

Faculté de technologie

Département de Génie Mécanique

Master 2 en Génie Mécanique

Option : Conception Mécanique et Productique

2015

**Thème : validation d'un programme
d'usinage d'une tête de forage sur un
centre d'usinage 5 axes.**



Réalisé par :

- SMAIL Nassim
- CHERAFT Brahim

Encadré par :

✚ Mr: A. BELAMRI

Examiné par :

Je remercie avant tout le dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mes

Sincères remerciements à mon encadreur Mr BELAMRI. A, pour

l'intérêt porté à mon travail, ses conseils précieux et

Surtout sa grande patience.

Je remercie ma famille qui mon été d'un grand soutien financier et moral, père, mère et frères et sœurs et je leur dédie ce travail

Je remercie aussi tout mes amis et mes collègues qui m'ont encouragé

MERCI

Mr CHERAFT .B

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et mes
Sincères remerciements à mon encadreur BELAMRIA, pour
l'intérêt porté à mon travail, sa disponibilité, ses conseils précieux et
Surtout sa grande patience.

Nos vifs remerciements vont aussi aux examinateurs
de ce travail et de Prendre part au jury.

Enfin, à tous ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à la
réalisation de ce travail, nous dis merci.

Je dédie ce travail à ma famille, votre courage, vos
sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long
parcours, veuillez trouver dans ce travail une grande reconnaissance
pour ce que vous avez entrepris à mon égard, et un fruit de toutes
vos efforts.

A mes chers frères et sœurs.

A tous mes amis.

A tous mes collègues.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents, votre courage, vos sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours, veuillez trouver dans ce travail une grande reconnaissance pour ce que vous avez entrepris à mon égard, et un fruit de toutes

Vos prières et vos efforts.

A mes chers frères et sœurs.

A tous mes amis.

A tous mes collègues.

A toute ma famille.

CHERAFT Brahim

Dédicaces

*Je dédie ce travail à ma famille, votre courage, vos
sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long
parcours, veuillez trouver dans ce travail une grande reconnaissance
pour ce que vous avez entrepris à mon égard, et un fruit de toutes*

Vos prières et vos efforts.

A mes chers frères et sœurs.

A tous mes amis.

A tous mes collègues.

SMAIL Nassim

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 : CONFIGURATION DES MACHINES A COMMANDE NUMERIQUE.....3

1.1. Généralités.....	4
1.1.1. Historique.....	4
1.1.2. Justification de la CN.....	6
1.1.2.1. Automaticité.....	6
1.1.2.2. Flexibilité.....	8
1.1.2.3. Sécurité.....	9
1.1.2.4. Nécessités économiques et techniques.....	9
1.2. Différents types de machines.....	11
1.2.1. Eléments principaux.....	11
1.2.2. Classification.....	12
1.2.3. Architecture.....	13
1.3. Les machines 5 axes.....	14
1.3.1. Histoire de machines 5 axes.....	15
1.3.2. Configurations des machines 5 axes.....	17
1.3.3. Critères de choix d'une machine 5 axes.....	20
1.3.4. Machine a plateau tilting.....	20
1.4. Le Forage :.....	22
1.5 Méthodes de foration :.....	22
1.5.1 : Forage a percussion ou battage :.....	23
1.5.2 : Forage a rotation (ou forage rotary) :.....	24
1.5.3 : Forage a roto-percussion :.....	25
1.6 Les différents outils de forage :.....	25
1.6.2 Les outils a molettes :.....	26
1.6.3 Les outils diamantés :.....	27
1.6.3.1 Outils diamant naturel :.....	28
1.6.3.2 Les outils PDC :.....	29
1.6.3.3 Les outils TSP :.....	30
1.6.3.4 Classification des outils diamantés (IADC) :.....	30

CHAPITRE 2 : PROCESSUS D'ELABORATION DES PIECES DE FORMES COMPLEXES.....30

2.1. INTRODUCTION.....	31
2.2. PROCESSUS D'ELABORATION DES PIECES DE FORMES COMPLEXES EN USINAGE 5 AXES.....	32
2.2.1. Description du processus.....	32
2.2.2. Erreurs et approximations liées au processus.....	34
2.2.3. Problématique associée a l'optimisation des trajectoires 5 axes.....	38
2.3. GENERATION DE TRAJECTOIRES 5 AXES.....	39
2.3.1. Définition d'une trajectoire 5 axes.....	39
2.3.1.1. Positionnement outil.....	40
2.3.1.2. Parcours de l'outil sur la surface.....	42
2.3.2. Description de la géométrie de la trajectoire.....	46
2.3.3. Synthèse.....	47
2.3.4. Génération et optimisation géométrique des trajectoires 5 axes.....	49
2.3.5. Autres méthodes de génération et d'optimisation des trajectoires 5 axes.....	50
2.3.6. Conclusion.....	52

CHAPITRE 3 : STRATEGIE D'USINAGE 5 AXES.....53

3.1. LE FRAISAGE A 5 AXES.....	54
3.2. USINAGE EN BOUT ET USINAGE SUR LE FLANC.....	54
3.3. LE FRAISAGE A 5 AXES EN BOUT.....	55
3.3.1. Le choix de l'outil.....	55
3.3.2. Construction des positions de l'outil.....	56
3.3.3. Influence des angles d'orientation sur le profil effectif.....	57
3.3.4. Gestion des interférences entre l'outil et la pièce.....	58
3.3.4.1. Méthode de chois et al.....	58
3.3.4.2. Méthode de rubio et al.....	59
3.3.4.3. Méthode de li et al.....	59
3.3.4.4. Méthodes basées sur la courbure.....	60
3.3.4.5. Calcul de la hauteur de crête et de la distance entre passes.....	61
3.4. LE FRAISAGE A 5 AXES SUR LE FLANC.....	65
3.4.1. Les surfaces réglées.....	65
3.4.1.1. Surfaces réglées remarquables.....	66
3.4.1.2. Surfaces réglées développables.....	66

3.4.2. Usinage des surfaces développables.....	66
3.4.3. Usinage des surfaces réglées non développables.....	67
3.4.4. Gestion des interférences.....	68
3.4.5. Comparaison des deux modes d'usinage.....	69
 CHAPITRE 4 : Aplication d'usinage d'outil de forage 8 ".....	70
4.1. INTRODUCTION.....	70
4.2. CHOIX DE LA MACHINE.....	70
4.2.1Logiciel CAMWorks.....	74
4.2.1.1 quelque module camworks®	74
4.2.1.1 CAMWorks® Tournage... ..	74
4.2.1.2 CAMWorks® Fraisage 2.5 axes.....	74
4.2.1.3 CAMWorks® Fraisage 3 Axes	74
4.2.1.4 CAMWorks® Usinage multiaxes.....	75
4.2.2 interface utilisateur camworks®	77
4.2.3 Etapes de generation du parcours d'outil en code machine (CN).....	82
4.3. Usinage de l'outil de forage.....	84
4.3.1. Gamme d'usinage de brute.....	85
4.3.2. Usinage des surfaces des hélices de l'outil de forage.....	86
4.3.2.1. Stratégie 3-axes.....	87
4.3.2.2. Stratégie 5-axes indexé.....	91
4.3.2.3. Finition 5-axes indexé.....	92
4.3.3. Usinage des trous et des logements PDC de l'outil de forage.....	93
4.4. Modèle réalisé au niveau du hall de technologie.....	98
4.4.1. Machine Sinumerik 810	98
4.5. Modélisation de tête de forage.....	99
4.5.1. Usinage sur la commande numérique.....	99
4.6 CONCLUSION.....	102
 CONCLUSION.....	103
ANNEXE A : ALDIM.....	104
ANNEXE B : OUTIL DE FORAGE.....	105

ANNEXE C : CAMWORKS.....	116
---------------------------------	------------

REFERENCES

TABLES DES MATIERS

TABLES DES MATIERS

TABLE DES FIGURE**Chapitre 1**

Figure.1.1 : La première MOCN 1952.....	5
Figure.1.2 : Pupitre opérateur d'une CN 32 bits	6
Figure.1.3 : Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation.....	8
Figure.1.4 : Domaine d'utilisation des MOCN.....	10
Figure.1.5 : Exemple de fraiseuses et centres d'usinage (doc. Huron Graffenstaden).....	12
Figure.1.6 : Différents types d'architectures de machine.....	14
Figure.1.7 : Variantes de position de la tête et de la table d'une machine CNC.....	18
Figure.1.8 : Machine multi-axes table/table.....	18
Figure.1.9 : Machine multi-axes tête/table.....	19
Figure.1.10 : Machine multi-axes tête/tête.....	19
Figure.1.11 : Configuration tilting.....	21
Figure.1.12 le forage par batage.....	23
Figure 1.13 .sonde de forage rotary.....	24
Figure.1.14 : machine à percussion.....	25
Figure.1.15 : différentes de type d'outil (de gauche à droite : PDC, TCI et outil à dent fraisé).....	26
Figure.1.16 : nomenclature des tricones (source : Hughes Tools).....	26
Figure.1.17 : taillants des outils intégraux.....	28
Figure.1.18 : nomenclature des outils diamants naturels.....	28
Figure.1.19 : exemples et nomenclature d'outils PDC	29
Figure.1.20 : outils TSP.....	30

Chapitre 2

Figure 2.1 : Exemple de pièce complexe.....	32
Figure 2.2 : Processus d'élaboration des pièces de forme complexe d'après [3].....	33
Figure2.3 : Chaîne numérique en 5 axes d'après [4].....	34
Figure 2.4 : Exemple d'une trajectoire 5.....	39

Figure 2.5 : Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil [2].....	40
Figure 2.6 : Paramétrisation de l'orientation de l'axe outil.....	41
Figure 2.7 : Définition d'un contact multi-points.....	41
Figure 2.8 : Mode de balayage par plans parallèles.....	43
Figure 2.9 : Mode de balayage par isoparamétriques.....	43
Figure 2.10 : Visualisation de l'erreur de corde.....	44
Figure 2.11 : Différents types d'interférences en usinage 5 axes	45
Figure 2.12 : Description par interpolation linéaire.....	47
Figure 2.13 : Définition d'une trajectoire avec le format « 5xNurbs » [3].....	48
Figure 2.14 : Trajectoires théorique et calculée [3].....	49
Figure 2.15 : Optimisation des trajectoires basée sur un raisonnement géométrique.....	50
Figure 2.16 : Décomposition du processus de réalisation des trajectoires.....	51
Figure 2.17 : Déformation de la trajectoire pour éviter la singularité [3].....	52

Chapitre 3

Figure 3.1 : usinage en bout et sur le flanc [9].....	55
Figure 3.2 : Géométrie d'outil [2].....	56
Figure 3.3 : Mise en position des outils en 5 axes.....	57
Figure 3.4 : Utilisation de la surface offset	60
Figure 3.5 : Profil apparent de l'outil (d'après [6]).....	61
Figure 3.6 : Optimisation de la largeur de coupe [3].....	62
Figure 3.7 : Interférence vers l'arrière [14].....	63
Figure 3.8 : Méthode du plan tangent [15].....	64
Figure 3.9 : Calcul de la hauteur de crête.....	64
Figure 3.10 : Calcul de la distance entre passes	65
Figure 3.11 : Surface réglée.....	66
Figure 3.12 : interférences lors d'un posage sur la règle.....	67
Figure 3.13 : gestion des interférences [16].....	68

Chapitre 4

Figure 4.1 : usinage multi-axes.....	70
Figure 4.2 : possibilités d'usinage 5-axes.....	71
Figure 4.3 : Déplacements machines.....	71
Figure 4.4 : fraisage 3-axes.....	72
Figure 4.5 : fraisage 3+2-axes.....	72
Figure 4.6 : fraisage 5-axes continue.....	74
Figure 4.7 : Outil de forage 8 pouces	81
Figure 4.8 : Modèle numérique du brut.....	82
Figure 4.9 : Cylindre de brute.....	82
Figure 4.10 : Les différentes surfaces du brut.....	83
Figure 4.11 : Parcours d'outil d'ébauche et finition.....	84
Figure 4.12 : Parcours d'outil en finition au fond de l'outil.....	85
Figure 4.13 : Usinage des surfaces difficilement accessible.....	85
Figure 4.14 : Parcours d'outil de finition sur les hélices	86
Figure 4.15 : stratégie d'ébauche par les côtés.....	87
Figure 4.16 : Surfaces de finition de la pièce.....	88
Figure 4.17 : trajectoires d'outil en finition.....	89
Figure 4.18 : Pièce (outil de forage), configuration par défaut (avec trous et logements PDC).....	90
Figure 4.19 : représentation des trous/logements.....	90
Figure 4.20 : Parcours d'outil de perçage des logements de type L1, L2.....	91
Figure 4.21 : Différents parcours d'outil de perçage des trous de type T1.....	92
Figure 4.22 Fraiseuse 3 axes disponible au niveau du hall de technologie, de marque EMCO Concept MILL55, à commande Siemens 810M.....	93
Figure 4.23 : tête de forage	94
Figure 4.24 : Brut de tête de forage.....	95
Figure 4.25 : Usinage de la partie haute de notre pièce.....	95
Figure 4.26 : Usinage de la périphérie de notre pièce	96
Figure 4.27 : pièce finale.....	96

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Défauts influents sur la qualité géométrique et la productivité.....	37
Tableau 3.1: Comparaison des deux modes d'usinage [3].....	69
Tableau 4.1: types et dimension des trous/logements.....	90

INTRODUCTION

L'objectif principal requis de toute industrie est de produire de la qualité tout en assurant des bénéfices. Pour cela, il est nécessaire de s'assurer de la qualité à toutes les étapes de la chaîne de fabrication.

L'expertise et le temps d'usinage nécessaire à l'obtention des outillages en font des produits à très forte valeur ajoutée. Les techniques mises à disposition pour usiner des pièces de formes complexes sont en plein développement. Parmi ces nouvelles techniques, on peut citer l'usinage dit "à cinq axes" qui permet aux industriels d'augmenter la productivité tout en assurant une meilleure qualité des produits.

La mise en place d'opérations d'usinage à cinq axes dans un processus de fabrication de pièces mécaniques n'est pas une action simple mais répond la plupart du temps à un besoin économique fort. En effet, le recours à l'usinage à cinq axes offre souvent l'opportunité de réaliser des pièces par enlèvement de matière sur des machines d'usinage (centre de tournage ou de fraisage), alors qu'elles sont traditionnellement obtenues soit par rectification ou par électro-érosion.

Cette évolution simplifie fortement la gamme en éliminant des opérations coûteuses et permet la standardisation des moyens de production. L'incidence économique de l'introduction de l'usinage à cinq axes dans une gamme de fabrication est donc à prendre en compte, parce qu'elle permet en particulier d'éviter la sous-traitance de la fabrication dans les pays émergents.

De plus, avec le développement des logiciels de Conception Assisté par Ordinateur (C.A.O.) et de Fabrication Assisté par Ordinateur (F.A.O.), les fabricants doivent adapter ou définir de nouvelles approches lors de la génération des gammes d'usinage. Le résultat de l'usinage dépend essentiellement de la méthode et des outils utilisés pour choisir la stratégie d'usinage.

L'utilisation des logiciels de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) pour générer les programmes de commandes numériques d'usinage de moules et de matrices est maintenant très courante. Le logiciel doit être capable à partir d'un modèle CAO (Conception assistée par

Ordinateur) de la pièce, de générer les trajets de l'outil qui permettent d'usiner la pièce, et éventuellement de transformer ces trajets en un programme compréhensible par le directeur de commande numérique (DCN).

La problématique

La préparation à l'usinage est la phase la plus importante et la plus longue du processus d'usinage d'une pièce. En effet, c'est à ce moment que la gamme d'usinage est définie.

Le but du travail présenté est de proposer une stratégie d'usinage en considérant comme contrainte le respect de la forme géométrique de la tête de forage, la productivité et la qualité de notre produit, en utilisant un logiciel de C.F.A.O permettant la l'usinage numérique en 5-axes applicable à l'usinage des surfaces gauches.

Les travaux menés dans ce projet de fin d'études sont divisés en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Configuration des machines à commandes numériques et le forage.

Chapitre 2 : Processus d'élaboration des pièces de formes complexes.

Chapitre 3 : Stratégie d'usinage 5-axes.

Chapitre 4 : Application sur un outil de forage 8 pouces.

CHAPITRE

1

**LA CONFIGURATION DES MACHINES A
COMMANDE NUMERIQUE ET LE FORAGE**

1.1. Généralités :

La Commande numérique (CN) est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé.

C'est également une méthode d'automatisation des fonctions des machines ayant pour caractéristique principale une très grande facilité d'adaptation à des travaux différents. À ce titre, la CN constitue l'un des meilleurs exemples de pénétration du traitement de l'information dans les activités de production.

Exploitant au maximum les possibilités de la micro-informatique, toutes les données sont traitées en temps réel, c'est-à-dire au moment où elles sont générées, de manière à ce que les résultats du traitement contribuent également à piloter le processus.

Après une première génération de CN à logique câblée, sont apparues les commandes numériques par calculateur (CNC), ou par ordinateur, qui intègrent un ou plusieurs ordinateurs spécifiques pour réaliser tout ou partie des fonctions de commande.

Tous les systèmes de CN commercialisés actuellement contiennent au moins un microprocesseur. (Les termes CN et CNC peuvent être considérés comme des synonymes, pour des raisons de simplicité)[1].

1.1.1. Historique :

Les travaux menés par Falcon et Jacquard à la fin du XVIII^e siècle ont montré qu'il était possible de commander les mouvements d'une machine à partir d'informations transmises par un carton perforé. Leur métier à tisser de 1805 fut le premier équipement à être doté de cette technique et, de ce point de vue, il peut être considéré comme l'ancêtre de la commande numérique. Il faut cependant rattacher l'exploitation industrielle de la CN au développement de l'électronique.

En 1947, à Traverse City dans l'État du Michigan, John Parsons fabrique pour le compte de l'US Air Force des pales d'hélicoptère par reproduction. Pour façonner ses gabarits, il utilise une méthode consistant à percer plusieurs centaines de trous faiblement espacés de manière à approcher le profil théorique. L'emplacement et la profondeur de chaque trou sont calculés

avec précision par un ordinateur IBM à cartes perforées. La finition de la surface est obtenue par des opérations manuelles de polissage.

Mais, lorsque l'US Air Force confie à ce même Parsons la réalisation de pièces de formes encore plus complexes pour ses futurs avions supersoniques, celui-ci réalise que sa méthode est trop approximative et que seul un usinage continu en 3 dimensions sera en mesure de donner satisfaction.

Au printemps 1949, il confie alors au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le soin de développer des asservissements capables de piloter une machine qui recevra des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes.

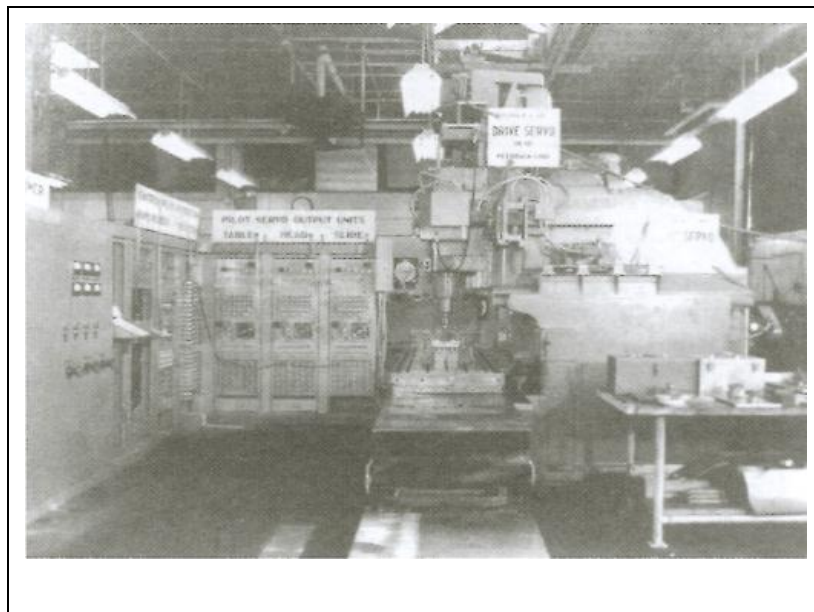


Figure. 1.1 : La première MOCN 1952

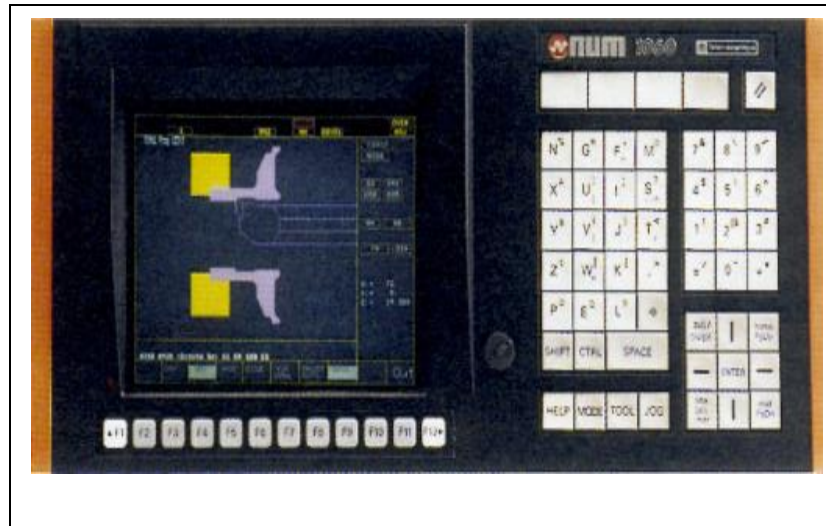


Figure. 1.2 : Pupitre opérateur d'une CN 32 bits

Cette machine, une *fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale* (figure 1.1), conçue pour exécuter des déplacements simultanés suivant 3 axes, est officiellement présentée en septembre 1952 dans le Servomechanisms Laboratory du MIT. L'information mathématique étant la base du concept, on lui donne le nom de *numerical control*.

Il aurait pu tout aussi bien s'appeler *commande symbolique* !

Il faut encore attendre quelques années de travail de l'US Air Force et l'appui des chercheurs du MIT pour rendre la première machine outil à commande numérique (MOCN) réellement opérationnelle [1].

Les différentes étapes de développement de la CN sont les suivantes :

1954 : Bendix acquiert le brevet de Parsons et fabrique la première CN industrielle.

1955 : à Font du Lac (Wisconsin), le constructeur américain Giddins & Lewis commercialise la première MOCN.

1959 : apparition de la CN en Europe (foire de Hanovre).

1964 : en France, la Télémécanique Électrique lance la CN NUM 100 conçue à base de relais Téléstat.

1968 : la CN adopte les circuits intégrés ; elle devient plus compacte et plus puissante.

1972 : les mini-calculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC.

1976 : développement des CN à microprocesseurs.

1984 : apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel.

1986 : les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la fabrication flexible (CIM).

1990 : développement des CN à microprocesseurs 32 bits (figure 1.2).

1.1.2. Justification de la CN :

1.1.2.1. Automaticité :

Le premier avantage d'une CN est d'offrir aux machines qui en sont équipées un très haut niveau d'automaticité. Sur de telles machines, l'intervention de l'opérateur nécessaire pour assurer la production de pièces peut être considérablement réduite voire supprimée.

De nombreuses MOCN peuvent ainsi fonctionner sans aucune assistance pendant toute la durée de leur cycle d'usinage, laissant l'opérateur libre d'accomplir d'autres tâches en dehors du poste de travail. Cette caractéristique présente par ailleurs un certain nombre d'avantages moins palpables mais tout aussi importants, tels qu'une diminution notable de la fatigue de l'opérateur, moins d'erreurs d'origine humaine et un temps d'usinage constant et prévisible pour chaque pièce d'une même série.

Si l'on compare une MO conventionnelle et une MOCN, on peut considérer que le temps copeau est assez voisin sur les deux types de machines. En revanche, la productivité comparée de diverses catégories de machines de niveaux d'automatisation différent, c'est-à-dire ce même temps copeau ramené au temps effectif de production, est très différent compte tenu de la réduction importante des temps non productifs que l'on enregistre sur les machines à fort taux d'automatisation (figure 1.3).

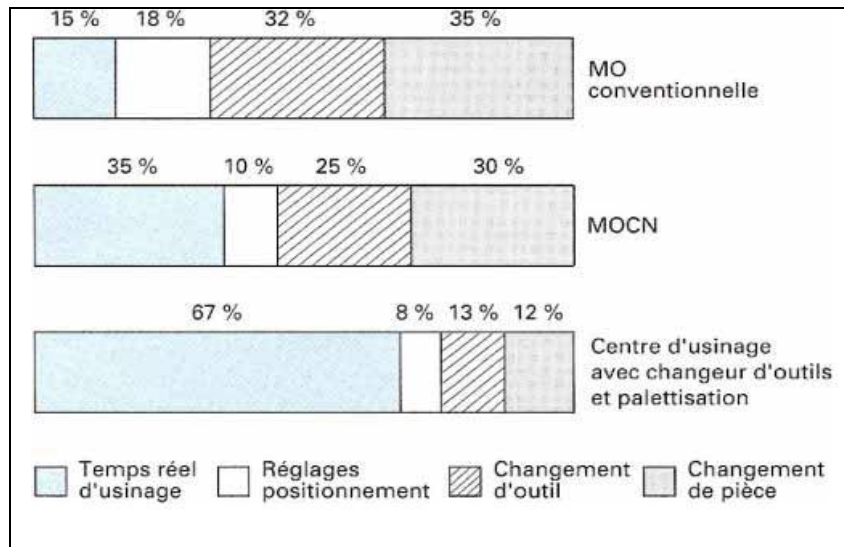


Figure. 1.3 : Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation.

1.1.2.2. Flexibilité :

Puisqu'elles sont pilotées à partir d'un programme, les MOCN peuvent usiner des pièces différentes aussi facilement que l'on charge un nouveau programme. Une fois vérifié puis exécuté pour la première série, ce programme peut être facilement rappelé lorsque la même série se représente.

Une MOCN se caractérise en outre par des temps de réglage très courts qui répondent parfaitement aux impératifs de la production en flux tendus.

La grande souplesse d'utilisation de la CN entraîne une quantité non négligeable d'autres avantages :

- changement aisé du programme d'usinage des pièces ;
- réduction des en-cours de fabrication ;
- réduction des outillages et suppression des gabarits ;
- diminution du nombre des outils spéciaux et des outils de forme ;
- réduction des temps de préparation et de réglage du poste de travail (la plupart des réglages, en particulier des outils, étant effectués hors machine) ;
- prise en compte rapide des modifications d'usinage (il est plus facile de modifier une ligne de programme qu'un outillage spécial ou un gabarit) ;
- définition plus rapide et plus fiable des conditions optimales d'usinage ;

- réduction du nombre de prises de pièces du fait de l'universalité de la machine ;
- diminution du temps d'attente entre les diverses machines d'usinage d'un atelier ;
- gain sur les surfaces au sol occupées dans l'atelier ;
- possibilité de réaliser des pièces complexes en gérant des déplacements simultanés sur plusieurs axes ;
- contrôle automatique des outils et des dimensions de pièces avec prise en compte par la CN des corrections à effectuer.

1.1.2.3. Sécurité :

La CN a beaucoup contribué à améliorer la sécurité des machines :

- en premier lieu, parce qu'elle connaît très précisément l'enveloppe de travail dans laquelle doivent évoluer les outils (possibilité de mémorisation des courses maximales des organes mobiles) ;
- ensuite, parce qu'elle permet une simulation graphique hors usinage des programmes nouvellement créés pour vérification et détection des risques éventuels de collision ;
- enfin, parce qu'en exerçant une surveillance permanente de l'usinage en cours, elle peut décider d'en interrompre le déroulement et d'alerter l'opérateur en cas d'incident.

Il est par ailleurs admis que le niveau de performances très élevé atteint par les MOCN conduit les constructeurs à prévoir des dispositifs de protection très élaborés (contre les projections de copeaux ou de liquide d'arrosage) qui ne s'imposent pas nécessairement sur une MO conventionnelle [1].

1.1.2.4. Nécessités économiques et techniques :

Symbole de précision, de reproductivité, de fiabilité et de flexibilité, qualités primordiales dans une économie de marché où les produits se caractérisent en termes de prix, de qualité et de délai de mise à disposition, la CN se montre économiquement intéressante pour produire à l'unité ou en série toutes les sortes de pièces, même les plus simples.

Une fois vérifié et validé, un programme assure la réalisation de 2, 10 ou 1 000 pièces identiques avec la même régularité de précision et la même qualité d'usinage, sans que l'habileté de l'opérateur n'intervienne.

Il convient, en outre, de souligner que la CN ouvre de nouvelles perspectives en permettant la définition de pièces complexes qu'il est pratiquement impossible de concevoir et de fabriquer sur des MO conventionnelles.

Le système de fabrication le plus rentable est celui qui engendre le coût de pièce le plus bas. Ce coût est calculé par la formule suivante (1) :

$$C = C_u + C_r/L + C_p/ZL \dots\dots\dots (1)$$

Avec : C Coût total de fabrication pour une pièce.

C_u Coût d'usinage d'une pièce (matière, main d'œuvre directe, coût machine).

C_r Coût de lancement de la série et des réglages des outils et de la machine.

L Nombre de pièces d'une série.

C_p Coût de préparation (gammes et programmes d'usinage) et des outillages.

Z Nombre de séries.

$Z.L$ Nombre total de pièces fabriquées.

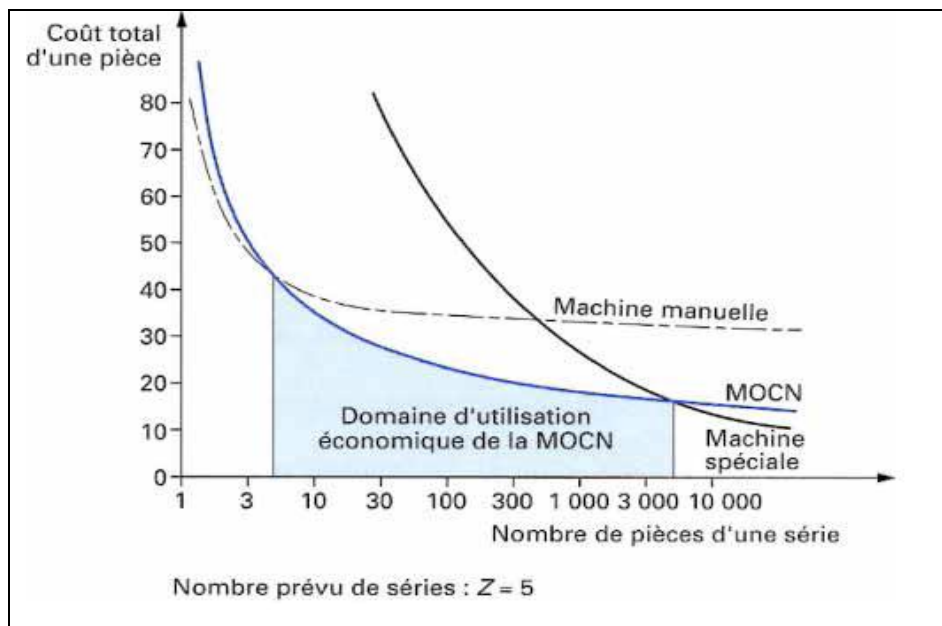


Figure. 1.4 : Domaine d'utilisation économique des MOCN.

On constate que le coût total de fabrication par pièce varie en fonction de la quantité ($Z.L$) d'une manière hyperbolique. Si l'on considère le nombre de pièces usinées, le domaine d'utilisation économique de la MOCN se situe dans la petite et la moyenne séries. Les MO

conventionnelles restent rentables pour des opérations simples où elles ont malgré tout tendance à être remplacées par des MOCN d'entrée de gamme.

Pour les grandes séries, le recours à des machines spéciales à automatisation rigide (machines transfert, tours à cames, fraiseuses de copiage) se montre encore très avantageux.

Si l'on représente le coût d'une pièce en fonction du nombre d'exemplaires à fabriquer, on peut déterminer les limites économiques d'utilisation de la CN. Dans l'exemple de la figure 1.4, au-dessus de 5 pièces par série, l'usinage sur une MO à commande manuelle est plus rentable que sur une MOCN ; de la même façon, une machine spéciale le sera au-dessus de 5 000 pièces par série [1].

1.2. Différents types de machines :

1.2.1. Eléments principaux :

La (figure 1.5) indique les éléments principaux d'une fraiseuse universelle de type à console, d'une fraiseuse à banc à commande numérique et d'un centre d'usinage à plateau tournant et palettes interchangeables. Ces machines comportent :

- une table destinée à recevoir la pièce ;
- une broche qui reçoit successivement les différents outils. La broche est logée dans un porte-broche que l'on nomme aussi *poupée* ou, lorsqu'il est de forme allongée, *coulant* ou *bélier*.

La table et la broche se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre par au moins trois mouvements perpendiculaires (X, Y, Z). La disposition des éléments varie beaucoup en fonction de l'architecture de chaque machine.

