vers des vecteurs
% le vecteur v_teta prendra les valeurs enregistré sur le fichier
% teta.txt
% le vecteur v_dep prendra les valeurs enregistré sur le fichier dep.txt
v_teta=fscanf(f_teta,'%f');
v_dep=fscanf(f_dep,'%f');
% BLOC 3
```

```

% le bloc suivant ne fait que vérifier la taille des deux vecteurs v_teta
et v_dep
% si les deux vecteurs n on pas la même taille le programme envoi un
% message d erreur .
length(v_teta);
length(v_dep);
% BLOC 4
% création de deux vecteurs pour créer le profil de la came
% v_y est le vecteur des y
% v_z est le vecteur des z
for i=1:length(v_teta)
v_y(i)=(12.5+0.01*v_dep(i))*cos(v_teta(i)*(3.14/180));
v_z(i)=(12.5+0.01*v_dep(i))*sin(v_teta(i)*(3.14/180));
end
% BLOC 5
% ce bloc est le bloc le plus important,il prend en charge le calcul des
paramètres de
% la fonction de regrassion de Gauss.
% pour effectuer cette opération on a choisi une fonction de Gauss avec
% n=3 'Gauss3'
f = fittype('Gauss3');
[parametre,gof2] = fit(v_teta,v_dep,f);
a1=parametre.a1;
a2=parametre.a2;
a3=parametre.a3;
b1=parametre.b1;
b2=parametre.b2;
b3=parametre.b3;
c1=parametre.c1;
c2=parametre.c2;
c3=parametre.c3;

```

BIBLIOGRAPHIE :

[1] : Xavier RITTER :

‘Modélisation de la distribution d’un moteur à arbre à cames en tête’
thèse de doctorat L’institut National des Sciences Appliquées de Lyon
2006

[2] :Park D.,David J:

‘Development of a Locally Nondimensional Mathematically Symmtric
Cam Profile for Optimal Camshaft Design’.SAE Technical Paper Series
1996

[3]:CHOI J.K., MIN B.S ., OH D.Y:

‘Influence of spring dynamics and friction on a springactuated cam
system ‘ SAE Technical Paper Series 1995

[4] : Yvon Gardan :

La CFAO introduction, technique et mise en œuvre .HERMES 3^{émé}
édition P 13.14

[5] : Coons :

‘Mathématique et CAO, volume 5 :Courbres et surfaces ‘ Edition
Hermès 1987.

[6] : Christophe Tournier et coll :

‘Usinage à Grande Vitesse’ Edition DUNOD 2010.

[7]:A.Hamrani -A.Younsi :

FAO des formes complexes en usinage multiaxes -mémoire de fin
d’étude pour l’obtention du diplômeingénieur d’état en génie mécanique
-USTHB 2006/2007

[8]:E.Lefur :

‘Commande numérique’ Notes de cours Ecole Normale Superieur de
Cachan 1996

[9] :V.Moron :

‘Mise en correspondance de données 3D avec un modèle CAO’ thèse
de coctort -lyon 1996

[10] :T.Sebastien :

«?introduction aux outils de prototypâge rapide et aux méthodes de la
rétroconception’ nov 1997

[11] :M.Frija :

‘Métrologie et appareils de mesure’ Institut supérieur des sciences
appliquées et de technologie 2002

[12] : [www.wkipidia/comparateur mécanique](http://www.wkipidia/comparateur_mecanique)