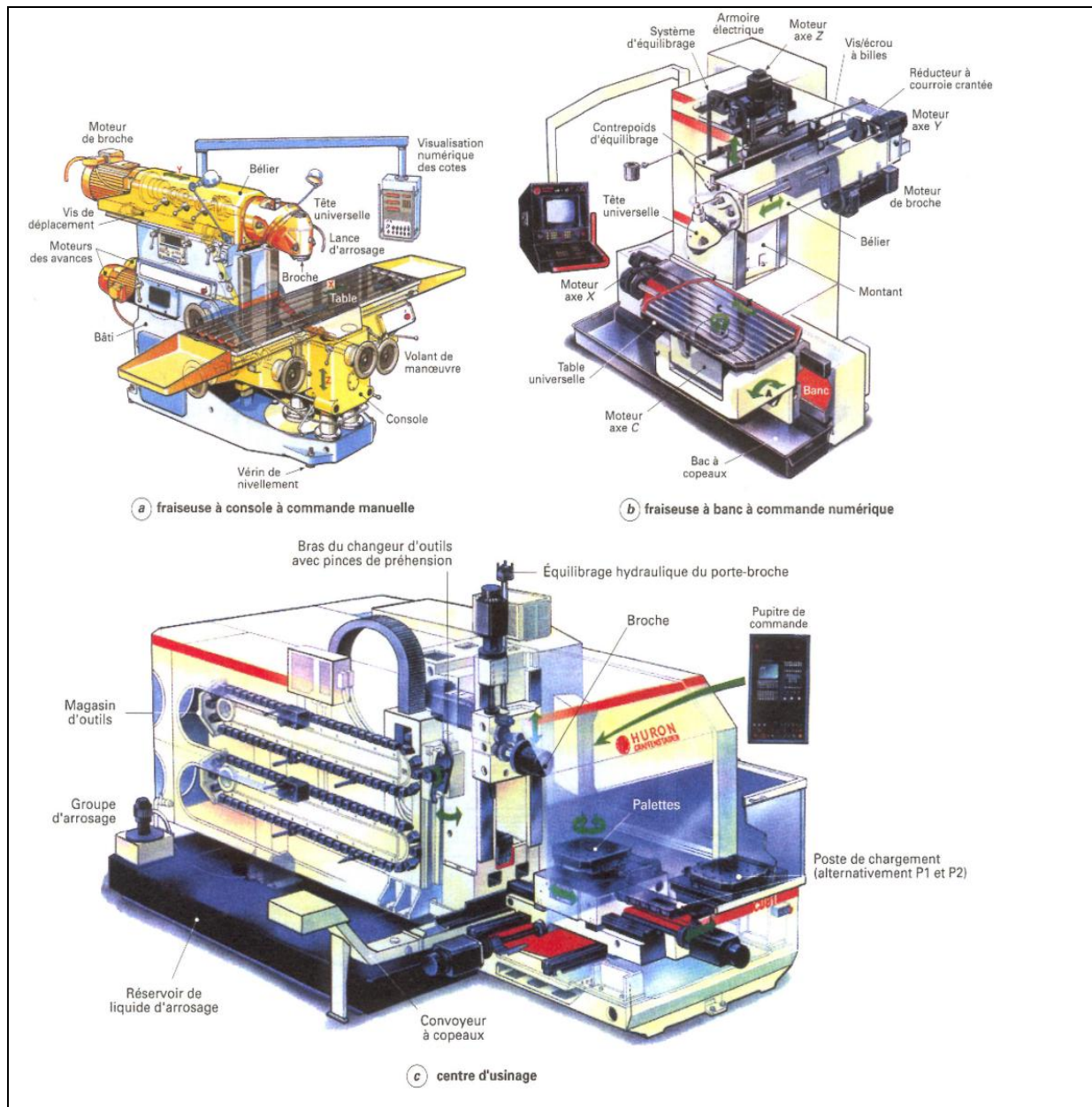


Figure. 1.5 : Exemple de fraiseuses et centres d'usinage (doc. Huron Graffenstaden).

1.2.2. Classification :

En général, la classification normalisée n'est pas respectée dans les dénominations commerciales. Compte tenu de la grande variété de modèles, plusieurs critères sont nécessaires pour caractériser une machine et ceux qui sont le plus souvent utilisés par les constructeurs sont indiqués ci-dessous. Nous attirons cependant l'attention sur le manque de rigueur des dénominations commerciales.

- **Par type d'usinage (ou d'emploi) :**

- fraiseuse ou fraiseuse-aléuseuse, capable des différents travaux;
- aléuseuse-fraiseuse ou genre aléuseuse, possédant par rapport aux précédentes une broche d'alésage coulissante ;
- fraiseuse universelle et fraiseuse d'outillage, possédant le plus souvent un moyen d'orientation relative de la pièce et de la broche ; ces machines sont en général très maniables pour tous travaux unitaires variés ;
- fraiseuses spécialisées à prédominance de fraisage et vocation particulière : fraisage des rainures, des vilebrequins, des arbres à cames, des panneaux ou des longerons d'aviation, etc. ;
- centre d'usinage, toujours caractérisé par la CN et le changement automatique d'outils, et éventuellement un dispositif de palettes.

- **Par dimensions :**

- par la course de déplacement sur l'axe X ;
- par la course de déplacement sur les trois axes principaux X, Y, Z ;

Pour les centres d'usinage à broche horizontale et palettes, par les dimensions de la surface de la palette exprimées en millimètres (exemple : 500×500).

- **Par position de la broche :**

- à broche horizontale ;
- à broche verticale ;

- **Par type de commande :**

- à commande manuelle (conventionnelle, classique) ;
- à reproduire ;
- à commande numérique (la dénomination est souvent suivie du nombre d'axes contrôlés par la CN) ;
- à broche orientable (universelle, multiaxe).

- **Par architecture (figure 1.6) :**

- à console.....(A);

- à banc.....(B) ;
- à table croisée.....(C) ;
- à table inclinable, à table universelle (inclinable dans trois plans).....(D) ;
- à montant mobile.....(E) ;
- à portique fixe(F);
- à portique mobile.....(G).

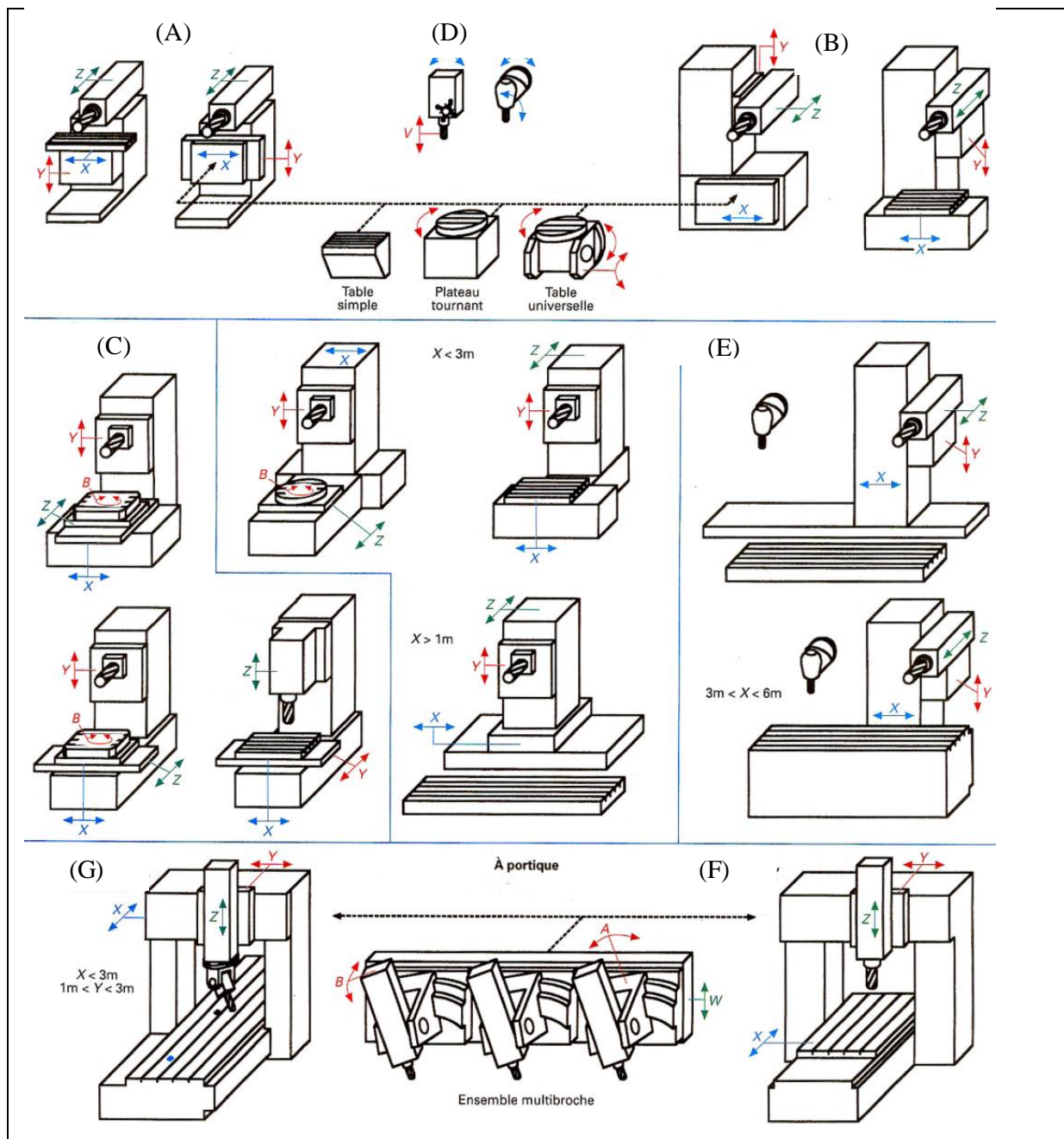


Figure. 1.6 : Différents types d'architectures de machine.

1.2.3. Architecture :

Chacun des axes de déplacement est défini par une lettre (A, B, \dots, X, Y, Z) selon une norme dont les principales règles sont :

Chaque axe est considéré comme le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce ;

- Z est parallèle à l'axe de rotation de la broche, le sens positif de Z va de la pièce vers l'outil ;
- X et Y font partie d'un trièdre rectangle XYZ défini selon la règle des 3 doigts de la main droite ;
- A, B, C correspondent respectivement à des rotations autour de X, Y, Z ;
- U, V, W correspondent respectivement à des déplacements secondaires parallèles à X, Y, Z .

La (figure 1.6) donne une vue générale des types d'architectures les plus couramment retenues par les constructeurs.

1.3. LES MACHINES 5 AXES :

La complexité des formes élaborées en CAO pour les pièces d'aérodynamique ou d'hydrodynamique rend leur usinage très difficile voire impossible sur des machines à 3 axes. On utilise alors des fraiseuses à 5 axes permettant d'obtenir une plus grande liberté dans le positionnement de l'outil afin d'éviter les collisions. C'est également le cas pour des pièces prismatiques plus simples lorsque certaines parties d'une pièce ne sont pas accessibles en usinage à 3 axes sans démonter la pièce. La machines 5 axes permet de diminuer le nombre de posages donc de diminuer les erreurs de remise en position [1].

1.3.1. Historiques des machines 5 axes

Longtemps avant que les contrôleurs de machines CNC soient apparus, les machines à 4, 5, 6 et 12 axes et plus, dénommées machines multiaxes, étaient utilisés. Les axes individuels étaient contrôlés mécaniquement par le biais d'un monte-leviers sur des plaques à came. Certaines machines avaient plus de 12 disques à came, qui contrôlent non seulement les mouvements de rotation outil/table, mais aussi le serrage et desserrage des dispositifs d'ablocage de la pièce. Ces machines étaient lourdes et longues à mettre en place, mais elles étaient parfaitement adaptées à la production de masse.

Les premières machines à CN (commande numérique sans mémoire interne) étaient lourdes à mettre en place et à exploiter, mais elles étaient idéales pour la production de masse. Au début, seulement les ateliers les plus riches et les plus établis ont pu se les offrir. La programmation a été un processus long et source d'erreurs. Bientôt, les constructeurs de machine ont ajouté la mémoire interne à leurs contrôleurs, puis ils ont ajouté la possibilité d'exécuter une logique de branchement simple boucle, et d'appeler des sous-programmes à partir d'autres sous-programmes. Il était possible d'employer ces macro-langages directement sur la machine et de changer rapidement des montages, spécialement pour le même type de pièces. Les différents constructeurs de machines ont développé diverses solutions, qui ont produit un certain nombre de langages de programmation de CNC (commande numérique avec mémoire interne). Les compagnies avec des noms familiers comme Fanuc, Acramatic, Heidenhain, Siemens, Mazatrol, etc., ont tous développé leurs propres langages, mais ceci est rapidement devenu un problème. Par exemple, quelques ateliers ont mis en marche dix machines avec huit langages différents. Si un travail répété arrivait, et la machine programmée à l'origine était occupée, un nouveau programme devra être réécrit à partir de zéro en raison des différences de langage.

Ensuite, les premiers systèmes rudimentaires de CAO (conception assistée par ordinateur) /FAO (fabrication assistée par ordinateur) ont été développés. Au début, ces solutions de logiciel ont été introduites par les mêmes compagnies qui ont développé les contrôleurs.

Peu après, des personnes entreprenantes ont écrit leur propre logiciel de CFAO. Ce saut en technologie était énorme parce qu'il a permis à des ingénieurs de :

- Dessiner les pièces dans un logiciel de CAO ;
- Générer un chemin d'outil dans un langage générique de système FAO.
- Traduire rapidement dans des langages multiples de G-Code, en utilisant le post-processeur (post processor.) approprié.

Les machines multi-axes passaient par un processus similaire, mais parce qu'elles étaient plus complexes, ce processus a pris plus de temps. Premièrement, les machines étaient chères à l'achat et à l'entretien, et plus difficile à programmer. Seules les grandes entreprises de l'aérospatiale ont eu le besoin, l'argent, et le personnel pour gérer les applications multi-axes.

Aujourd'hui, il y a de nombreux constructeurs de machines offrant une variété de matériels multi-axes dans une grande variété de configurations, de qualité et de prix. Les ordinateurs sont devenus très abordables, et les systèmes CAO/FAO offrent maintenant des stratégies de découpe multi-axes excellentes avec un contrôle d'outil élevé et de larges bibliothèques de post-processeur.

La plupart des constructeurs de machines sont en expansion de production et embrassent la nouvelle technologie.

L'usinage multi-axes est un domaine en constante expansion, avec des possibilités quasiment illimitées et est devenu polyvalent, précis, et accessible. Comme résultat, encore de plus petits ateliers peuvent, et font mettre en application l'usinage multi-axes.

1.3.2. Configurations des machines 5 axes :

Beaucoup de mots à la mode de l'industrie sont utilisés pour décrire les machines 5 axes. Pour simplifier les choses, nous dirons qu'il y a **trois critères de construction majeurs** de ces types de machines.

- Les propriétés physiques de la machine.
- Le système de commande CNC.
- Les capacités du contrôleur CNC.

La combinaison parfaite des caractéristiques ci-dessus va construire une machine de fraisage 5-axes à CNC, rapide, précise, et facile à programmer et à utiliser. Et comme résultat, il existe de nombreuses variantes et solutions. Les illustrations dans la **(Figure. 1.7)** quelques variantes de position de la tête et de la table d'une machine CNC 5 axes.

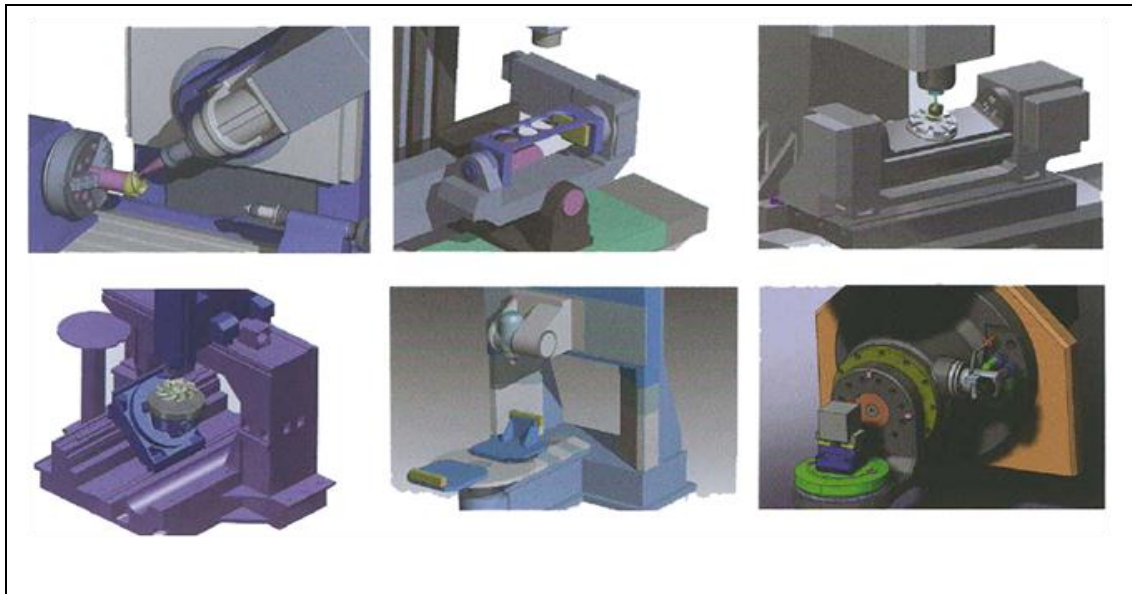


Figure. 1.7 : Variantes de position de la tête et de la table d'une machine CNC.

Les positions illustrées sur la figure.1.7 sont toutes des configurations très populaires, mais aucun d'eux n'est « Standard ». C'est fraiseuses multi-axes peuvent être aussi organisées dans trois principaux types de machines :

- i- **La machine multi-axes table / table (figure 1.8)** exécute les mouvements de rotation par double rotation. La table de rotation principale porte la table de rotation secondaire, qui à son tour porte le dispositif de serrage (fixture) et la pièce. Cette configuration est connue plus, par « **Dispositif Tilting** ».

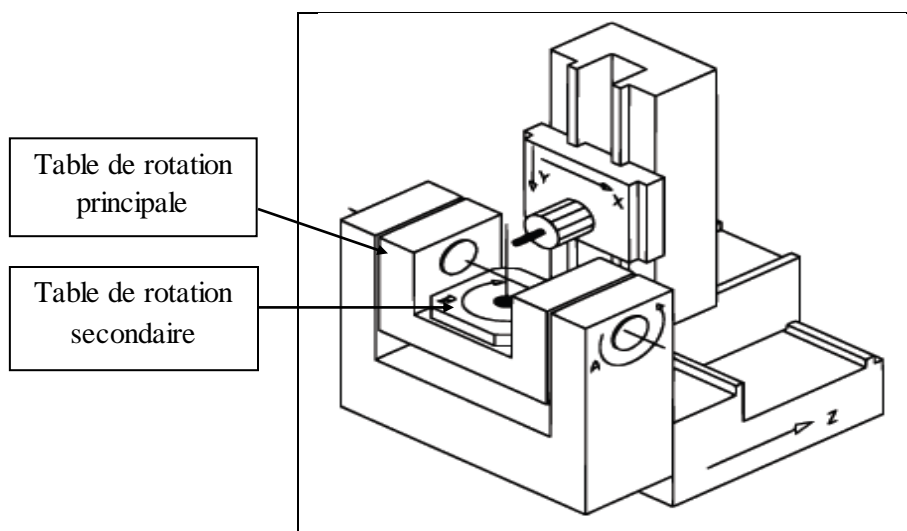


Figure. 1.8 : Machine multi-axes table/table.

- ii- **La machine multi-axes tête/table (Head/Table multi-axis machines)** exécute les mouvements de rotation par la table, qui porte la pièce à usiner. La tête de la broche articule l'outil avec des mouvements d'inclinaison, voir (**Figure 1.9**).

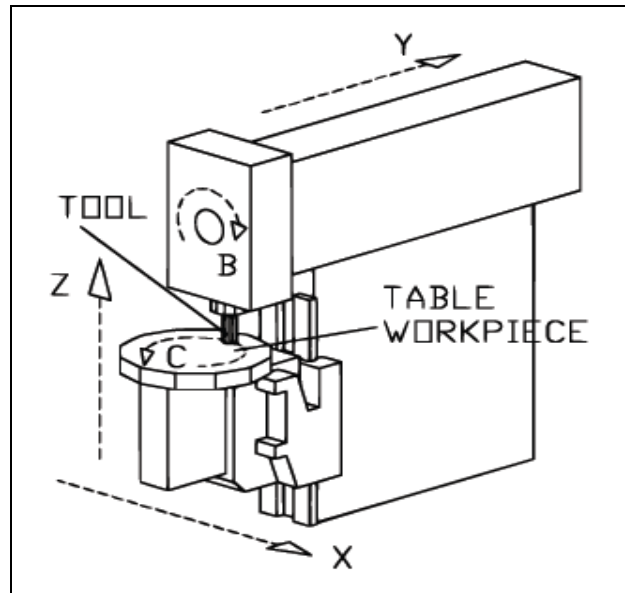


Figure. 1.9 : Machine multi-axes tête/table.

- iii- **La machine multi-axes tête/tête (Head/Head multi-axis machines)** exécute tous les mouvements de rotations/pivotements par articulation de la tête de la broche de la machine. La pièce usinée est stationnaire. Cette configuration est connue plus par le nom « **Tête Twist** », voir (**Figure 1.10**) [1].

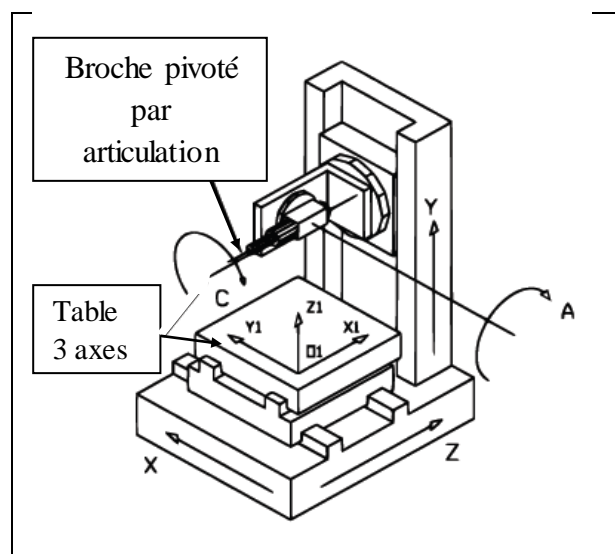


Figure. 1.10 : Machine multi-axes tête/tête.

1.3.3. Critères de choix d'une machine 5 axes :

Le choix va s'effectuer en fonction des caractéristiques des pièces à usiner et des données quantitatives et économiques. Ces données sont, la plupart du temps, élaborées par le bureau des méthodes et reposent sur les fabrications actuelles ou déjà prévues pour la machine.

Le type de machine est sélectionné en fonction des données, parmi lesquelles :

- Morphologie des pièces à usiner.
- Opération d'usinage.
- Dimensions et poids des pièces à usiner.
- Précisions d'usinage demandées.
- Complexité et diversité des usinages.
- Dureté des matériaux à usiner.
- Quantités de pièces à usiner.

1.3.4. Machine à plateau tilting :

Cette configuration de machine 5axes permettant une bonne compacité, est à table bi-rotative. Cette cinématique n'a pas d'influence en 5 axes sur la position relative outil/pièce selon les longueurs outils. Seule la position de la pièce par rapport à l'origine machine devra être prise en compte pour le calcul des trajectoires outil.

Les machines de fraisage multi-axes tête/table peuvent être verticales ou horizontales. Tous les mouvements de rotation excepté la broche (spindle) sont faits par les tables de ces machines. La table rotative principale porte une deuxième table rotative.

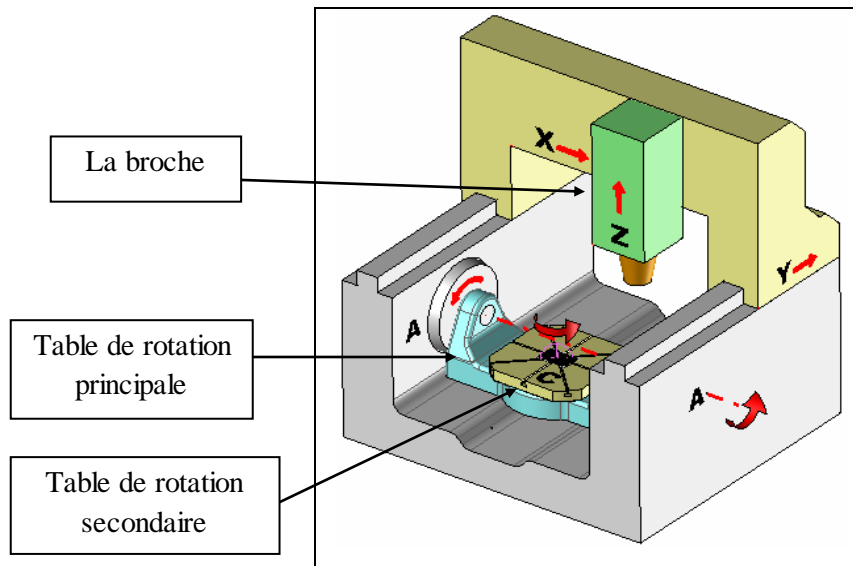


Figure. 1.11 : Configuration tilting.

Les dispositifs rotatifs de la machine doivent être capables de manipuler le poids de la pièce et du montage, et ces possibilités sont un facteur important quand des mouvements rapides sont considérés.

La plupart de ces machines ont des limites de rotation minimum et maximum sur l'un des axes de rotation. D'autres auront un mouvement de rotation illimité sur l'autre axe. Certaines ont même la capacité de centrifuger le travail comme le ferait un tour (machine outil tour).

Les machines tête/table dédiés sont très capables d'effectuer le **travail d'indexation/positionnement** et sont toutes aussi capables du **travail simultané**. Les différences inhérentes entre les deux sont mentionnées ci-dessous :

- La **méthode d'indexation** maintient la pièce usinée beaucoup plus rigidement qu'il ne l'est pour le travail d'usinage simultané parce que les axes de rotation sont bloqués (locked) lors de l'usinage. Lors de la rotation d'un axe, l'axe de rotation doit d'abord être débloqué avec une fonction-M (M-Code) désigné. L'axe est alors tourné, et il est bloqué avec une autre fonction-M (M-Code) avant que l'usinage ait repris. Cette séquence permet à l'usinage d'être fait dans l'état le plus rigide de la machine.
- Lors de l'utilisation des **techniques de fraisage simultané**, tous les freins doivent être désengagés, ce qui mettra l'appareil en mode libre. Pour cette raison, c'est toujours une

bonne idée d'utiliser (quand c'est possible) les techniques de fraisage par indexation/positionnement pour des travaux de dégrossissage [1].

1.4 Le Forage :

Le début industriel du forage pétrolier a été marqué en 1889, à 'Titusville (Pennsylvanie)' lorsque le pétrole jaillissait pour la première fois d'un puits foré à 21,18 m par le 'Colonel Drake', mais il ne faut pas oublier les très nombreux puits forés bien avant pour la production d'eau, de Saumures, du naphthe....Tous ces forage anciens, y compris celui du 'Colonel Drake', était forés par battage.

C'est au début du siècle que 'Antony Lucas' démontra au monde entier l'efficacité du forage Rotary par la découverte de champ de 'Spindeltop (Texas)' en utilisant la combinaison d'un outil rotatif et l'injection continue de boue. Depuis ce jour, cette technique est universellement utilisée et a profité des améliorations apportées par le progrès technique.

Les principaux domaines d'intervention du forage peuvent être groupés sous les rubriques suivantes :

- Recherche et exploitation de matières utiles : minerais, charbon, eau, pétrole, matériaux de carrières ;
- Reconnaissance des sols dans le cadre d'études géologiques, géotechniques, hydrogéologiques, pédologiques ;
- Préparation de sols en vue de la réalisation d'ouvrages de génie civil : pieux forés, injections.

Bien qu'étant une technique très ancienne, le forage s'est beaucoup développé avec les recherches minières et pétrolières, et il a mis à profit de nombreuses innovations techniques déterminantes comme l'utilisation de matériaux très durs et d'aciers spéciaux, l'air comprimé, la transmission hydraulique [1].

1.5 Méthodes de foration :

On distingue trois principales méthodes de foration, à savoir :

- Forage a percussion ou battage.

- Forage a rotation (ou forage rotary).
- Forage a roto-percussion.

Sachant que pour chacune de ces méthodes de forage il y a de très grande variétés d'outils, de matériels, et de procédés (méthodes) de mise en œuvre, d'application et de savoir faire.

1.5.1 Forage a percussion ou battage :

C'est la méthode de forage la plus anciennement connue et les Chinois, notamment, l'utilisaient depuis des temps très reculés pour la recherche d'eau. Dans l'appareillage le plus simple, la destruction de la roche et l'avancement du trou qui en résulte sont obtenus à l'aide d'un trépan suspendu à un câble, auquel un balancier ou un treuil à chute libre imprime un mouvement alternatif de haut en bas. C'est le sondage au câble ou pennsylvanien.

Le trou est curé périodiquement au moyen d'une soupape qui remonte les débris de roche, tandis que, dans les terrains non cohérents et éboulés, un tubage poussé à l'avancement (havage) assure la tenue des parois du forage et évite le coincement de l'outil, tout en permettant de connaître les cotes de prélèvement avec une meilleure précision.

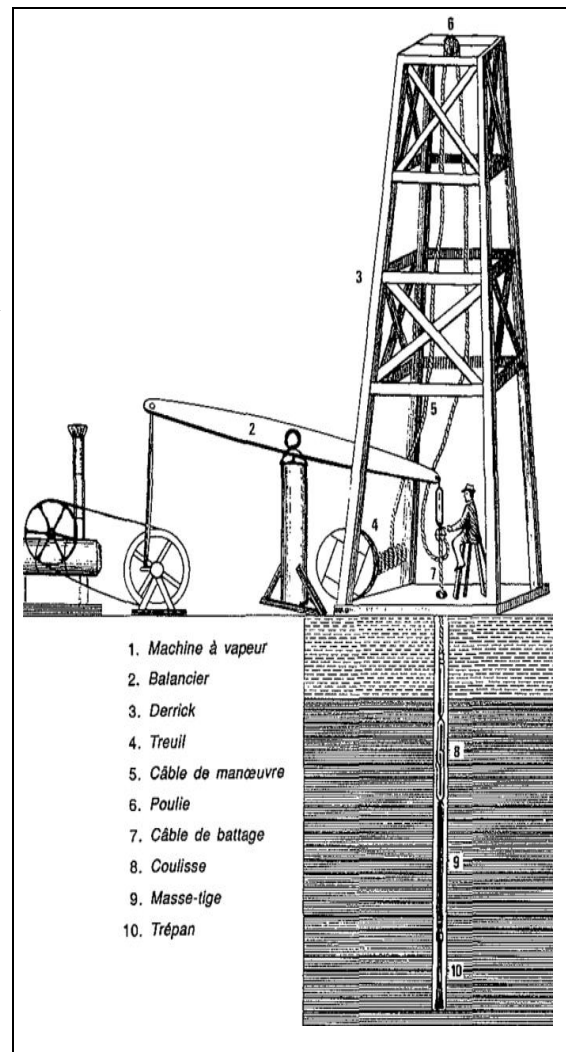


Figure 1.12 : Le forage par battage

1.5.2 Forage a rotation (ou forage rotary) :

La méthode Rotary consiste à utiliser des trépan à dents type tricônes ou des trépan monobloc comme les outils diamants ou PDC, sur lesquels on applique une force procurée par poids pour en assurer la pénétration tout en les entrainant en rotation pour assurer le découpage. L'outil est relié à la machine par un système de tiges ou de tubages.

L'avantage de cette technique est de pouvoir injecter en continu un fluide au niveau de l'outil destructif de la formation pour emporter les débris hors du trou grâce au courant ascensionnel de ce fluide vers la surface.

Puisque la technique universellement connue du forage Rotary est utilisée de nos jours alors on parlera dorénavant seulement de cette méthode (ou technique) de forage.

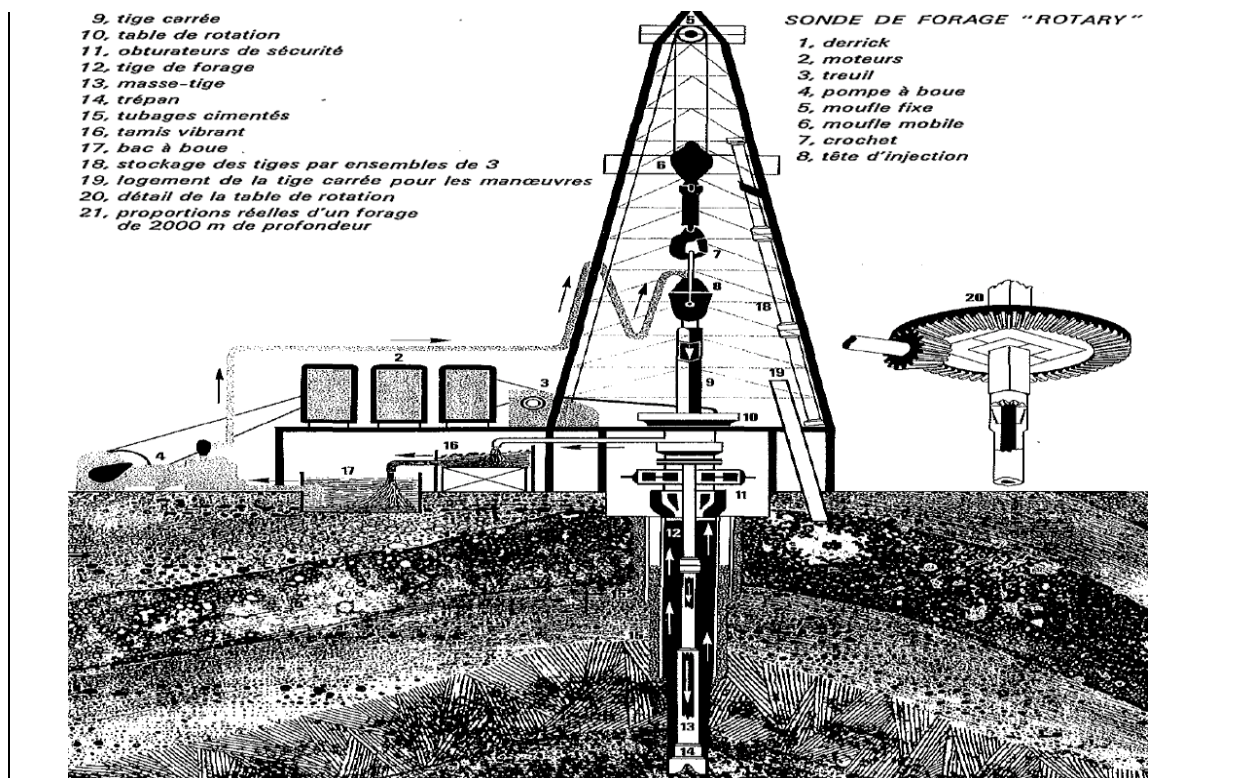


Figure 1.13 : Sonde de forage Rotary.

1.5.3 Forage a roto-percussion :

Le forage à roto-percussion consiste à appliquer à l'outil de forage, ou taillant, un couple de rotation et une énergie de frappe, cette dernière à cadence élevée (1 200 à 1 500 coups/min, par exemple).

Jusqu'à un passé récent (vers 1970) cette méthode, particulièrement adaptée aux roches dures, était principalement utilisée pour la reconnaissance et l'abattage, en carrières et en tunnels au rocher. Depuis plusieurs années, l'apparition d matériels nouveaux et de plus en plus performants permet l'ouverture du champ d'action de la méthode à la reconnaissance des sols.

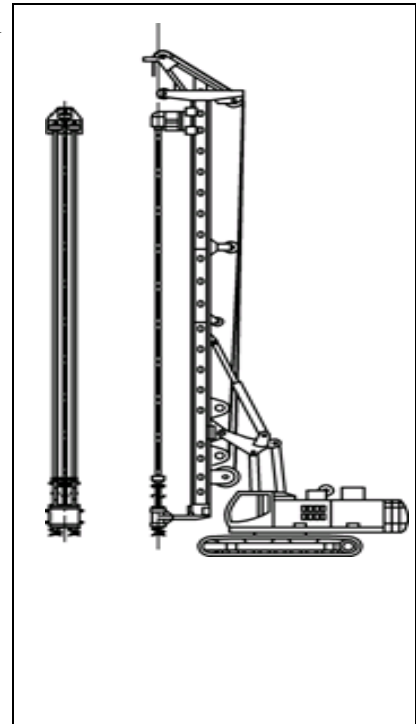


Figure 1.14 : Machine a percussion.

Les outils utilisés sont des taillants en croix ou à boutons pour fragmenter la roche et la réduire en cuttings lors des impacts répétés.

1.6 Les différents outils de forage :

On a deux grandes catégories d'outils de forage :

- Les outils à molettes.
- Les outils diamantés.

Et pour chacune des catégories on a plusieurs variantes. Voyons maintenant un aperçu des différents types d'outils de forage :

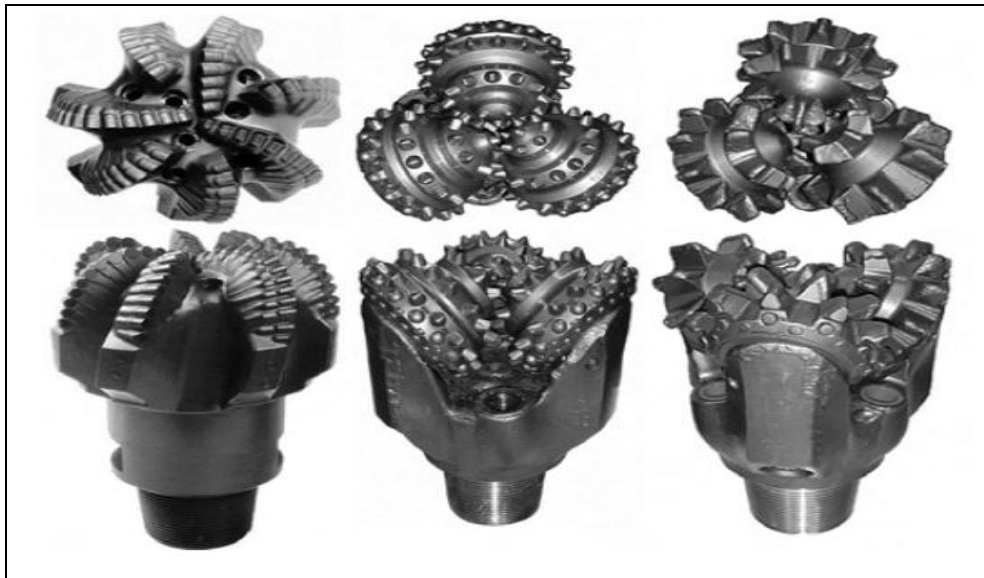


Figure 1.15 : Différents types d'outils (de gauche a droite : PDC, TCI, et outil a dents fraisé).

1.6.1 Les outils a molettes :

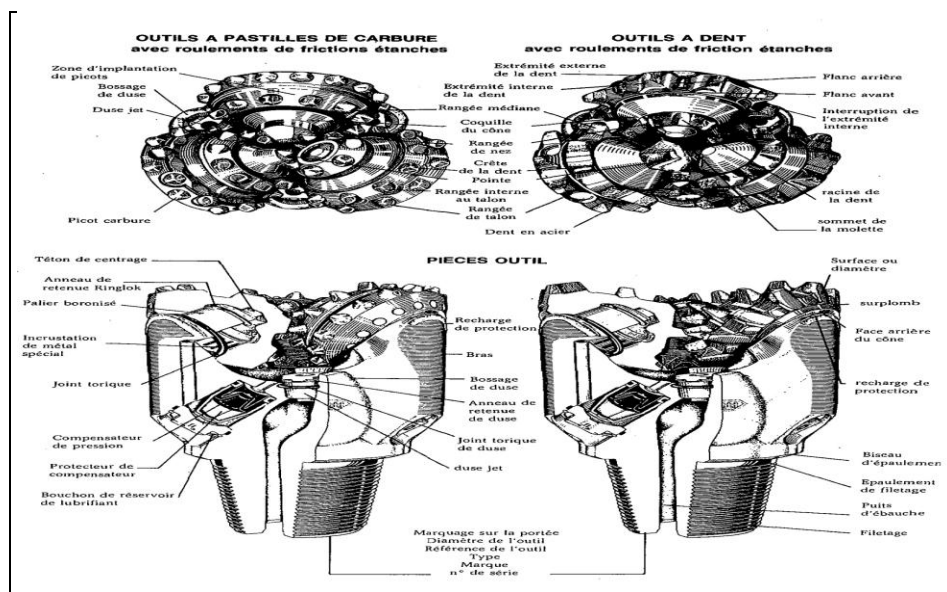


Figure 1.16 : Nomenclature des tricônes (Source : Hughes Tools).

Un outil à molettes est constitué de trois parties principales :

- Le corps de l'outil,
- Les roulements,

- **Les molettes** : Ces molettes sont montées sur des arbres de roulement qui sont parties intégrantes du corps de l'outil, elle présente des rangées circonférentielles de dents s'intercalant entre les rangées de dents des cônes adjacents. Les dents son soit :
 - En acier usiné dans le cône (Outil a dents)),
 - Soit des picots d'un carbure de tungstène serti dans des perçages à la surface des cônes (Outil a pastilles de carbure).

La taille ou l'épaisseur et différents constituants de l'outil dépende du type de formation à forer.

- Les outils pour formation tendre, qui nécessitent peu de poids, ont des roulements plus petits, des cônes moins épais et des jambes de plus faible section que pour les outils de formation dure.
- Les outils pour formation dures, qui travaille avec des poids importants, ont des éléments de coupe plus trapus, des roulements plus gros et des corps plus solides.

Désignations des tricônes :

L'international Association of Drilling Contractors (IADC) classe les tricônes à l'aide de quatre caractères (trois chiffres et une lettre). Exemple : '**517G**' qui signifie

- 5** : outil à picot pour formation tendre à moyennement tendre,
- 1** : classification de la plus faible dureté,
- 7** : pastilles de protection sur le diamètre et palier lisses,
- G** : protection renforcées.

1.6.2 Les outils diamantés :

Les outils diamantés sont de trois types et sont spécifiques par leur forme monobloc qui leur confère une certaine solidité, et la nature des éléments de coupes qui détruisent la roche de manière mécaniquement différente :

- **Diamant naturels** : Il abrassent la roche et travaillent comme une macro meule,

- **Diamant polycristallins** (Taillants PDC) : Il cisaille la roche en découpant des copeaux comme un outil de tournage des métaux,
- **Diamant polycristallins thermostables** (Taillants TSP) : pareille que le taillant PDC.

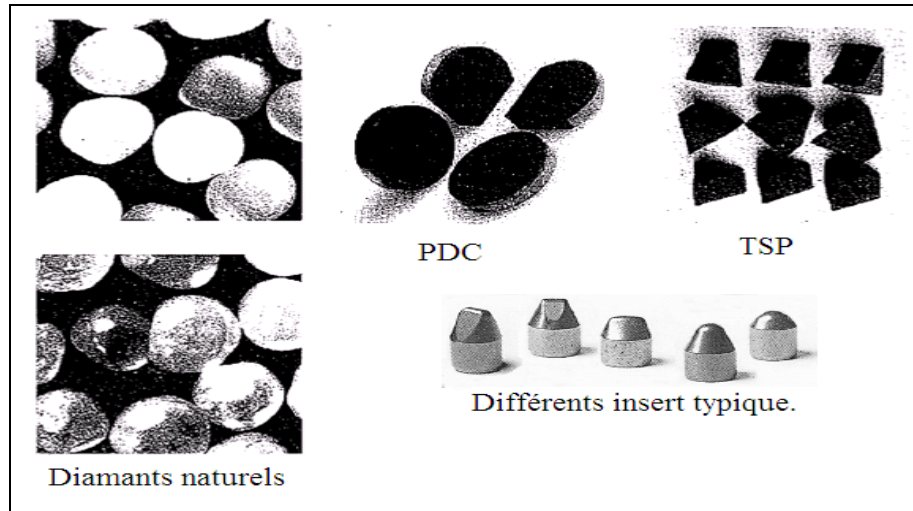


Figure 1.17 : Taillants des outils intégraux.

1.6.2.1 Outils diamant naturel :

Le diamant (carbone cristallisé) et le matériau le plus dur que l'on connaisse parmi les matériaux. Bien qu'il existe des règles générales pour le choix de la taille des diamants, l'expérience acquise lors de passes d'outils précédents reste le meilleur des guides.

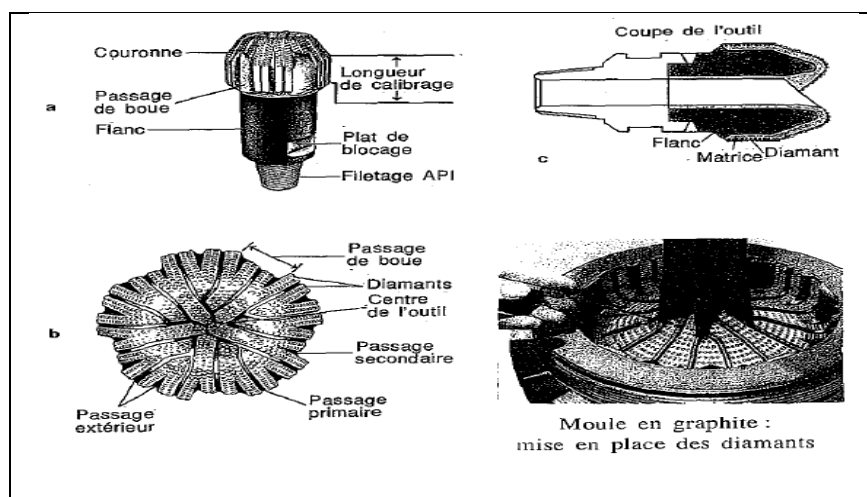


Figure 1.18 : Nomenclature des outils diamants naturels.

1.6.2.2 Les outils PDC :

Les outils à pastilles de diamant polycristallins existent soit avec :

- Les corps en acier : qui sont usinés puis recouverts de carbure de tungstène pour limiter l'érosion.
- Les corps en matrice : qui sont fabriqués à partir du même matériau au carbure tungstène que les outils diamant naturels.

C'est General Electric qui a mis au point la synthétisation de ses pastilles diamantées (Stratapax) constitué d'un dépôt de quelques dixièmes de millimètre de diamètre synthétique sur un disque en carbure de tungstène. Ces pastilles sont ensuite disposées à la surface de l'outil de façon à fournir à chaque élément de coupe l'action de cisaillement maximale.

Les limitations des PDC qui peuvent apparaître sont : la résistance au terrain abrasif, l'efficacité hydraulique pour le nettoyage des pastilles PDC et ils ne supportent pas des températures au-delà de 800 °C.

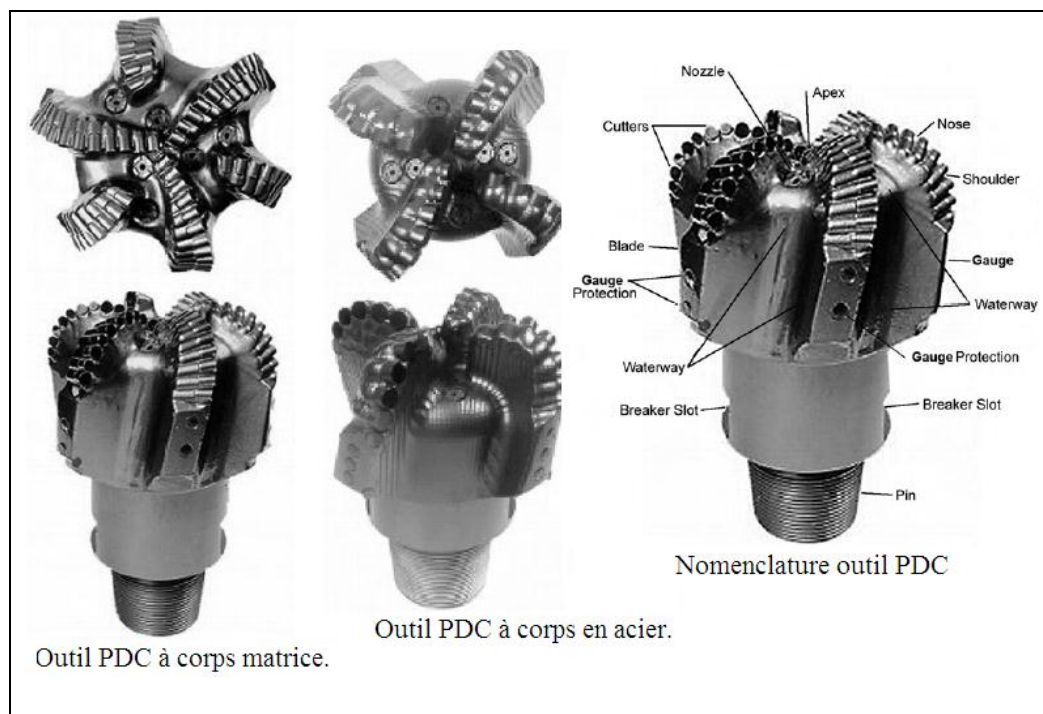


Figure 1.19 : Exemples et nomenclature d'outils PDC.

1.6.2.3 Les outils TSP :

La plus récente nouveauté en matière d'outils diamant est l'utilisation de diamants polycristallins thermiquement stables. Contrairement aux PDC, les TSP ont subi un traitement pour éliminer les éléments incompatibles d'un point de vue dilatation thermique, ils pourront donc supporter les températures de fabrication d'une matrice carbure. Leur forme triangulaire présente des arrêtes agressives pour le cisaillement de la roche. Leur utilisation est souvent associée à l'action de diamants naturels.

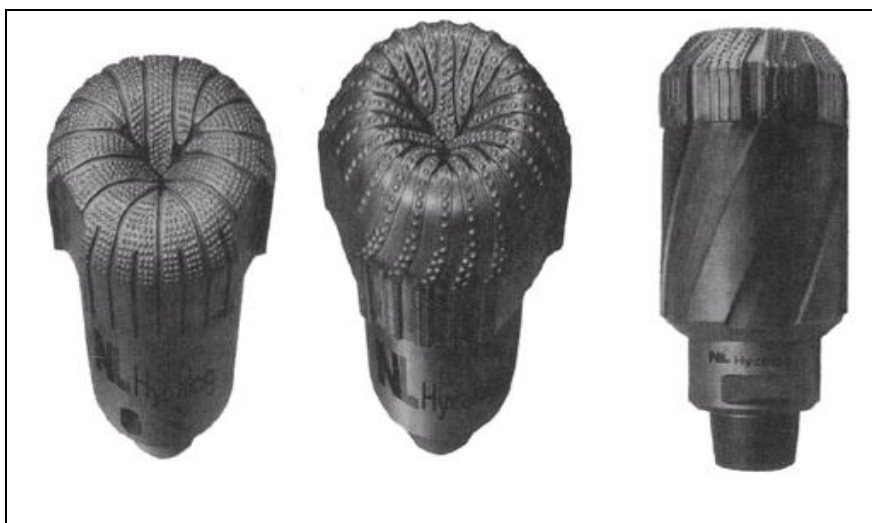


Figure 1.20: Outils TSP.

1.6.2.4 Classification des outils diamantés (IADC) :

Cette classification se fait à l'aide de quatre caractères, elle est donc cohérente avec la classification des outils tricônes. Exemple : (XXXX)

1^{er} caractère (D, M, S, T, O) : définit le type d'élément de coupe PDC et corps fritté, PDC et corps acier, TSP, autres types.

2^{eme} caractère (1 à 9) : définit le type et la forme général du profil.

3^{eme} caractère : concerne l'hydraulique en général.

4^{eme} caractère (1 à 9) : définit la taille des éléments de coupe et leur densité sur l'outil [1].

CHAPITRE

2

**PROCESSUS D'ELABORATION DES PIECES DE
FORMES COMPLEXES**

2.1. Introduction :

L'élaboration de pièces de formes complexes par usinage 5-axes est un processus complexe, constitué de différentes activités. La première activité porte sur l'obtention d'un modèle CAO de la pièce à réaliser. Ce modèle géométrique est basé sur les spécifications géométriques et fonctionnelles qui sont traduites à partir des intentions du designer. La deuxième activité consiste à créer un modèle FAO qui dans le cadre de l'usinage, est constitué principalement de trajectoires d'usinage. Enfin, la pièce est réalisée au cours de la troisième étape par l'exécution des trajectoires d'usinage précédemment calculés. Le grand nombre de paramètres intervenant dans chacune de ces activités ainsi que les échanges d'informations entre activités constituent des difficultés et des limites pour la maîtrise du processus global afin de respecter les critères de productivité et de qualité du produit fini.

En effet, de nombreux verrous technologiques existent au sein de chacune de ces activités. La traduction des intentions du designer est bien souvent limitée par les outils CAO à sa disposition qui ne permettent pas d'exprimer complètement toutes les caractéristiques voulues (lignes de style, etc.). Le modèle CAO obtenu est une représentation approchée du concept initial. Il constitue cependant le modèle de référence pour les activités suivantes. En ce qui concerne l'activité de génération de trajectoires, la gestion des collisions, les positionnements précis de l'outil ou encore la prédiction de la géométrie usinée sont des points d'étude à considérer afin de garantir la conformité de la pièce vis-à-vis de la qualité requise. Lors de l'exécution des trajectoires, des défauts et/ou des pertes de productivité peuvent également apparaître selon les performances du couple MO-CN utilisé (influence de la structure de la machine outil, gestion de ses défauts géométriques, commande par la CN, etc.). Enfin, selon les typologies de pièces usinées, le procédé de coupe nécessite également une certaine maîtrise des efforts de coupe, des déformations ainsi que des vibrations qui peuvent être générées. Ainsi, ces verrous technologiques sont source d'écarts géométriques entre le produit fini et l'intention du designer.

Parmi les différentes activités du processus d'élaboration, le travail doctoral proposé se concentre sur la génération des trajectoires 5-axes. Si l'on considère le modèle de CAO comme donnée géométrique de référence, le calcul de trajectoires devient le point d'entrée du processus de réalisation des formes. Ainsi, la maîtrise du calcul des trajectoires 5-axes associée à la maîtrise de leur suivi doit permettre de réduire les écarts géométriques tout en maintenant une certaine productivité. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de s'assurer de

la correcte spécification des trajectoires 5-axes. Une fois le positionnement de l'outil défini, la construction de la trajectoire sur la pièce peut être optimisée afin de contrôler le comportement du couple MO-CN lors du suivi avec des objectifs de qualité ou de productivité.

2.2. Processus d'élaboration des pièces de formes complexes en usinage 5-axes :

2.2.1. Description du processus :

Les pièces de formes complexes des domaines de l'aéronautique et de l'automobile sont souvent réalisées en 5-axes. Le choix de l'usinage 5-axes est souvent étroitement lié à la géométrie de la pièce. En effet, la géométrie de ces pièces est généralement définie par un ensemble de surfaces gauches dont la complexité limite le nombre de procédés possibles pour leur fabrication (**Figure 2.1**).



Figure 2.1 : Exemple de tête de forage qui présente des formes complexe.

En comparaison avec l'usinage 3-axes, les deux degrés de libertés supplémentaires apportés par la libre orientation de l'axe de l'outil par rapport à la pièce autorisent un gain de productivité significatif lié à une augmentation de l'accessibilité de l'outil et à une augmentation de l'efficacité le long des trajets [2]. En particulier, la minimisation du nombre de posages de la pièce et l'augmentation de la largeur coupée en usinage 5-axes en bout avec un outil torique permettent d'accroître la productivité.

Dans ce contexte, nous pouvons présenter le processus d'élaboration des pièces de formes complexes sous forme de trois activités principales (**Figure 2.2**).

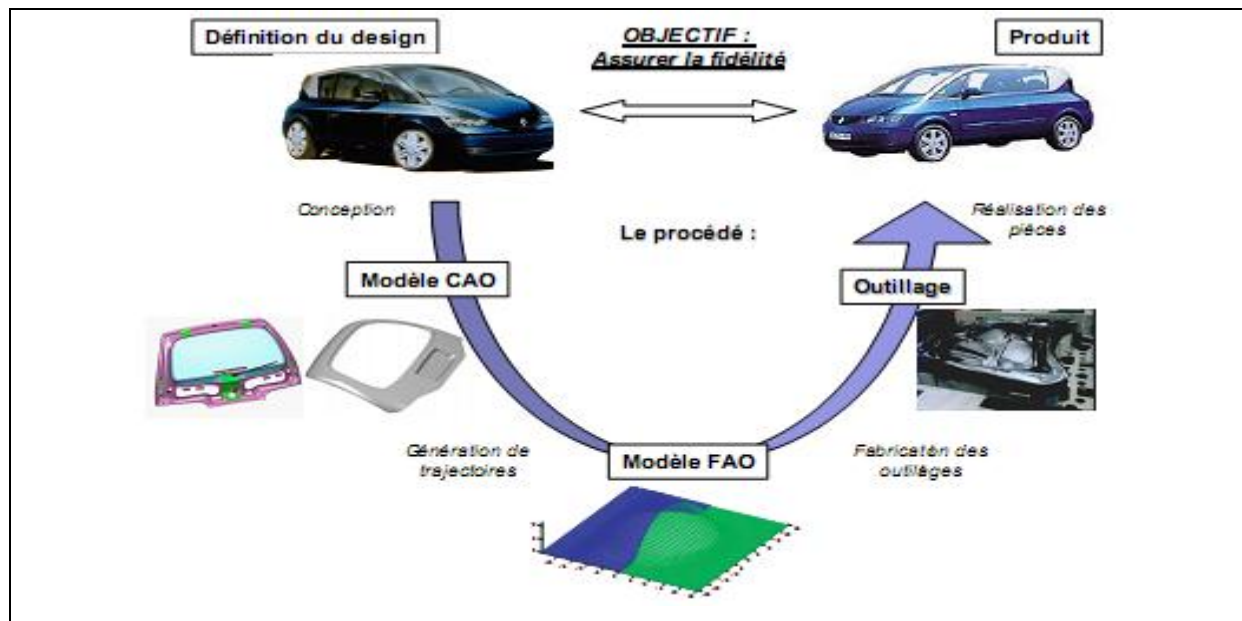


Figure 2.2 : Processus d'élaboration des pièces de forme complexe d'après [3].

La première consiste à créer un modèle CAO à partir de la définition du designer. La géométrie des formes ainsi que les spécifications géométriques associées sont définies à partir des intentions du designer. Certaines exigences, souvent liées à des besoins esthétiques restent difficiles à formaliser : la forme doit être tendue, la forme doit conserver une même concavité, les lignes de style doivent être respectées. Un modèle CAO est ensuite créé à l'aide d'un modelleur géométrique afin de traduire ces spécifications sous forme d'éléments géométriques. Le modèle du produit ainsi construit devient le modèle géométrique de référence.

La deuxième activité porte sur le calcul d'un modèle FAO. Dans le cadre de l'usinage, ce modèle est constitué des trajectoires et de paramètres associés permettant de décrire le mouvement de l'outil par rapport à la pièce afin de générer la surface désirée. Les pièces sont ensuite fabriquées sur une MOCN par exécution des trajectoires 5-axes calculées.

Dans le cas de l'usinage 5-axes, il est important de rappeler que les mouvements des axes sont différents des trajectoires décrites par le modèle FAO. En effet, les consignes de position des axes sont calculées en fonction de la cinématique de la MO utilisée à partir des positionnements outil-pièce programmés dans un repère lié à la pièce à l'aide d'une transformation géométrique inverse (TGI). Cette étape de transformation de coordonnées peut

être réalisée en amont par un post-processeur dédié ou en temps réel par la CN lors de l'exécution de la trajectoire (**Figure 2.3**).

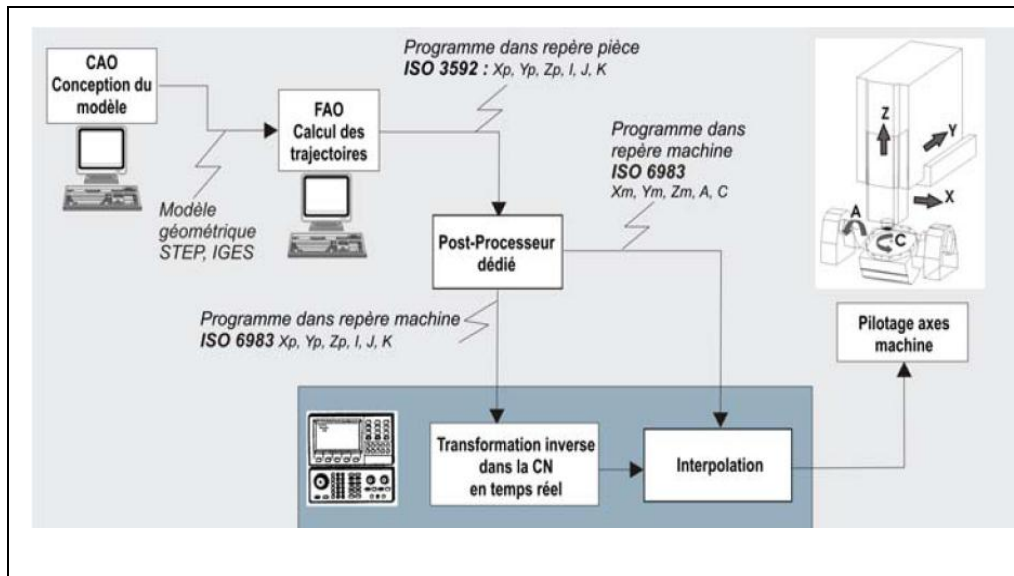


Figure 2.3 : Chaîne numérique en 5-axes d'après [4].

Les activités associées au processus ne doivent pas être indépendantes. Elles doivent en particulier favoriser le dialogue et les échanges d'informations pour faciliter la réalisation du produit [DUC 98]. En effet, diverses erreurs ou approximations présentes dans le processus de réalisation sont sources d'écarts entre les contraintes fonctionnelles associées au produit et le produit réalisé.

2.2.2. Erreurs et approximations liées au processus :

Les erreurs associées au processus peuvent être classées selon deux catégories : les erreurs générées au sein de chaque activité et les erreurs dues aux difficultés de communication entre activités, ces dernières étant essentiellement liées à l'utilisation de modèles géométriques différents au niveau de chacune des activités [3] .

En conception, certaines limites sont imposées par les modeleurs géométriques actuels qui ne donnent pas une grande souplesse pour la définition des formes gauches. L'utilisateur est limité par les fonctionnalités qui sont à sa disposition, il ne peut donc pas toujours modéliser de manière précise l'idée du concepteur. Certaines évolutions sont cependant en cours : possibilités de déformation des surfaces, modèles plus souples (surfaces de subdivision),

modeleur géométrique basé sur des exigences de style . Cependant, quelles que soient les difficultés de modélisation, le modèle issu de l'étape de conception, généralement constitué d'un agencement de surfaces ou d'éléments géométriques, est le modèle de référence. Il n'est jamais remis en cause.

En génération de trajectoires, il est important de noter que le modèle FAO ou trajectoire est défini par un ensemble de points caractéristiques. Ces points sont des points de passage ou points de contrôle, calculés par le positionnement de l'outil sur la surface de référence. Des erreurs peuvent apparaître lors du calcul du positionnement de l'outil sur la surface [DUC 98]. Elles résultent soit d'un positionnement peu précis de l'outil sur la surface à usiner, soit de collisions entre l'outil et la surface. A l'issue de cette activité, l'enveloppe de la trajectoire de l'outil constitue une approximation de la surface à usiner.

En ce qui concerne l'activité de réalisation de la pièce sur la machine outil, les erreurs engendrées sont de diverses natures, et l'identification des écarts est ici plus complexe. Il est ainsi nécessaire de séparer l'activité principale en sous activités. Pour la partie exécution des trajectoires réalisée par la CN, les phases de préparation, d'interpolation ou encore la résolution de la TGI sont sources d'erreurs pour la génération des consignes de position des axes, et donc de défauts pour le suivi. Le pilotage des axes, (performances cinématiques, qualité des asservissements) et les phénomènes dynamiques en usinage (vibrations des composants mécaniques, efforts de coupe, déformations de l'outil et de la pièce) influent également sur le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce. La géométrie de la forme usinée résulte alors du mouvement de l'outil calculé en FAO, altéré par les erreurs d'exécution et par le comportement dynamique en cours d'usinage ; ces difficultés de planification et de suivi des trajectoires entraînent des pertes de productivité par le non respect des vitesses d'avance.

A chaque activité correspond un modèle de représentation du produit : des contraintes géométriques à l'étape initiale de conception, une géométrie surfacique pour la conception et une séquence de points et de paramètres pour la génération de trajectoires et enfin un ensemble de consignes pour l'exécution.

Ainsi, chaque activité possède un modèle différent qui ne comprend pas la même quantité et le même niveau d'informations sur le produit. Ceci explique les difficultés de communication et d'échange entre activités, les erreurs ou encore les manques d'information qui apparaissent. Pour que la pièce soit conforme au cahier des charges d'un point de vue géométrique les écarts

au modèle nominal doivent être contenus. Ainsi, les diverses erreurs du processus interviennent dans ce critère d'acceptation de la pièce. Cependant, toutes les erreurs n'influent pas de la même façon, ou avec la même importance sur la géométrie de la pièce usinée.

Le tableau 1.1 liste de manière non exhaustive les principaux défauts observés, classés selon deux catégories : les écarts au niveau de la géométrie et les pertes de productivité.

Impact sur	Phénomène entrant en jeu	Causes possibles	Paramètres influents
Géométrie	Déformation outil	Efforts de coupe	Section copeau - Matériau outil - Attachement outil (technologie) - Géométrie outil (diamètre, géométrie de l'extrémité, longueur)
Géométrie	Déformation pièce	Efforts de coupe	Section copeau Montage d'usinage (rigidité) Matériau de la pièce Mode d'obtention du brut Trajectoire d'usinage (séquencement)
Géométrie	Vibrations Dynamique	Efforts de coupe Rigidité - Structures - Modes propres des ensembles {pièce-porte pièce} et {outil/broche/axes/bâti}	Trajectoire d'usinage (moins accidentée, modifier la stratégie d'usinage) Montage d'usinage Outil (matériau, attachement, longueur)
Géométrie	Mouvement relatif outil- pièce (enveloppe du	Génération de trajectoires au sens calcul	Valeurs des paramètres d'usinage Format d'interpolation

	mouvement outil=pièce)		Méthode de calcul du positionnement outil
Géométrie	Mouvement relatif outil- pièce (enveloppe du mouvement outil=pièce)	Défauts géométriques des liaisons géométriques de la machine et des règles de mesure	
Géométrie Productivité	Mouvement de l'outil dans le repère machine et/ou mouvement relatif outil-pièce non désiré (singularité géométrique)	Architecture machine Génération de trajectoires (géométrie)CN (transformation géométrique)	Montage d'usinage (posage+orientation pièce) Programme CN Mode de pilotage de la CN Architecture machine
Géométrie	Dilatation thermique	Frottements - Echauffements	Mise en chauffe - Stabilité thermique
Géométrie Productivité	Vitesse d'avance réelle limitée	Saturation des moteurs (surtout les moteurs rotatifs)	Posage pièce (solicitation des axes différente rotation/translation)
Géométrie Productivité	Vitesse d'avance réelle limitée	CN (temps de cycle faible)	Format d'interpolation Trajectoire (longueur des segments)
Géométrie Productivité	Ralentissements de la vitesse d'avance	Inertie des axes (accélération, fin de course)	Trajectoire (changement de direction, courbure, mode de parcours, longueur des segments) Réglage des asservissements CN

Tableau 2.1 : Défauts influents sur la qualité géométrique et la productivité

Ce tableau permet de montrer les défauts influents vis-à-vis de l'objectif de réalisation d'une pièce géométriquement conforme tout en respectant des critères de productivité. Pour chaque défaut, le phénomène physique entrant en jeu et les causes potentielles sont cités. Enfin, les paramètres influents et modifiables sont également recensés [3].

Parmi ces éléments, nous retiendrons plus particulièrement ceux qui sont spécifiques à l'usinage 5-axes, c'est à dire les points liés :

- à la géométrie de la trajectoire : la gestion de la position de l'outil et celle de l'orientation de son axe, le format de description ;
- à l'architecture des machines 5-axes : la TGI, la multiplicité éventuelle de ses solutions, les points singuliers ;
- à l'exécution et à la réalisation des trajets : les performances associées au directeur de commande numérique (DCN) (temps de cycle et look ahead) et les celles associées aux axes (performances cinématiques maximales) ;
- à l'enlèvement de matière : procédé de coupe spécifique.

2.2.3. Problématique associée a l'optimisation des trajectoires 5-axes :

Nous venons de voir que le processus d'élaboration des pièces de formes par usinage 5-axes est long et complexe ; il fait intervenir de nombreuses activités. L'objectif global de maîtrise du processus est de limiter les écarts entre le produit fini et l'intention de design qui apparaissent tout au long du processus avec une certaine productivité. Dans la majorité des approches proposées, le modèle CAO est considéré comme modèle géométrique de référence. Le problème peut alors être reformulé de la façon suivante : limiter les écarts entre le modèle de référence et la pièce usinée avec une certaine productivité.

Ainsi, le point d'entrée permettant de résoudre en partie cette problématique est l'activité de génération de trajectoires.

2.3. Génération de trajectoires 5-axes :

La génération de trajectoires est une activité essentielle dans le processus de réalisation des pièces de formes complexes puisqu'elle fait le lien entre le modèle virtuel de la pièce

qu'est le modèle CAO et sa réalisation physique lors de l'exécution. La difficulté de la génération est double puisqu'elle est tributaire de la définition numérique de la pièce et conditionne le comportement du couple MO-CN.

Pour déterminer les paramètres les plus influents en génération de trajectoires, il est nécessaire d'approfondir les méthodes employées pour la définition et le calcul des trajectoires. Pour cela, nous définissons dans un premier temps une trajectoire 5-axes pour préciser les éléments qui la composent puis nous présentons les méthodes de génération et d'optimisation présentes dans la littérature.

2.3.1. Définition d'une trajectoire 5-axes :

Considérons une surface ou face à usiner pouvant être décrite sous une forme bi-paramétrée $S(u, v)$, une trajectoire 5-axes peut être définie par les trois points suivants (Figure 2.4) :

- le positionnement outil, ou comment définir la position et l'orientation de l'outil par rapport à la pièce ;
- le parcours de l'outil sur la surface, ou comment enchaîner les positionnements outils sur la surface pour l'usiner ;
- la description de la géométrie de la trajectoire.

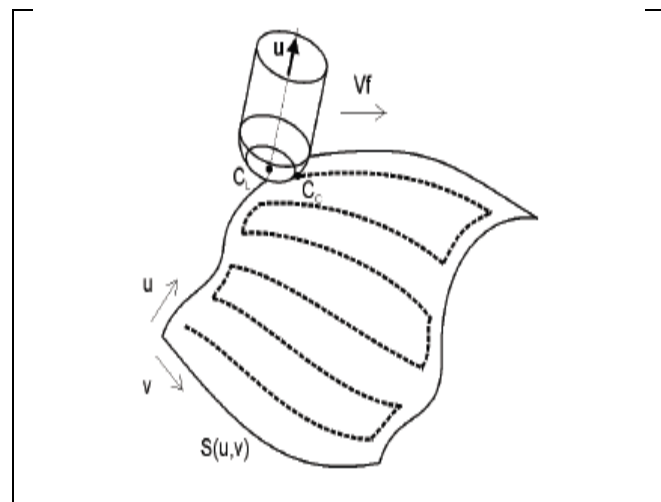


Figure 2.4 : Exemple d'une trajectoire 5.

2.3.1.1. Positionnement outil :

Le positionnement de l'outil sur la surface consiste à déterminer un couple Pu , où P représente le point piloté, caractéristique de la géométrie de l'outil, et u le vecteur directeur de l'axe de l'outil. Classiquement, le point piloté de l'outil est le point CL , point extrémité. Ce couple est défini localement par rapport à la surface à usiner, au niveau du point de contact outil-pièce CC . Le repère local associé CC, f, n, t est tel que f représente le vecteur tangent à la courbe suivie, n le vecteur normal à la surface, et t le vecteur issu du produit vectoriel de f par n .

La Figure 2.5 positionne les points caractéristiques de l'outil suivant sa géométrie par rapport à la base locale ; OC_C représente le centre de l'outil, le rayon principal de l'outil et le rayon de coin.

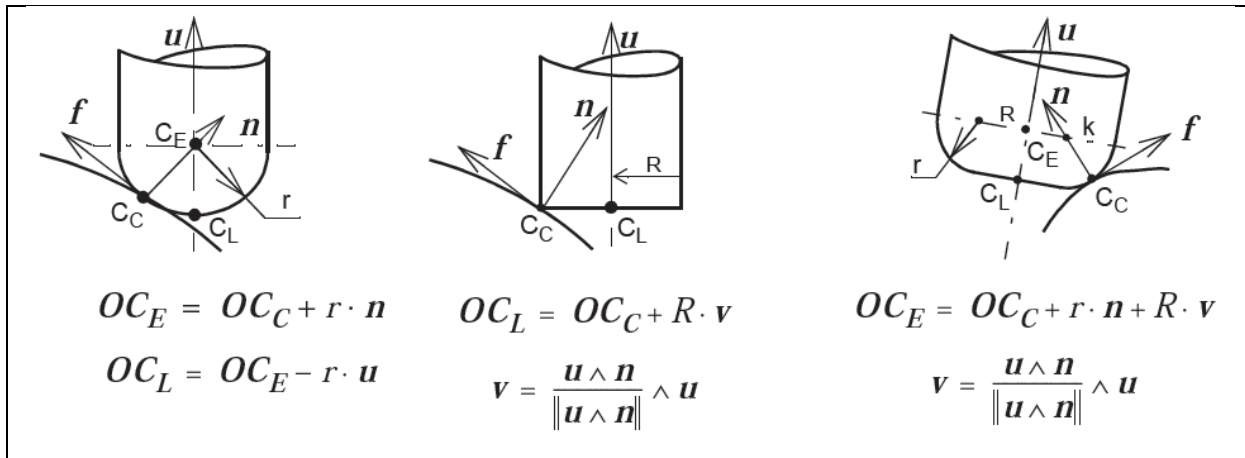


Figure 2.5 : Points caractéristiques suivant la géométrie de l'outil.

Une fois la position de l'extrémité de l'outil déterminée, il reste à définir l'orientation de son axe. Elle est donnée dans le repère local par deux angles de rotation. La Figure 2.6 présente les deux méthodes utilisées pour définir l'orientation de l'axe de l'outil:

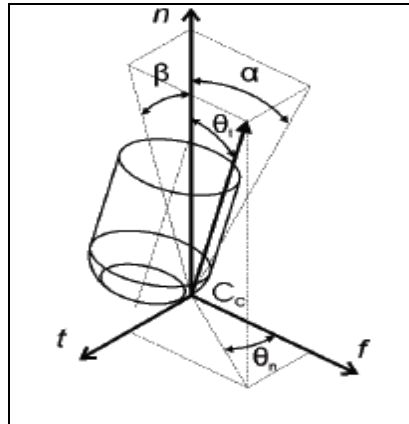


Figure 2.6 : Paramétrisation de l'orientation de l'axe outil.

- La notation la plus communément utilisée dans la littérature, consiste à définir le couple d'angles (t, n) ; t représente l'angle d'inclinaison (« inclination angle »), angle entre u et n , n l'angle de pivotement (« screw angle ») autour de n ; l'orientation de l'axe de l'outil est obtenue par une première rotation t de autour de t puis une seconde rotation de n autour de n .
- La seconde notation, utilisée notamment dans les logiciels de FAO, est définie par le couple , où est l'angle de détalonnage (« lead angle »), défini dans le plan contenant la direction d'avance, autour de t , et est l'angle d'inclinaison latérale (« tilt angle »), défini dans le plan perpendiculaire à la direction d'avance autour de f .

Ce positionnement basé sur un point de contact est celui qui est le plus communément utilisé aujourd'hui. Nous pouvons noter un positionnement plus atypique proposé par [3] qui consiste à mettre deux points $CC1$ et $CC2$ en contact entre l'outil et la pièce (Figure 2.7). L'orientation de l'axe de l'outil est définie par un seul angle représentant l'inclinaison de l'outil autour de la droite $CC1 CC2$.

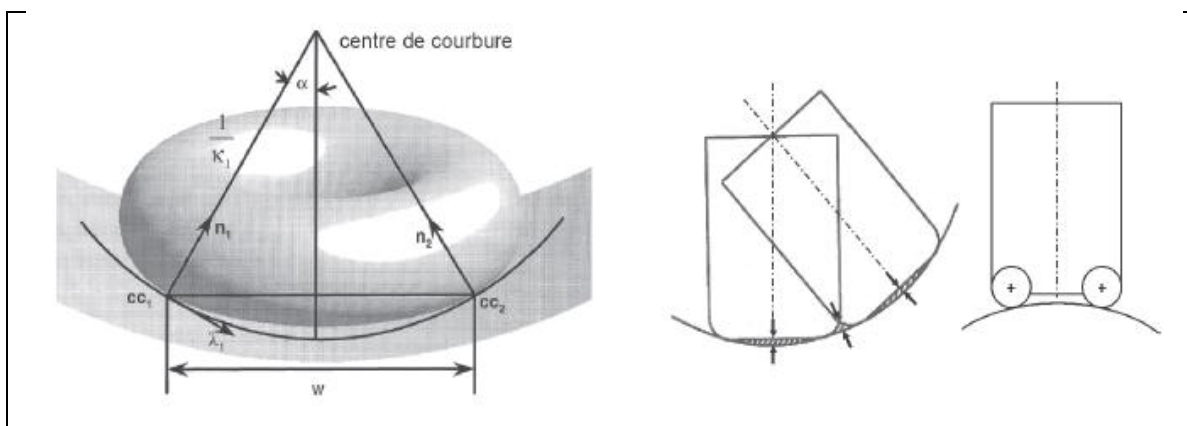


Figure 2.7 : Définition d'un contact multi-points.

Nous retiendrons de cette partie que le positionnement de l'outil sur la surface à usiner est donné par le couple $CL \ u$ définissant la position de l'outil et l'orientation de son axe. Ces deux éléments sont calculés à partir du point de contact outil-pièce CC et de deux angles (t , n) définis dans la base locale f, n, t . La trajectoire est donc localement définie par le choix de ces trois paramètres. Le parcours de l'outil sur la surface permet ensuite d'enchaîner et de situer de manière relative ces positions discrètes.

2.3.1.2. Parcours de l'outil sur la surface :

Le parcours de l'outil est déterminé par la donnée d'un mode de balayage permettant d'usiner la totalité de la surface tout en évitant les collisions et par la donnée d'un ensemble de paramètres opératoires.

Parmi le grand nombre de modes de balayage existants, nous ne présentons ici que les deux plus classiques associés à l'usinage 5-axes des surfaces complexes : les plans parallèles et les iso-paramétriques de surface. Les paramètres de discrétisation de la trajectoire dans le sens longitudinal (selon la direction de l'avance) et dans le sens de propagation (direction transversale à l'avance) ainsi que les critères associés sont également exposés.

La méthode par plans parallèles consiste à déterminer sur la surface $S(u,v)$ des passes Cs pour lesquelles les points de contacts outil-pièce CC ou les points CL sont contenus dans des plans parallèles Pi de la surface [3]. Au sein de chaque passe, les positionnements outils sont déterminés par cheminement le long des plans de guidage Pi (Figure 2.8) ; les paramètres de discrétisation associés sont la variation entre deux positions successives u,v dans l'espace paramétrique (sens longitudinal) et la distance entre deux plans successifs p (sens transversal).

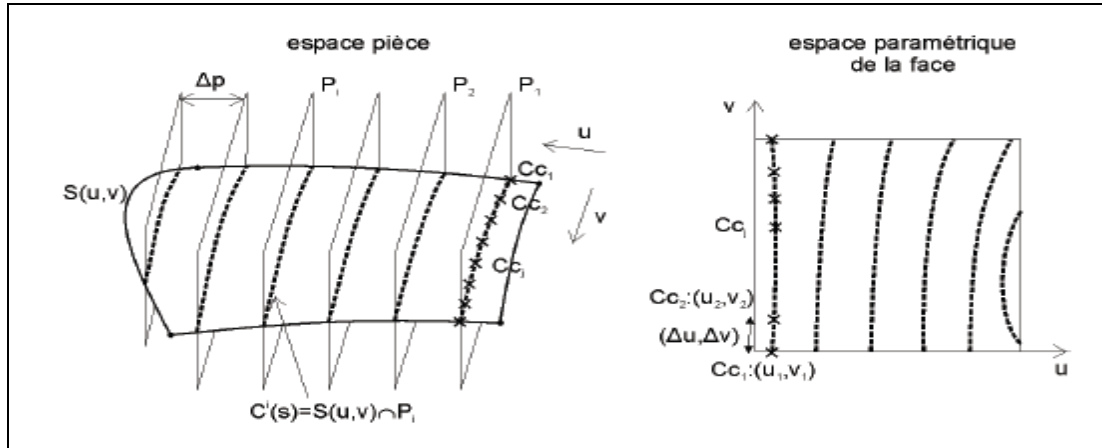


Figure 2.8 : Mode de balayage par plans parallèles.

La méthode par iso-paramétriques de surface consiste à balayer la surface $S(u,v)$ selon une succession de courbes iso-paramétriques $C^*v = Su^*v$ obtenues en fixant l'un des paramètres u ou v [3]. Dans ce cas, les paramètres de discrétisation de la trajectoire dans les deux directions sont directement les variations u et v définies dans l'espace paramétrique (Figure 2.9).

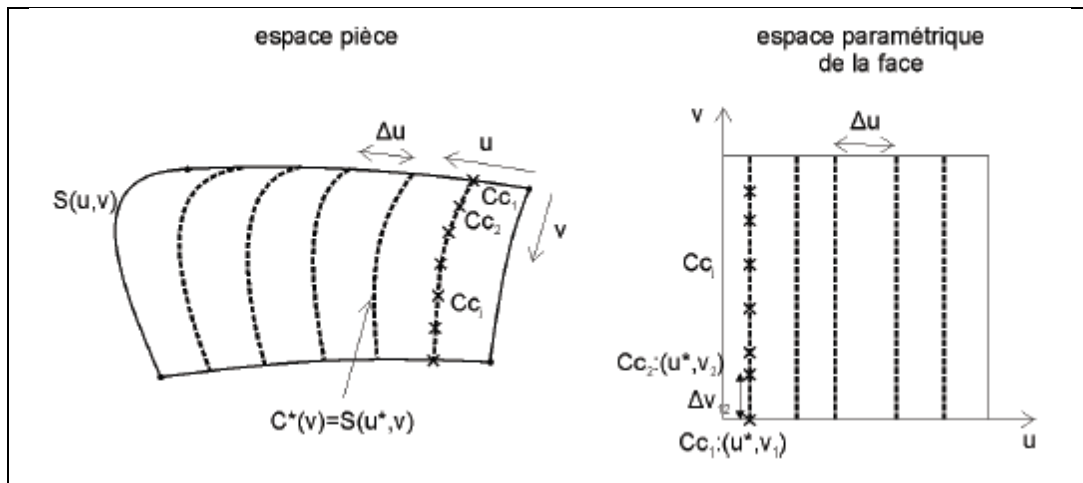


Figure 2.9 : Mode de balayage par isoparamétriques.

Pour chaque mode de balayage, les calculs des paramètres de discrétisation sont liés à la géométrie de la surface ; il est nécessaire de contrôler localement que l'enveloppe du mouvement de l'outil définie par la trajectoire respecte les écarts géométriques admissibles. Pour cela, les valeurs des paramètres de discrétisation doivent respecter des critères géométriques, dont les deux plus courants sont l'erreur de corde maximale $emax$ et la hauteur de crête maximale $hmax$.

L'erreur de corde également nommée « tolérance d'usinage » représente l'écart maximal entre la surface à usiner et l'enveloppe du mouvement de l'outil générée par l'interpolation des positionnements outils le long d'une passe (Figure 2.10). Il est important de noter que dans le cas des trajectoires 5-axes, l'évaluation de l'erreur de corde doit prendre en compte l'écart généré par la variation de l'orientation de l'axe de l'outil [3].

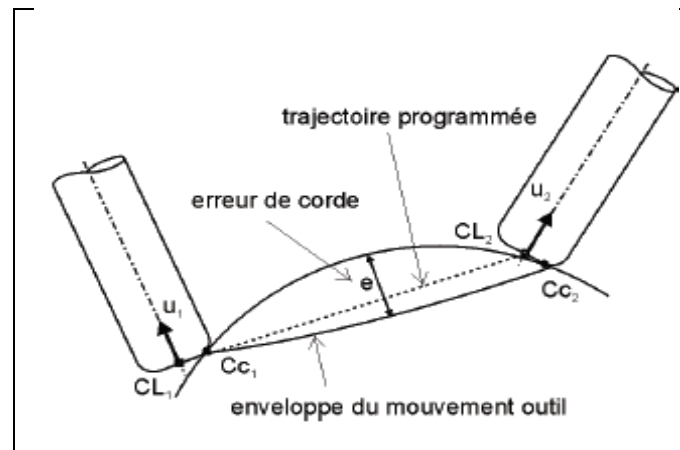


Figure 2.10 : Visualisation de l'erreur de corde.

Ainsi, [5] proposent une adaptation du critère utilisé en 3 axes en découplant l'interférence générée selon les deux composantes : une interférence due à la translation de l'outil et une interférence due à la rotation de l'axe ; chacune est évaluée par subdivision du trajet élémentaire en portions linéaires. La somme de ces écarts à la surface doit respecter l'erreur de corde maximale spécifiée.

La hauteur de crête qualifie le surplus de matière laissée entre deux passes successives. En 5-axes, l'évaluation de la hauteur de crête est complexe du fait de la libre orientation de l'axe de l'outil ; le profil générateur de la passe est 3D. Pour évaluer la hauteur de crête, l'approximation couramment utilisée dans la littérature consiste à rendre le problème plan en projetant le profil de l'outil dans un plan perpendiculaire à la direction d'avance (Figure 2.11).

[6] proposent une évaluation de la hauteur de crête assez réaliste. A partir de deux positionnements outils adjacents, le plan d'étude est construit passant par les deux points de contact $CC_{i,j}$, $CC_{i+1,j}$ et contenant la normale à la surface \mathbf{n} en $CC_{i,j}$. Les deux profils apparents des outils sont les ellipses $E_{i,j}$ et $E_{i+1,j}$; leur point d'intersection est noté P . La hauteur de crête hc est calculée comme étant la distance entre P et la courbe intersection du plan d'étude et de la surface nominale.

Cette distance est calculée par approximation de la courbe par un cercle dont le rayon est le rayon moyen entre les rayons de courbures $RCC_{i,j}$ et $RCC_{i+1,j}$.

Ainsi, le respect des deux critères géométriques e_{max} et hc_{max} permet de valider, pour des orientations de l'axe de l'outil données, les valeurs des paramètres de discrétisation. Cependant, s'il n'y a pas de gestion particulière de l'orientation de l'axe de l'outil, les trajectoires calculées ne sont pas optimales en termes d'efficacité de balayage de la surface. Par exemple, en plans parallèles, la distance entre passes p est contrainte par la plus grande des hauteurs de crête générée ; il en est de même pour la variation du paramètre u du mode iso-paramétriques présenté en Figure 2.9. Le long de la passe, les hauteurs de crêtes sont plus faibles, ce qui est synonyme de chevauchement inutile des passes c'est à dire de surqualité : l'orientation de l'axe de l'outil apparaît donc comme un moyen d'optimisation des trajectoires 5-axes pour les modes de balayage par plans parallèles et par iso-paramétriques de faces. De manière générale, les méthodes de génération de trajectoires de la littérature font couramment l'objet d'une optimisation géométrique visant à maximiser son efficacité en termes de balayage de la surface à usiner. Par exemple, les trajectoires isocrêtes visent à conserver une hauteur de crête constante et égale à hc_{max} entre toutes les passes successives [3]. Ces méthodes de génération et d'optimisation des trajets sont présentées dans le §3.2.

La maîtrise des interférences outil/pièce lors de la génération de trajectoires est une condition nécessaire pour garantir la conformité de la pièce en termes de géométrie. Les interférences sont en général classées selon trois types : les interférences locales, les interférences vers l'arrière et les interférences globales ou collisions (Figure 2.12).

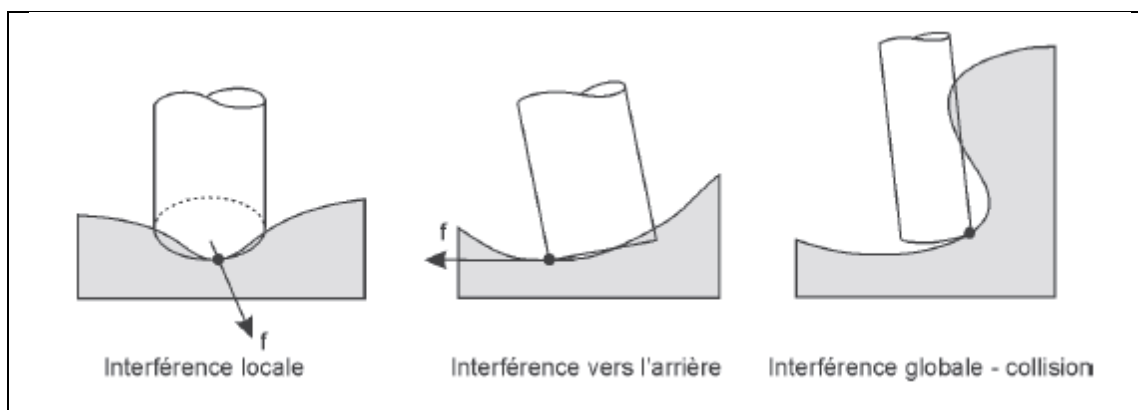


Figure 2.12 : Différents types d'interférences en usinage 5-axes.

Les interférences locales traduisent un enlèvement de matière excessif par la partie active de l'outil sur la surface à usiner. Elles sont principalement dues aux différences de courbures de la partie active de l'outil et de la surface au point de contact. Les interférences vers l'arrière sont des pénétrations intempestives de l'arrière de l'outil dans la surface à usiner. Les interférences globales quant à elles représentent de manière générale des collisions entre l'ensemble {corps d'outil, porte outil, broche} et l'ensemble {pièce, porte pièce, éléments de structure...}.

Du fait des deux rotations supplémentaires, le risque de collision est plus fréquent en usinage 5-axes qu'en usinage 3 axes ; celles-ci peuvent apparaître au niveau des positionnements outils calculés, lors de l'interpolation de la trajectoire ou encore lors des mouvements hors matière. Pour un point de contact outil pièce donné, toute la difficulté consiste à déterminer l'orientation de l'axe de l'outil qui soit la plus efficace. Le positionnement et le parcours de l'outil sur la surface ne peuvent pas être dissociés ; ils font l'objet d'une optimisation qui consiste le plus souvent à maximiser la largeur coupée avec comme contrainte la non interférence.

Le problème de la détection des interférences locales ou globales est très largement développé dans la littérature que ce soit dans le domaine de l'usinage multi-axes ou des domaines autres tels que la robotique, l'infographie, la réalité virtuelle.

Certaines méthodes s'attachent à vérifier que l'outil n'est pas en interférence avec la pièce lors de la génération de la trajectoire. Ces méthodes sont principalement basées sur la comparaison locale de la surface de l'outil avec la surface à usiner. L'objectif consiste alors à positionner l'outil hors interférence afin d'obtenir un enlèvement matière maximum [7].

D'autres méthodes sont consacrées à la détection a posteriori des interférences ou collisions en prenant en compte les positionnements outils déjà calculés, l'interpolation des positionnements ou encore la trajectoire réellement suivie par l'outil étant donnée la structure de la machine [8].

Remarque :

On utilise souvent ces deux modes d'usinage (balayage par plans parallèles ou par iso-paramétriques) dans le cas d'un fraisage trois axes, c'est-à-dire lorsque on fixe par quelque opération d'usinage deux axes et travailler avec trois axes.

L'inconvénient de ces modes c'est qu'elles présentent des chevauchements des passes synonyme de perte de productivité. On introduit alors d'autre mode d'usinage permettant d'obtenir une bonne productivité.

2.3.2. Description de la géométrie de la trajectoire :

En usinage 5-axes, il existe deux types de formats de description des trajectoires : sous forme de segments de droites (interpolation linéaire) et sous forme de courbes (interpolation polynomiale).

L'interpolation linéaire permet de décrire une trajectoire comme une succession de positionnements outils. Les points pilotés CL_i sont reliés par des segments et les orientations de l'axe outil ui sont interpolés dans le repère de la pièce (Figure 2.13). Chaque positionnement outil constitue un bloc du programme d'usinage comportant les trois composantes xyz pour la position et les trois cosinus directeurs ijk pour l'orientation.

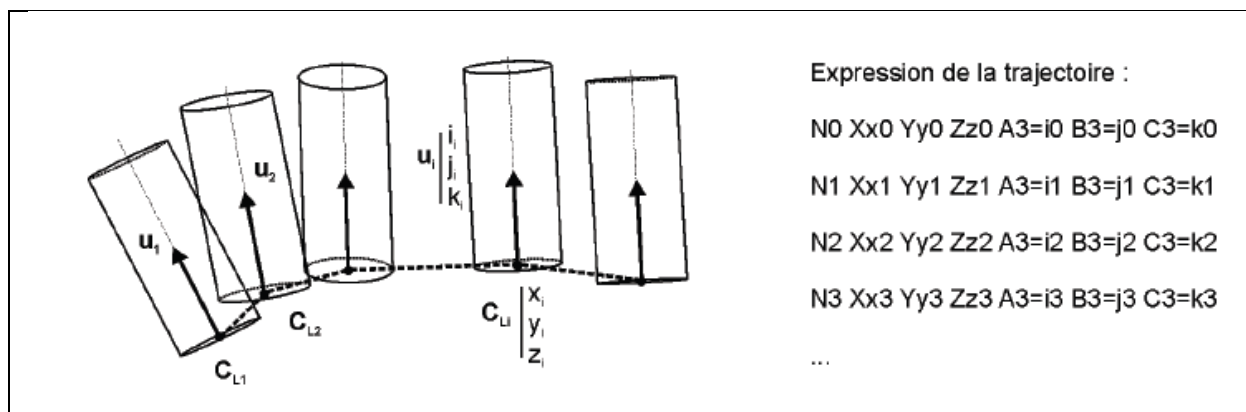


Figure 2.13 : Description par interpolation linéaire.

Cette méthode de description des trajectoires 5-axes, est la plus communément utilisée. Elle a l'avantage d'être très simple car elle est directement définie par la liste des positionnements outils calculés (format APT [ISO 3592]). Cependant, un tel format génère des discontinuités en tangence au niveau de la trajectoire du point piloté et des discontinuités sur le mouvement de l'axe outil. Une telle trajectoire est donc source de facettisation des surfaces. De plus, les discontinuités sollicitent fortement les axes et la structure de la machine outil et engendrent de grands ralentissements de la vitesse d'avance [3].

[3] proposent un format d'interpolation « 5xNurbs » basé sur deux courbes polynomiales. Dans l'article présenté, les courbes sont définies par des Bsplines de degré 3. La première courbe Pu décrit la position du point extrémité de l'outil CL . Elle est décrite dans le programme par les coordonnées de ses points de contrôle dans le repère pièce $XTi, YT i, ZTi$.

La seconde courbe Qu décrit la position d'un point appartenant à l'axe de l'outil et situé à une longueur donnée de CL ; de même, cette courbe est décrite dans le programme par ses points de contrôle. Ces deux courbes possèdent la même paramétrisation selon la longueur de corde, assurant leur synchronisation ; les valeurs du paramètre DK représentent les variations successives de la séquence nodale. Le couple (Pu, Qu) permet ainsi de définir la position et l'orientation de l'axe de l'outil le long d'une trajectoire polynomiale 5-axes (Figure 2.14).

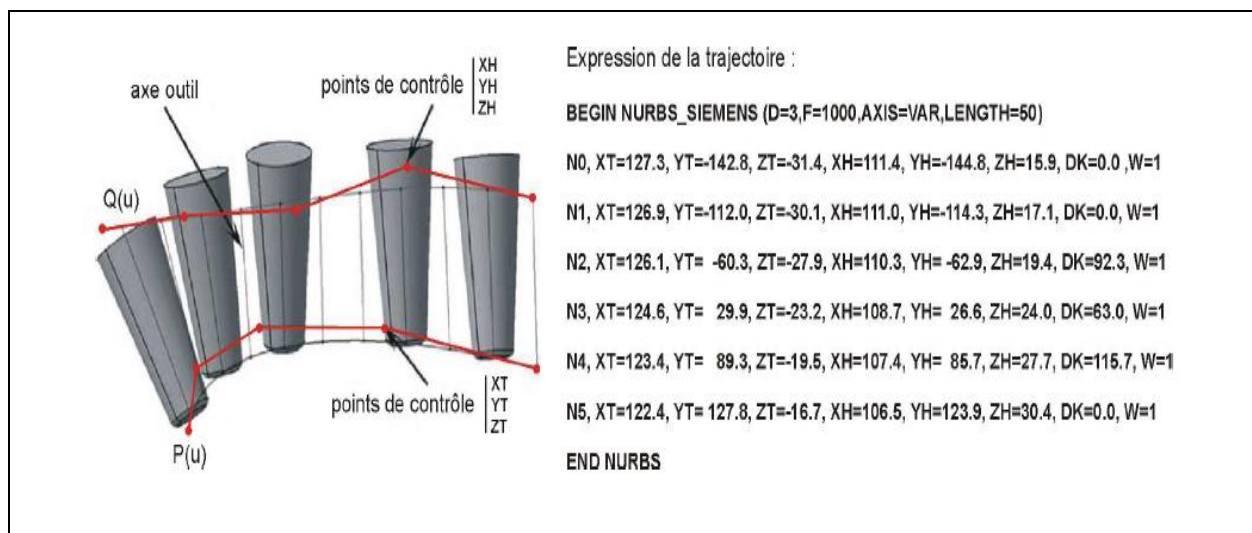


Figure 1-14 : Définition d'une trajectoire avec le format « 5xNurbs » [3].

Le calcul de la trajectoire est effectué par association de courbes polynomiales sur les positionnements outils obtenus par échantillonnage de la trajectoire théorique. La courbe contrôlant la position de l'extrémité de l'outil doit rester dans un tuyau enveloppe d'une sphère parcourant la trajectoire théorique, le rayon de la sphère définit alors la zone de tolérance de la trajectoire (Figure 2.15).

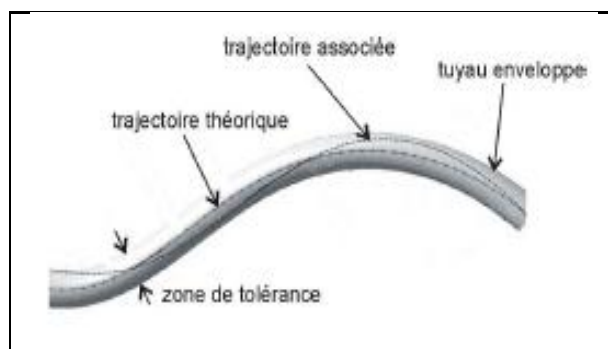


Figure 2.15 : Trajectoires théorique et calculée [3].

En résumé, il existe aujourd'hui deux formats de description des trajectoires 5-axes qui sont adaptés respectivement à l'interpolation linéaire et polynomiale. Pour le premier, les positionnements outils sont décrits de manière discrète (position + vecteur directeur unitaire) ; pour le second le positionnement est défini de manière continu par deux courbes polynomiales. Ce second format reste peu utilisé en 5-axes, car peu de CN industrielles actuelles possèdent les algorithmes adéquats pour réaliser l'interpolation.

2.3.3. Synthèse :

Une trajectoire 5-axes est définie par un ensemble de positionnements outils permettant le balayage d'une surface et par son format de description dans le programme d'usinage. Les positionnements sont déterminés à partir d'un point de contact outil-pièce, et de deux angles d'orientation de l'outil dans une base locale basée sur la normale à la surface et la direction d'avance. Le choix de ces paramètres et le parcours de l'outil sont calculés lors de la génération de la trajectoire en faisant intervenir des critères géométriques pour assurer la conformité de la pièce. Une fois la trajectoire calculée, elle est décrite dans le programme CN sous forme discrète ou polynomiale, en vue de son interpolation. La génération de trajectoires 5-axes fait l'objet d'une optimisation des positionnements outils successifs (CC, t , n), visant à maximiser la productivité. Nous présentons dans les paragraphes suivants les méthodes de génération et d'optimisation de trajectoires 5-axes présents dans la littérature. Nous avons distingué les méthodes basées sur un raisonnement purement géométrique des méthodes prenant en compte d'autres contraintes situées en aval dans le processus de réalisation.

2.3.4. Génération et optimisation géométrique des trajectoires 5-axes :

Les méthodes de génération de trajectoires ont pour objectif le calcul de trajets d'outils tels que l'enveloppe du mouvement de l'outil corresponde à la surface désirée. Cependant, le procédé même d'usinage de forme ne permet pas d'obtenir une surface correspondant exactement à la surface de référence sans écart géométrique. Ainsi, le calcul de trajectoires doit intégrer les valeurs des écarts géométriques admissibles (tolérances géométriques) issues du cahier des charges afin de conclure quant à la conformité de la pièce fabriquée.

Les méthodes basées sur un raisonnement purement géométrique s'attachent à calculer une trajectoire à partir de la donnée du modèle CAO, des tolérances géométriques et de la géométrie outil (Figure 2.16). L'objectif du problème d'optimisation consiste alors à maximiser la productivité tout en respectant ces contraintes géométriques. Cette optique est la plus courante.

NB : nous considérons que le procédé, le moyen de production et la gamme d'usinage sont figés ; les optimisations portent uniquement sur la construction de trajectoires 5-axes pour la phase de finition.

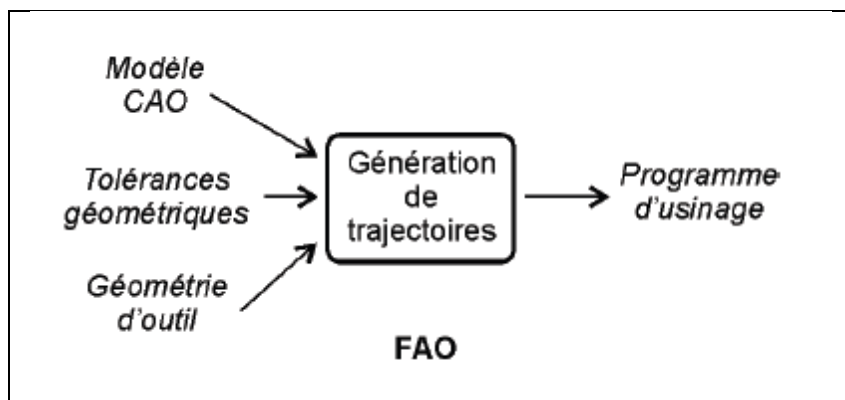


Figure 2.16 : Optimisation des trajectoires basée sur un raisonnement géométrique.

Dans la littérature, la problématique de la maximisation de la productivité est traitée comme celle de la minimisation du temps d'usinage. En abordant ce problème avec une vision purement géométrique, l'objectif consiste à trouver la trajectoire la plus efficace. Pour cela, différents voies d'optimisation sont étudiées :

- maximisation de la largeur coupée à chaque instant ;
- maximisation du taux d'enlèvement matière ;
- hauteur de crête constante ;
- taux de conformité de surface maximal ;
- minimisation de la longueur de la trajectoire ;

Le calcul de trajectoires optimales conduit à résoudre deux problèmes qui sont liés et situés à deux niveaux différents :

- un problème local : comment positionner l'outil sur la surface (CC, t, n) ?
- un problème global : comment enchaîner ces positionnements pour parcourir la surface (direction d'avance locale, base) ?

La majorité des travaux abordent cette difficulté en deux temps. A partir de la passe précédente et d'un positionnement outil, le positionnement outil suivant est optimisé en fonction du critère retenu, construisant ainsi la trajectoire de proche en proche.

2.3.5. Autres méthodes de génération et d'optimisation des trajectoires 5-axes :

Après avoir parcouru les principes de génération des trajectoires 5-axes et leurs optimisations purement géométriques basées sur le modèle CAO, intéressons nous aux autres méthodes qui englobent dans l'optimisation d'autres contraintes ou objectifs situés en aval dans le processus de réalisation (Figure 2.24). On trouve dans la littérature une grande diversité de travaux due à la complexité de l'exécution des trajectoires ainsi qu'à celle du procédé de coupe. En effet, de nombreux éléments, traitements et phénomènes interviennent entre le programme d'usinage et la surface usinée obtenue.

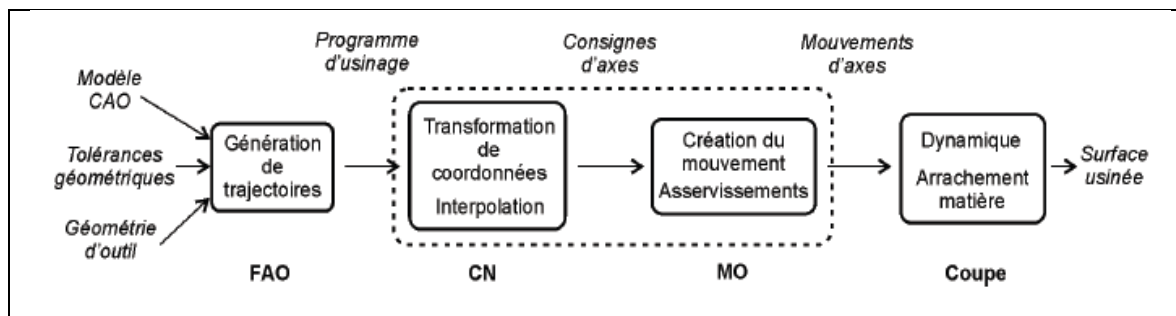


Figure 2.24 : Décomposition du processus de réalisation des trajectoires.

Parmi les travaux qui ont pour finalité la génération de trajectoires, nous retenons trois principales approches :

- la première consiste à intégrer dans le calcul de la trajectoire les phénomènes liés à la transformation de coordonnées ainsi qu'à l'interpolation de la trajectoire ;
- la deuxième, s'intéresse aux contraintes liées aux composants de la MOCN ;
- la troisième, pour laquelle les effets dynamiques liés à la coupe sont pris en compte.

En usinage 5-axes, la transformation de coordonnées consiste à transformer le mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce en déplacements d'axes. Les configurations articulaires correspondantes aux positionnements outils sont calculées par la TGI. Couplées, à

l'interpolation de la trajectoire, ces deux éléments sont sources de défauts géométriques sur la surface et de pertes de productivité (voir chapitre 2 §4.).

[3] s'intéresse au comportement cinématique de la machine au voisinage des points singuliers en usinage 5-axes. En effet, lorsque l'outil passe par une position singulière, des mouvements incohérents apparaissent sur les axes, faisant chuter la vitesse d'avance et pouvant causer des interférences avec la pièce. La solution adoptée consiste à générer des trajectoires qui ne passent pas par ces positions critiques. Etant donnée la précision de positionnement des axes de rotation, la notion de singularité est étendue à un volume délimité par un cône. L'évitement de ce cône par la trajectoire est réalisé à l'aide d'une déformation des trajectoires initialement calculées (Figure 2.25). Dans le cas des trajectoires décrites par des courbes Bsplines, la déformation est réalisée par un déplacement des points de contrôle au voisinage de la singularité.

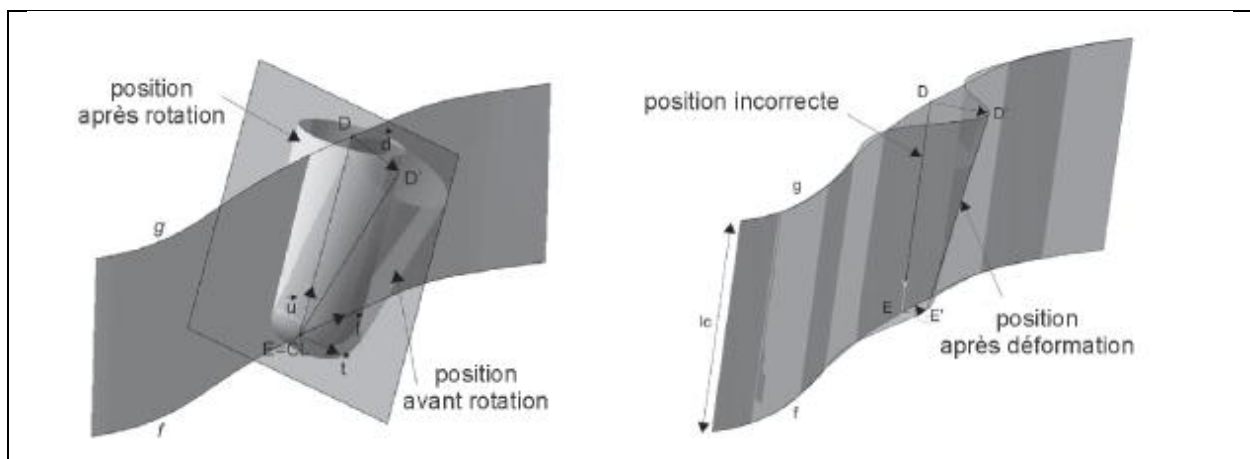


Figure 2.25 : Déformation de la trajectoire pour éviter la singularité [3].

2.3.6. Conclusion :

L'objectif de l'activité de génération de trajectoires 5-axes est de construire des trajectoires permettant d'usiner une surface en garantissant sa conformité géométrique. Les trajectoires doivent assurer un balayage de la surface nominale par l'outil tout en contenant les écarts géométriques créés par le principe même d'usinage.

Le calcul des trajets consiste alors à déterminer une séquence de positionnements outils pour parcourir la surface. La position et l'orientation de l'axe de l'outil sont classiquement définies par la donnée d'un point de contact outil-pièce et de deux angles définis dans une base locale de la surface ; le mode de parcours fait intervenir des critères géométriques tels que la hauteur de crête et l'erreur de corde pour assurer que la surface usinée respecte les tolérances géométriques. Enfin, une fois calculée, la trajectoire est décrite sous un format spécifique dans le programme d'usinage en vue de son interpolation par la CN.

CHAPITRE

3

STRATEGIE D'USINAGE 5 AXES

3.1. Le fraisage a 5 axes

Le développement de l'usinage 5 axes permet aux industriels de réaliser des pièces de plus en plus compliquées. Le triptyque Cout / Qualité / Délai étant primordial,

Le fraisage sur une machines 5 axes permet de diminuer le nombre de posages donc de diminuer les erreurs de remise en position. Cependant, lorsque l'on souhaite améliorer la qualité et la productivité du fraisage des pièces de formes complexes, l'usinage à 5 axes peut être très avantageux. Les principaux avantages de l'usinage à 5 axes sont de pouvoir :

- usiner des surfaces présentant des contre dépouilles,
- imposer et maintenir des conditions de coupe en modifiant l'orientation de l'outil,
- obtenir un meilleur état de surface ce qui permet de réduire le temps de polissage,
- usiner sur le flanc de l'outil ce qui permet d'enlever plus de matière à chaque passe,
- minimiser le nombre de posage sur la machine.

Il existe un grand nombre de stratégies d'usinage possibles pour une même forme. Ce choix reste pour l'instant du domaine de l'expert. Effectivement il n'existe pas actuellement de règles précises permettant un choix automatique d'une stratégie d'usinage à partir de l'analyse des spécifications de la pièce et du modèle numérique. L'objectif des travaux présentés est de fournir un outil d'aide au choix des stratégies d'usinage pour la réalisation de pièces de formes complexes. L'influence de la trajectoire de l'outil sur la qualité finale de la surface en fonction des caractéristiques intrinsèques de la pièce a été étudiée.

3.2. Usinage en bout et usinage sur le flanc

Avec l'usinage en bout, le contact entre l'outil et la pièce est ponctuelle et la surface de la pièce est obtenue par balayage comme en usinage à 3 axes. Il apparaît alors des crêtes dont la hauteur dépend de la distance entre les passes (Figure 3.1). Il existe alors un compromis à faire entre qualité et temps d'usinage.

En usinage sur le flanc de l'outil (encore appelé usinage en roulant), l'outil touche tangentiellement la surface de la pièce (contact linéique) perpendiculairement à la direction d'avance. Il permet d'augmenter le taux d'enlèvement de matière et d'obtenir de meilleurs états de surface comparé à l'usinage en bout.

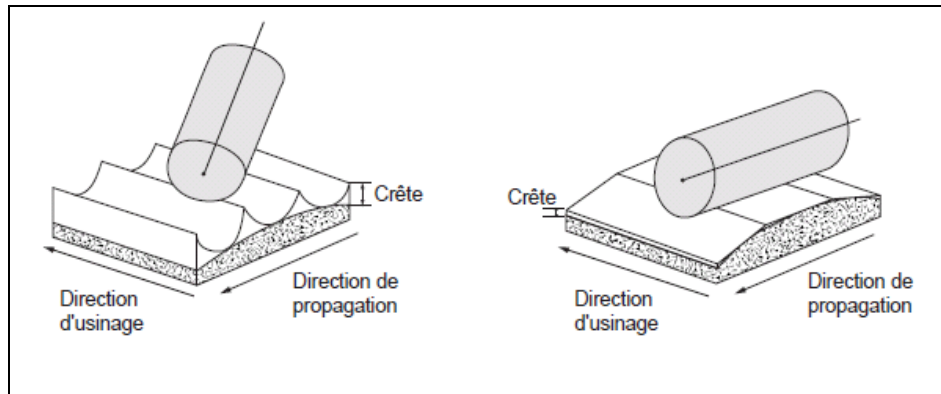


Figure 3.1 : usinage en bout et sur le flanc [9].

3.3. Le fraisage a 5 axes en bout

3.3.1. Le choix de l'outil

L'outil hémisphérique

C'est l'outil le plus utilisé de part la simplicité de sa géométrie qui le rend mathématiquement plus facile à positionner pour l'usinage. De plus, il génère des sillons réguliers qui conviennent parfaitement pour les opérations de polissage. Le changement d'orientation est utilisé pour éviter de couper la matière avec l'extrémité de l'outil afin d'améliorer la qualité de l'état de surface de la pièce usinée. L'inconvénient est que la valeur de la vitesse de coupe n'est pas constante le long du profil de l'outil, et qui s'annulant en son extrémité.

Les outils toriques et cylindriques

Présentent l'avantage d'enlever plus de matière qu'un outil hémisphérique de diamètre égal. Plus l'angle entre l'axe de l'outil et la normale à la surface est petit et plus la largeur coupée est grande. C'est outils assurent une vitesse de coupe constante ou peu variable sur la périphérie [10].

La génération de trajectoires en 5 axes se décompose en plusieurs étapes :

- Construction d'une position outil optimale sans interférence,
- Agencement des positions le long d'une passe,
- Distribution des passes pour couvrir la pièce et test d'interférence global entre l'outil et la pièce.

On distingue les interférences dites :

- **Interférences locales** entre l'extrémité de l'outil et la pièce.
- **Interférences globales** qui mettent en jeu l'outil en entier, le porte outil ainsi que la pièce et son montage d'usinage.

Par rapport à l'usinage à 3 axes, la différence réside dans une gestion des interférences entre l'outil et la pièce, qui est plus délicate en 5-axes du fait du plus grand nombre de degrés de liberté et de la volonté de couper le plus de matière possible à tout instant.

3.3.2. Construction des positions de l'outil

La génération de trajectoires en fraisage en bout consiste à déterminer le couple (CL, u)
Avec : **CC** : point de contact outil surface ; **CL** : point centre de l'outil ; **U** : vecteur directeur de l'axe de l'outil pour chaque point de contact outil surface CC usiné le long du trajet d'usinage

La relation vectorielle entre le point de contact CC et le point centre outil CL diffère selon la géométrie de l'outil (Figure 3.2).

En usinage à 3 axes il est possible de piloter le point centre outil CL et d'en déduire ensuite le point CC associé, comme dans les méthodes d'offset de forme ou de plongée . Cependant cette approche n'est pas appliquée en usinage à 5 axes à cause de sa complexité [11].

Ainsi dans les méthodes de génération de trajectoires en 5 axes on utilise toujours un guidage du point de contact CC. En ce qui concerne les directions d'usinage, on retrouve celles employées dans le cadre de l'usinage à 3 axes, c'est-à dire l'usinage selon des plans parallèles ou selon les courbes iso-paramétriques des surfaces.

voir figure 2.5

A chaque position de l'outil est associé un repère local CC (f , n , t). **Avec :** **f** : vecteur tangent à la courbe suivie par le point piloté ; **n** : vecteur normal à la surface ; **t** : vecteur tangent à la surface tel que $t = f \wedge n$

Le vecteur f est tangent à la courbe de guidage sur la surface nominale, il est donc dans le plan tangent à la surface au point CC et orthogonal à n .

Initialement, l'outil est positionné tel que son axe u soit colinéaire à n . On applique ensuite deux rotations pour orienter l'axe de l'outil dans la direction choisie. Les axes de rotation ne sont pas imposés et ceux-ci peuvent être différents d'une méthode à l'autre. Ainsi

les deux rotations utilisées sont d'abord θ_t autour du vecteur t puis θ_n autour du vecteur n (Figure 3.3). C'est cette configuration que l'on retrouve le plus souvent. Cependant dans, la première rotation est θ_t autour du vecteur t et la deuxième rotation est θ_f autour du vecteur f [12].

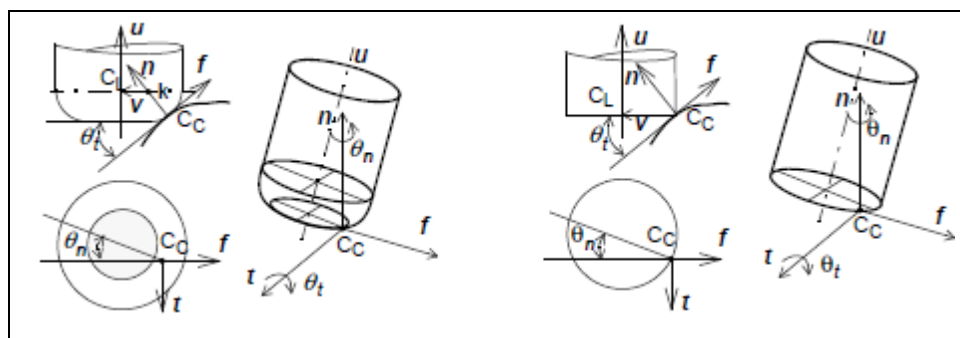


Figure 3.3 : Mise en position des outils en 5 axes.

Ensuite, toute la difficulté consiste à déterminer la valeur des angles de rotation. Nous verrons qu'en règle générale, la valeur de l'angle de rotation θ_t est choisie la plus petite possible pour maximiser la largeur de coupe tout en restant compatible avec le rayon de courbure de la surface pour éviter les interférences. De même, l'angle θ_n est nul par défaut afin d'augmenter la surface coupée et sera modifié éventuellement en cas d'interférence.

3.3.3. Influence des angles d'orientation sur le profil effectif

Nous rappelons tout d'abord que l'usinage à 5 axes avec un outil torique permet d'obtenir des largeurs coupées différentes selon l'orientation de l'axe de l'outil choisie. En effet, le rayon du profil effectif de coupe est une ellipse dont les caractéristiques évoluent avec les angles d'inclinaison et de pivotement .

Afin d'être le plus productif possible, les angles d'orientation de l'axe de l'outil doivent être minimum. Ainsi la largeur de matière coupée est maximum.

3.3.4. Gestion des interférences entre l'outil et la pièce

Pour un point de contact CC le long du trajet, les paramètres d'orientation de l'outil choisis ne garantissent pas un usinage sans interférences. En effet, à ce stade du calcul on ne

prend pas en compte la géométrie locale de la surface et l'encombrement de l'outil. Aussi il est nécessaire de vérifier la position relative de l'outil et de la surface en chaque position calculée. On distingue deux types d'interférence, les interférences causées par la courbure concave de la surface dans le plan perpendiculaire à la direction d'avance et les interférences vers l'arrière de l'outil dans la direction d'usinage. Parmi les méthodes de détection d'interférences existantes, il y a celles qui utilisent les caractéristiques locales de la surface à usiner telles que la courbure, et celles qui optent pour une représentation approchée par des points ou des modèles polyédriques. De plus, la plupart de ces méthodes tentent d'optimiser la position de l'outil hors interférences en termes de temps d'usinage, de comportement dynamique ou d'état de surface (hauteur de crête).

3.3.4.1. Méthode de CHOIS et AL

Pour un point de contact CC le long du trajet, les paramètres d'orientation de l'outil choisis ne garantissent pas un usinage sans interférences. En effet, à ce stade du calcul on ne prend pas en compte la géométrie locale de la surface et l'encombrement de l'outil. Aussi il est nécessaire de vérifier la position relative de l'outil et de la surface en chaque position calculée. On distingue deux types d'interférence, les interférences causées par la courbure concave de la surface dans le plan perpendiculaire à la direction d'avance et les interférences vers l'arrière de l'outil dans la direction d'usinage. Parmi les méthodes de détection d'interférences existantes, il y a celles qui utilisent les caractéristiques locales de la surface à usiner telles que la courbure, et celles qui optent pour une représentation approchée par des points ou des modèles polyédriques. De plus, la plupart de ces méthodes tentent d'optimiser la position de l'outil hors interférences en terme de temps d'usinage, de comportement dynamique ou d'état de surface (hauteur de crête).

3.3.4.2. Méthode de RUBIO et AL

Choi et al proposent une méthode permettant, à partir du repère local (CC, f, n, t), de déterminer les valeurs des deux angles θ_t et θ_n de sorte qu'il n'y ait pas d'interférence locale et globale entre la pièce et l'outil, et que les angles soient compatibles avec la cinématique de la machine. Afin de faciliter les tests d'interférence, la base de l'outil et la surface à usiner sont échantillonnées à l'aide de la méthode du Z-buffer. On compare alors l'altitude en Z des deux ensembles de points pour déterminer si il y a ou non interférence. Finalement une

recherche est effectuée pour déterminer le couple qui minimise la hauteur de crête donc le temps de polissage. Une méthode similaire est utilisée dans [13].

3.3.4.3. Méthode de LI et AL

La méthode développée permet l'étude des interférences entre la surface et l'outil torique en utilisant l'outil cylindrique de rayon R associé et la surface offset de distance r (Figure 3.4). Ils calculent les intersections entre le fond et le bord de l'outil cylindrique avec la surface offset. Dans un repère associé au fond de l'outil cylindrique, si certains points d'intersection ont une coordonnée en Z positive alors il y a interférence. En ce qui concerne le bord de l'outil, le calcul de points répartis sur la courbe intersection entre le cylindre outil et la surface offset permet de déterminer l'angle de rotation θ_t nécessaire à la suppression de l'interférence. Si celui-ci est supérieur à l'angle maxi autorisé par la cinématique de la machine, l'outil est décalé selon son axe jusqu'à ce que les coordonnées en Z soient inférieures ou égales à zéro. La méthode, reprise par [12], permet un balancement de l'outil en demi-finition autour du vecteur f tel que les surépaisseurs d'usinage résultantes soient identiques de part et d'autre du point de contact.

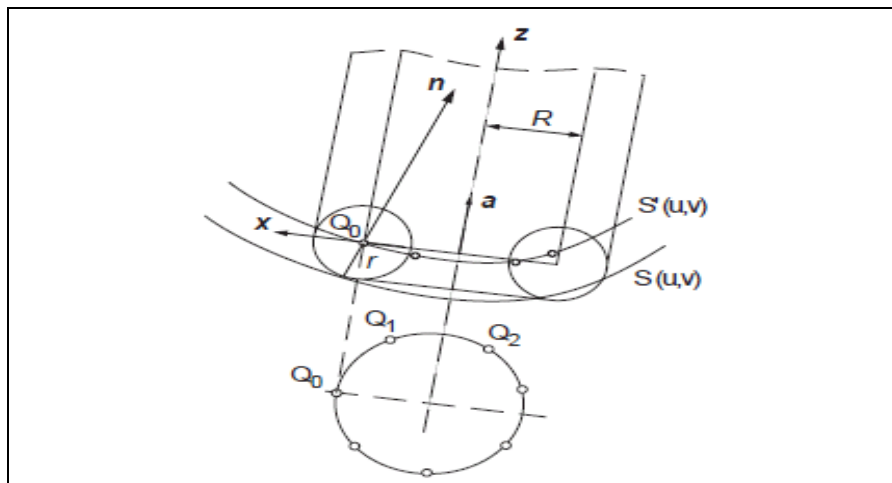


Figure 3.4 : Utilisation de la surface offset.

3.3.4.4. Méthodes basées sur la courbure

Li et Jerard proposent également une méthode basée sur une représentation polyédrique triangulaire de la surface. En chaque position outil CC, une isométrie transforme les triangles de telle sorte que l'axe Z du système de coordonnées soit aligné avec l'axe de l'outil. Ensuite on considère que tout triangle qui intersecte la projection de l'outil

dans le plan xy est en interférence. Dans le cas d'une interférence, seul l'angle d'inclinaison θ_t est modifié et si nécessaire l'outil est déplacé le long de la normale à la surface en CC. Parmi les contraintes à respecter, l'angle d'inclinaison d'une position outil à la suivante ne doit pas dépasser cinq degrés afin d'assurer un comportement continu de la coupe. La précision de la méthode dépend du nombre de triangles utilisés lors de l'interpolation de la surface. Après avoir discrétisé la surface, l'objectif est de trouver l'orientation du plan de base de l'outil qui n'interfère avec aucun triangle. Les deux types d'interférence sont corrigés successivement sans aucune optimisation.

Lauwers et al procèdent par dichotomie pour déterminer la valeur des deux angles. Les bornes mini et maxi des deux rotations sont fixées par l'utilisateur et la vitesse de variation d'angle d'inclinaison est contrôlée pour éviter de marquer la pièce. Pour une valeur donnée de l'angle d'inclinaison, tout le domaine de l'angle de pivotement est analysé. L'objectif étant de trouver l'angle d'inclinaison le plus proche de l'interférence pour maximiser la section du copeau [3].

3.3.4.5. Calcule de la hauteur de crête et de la distance entre passe

L'autre famille de méthodes est basée sur l'adéquation nécessaire entre la courbure de la surface et le profil apparent de l'outil. Le profil apparent de l'outil est la projection de celui-ci dans le plan perpendiculaire à la vitesse d'avance au point CC (Figure 3.5).

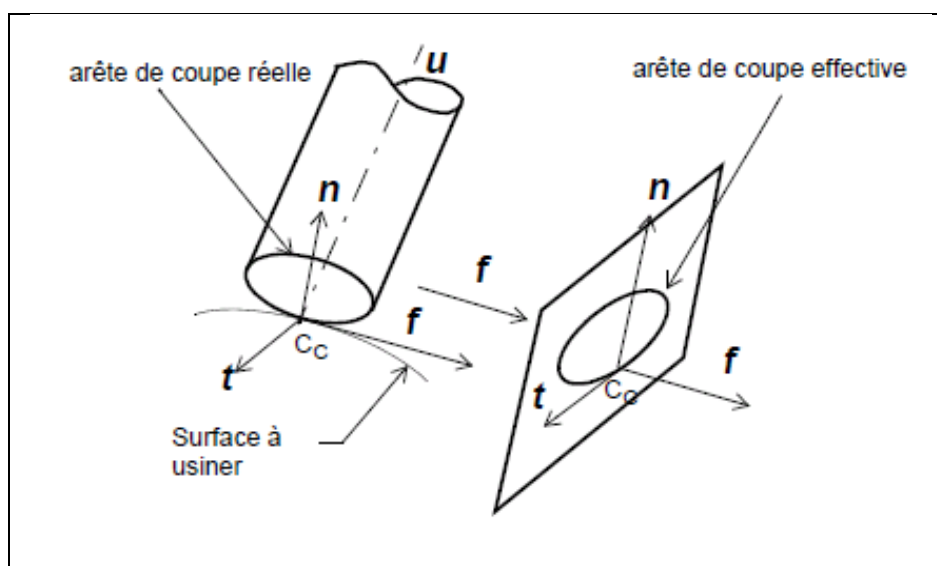


Figure 3.5 : Profil apparent de l'outil [6]

L'outil est alors positionné de telle sorte que le rayon de courbure du profil apparent soit inférieur au rayon de courbure de la surface dans le plan considéré

Certaines méthodes plus sophistiquées mettent en relation les courbures principales de la surface avec le profil apparent afin d'optimiser la largeur de coupe. Pour cela on utilise la représentation quadratique de la surface au point considéré dont l'équation dans le système d'axe principal est (Figure 3.6).

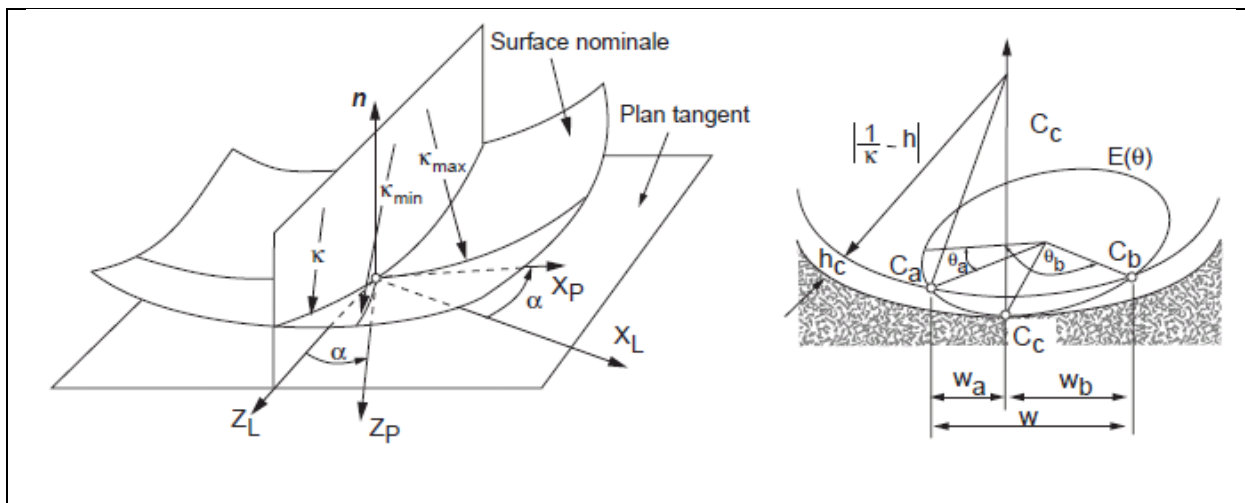


Figure 3.6 : Optimisation de la largeur de coupe [3].

L'intersection de cette courbe avec celle du profil apparent donne alors la largeur de coupe (Figure 3.6). Ainsi la largeur de coupe est maximale quand la direction d'usinage coïncide avec la direction principal de sorte que. D'autres travaux aboutissent aux mêmes conclusions .

Cependant, ces techniques ne prennent pas en compte les interférences vers l'arrière. Dans un premier temps, l'analyse des courbures de l'outil et de la surface au point CC et dans les plans (CC, n, t) et (CC, f, n) permet de déterminer un domaine de non interférence dans (θ_t, θ_n) . Ensuite la méthode procède à l'analyse des interférences vers l'arrière dans le plan (CC, f, n) en deux étapes. La première étape consiste à approcher la trace de la surface dans le plan par un cercle de rayon égal au rayon de courbure de la surface en CC. L'angle d'inclinaison minimum correspond alors au cas où la trace de l'outil est bitangente au cercle (Figure 3.7).

Conscient de l'approximation de la courbure effectuée, l'auteur propose dans un deuxième temps de vérifier la présence d'interférences dues à une discontinuité en courbure. Pour cela tous les points de contact précédemment calculés sur le trajet ou les trajets adjacents et situés

dans la zone critique sont candidats à un test d'interférence. Les coordonnées des points sont exprimées dans un repère attaché au plan de base de l'outil. Ainsi tous les points au dessus du plan de base et dont la distance à l'axe outil est inférieure au rayon principal de l'outil sont en interférence (Figure 3.7)[14].

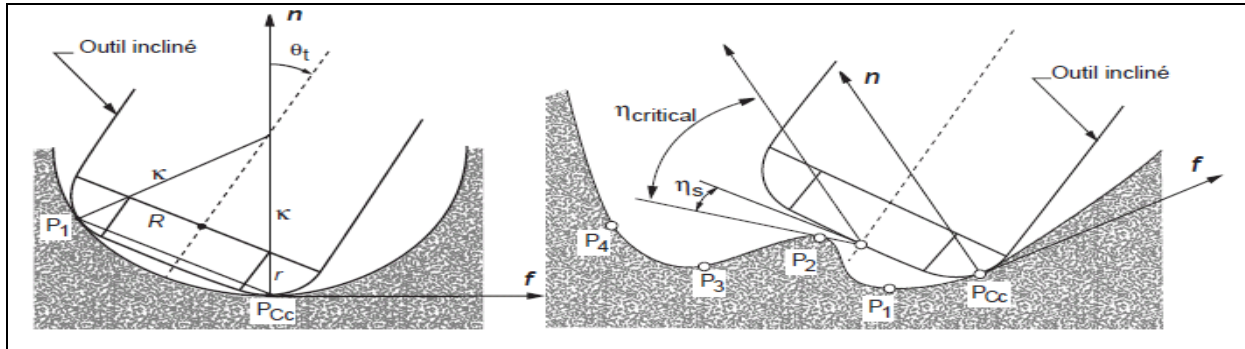


Figure 3.7 : Interférence vers l'arrière [14]

Le calcul de la hauteur de crête en usinage à 5 axes avec les outils toriques et plats est beaucoup plus difficile qu'en 3 axes avec un outil hémisphérique. En effet, le profil de la partie coupante varie tout au long du trajet en fonction de l'orientation de l'outil et de la courbure de la surface. Plus précisément, ce profil est la projection de l'outil dans le plan perpendiculaire à la direction d'avance au point de contact entre l'outil et la surface CC. C'est pourquoi la totalité des méthodes rencontrées dans la littérature sont des méthodes approchées.

La méthode la plus simple consiste à approcher le profil apparent de l'outil par un cercle de façon à retrouver la méthode de calcul de l'outil hémisphérique.

Il existe également la méthode approchée dite du plan tangent et initiée dans [15]. On se place dans le cadre de l'usinage de surfaces à évolution douce avec un outil plat. La surface est approchée par son plan tangent au point de contact outil surface CC. La partie coupante est le profil apparent situé dans le plan (CC, n, t) (Figure 3.8). On considère que la crête est formée par deux positions de l'outil adjacentes, distantes d'une longueur d et de même orientation, de sorte que les deux profils apparents en ellipse sont identiques. Deux cas se présentent : la crête est formée par le fond de l'outil ou par le bord de l'outil selon la distance entre passes. Dans les deux cas on calcule l'intersection P des deux profils et la hauteur de crête est la distance de P au plan tangent. La méthode du plan tangent fut reprise pour calculer la distance entre passes en usinage à 3 axes avec des outils plats et toriques.

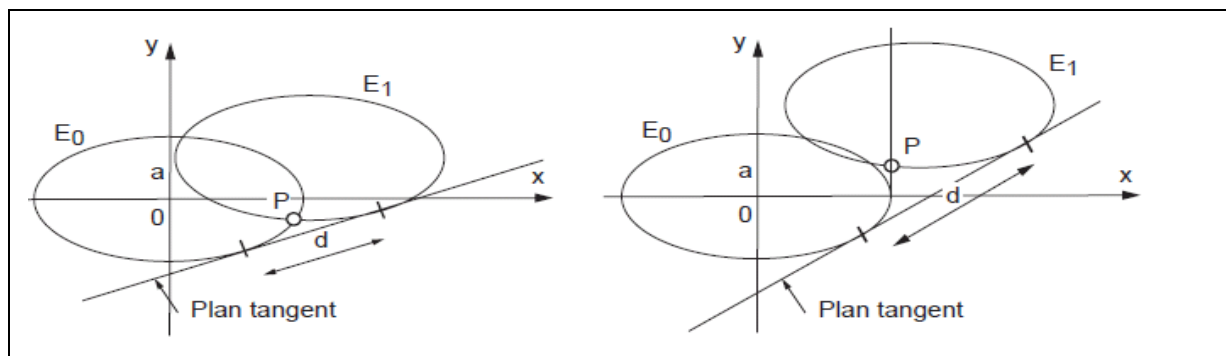


Figure 3.8 : Méthode du plan tangent [15].

les deux profils sont aussi coplanaires et identiques mais la surface est un cylindre de révolution de rayon R et usinée suivant les génératrices. Cette méthode étendue à toutes sortes de surfaces induit alors une approximation d'ordre 2 du profil de la surface dans le plan d'étude. Le problème est alors similaire à celui du 3 axes avec outil hémisphérique en remplaçant les profils en cercle par des ellipses.

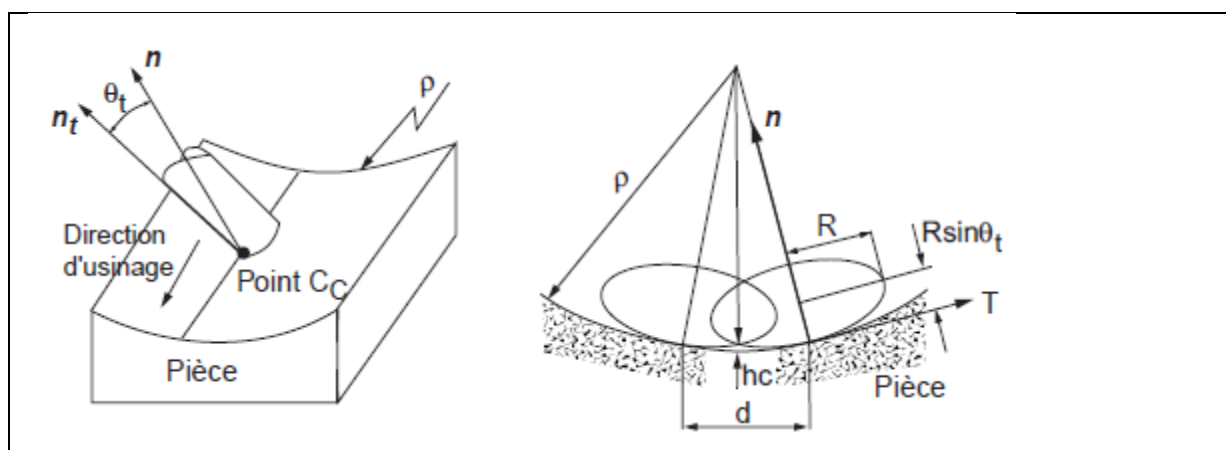


Figure 3.9 : Calcul de la hauteur de crête.

Lee propose également une méthode permettant de déterminer la distance entre passes pour une hauteur de crête donnée avec une approximation d'ordre 2 de la surface dans le plan d'étude. Contrairement aux méthodes précédentes, les deux profils ne sont pas forcément les mêmes (Figure 3.10). A partir d'un point courant $CC_{i,j}$ sur le trajet TC_i , le point adjacent $CC_{i+1,j}$ se trouve dans le plan d'étude et sur la surface, et doit respecter la contrainte suivante :

$$w_{b,i} + w_{a,i+1} \geq d$$

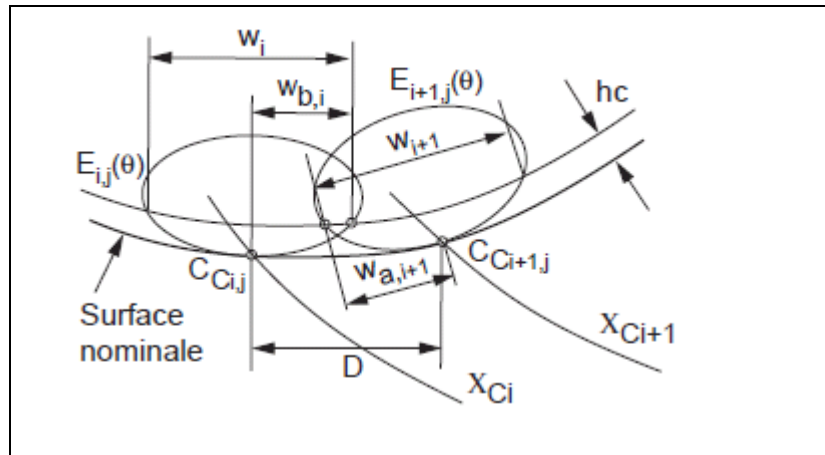


Figure 3.10 : Calcul de la distance entre passes .

Lee et Chang proposent une méthode de calcul de hauteur de crête plus réaliste mais aussi plus complexe [6]. A partir de deux positions de l'outil adjacentes, pour lesquelles l'orientation et la direction d'avance sont distinctes, un plan d'évaluation P_{ln} est construit passant par $CC_{i,j}$ et $CC_{i+1,j}$ et contenant la normale à la surface en $CC_{i,j}$. Dans ce plan sont évalués les deux profils apparents des outils et on construit le point P d'intersection des deux profils. La hauteur de crête est calculée comme la distance entre le point P et la courbe intersection du plan P_{ln} et de la surface nominale S_n . Cette distance est calculée par approximation de la courbe par un cercle dont le rayon est le rayon moyen entre $RCC_{i,j}$ et $RCC_{i+1,j}$. De plus, différents cas d'intersections possibles sont envisagés, notamment le cas où le point de crête est généré par le flanc de l'outil. On retiendra surtout de la méthode sa grande complexité par rapport aux précédentes sans pour autant juger de ses performances.

3.4. LE FRAISAGE A 5 AXES SUR LE FLANC

3.4.1. Les surfaces réglées

Une surface est réglée si et seulement si par tout point de la surface il passe au moins une droite entièrement contenue dans la surface. On définit une surface réglée par deux courbes directrices $P1(u)$ et $P2(u)$ sur lesquelles s'appuient les droites de la surface :

$$Q(u, v) = (1 - v) \cdot P1(u) + v \cdot P2(u)$$

avec u et $v \in [0, 1]^2$

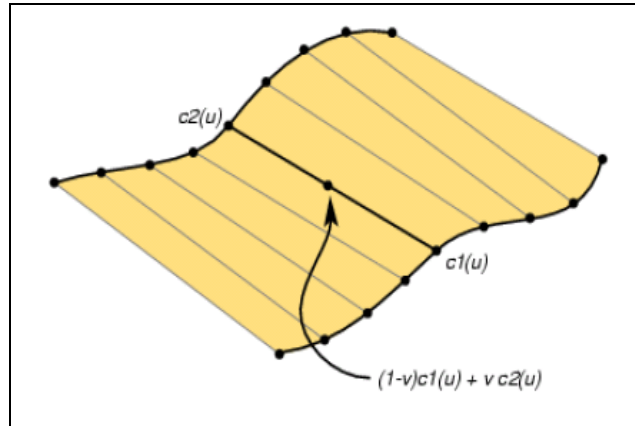


Figure 3.11 : Surface réglée.

3.4.1.1. Surfaces réglées remarquables

La surface cylindrique est un cas particulier des surfaces réglées. Le cylindre de révolution est une surface réglée dont toutes les droites sont parallèles à l'axe. Le cône est une surface réglée dont toutes les droites (appelées directrices) sont concourantes au sommet. Les directrices s'appuient sur le sommet et sur un cercle non coplanaire avec le sommet. Le paraboloïde hyperbolique (selle de cheval) est également une surface réglée.

3.4.1.2. Surfaces réglées développables

Une surface réglée est dite développable si les normales à la surface aux deux extrémités d'une règle sont colinéaires. Les surfaces cylindriques, le cylindre de révolution et le cône sont des surfaces développables. Le qualificatif développable vient de la propriété de ces surfaces de pouvoir être développé sur un plan sans être étirées ou tordues. De telles surfaces sont telles que leur courbure Gaussienne K est nulle en tout point.

3.4.2. Usinage des surfaces développables

L'outil est positionné tangent à une des deux courbes directrices et son axe est orienté parallèlement à la règle considérée. L'usinage de surfaces développables sur le flanc s'effectue sans interférences si le rayon de l'outil est plus petit que le plus petit rayon concave

de la surface à usiner. La trajectoire de l'outil est calculée par interpolation linéaire des deux directrices en fonction d'un paramètre de tolérance d'usinage.

On applique la même méthode sur chacune des courbes et on choisit le paramètre u_{i+1} qui permet le respect de la tolérance d'usinage sur chacune des courbes.

Une fois chacune des trajectoires du point de contact établie, on passe au point piloté par une opération d'offset de chaque point $p(u_i)$ de distance égale au rayon de l'outil selon la normale à la surface. Cette méthode s'applique aux outils cylindriques.

3.4.3. Usinage des surfaces réglées non développables

Considérons l'usinage d'une surface réglée S_R dont P_1 et P_2 sont les directrices et g la règle roulant sur la surface S_R . On positionne l'axe de l'outil parallèle à la règle g considérée. Cette solution génère des collisions entre l'outil et la pièce aux extrémités de la règle car l'angle entre les deux projections P'_1 et P'_2 dans le plan E perpendiculaire à g des directrices P_1 et P_2 n'est pas nul (Figure 3.12).

Dans le cas des surfaces réglées non développables, il est donc impossible d'usiner la pièce sans interférences si le diamètre de l'outil est non nul. Ces surfaces ne peuvent donc être usinées parfaitement selon les règles qu'en électro-érosion à fil.

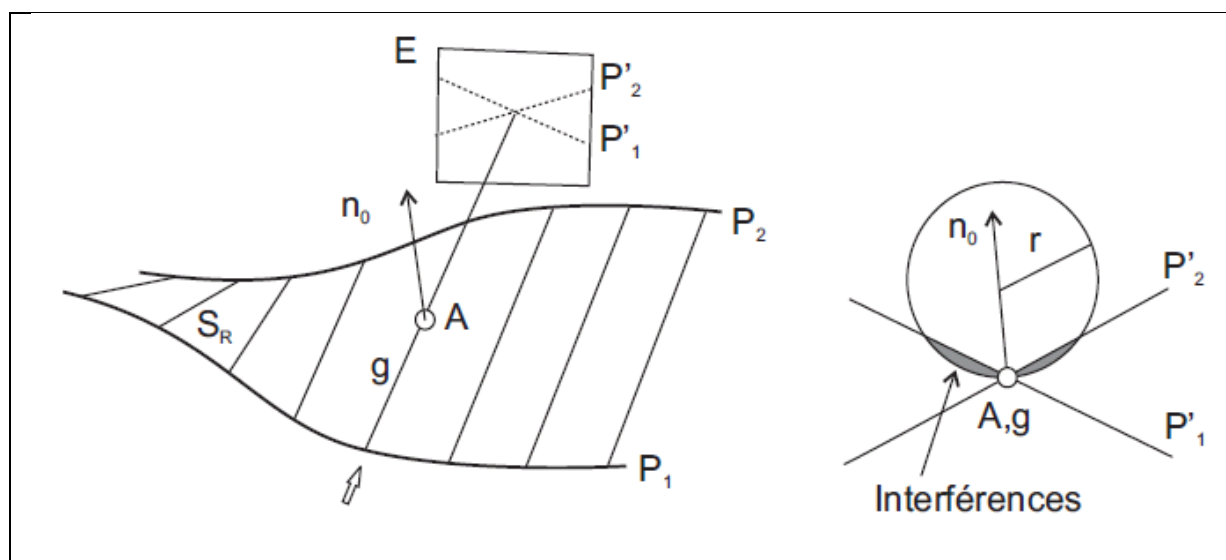


Figure 3.12 : interférences lors d'un posage sur la règle .

3.4.4. Gestion des interférences

La méthode suivante [16], prend en compte la courbure de chaque courbe directrice dans le calcul du posage de l'outil et de l'interférence. L'axe de l'outil est positionné parallèlement à la règle considérée et un point de l'axe est calculé de manière à répartir également les interférences avec les deux directrices.

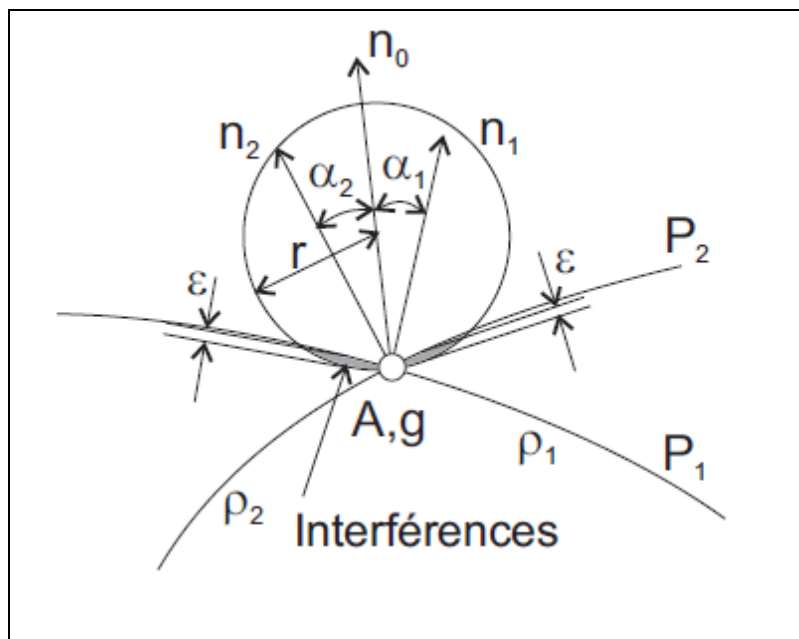


Figure 3.13 : gestion des interférences [16]

L'idée ici est de faire une approximation des surfaces quelconques par des surfaces réglées selon une tolérance donnée afin d'appliquer les méthodes précédentes. Par exemple, l'algorithme développé dans le cadre du projet Européen Flamingo est le suivant :

- choisir une surface à usiner
- construire la surface offset avec le rayon de l'outil comme distance de décalage,
- approchée la surface offset par des surfaces réglées jointives,
- utiliser les surfaces réglées pour positionner l'outil.

Ce genre d'application est courant en architecture où les différents panneaux qui composent une structure sont obtenus par pliage à partir d'une tôle plane. Les surfaces des panneaux sont donc des surfaces réglées développables qui approchent une surface quelconque (Figure 3.14).

3.4.5. Comparaison des deux modes d'usinage

Les deux modes d'usinage peuvent être utilisés : l'usinage en bout et l'usinage par flanc. Des travaux réalisés dans le but de comparer ces deux modes montrent que le mode d'usinage par flanc d'outil augmente le taux d'enlèvement de matière (Tableau : 1.1). En effet le mode d'usinage en bout est consommateur de temps car il impose de faire un grand nombre de passes, générant une surface festonnée nécessitant des opérations de parachèvement longues et difficilement reproductibles car souvent effectuées manuellement. En comparaison, l'utilisation de l'usinage par flanc d'outil apporte une réduction des coûts de production de la pièce pour une hauteur de crête identique.


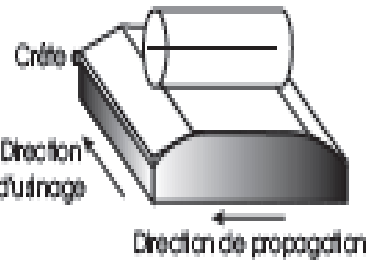
	Usinage en bout	Usinage par flanc
Mode d'usinage		
Temps	Explosion du temps d'usinage donc grand nombre de passes.	Réduction du nombre de passes donc du temps d'usinage.
Cout	Couteux car temps de production très long et nécessite des opérations de polissage.	Réduction des coûts.
Qualité	Surface festonnée a cause du rayon de bout d'outil.	Qualité de surface améliorée donc réduction des opérations de polissage.

Tableau 3.1 : Comparaison des deux modes d'usinage [3].

CHAPITRE

4

**APLICACION D'USINAGE D'OUTIL
DE FORAGE 8 "**

4.1. INTRODUCTION :

Dans cette partie Nous nous sommes attachés à l'étude de la faisabilité de l'usinage de notre pièce mécanique (outil de forage 8") dans le cadre de l'usinage 5-axes. Nous présentons l'étude des stratégies d'usinage de notre modèle en CAO, depuis le modèle numérique CAO jusqu'à la réalisation du modèle FAO (génération de parcours d'outil, simulation d'usinage,...). (Figure 4.2)

Du point de vue de l'utilisation du système FAO, il convient de choisir une stratégie (en fonction de ce qui convient le mieux, selon la situation qui est en face). L'usinage 5 axes des pièces à géométrie complexe, en particulier des outillages, des moules, et des outils de forage, s'appuie sur la chaîne des processus CAO - FAO – CN (voir ci-dessous).

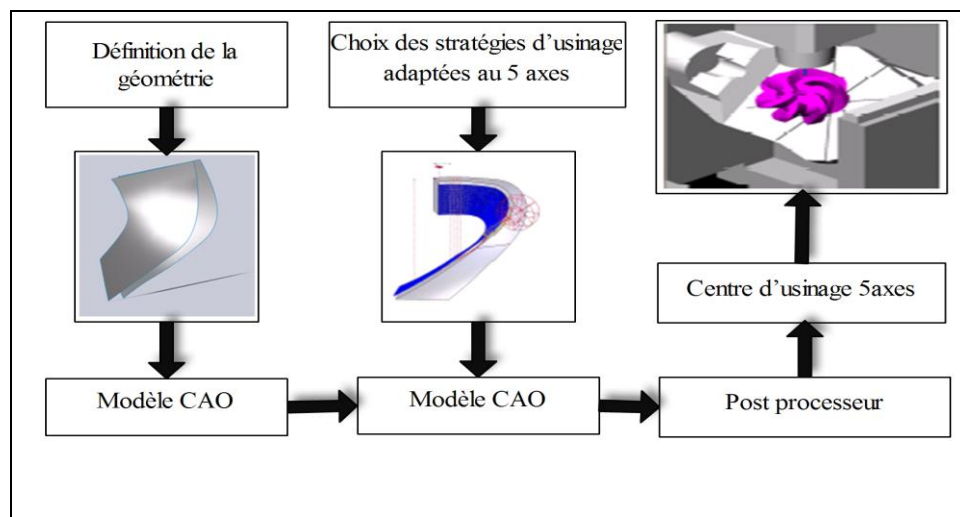


Figure 4.1 : usinage multi-axes.

Notre tâche se résume ainsi :

- Proposer une stratégie d'usinage 5-axes de l'outil de forage 8 pouces.
- Simulation d'usinage : pour écarter les risques d'interférence locale.

4.2. CHOIX DE LA MACHINE :

- Que faut-il comme machines ?

Dans tous les domaines, la création d'objets se voit aujourd'hui confrontée à des exigences croissantes en matière de design. Les critères ergonomiques, la valeur ou tout simplement l'esthétique demandent des formes de plus en plus arrondies. Les différentes phases de la conception doivent toujours être plus rapides et plus précises. Les paramètres de forme sont fournis essentiellement par les systèmes de CAO, les programmes d'usinage des surfaces gauches sont issus des postes de FAO. Aujourd'hui c'est **les machines 5-axes qui sont à la mesure du challenge que constitue aujourd'hui la fabrication** d'outils de forage, de moules et de pièces de forme complexe.

- Facilité d'utilisation ;
- Rendement optimal dans la chaîne des processus CAO FAO CN ;
- Maîtrise maximale de la qualité.
- Etc.

Usinage 5-axes sur centres de fraisage modernes :

Les exigences de forme, de qualité de surface et de vitesse qui sont posées dans l'usinage par enlèvement de matière, prennent des proportions de plus en plus grandes. Pour parvenir à des conditions de coupe optimales dans l'usinage des surfaces incurvées dans l'espace.

Pour parvenir à des conditions de coupe optimales dans l'usinage des surfaces incurvées dans l'espace (1). Pour usiner des formes orientées de façon quelconque dans l'espace (il faut pouvoir modifier l'angle d'attaque de l'outil) (2). Ou pour fraiser des cavités profondes (3).

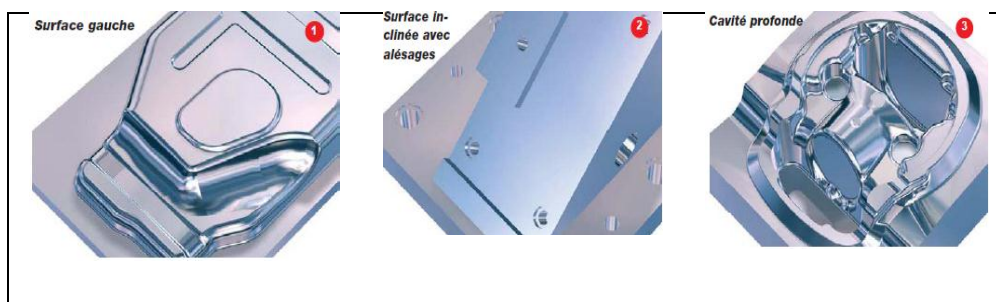


Figure 4.2 : possibilités d'usinage 5-axes.

Les déplacements sur la machine :

Deux axes rotatifs A, B ou C sont ici nécessaires (4) en plus des trois axes linéaires X, Y et Z. L'accostage d'une position d'outil dans l'espace s'effectue dans les axes linéaires X, Y et Z (5). Le positionnement de l'outil, son orientation, s'effectue avec deux axes rotatifs, B et C par exemple (6). Théoriquement, avec 3 axes linéaires et 2 axes rotatifs, il est possible d'accoster chaque point dans l'espace avec l'outil orienté tel qu'on le souhaite.

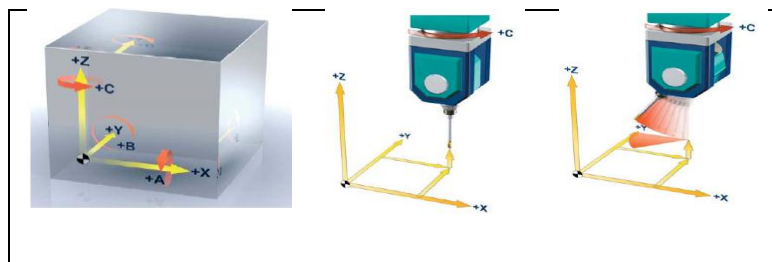


Figure 4.3 : Déplacements machines.

Le fraisage avec 3 axes, avec 3+2 axes ou avec 5 axes ?

Sachant qu'une machine de fraisage 5-axes a des possibilités de fraisage en 3-axes pure (comme le fait une machine de fraisage 3-axes dédiée), de fraisage indexé (3+2 axes), ou de fraisage 5-axes continue.

- Pour le fraisage 3-axes :

Ce sont surtout les surfaces gauches de convexité régulière qui sont généralement usinées avec une commande 3-axes. Par contre, la commande 5-axes est indispensable pour les cavités profondes ou les changements de courbure fréquents.

- Axes à interpolation commandés numériquement X, Y, Z.
- Sur toute la trajectoire de fraisage, l'orientation de la fraise ne change pas. Les conditions de coupe en bout de fraise ne sont jamais optimales.

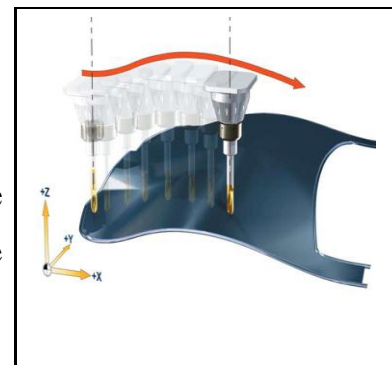


Figure 4.4 : fraisage 3-axes

- Pour le fraisage 5 axes indexé (3+2-axes) :

La figure en haut montre la fraise dans des conditions de coupe optimales. Cependant, les conditions de coupe se dégradent au fur et à mesure que la fraise se déplace vers le haut ou vers les côtés de la pièce. Pour conserver ici des conditions de coupe optimales, il est nécessaire de basculer la table. Et pour usiner intégralement une surface gauche comme celle représentée, il est nécessaire de basculer plusieurs fois la table dans des directions différentes.

- Axes à interpolation commandés numériquement X, Y, Z
Axes rotatifs fixes, par ex. A, C (table)
- Sur ces machines-outils, l'orientation de l'outil ou la position de la table sont modifiables, par modification du réglage par exemple.

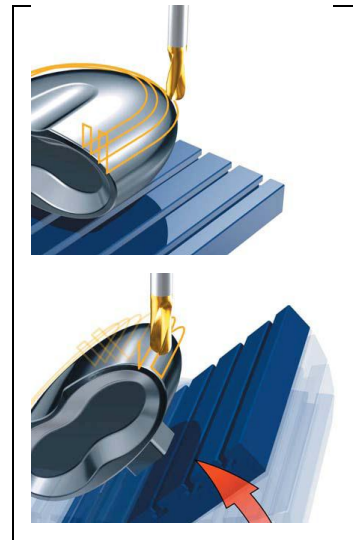


Figure 4.5 : fraisage 3+2-axes.

- Pour le fraisage 5-axes continue :

Il permet de réaliser simultanément plusieurs opérations d'usinage multilatérales, augmentant ainsi la productivité et éliminant les erreurs susceptibles de se produire lors des multiples opérations de configuration de pièces.

- Les Axes à interpolation commandés numériquement X, Y, Z. Les Axes rotatifs commandés numériquement, par ex. A, B.
- Avantage : il est possible de régler l'orientation de l'outil en parfaite synchronisation avec son déplacement linéaire sur toute la trajectoire. Les conditions de coupe sont optimales sur toute la trajectoire de l'outil.

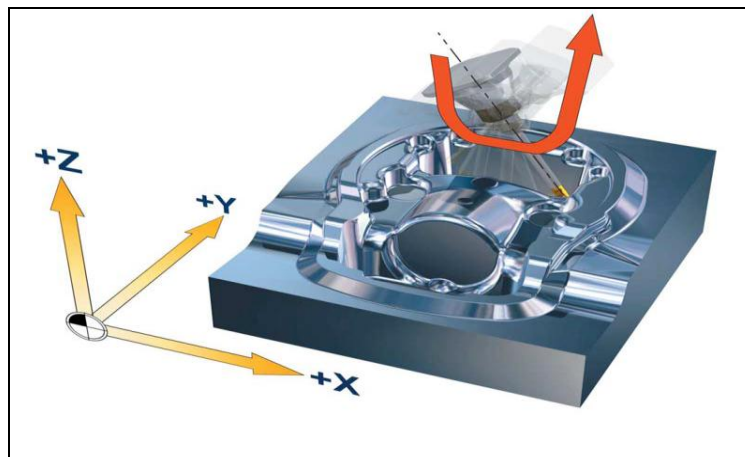


Figure 4.6 : fraisage 5-axes continu.

Les systèmes de FAO actuels offrent un éventail de parcours 5 axes. Le problème général de l'usinage 5-axes simultané est que les 5-axes offrent simplement trop de liberté. Les deux degrés de liberté des inclinaisons des axes permettent pour n'importe quelle position du parcours un nombre infini de valeurs d'inclinaison correctes sans collision mais qui sont complètement différentes. Il est important de trouver les angles optimums. Par conséquent, **tout système de FAO nécessite des paramètres de la part de l'utilisateur pour définir des contraintes au processus de création du parcours.**

La question reste la suivante : Quelle est la contrainte correcte ?

La réponse est simple : Ca dépend !

Les facteurs sont la machine proprement dite avec ses limitations angulaires et sa capacité physique à exécuter des parcours d'usinage 5 axes. De même, le matériau utilisé, la qualité des surfaces, la stratégie 5-axes et l'outil disponible influencent les contraintes de l'utilisateur.

De ce fait la Direction de Fabrication (DF/ENSP) doit investir sur un centre d'usinage 5-axes. La machine retenue dans la DF/ENSP a été choisie afin de répondre aux exigences techniques formulées par un cahier de charge, à savoir :

- Le prix de la machine et des produits annexes ;
- L'assistance, la maintenance, et la formation ;
- Les spécifications techniques de la machine :

- l'encombrement géométrique (course des axes X Y Z, rotation des axes A, B, C,...) ;
- capacité du magazine ;
- puissance, vitesse, et type de broche ;
- vitesse rapide et vitesse d'avance d'usinage en X, Y et Z ;
- La configuration de la machine (tête/table, table/table, tête/tête)
- Type et version du contrôleur (DCN) machine (FANUC, HEIDENHAIN, SINUMERIK,...) ;
- Etc.

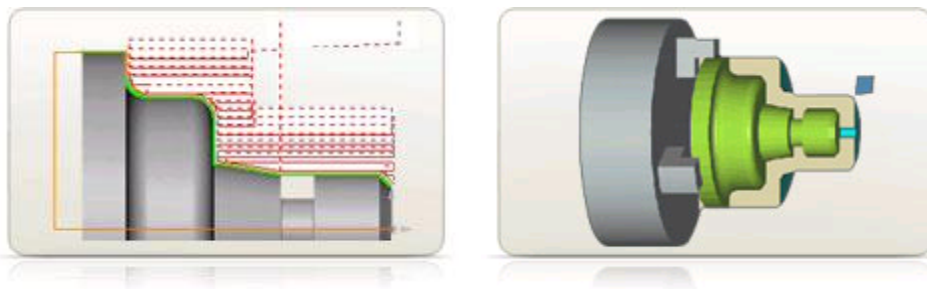
La machine proposée au niveau de la DF/ENSP pour usiner notre modèle, est une machine 5-axes avec une configuration tête/table (tilting) qui permet une grande accessibilité pour les pièces petites et moyennes dimensions (c'est le cas de notre pièce de forme et de dimensions qui nécessite une machine bien appropriée à ce travail). (HEIDENHAIN)

4.2.1 Logiciel CAMWorks;

4.2.1.1 quelque module camworks® :

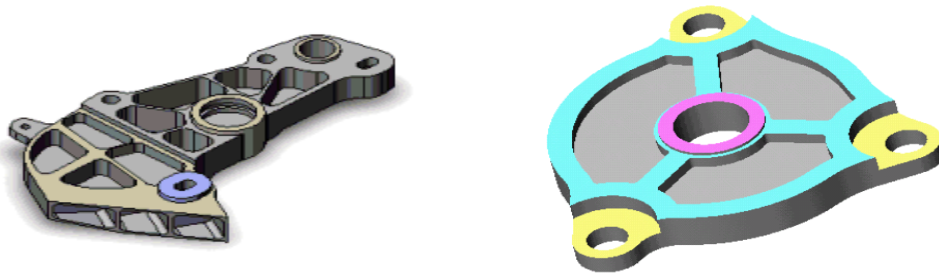
4.2.1.2 CAMWorks® Tournage :

Le logiciel de tournage 2 et 4 axes CAMWorks® pour la programmation des tours CN comprends les cycles d'ébauche automatique, de finition, de gorge, de filetage, de tronçonnage, et de perçage, d'alésage, taraudage, etc.



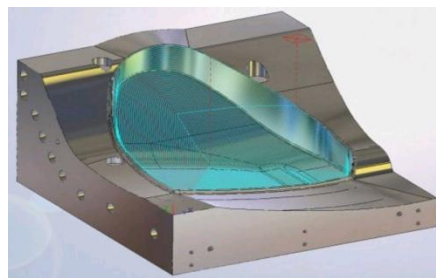
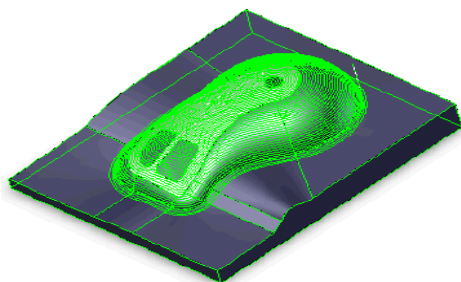
4.2.1.3 CAMWorks® Fraisage 2.5 axes :

CAMWorks® Fraisage, est utilisé pour la programmation des codes G des fraiseuses CN. Le fraisage 2 axes 1/2 comprend : l'ébauche automatique, la finition, le fraisage hélicoïdal, le surfacage et les cycles points à point (perçage, alésage, taraudage) appliqués aux formes prismatiques, etc.



4.2.1.4 CAMWorks® Fraisage 3 Axes :

Le fraisage 3 axes comprends le fraisage 2 axes 1/2 plus les routines pour l'usinage complexe de surfaces rencontrées couramment dans la fabrication de moules et les applications aérospatiales. Les cycles d'usinage 3 axes, simples ou complexes les pièces sont rapidement usinées avec exactitude selon des parcours d'outil de haute qualité.



4.2.1.5 CAMWorks® Usinage multiaxes :

Parmi les principales caractéristiques de l'usinage multiaxes sous CAMWorks® :

Usinage de pièces complexe :

Ceci inclut des pièces automobiles de haute performance, les turbines, les pales de turbines, les outils de coupe, l'ajustage 5 axes, les moules, et l'usinage des outils de forage des puits de pétrole, etc.

Réduction des temps d'usinage, Finition améliorée, Durée de vie d'outil prolongée :

- L'inclinaison de l'outil par rapport à la pièce permet l'utilisation d'outils plus courts. D'où une rigidité accrue des outils et donc il en résulte une meilleure qualité de surface et un gain de productivité.
- Le temps de production de pièces complexes est écourté par le fait que l'usinage entier peut être réalisé à partir d'une seule configuration de fraisage sans besoin de reprise. L'usinage Multiaxes CAMWorks® offre des stratégies et des paramètres d'usinage performants capables de satisfaire les applications même les plus avancées.

- Etc.

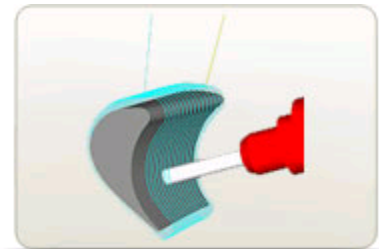
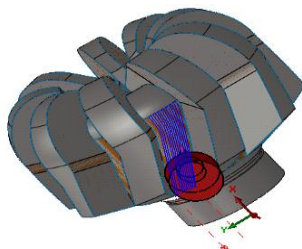
Offre des stratégies et des paramètres d'usinage performants :

- La prise en charge de plusieurs types d'outils notamment les fraises 2 tailles, hémisphériques, 2 tailles rayonnées, coniques et à profil rentrant, comme les fraises sphériques et en té.
- Des stratégies de coupe pour l'usinage de surface, contournage de profil, la gravure, le rainurage et l'usinage de cavités et coins profonds.
- La détection de collision analyse chaque parcours d'outil ainsi que la surface pour vérifier toute collision avec la pointe, la queue et le support de l'outil.
- Les parcours d'outils peuvent être générés dans des traitements séparés. De multiples parcours d'outil peuvent être conçus simultanément et pendant que l'utilisateur continue de travailler sur d'autres zones ou sur d'autres modèles.
- Etc.

Citons deux types d'usinage multiaxes.

4/5 Axes continus :

L'usinage sur 4/5 axes simultanés de CAMWorks® nous permet de créer des parcours d'outils sur des formes complexes impossibles à usiner avec des machines 3 axes. Ceci induit une plus grande flexibilité et productivité des équipements ainsi qu'un gage de qualité.

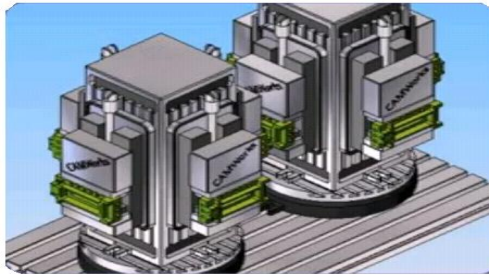


4/5 axes positionnés :

CAMWorks® offre un support avancé pour l'usinage 3 axes plus 2, qui donne la possibilité d'usiner sur les différentes faces d'une pièce. Le logiciel calcule automatiquement les angles d'indexation. La machine supporte de multiples configurations telles que : plateau tournant, table sur table, tête pivotante 5 axes et centres d'usinage horizontaux.

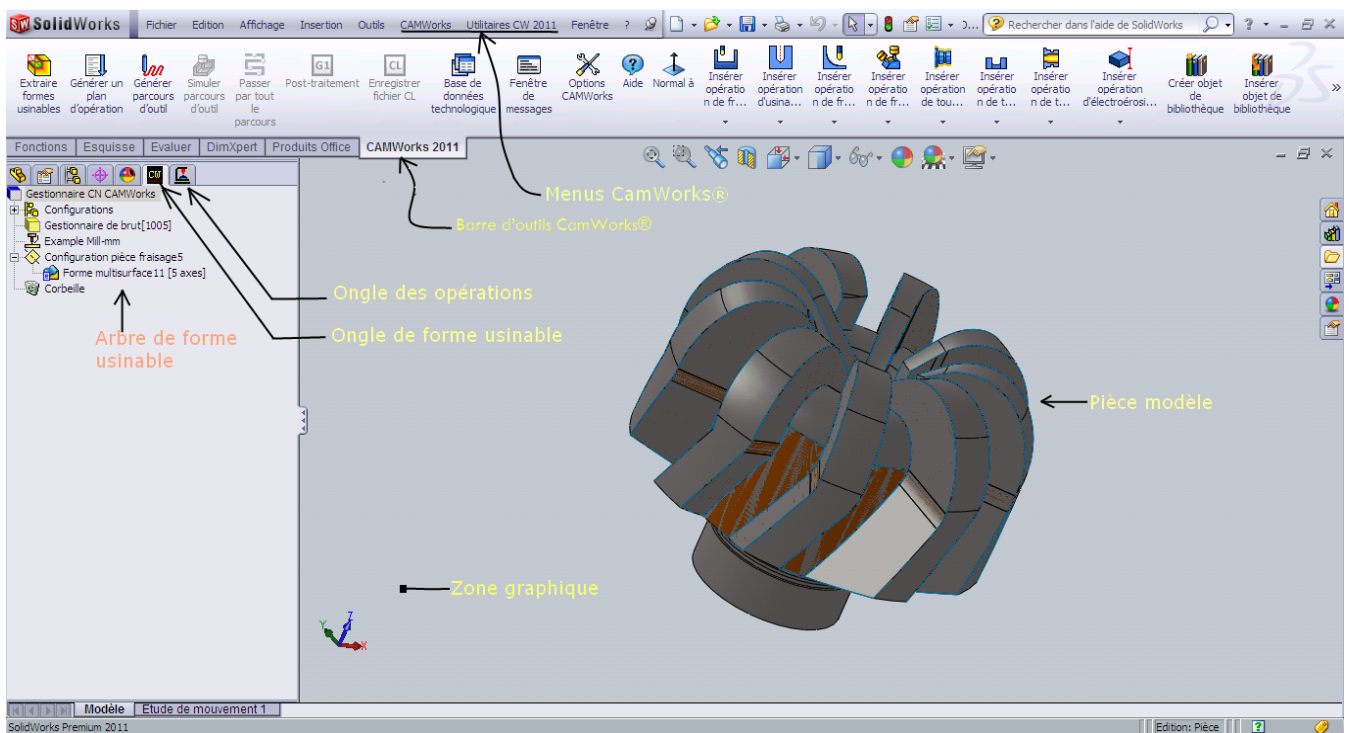
Les cycles d'usinage 2 axes et 3 axes peuvent être utilisés pour usiner des pièces à faces multiples ou des pièces multiples. Des profils de brut unique peuvent être définis ce qui réduit

les passes dans le vide. Des gains de temps significatifs sont obtenus par l'optimisation des séquences d'usinage par outil et dans les positions d'indexage.



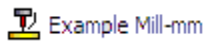
4.2.2 interface utilisateur camworks® :

CAMWORKS® offre une variété d'option et de paramètres toutes accessible par l'intermédiaire d'une interface utilisateur, que nous allons présenter brièvement sur les figures ci-dessous (on considère l'usinage en fraisage multiaxes) :



- Le menu CAMWorks liste des commandes, en plus de ces menus des raccourcis menus sont disponible en cliquant avec la touche de droite permettant un accès rapide à une variété de commandes utilisée fréquemment.

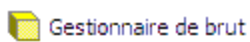
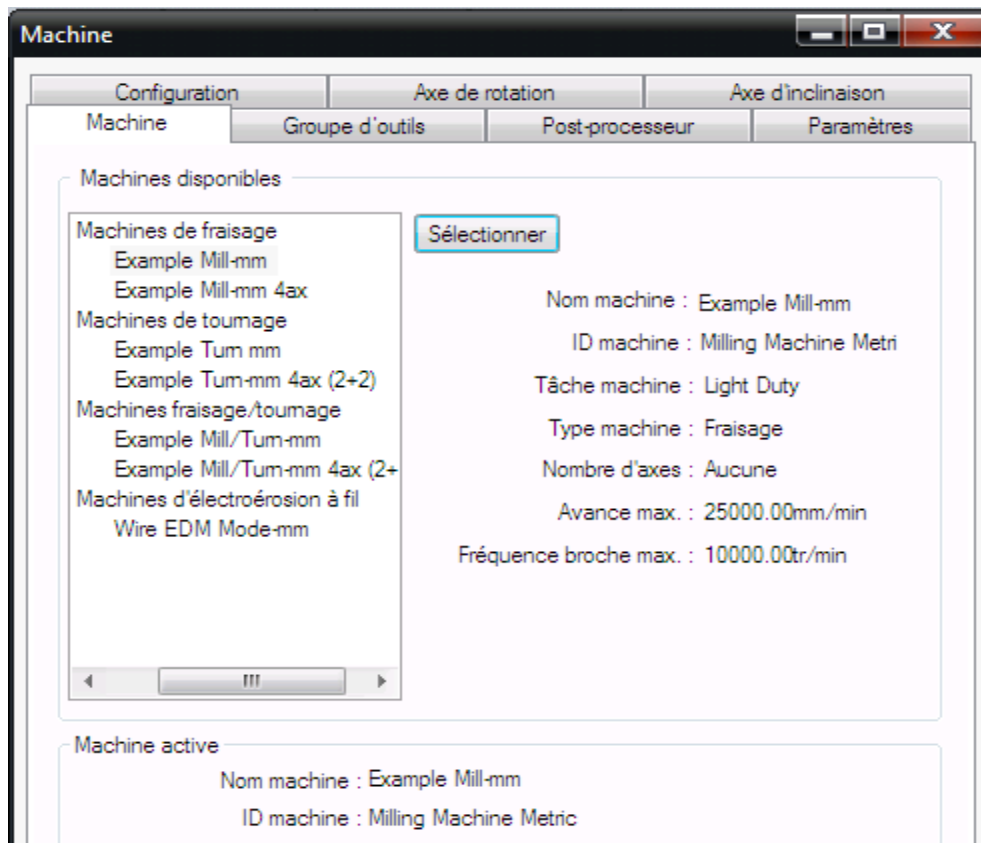
- Les arbres d'usinage CAMWorks permettent d'avoir une vue des informations d'usinage du modèle. Initialement, **'l'arbre des Formes Usinables'** montre quelques icônes tels que **'Gestionnaire CN'**, **'Gestionnaire de Brut'**, **'Machine-Mill'** et **'Corbeille'**.
- Et bien d'autre options, ou on va expose quelques une ci-dessous.



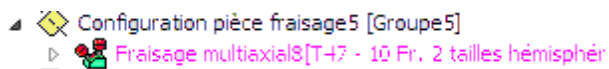
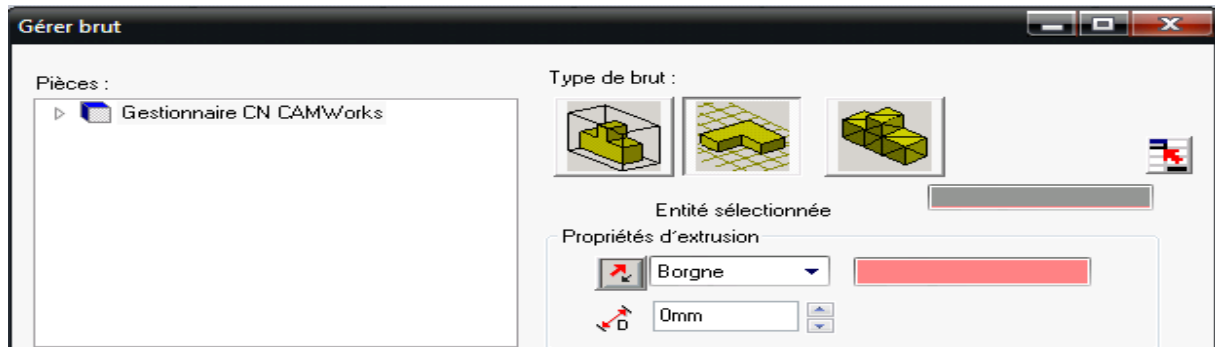
L'icône Machine défini la machine outil utilisée pour usiner la pièce. La définition de Machine inclue le type de machine (tour ou fraiseuse), les définitions d'outil, et le contrôleur (post-processeur). Les machines sont fixées dans la base de données technologique. Un click droit sur cette icône affiche une boîte de dialogue "Définir la machine". La définition de la fraiseuse inclut :

- Les informations générales de la machine.
- un groupe d'outils actif (groupe d'outils utilisé avec la fraiseuse avec laquelle vous travaillez) ;
- La commande CN pour la machine que vous êtes en train d'utiliser (ceci définit le post-processeur).

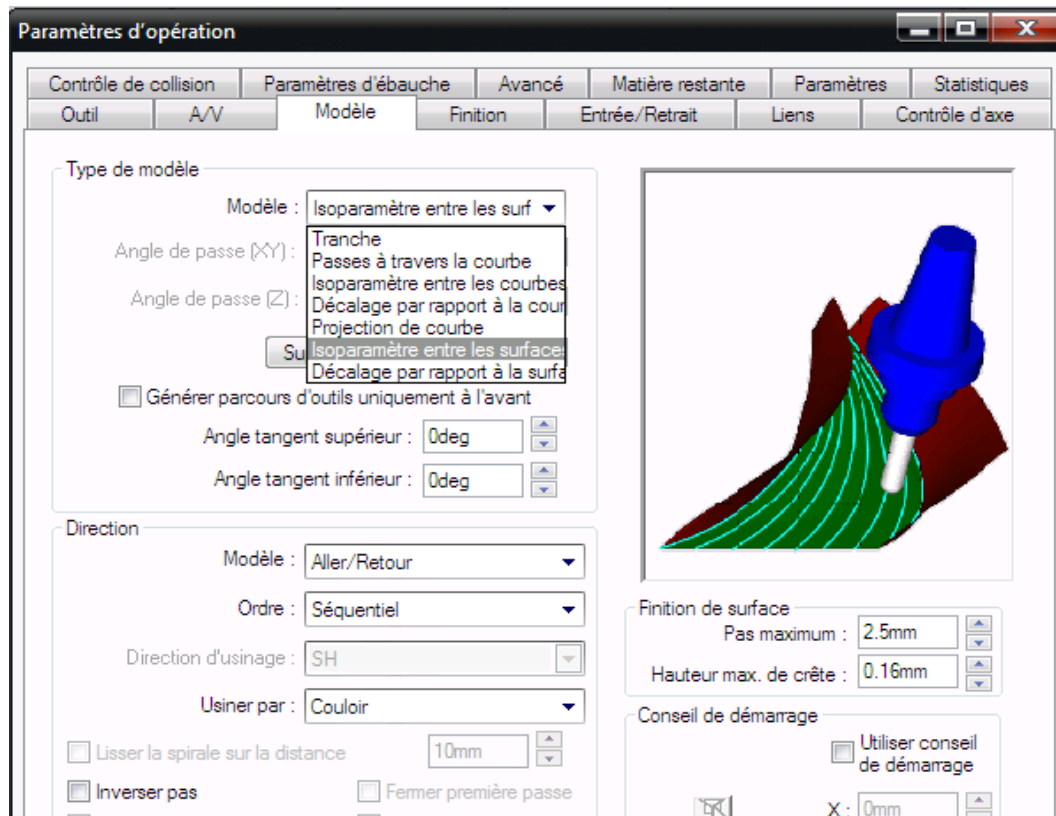
- Etc.



L'icône brut est le bloc de matière dans laquelle la pièce sera usinée. Un clic droit sur cette icône affiche une boîte de dialogue 'Gérer brut' qui contient les paramètres permettant de définir le brut de fraisage à partir d'une boîte englobante, d'une esquisse extrudée ou d'un fichier STL.

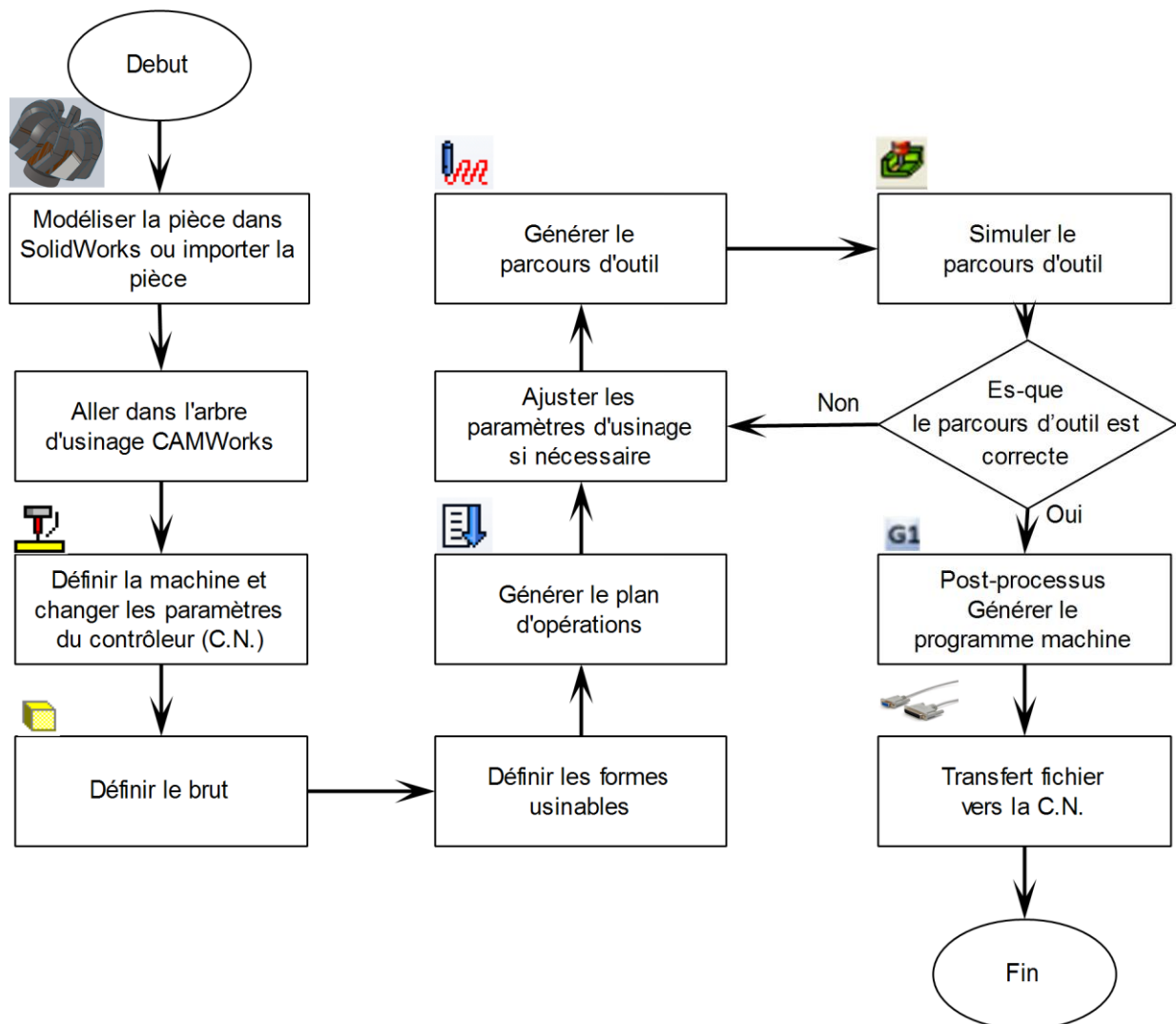


L'option Fraisage multiaxial nous permet de spécifier les paramètres utilisés par CAMWorks pour créer des parcours d'outil destinés à des formes complexes. Sous l'onglet "Ongle des Opérations" Un click droit sur l'icône "Fraisage multiaxes" affiche une boîte de dialogue "Paramètre d'opération" qui contient différent onglets du choix, d'ajustage et de paramétrage de la stratégie d'usinage à adopter.



4.2.2 Etapes de génération du parcours d'outil en code machine (CN) :

4.2.3 Voir le diagramme ci-dessous, qui monte les étapes de génération de la trajectoire d'outil en code machine.



4.3. Usinage de l'outil de forage

L'outil de forage proposer dans cette étude d'usinage, sur machines multi-axes à comme caractéristiques et nomenclatures bien précise (voir Annexe F.)

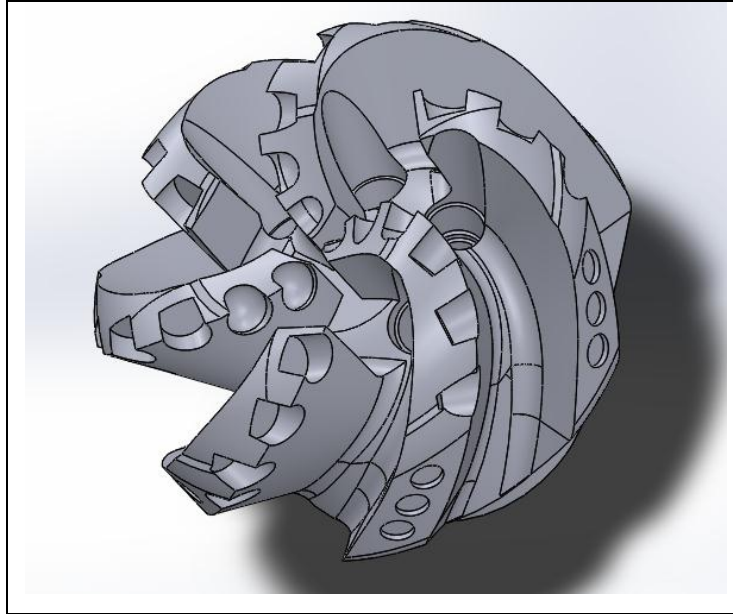


Figure 4.7 : Outil de forage 8 pouces.

Plusieurs questions apparaissent dans cette partie de l'étude. Quelle machine choisir en premier ? Comment usiner ? Par quelle partie peut-on commencer ou par quelle point ? Quelle stratégie peut-on choisir ? Etc.

On propose dans notre étude 3 grands axes d'usinage de l'outil de forage 8" :

- On commence par une gamme d'usinage du brute (préparation du brute) ;
- Puis usinages des surfaces des hélices de l'outil de forage (hélices de l'outil) ;
- Et enfin usinage des trous et des logements PDC de l'outil de forage.

Enfin pour chacune des étapes (et des sous étapes) précédentes on vérifiera que l'usinage se déroule bien en faisant des simulations d'usinage pour éliminer toutes interférences locale (collision outil et pièce).

Sachant aussi qu'il ya énormément de paramètres pour chaque stratégies (ou mode) choisie, nous présentant dans ce qui suit que les principale paramètres. Les stratégies employées seront

jugées sur le résultat final de la pièce, mais aussi sur le temps nécessaire à l'usinage. ; Voyons maintenant les différentes stratégies :

4.3.1. Gamme d'usinage du brut :

Avant de commencer l'usinage sur la machine 5-axes il est nécessaire de proposer un brute qui convient à notre besoin ; on voit que le modèle proposé dans la figure 4.8 facilite largement la tâche pour une reprise d'usinage sur une machine multi-axes.



Figure 4.8 : Modèle numérique du brut.

L'usinage de modèle de brut n'est pas compliqué, on peut l'usiner avec un tour numérique ou conventionnel en appliquons les phases suivantes :

Phase 100 : Control de brute, on utilise un cylindre de même diamètre (\varnothing 221) que l'outil de forage ;

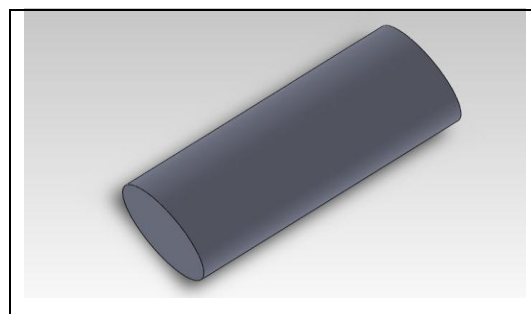


Figure 4.9 : Cylindre du brut.

Phase 200 : Tournage

OP 201 : Dressage (A1) ; **OP 202 :** Chariotage (B1) ; **OP 203 :** Chariotage (C1) ;

OP 204 : Chanfreinage (D) ; **OP 204** : Chariotage (E1) ; **OP 205** : Signage (F1) ;

Phase 300 : perçage

OP 301 : Perçage (G1) ; **OP 302** : chambrage (H1) ;

Phase 400 : Tournage

OP 401 : chariotage (A2) ; **OP 406.4** : chanfreinage (B2) ; **OP 406.4** : perçage (C2).

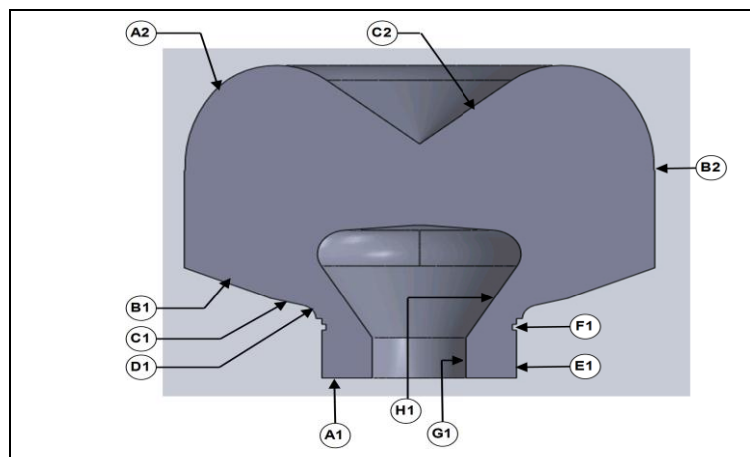


Figure.4.10 : Les différentes surfaces du brut.

4.3.2. Usinage des surfaces des hélices de l'outil de forage :

Si on analyse bien la géométrie de la pièce (outil de forage), on remarque que les parties principales dans cette pièce, sont des hélices, on va s'intéresser alors à l'usinage de ces hélices. Dont on propose ici différents stratégies d'usinage de ces hélices :

Premièrement on proposera pour la partie supérieure des hélices une stratégie d'usinage d'ébauche et finition sur une machine 3-axes dédié, qu'on appellera **stratégie 3-axes** ;

Deuxièmement on proposera une autre stratégie d'ébauche et finition de chaque coté pour usiner les parties inaccessible dans la première stratégie, sur une machine 5-axes indexé, en tournant un axe de rotation avec un angle 90°, qu'on appellera aussi **stratégie 5-axes indexé** ;

Troisièmement on proposera une stratégie d'usinage de finition de la partie inférieure des hélices (les cotés des hélices) et des fonds des hélices, sur une machine 5-axes continue, qu'on appellera aussi **stratégie 5-axes continue** ;

Remarque : avec les deux stratégies présentées on a pu usiner des parties du logement PDC pour optimiser les temps d'usinage.

4.3.2.1. Stratégie 3-axes :

Cette stratégie consiste à usiner l'intégralité des hélices. Cette partie présente des hélices à profil droit suivant le plan d'usinage, et aussi l'ébauche et finition nécessitent une certaine rigidité, d'où le choix de réaliser ces opérations en usinage 3-axes sur une machine 3-axes dédiée. Des approches différentes peuvent être utilisées pour réaliser l'opération d'usinage de la pièce. Certaines sont plus appropriées que d'autres, notre FAO possède des cycles d'usinages prédéfinis qui offrent certaines facilités pour la réalisation de certaines opérations.

❖ Opération "Ébauche et finition" :

Dans cette stratégie on utilise un cycle d'usinage 'zone d'approche' : cela permet d'enlever un maximum de brut avant d'entamer l'usinage par les cotés, l'axe d'outil est perpendiculaire au plan d'usinage.

Operations	Ébauche et finition
Outils	Fraise 2 tailles hémisphérique D = Ø10 L 1=150mm
Paramètres	Surépaisseur : 4mm Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

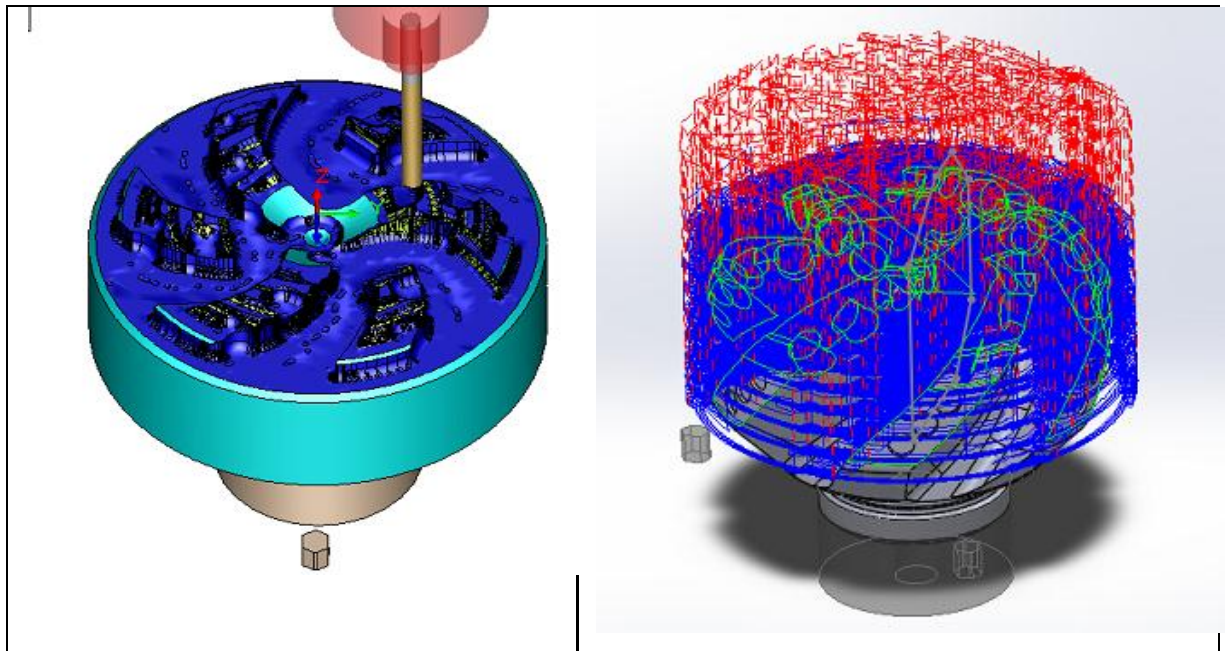


Figure 4.11 : Parcours d'outil d'ébauche et finition

❖ Opération "finition" :

Cette opération présente le même programme avec une passe de finition que l'opération d'ébauche. (Figure 4.12).

Operations	finition.
Outils	Fraise 2 hémisphérique D= Ø10 L1=150mm
Paramètres	Surépaisseur : 2 mm Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

❖ Opération "Reprise d'ébauche" :

Vus que, certaines zones n'ont pas été usinées par l'opération de reprise d'ébauche précédente (outil Ø10 mm) ; nous pourrions reprendre ces zones avec un outil plus petit (Ø4) en adoptant une stratégie de reprise d'ébauche.

Operations	Reprise d'ébauche.
-------------------	--------------------

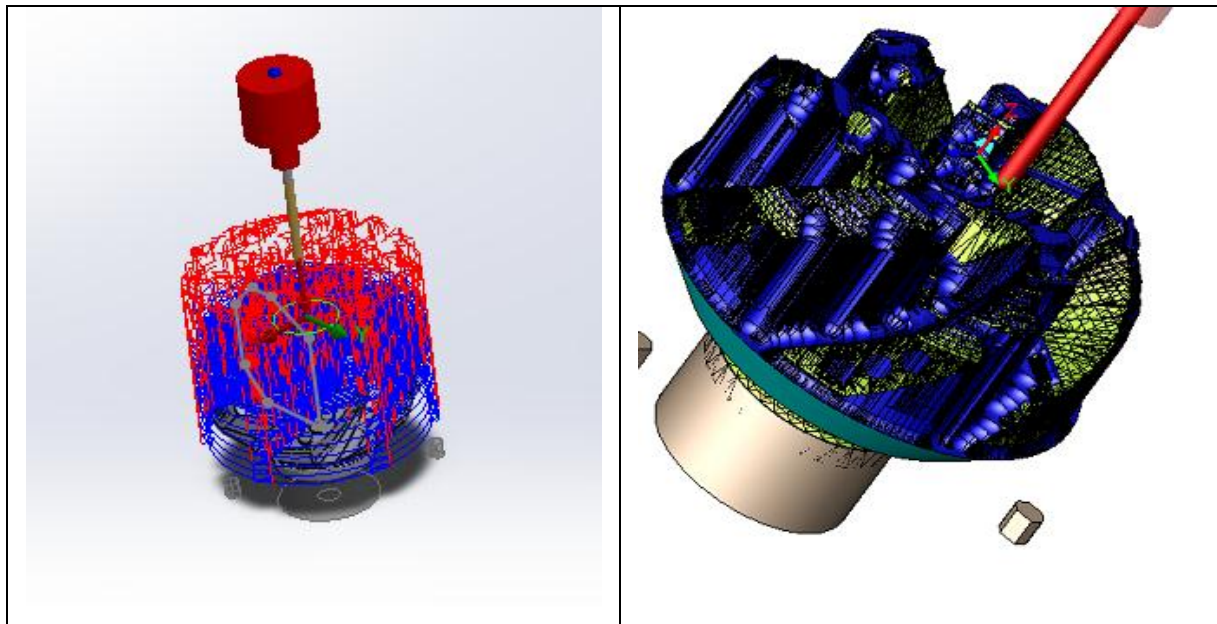


Figure 4.12 : Parcours d'outil en finition au fond de l'outil

Outils	Fraise 2 hémisphérique D= Ø4 L1=120mm
Paramètres	Surépaisseur : 1.5 mm Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

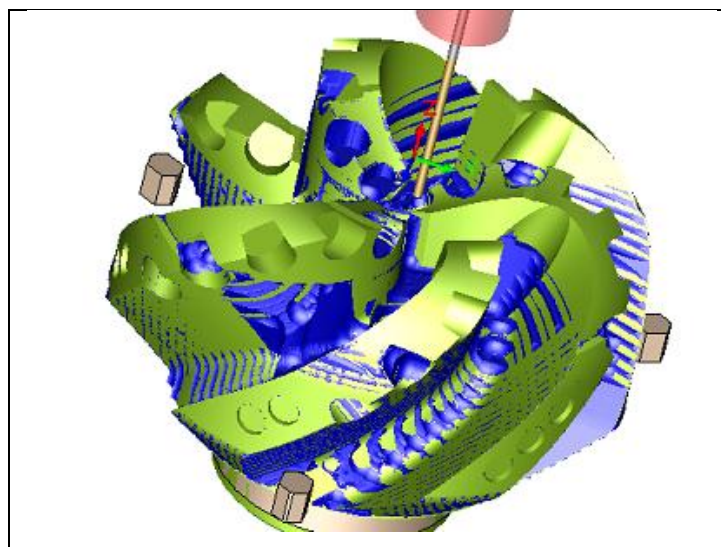


Figure 4.13 : Usinage des surfaces difficilement accessible.

❖ Opération "Finition" :

Finalement l'opération de finition qui nous permet de finir toute les surfaces ébaucher précédemment et ainsi avoir un bon état de surface.

Operations	Finition.
Outils	Fraise 2 hémisphérique D= Ø8 L1=120mm
Paramètres	Surépaisseur : 0,5 mm Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

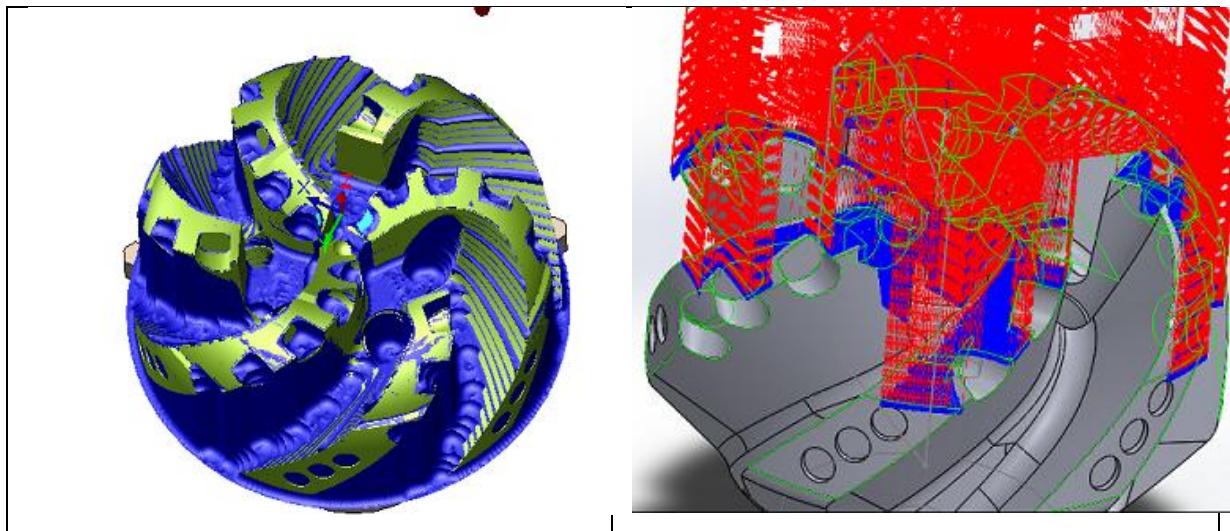


Figure 4.14 : Parcours d'outil en finition sur les hélices.

4.3.2.2. Stratégie 5-axes indexé :

Cette stratégie consiste à usiner les restes loupés par la première stratégie, on adoptants des opérations d'ébauche et finition, sachant que c'est opérations nécessitent une certaine rigidité de la pièce à usiner et que toutes les parties usinables ne sont pas toujours accessible en une seule pose, ce qui nous conduit à choisir, un usinage 5-axes indexé (c.à.d. usinage 3 axes sur différentes orientations (posages)).

❖ Opération "Ébauche par les cotés" :

Dans cette stratégie nous avons défini la géométrie de l'outil le plus précisément possible pour générer la trajectoire sans collision avec les autres surfaces, sachant que cette stratégie d'ébauche par les cotés permet d'adapter parfaitement la trajectoire, la position de l'outil et les longueurs d'outil à la géométrie. Le mode d'usinage choisie est le mode d'usinage en bout, vu qu'on a une surface gauche, et des ébauches profondes.

Operations	Ébauche par les cotés.
Outils	Fraise 2 hémisphérique D= Ø10 L1=120mm
Paramètres	Surépaisseur : 3 mm Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

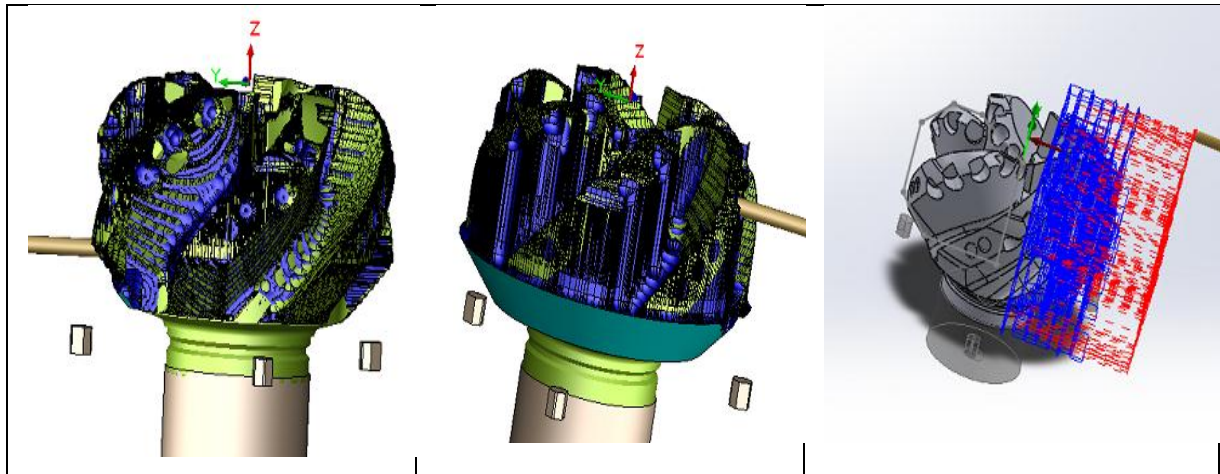


Figure 4.15 : stratégie d'ébauche par les cotés.

4.3.2.3. Finition 5-axes indexé :

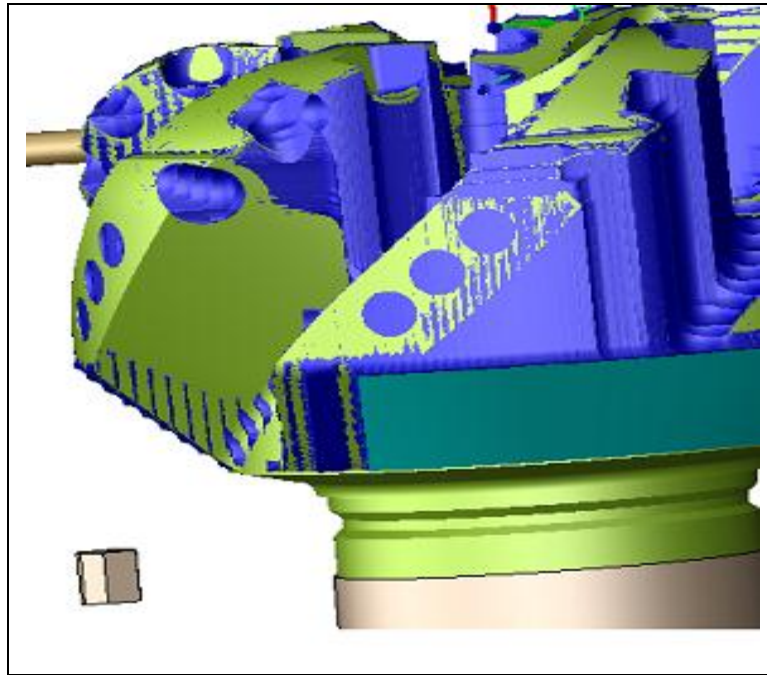


Figure 4.16 : Surfaces de finition de la pièce.

❖ **Usinage de "Finition " :**

L'objectif est de créer des opérations d'usinage en 5-axes indexé qui s'appuient sur des surfaces guides à éviter. Le parcours d'outil est estimé entre les surfaces à éviter et réparti uniformément sur la surface à couper. Le travail s'effectue avec le bout de l'outil.

Le type de modèle choisi est donc "voulé mill" disponible dans l'onglet "Modèle" de la boîte de dialogue "Paramètres d'opérations". Et les principaux paramètres résumés dans le tableau ci-dessous.

Operations	Finition (cotés des hélices).
Outils	Fraise 2 tailles rayonnées D =Ø10 L1 =120mm
Paramètres	Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

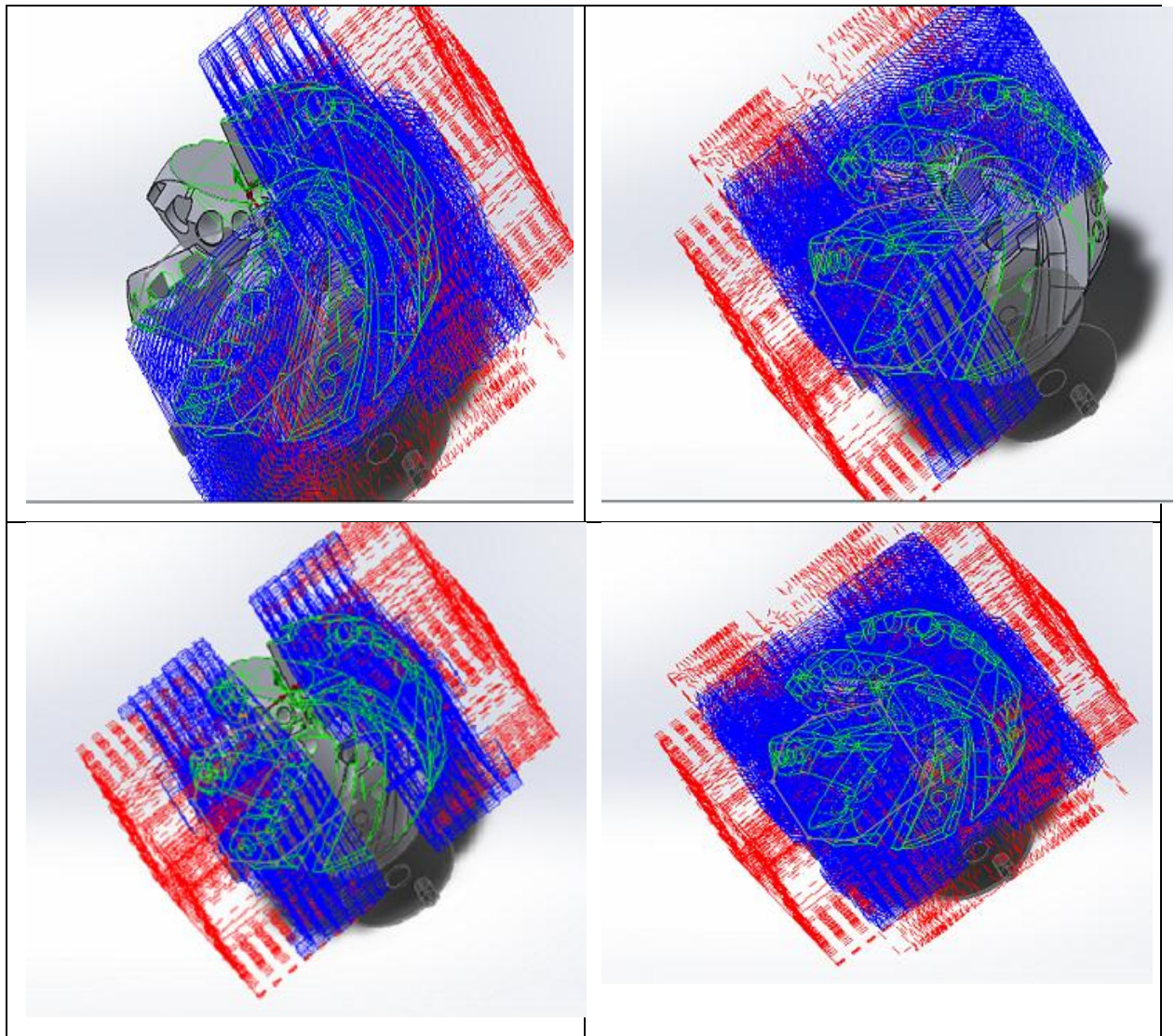


Figure 4.17 : trajectoires d'outil en finition.

4.3.3. Usinage des trous et des logements PDC de l'outil de forage :

Dans le modèle CAO de la pièce précédente les trous PDC ne figuré pas (configuration simplifier du modèle CAO). En raison d'une simplicité du modèle CAO et aussi de la facilité de manipulation (sélections des surfaces correcte, alléger le modèle, ...) en vus d'applique des stratégies d'usinage adéquate. Dans cette partie, on va utiliser la configuration par défaut du modèle CAO (c.à.d. le modèle avec les trous et les logements PDC). (Figure 4.19)

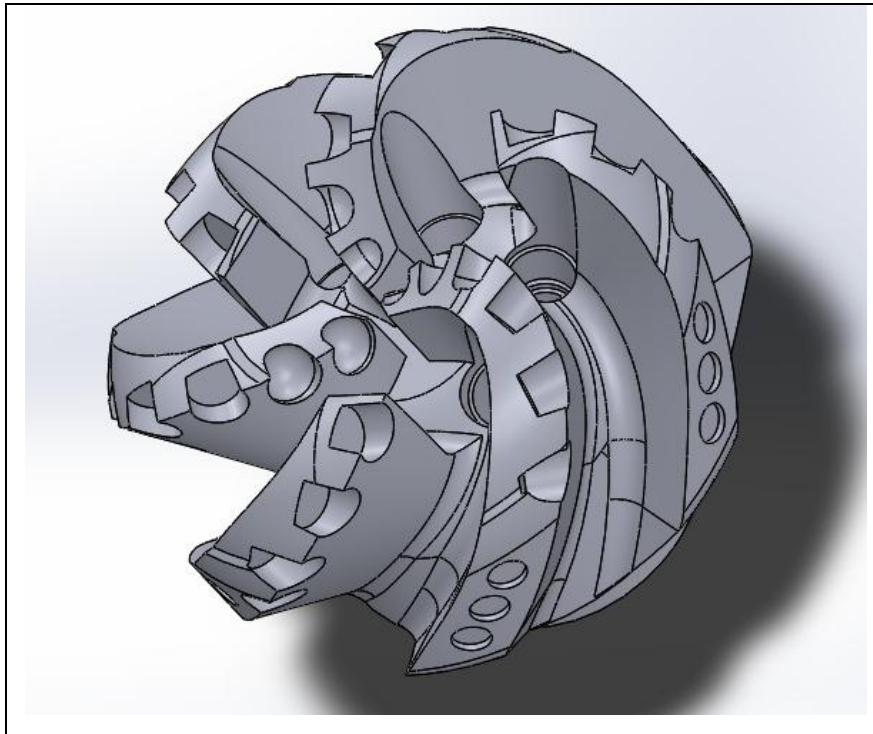


Figure 4.18: Pièce (outil de forage), configuration par défaut (avec trous et logements PDC).

En analysants la pièce on remarque qu'il ya plusieurs types de trous/logements, citons : Les trous duse, Les logement des taillant (PDC), Les logement des inserts (PDC). (Voir figure 4.).

- logements PDC. , type L1, L2 .
- trous (ou duse), type T1.

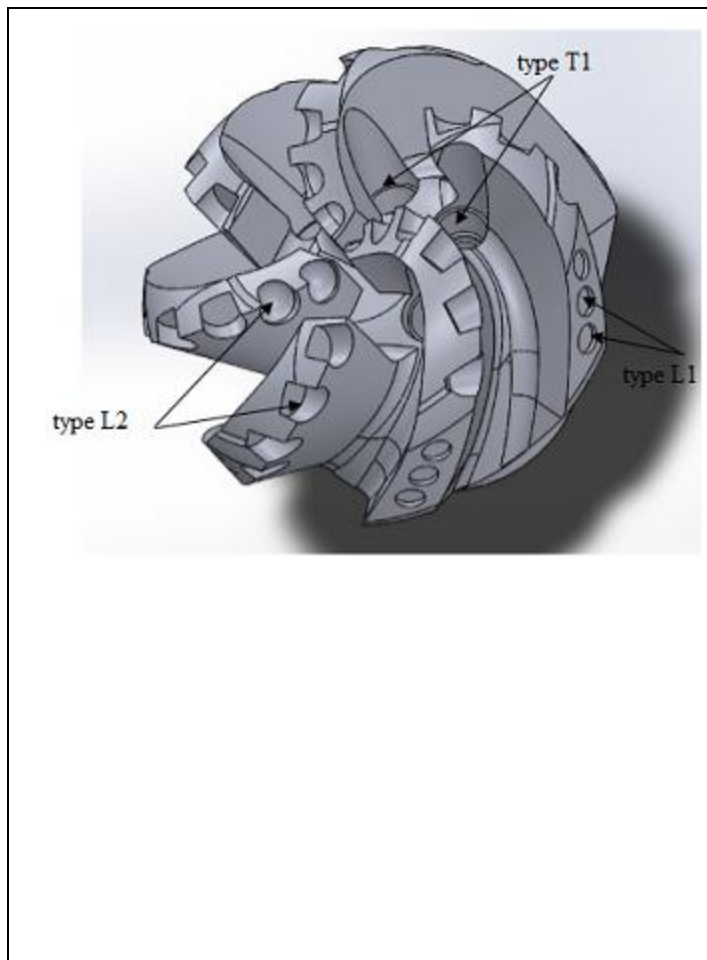


Figure 4.19 : représentation des toues/logements.

Type	Ø (mm)	remarque
L1	13.5	Fond plat
L2	19	Fond plat
	19.2	Fond plat
	16.2	Fond rayonné R9.6
	13.6	Fond rayonné R6.8
T1	9.9	Trou
	23	Trou borgne
	26	Trou borgne
	27.2	Évidement 3.5x2.14

Tableau 4. : types et dimension des toues/logements.

(Sachant que les dimensions, les positions et l'orientation de tous les trous/logements sont définies (connues) dans le modèle CAO de la pièce à usinée).

D'après les différents types de trous/logements et leurs dispositions sur le corps de la pièce plusieurs stratégies peuvent être adoptées. L'idée est de permettre d'effectuer des opérations d'usinages à des angles déterminés et suivant des chemins précis sur une machine 5-axes indexé. Dans cette partie en vas usinée les logements on ce positionnant automatiquement a la normal a la surface de chaque position logements et on attaque la matière par des opérations d'usinage 2 axes 1/2, avec une stratégie 5-axes indexé, tel-que les axes sont indexée suivant l'axe de rotation (Z) et l'axes d'inclinaison (X et/ou Y).

❖ Usinages des logements de type L1, L2,

La stratégie choisîtes est d'usinée chaque groupe de trous (de même forme) situer sur une même hélice et ainsi répéter l'opération pour chaque hélice. Et tout ça pour chaque type (L1, L2,). Le mode d'usinage adopté ici pour tout le type de logements est le mode "Poche circulaire"

Operations	Fraisage d'ébauche pour L1, L2,
Outils	Fraise 2 tailles D1= Ø 13.5 D2=Ø19
Paramètres	Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque. Modèle : Poche vers extérieur. Surépaisseur : P1=1.5, P2=P3=2.

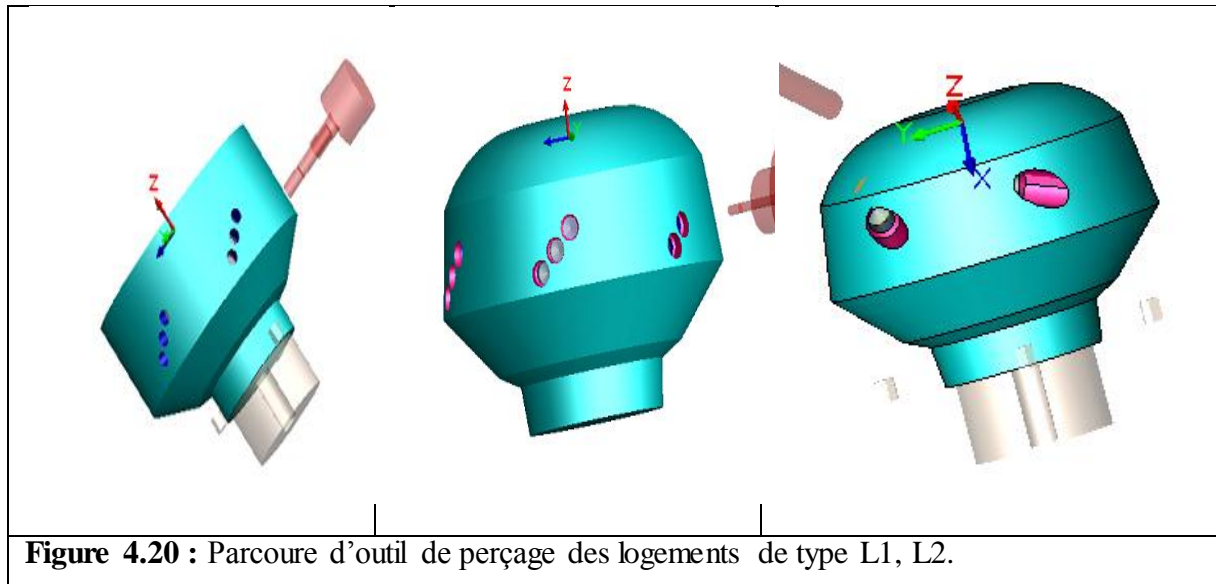


Figure 4.20 : Parcours d'outil de perçage des logements de type L1, L2.

❖ Usinages des trous de type T1 :

Dans cette partie en vas attaquer la matière par des opérations de centrage des 6 trous, puis des perçages profonds à travers toute la matière et ainsi de suite pour les autres opérations, résumées ainsi :

Operations [1]	Centrage et Perçage T1 (perçages à travers toute la matière).
Outils	Foret à centrer $D=\varnothing 6.3$. Foret de perçage $D=19.75$
Paramètres	Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

Operations [2]	Perçage T1 (perçages borgne).
Outils	Fr 2 tailles $D=\varnothing 12$
Paramètres	Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque. Passe : 3mm

Operations [3]	Limage T1.
Outils	Fr 2 tailles $D=\varnothing 14$
Paramètres	Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque. Passe : 2mm

Operations [4]	Évidement intérieur.
Outils	Fr en T $D \times L : 18 \times 3.5$
Paramètres	Avance : Bibliothèque Vitesse : Bibliothèque.

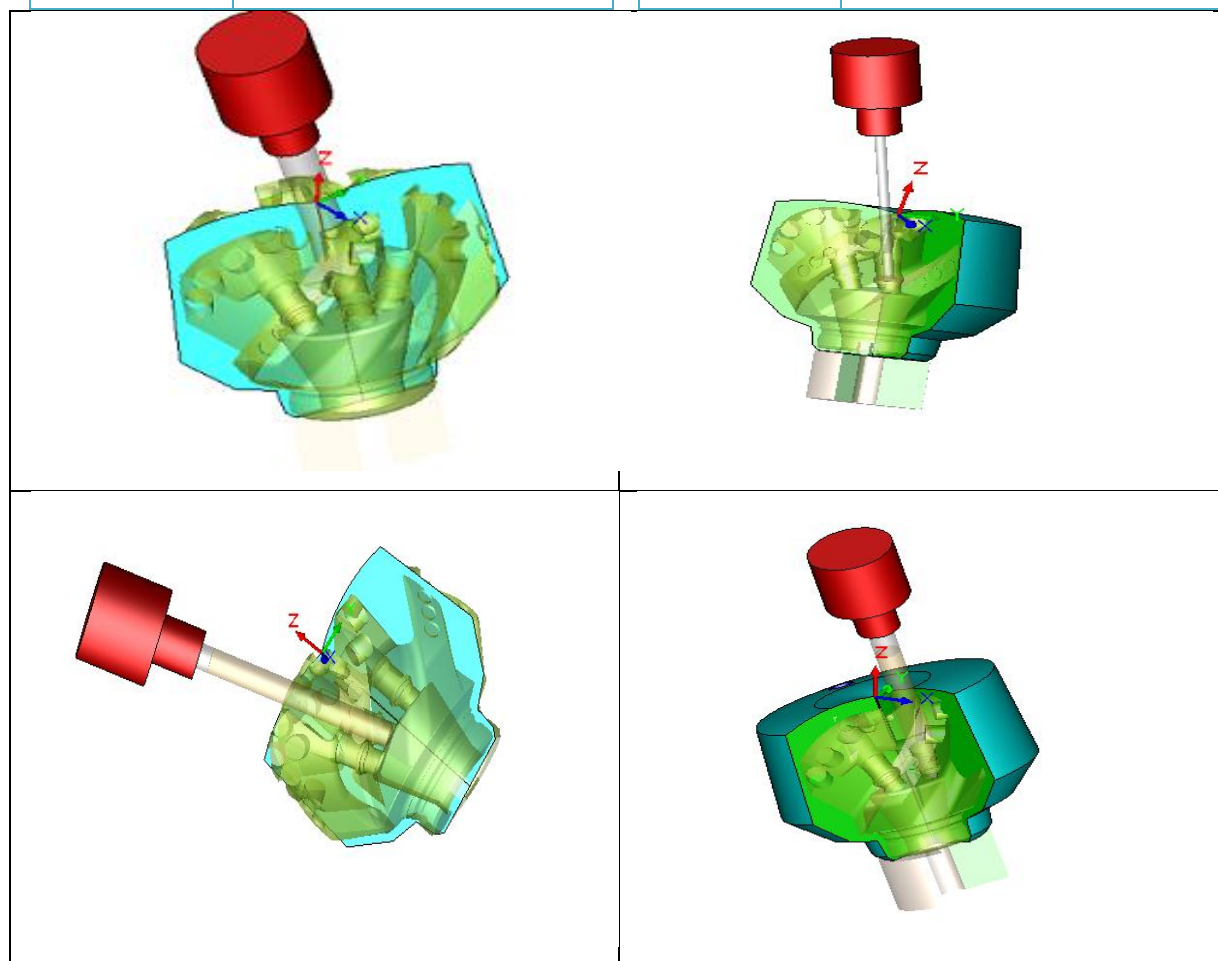


Figure 4.21 : Différents parcours d'outil d'usinage des trous de type T1.

4.4. Modèle réalisé au niveau du hall de technologie :

Dans cette partie de notre travail on a opter pour un modèle de tête de forage à usiner avec les moyens disponible au niveau du hall qui sont :

4.4.1. Machine Sinumerik 810 M:

Cette machine est dotée d'un système de 2 axes et $\frac{1}{2}$, (figure 4.22).

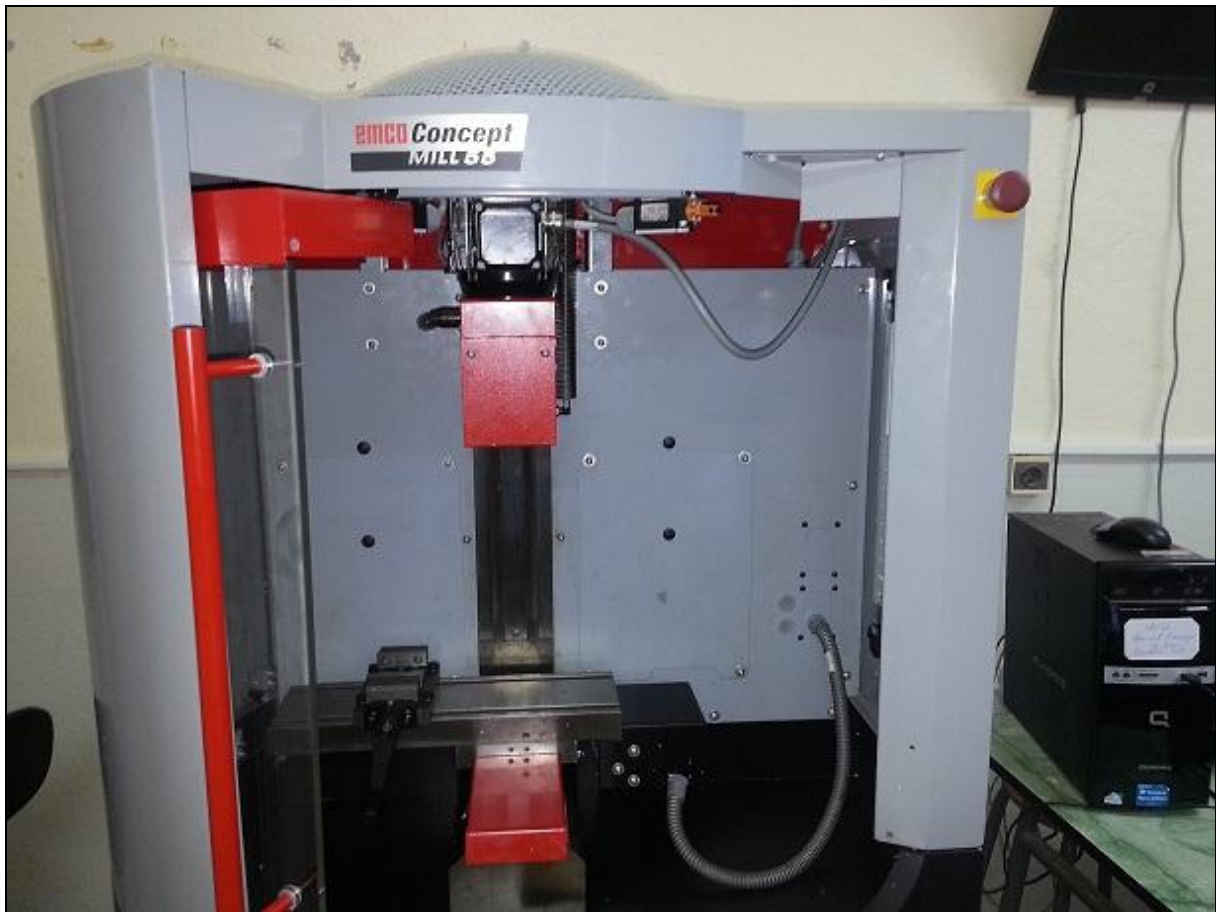


Figure 4.22 : Fraiseuse 3 axes disponible au niveau du hall de technologie, de marque EMCO Concept MILL55, à commande Siemens 810M

4.5. Modélisation de tête de forage

Sur un logiciel de C.A.O « SolidWorks 2014 » nous avons un model 3D d'une tête de forage la figure 4.24 nous montre ce modèle.

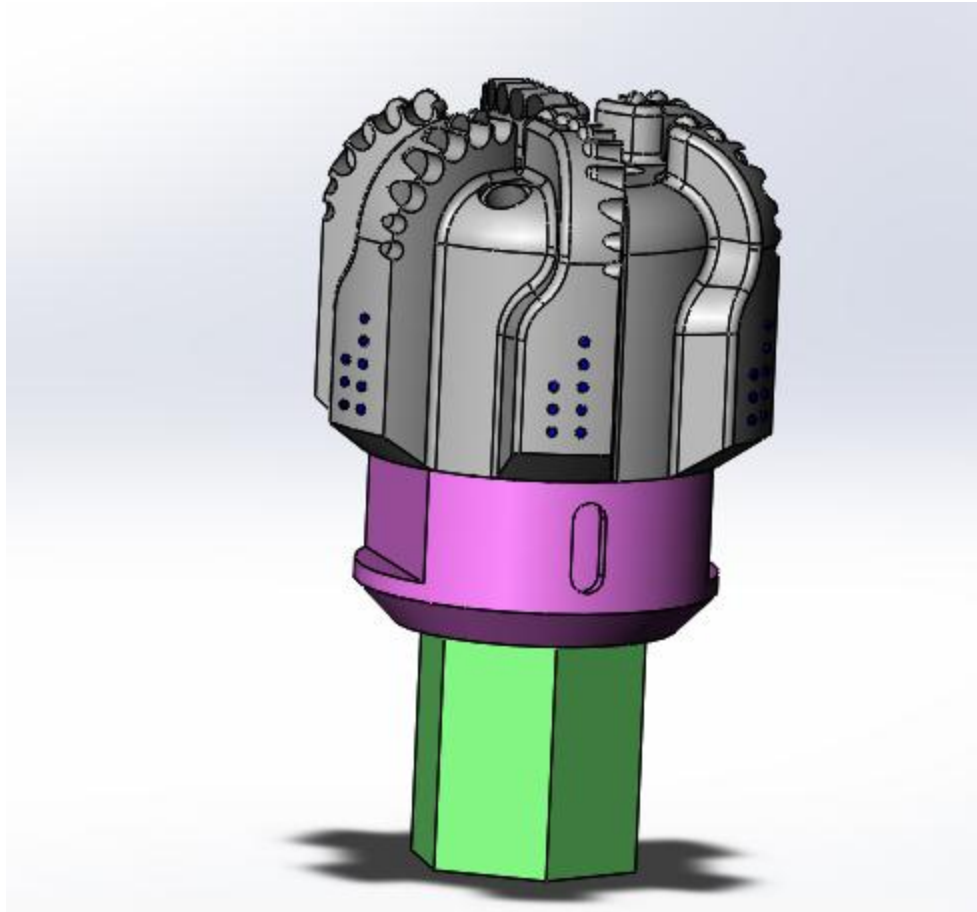


Figure 4.23 tête de forage

4.5.1. Usinage sur la commande numérique

Dans le but de fabrication d'un prototype réduit d'un exemple de tête de forage en PDC 16" sur notre fraiseuse 3 axes, nous avons suivi les étapes de fabrication nous permettant la rotation de la pièce de 60° afin de nous permettre d'usiner les zones qu'on peut pas usiner avec une seule position

Les étapes que on a suivez sont :

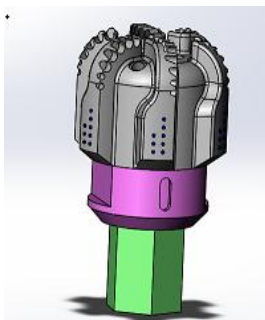
Etape 1 : usinage d'une forme hexagonale à l'arrière de la tête.



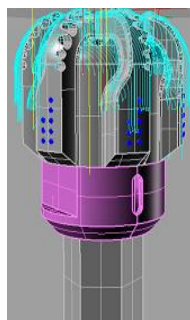
(Figure 4.24). Brut de tête de forage

Etape 2

- Fixation au niveau de l'hexagone et usinage de haut de la tête de forage



Modèle 3D en SolidWorks



trajectoire d'outil sur logiciel
Rhinceros

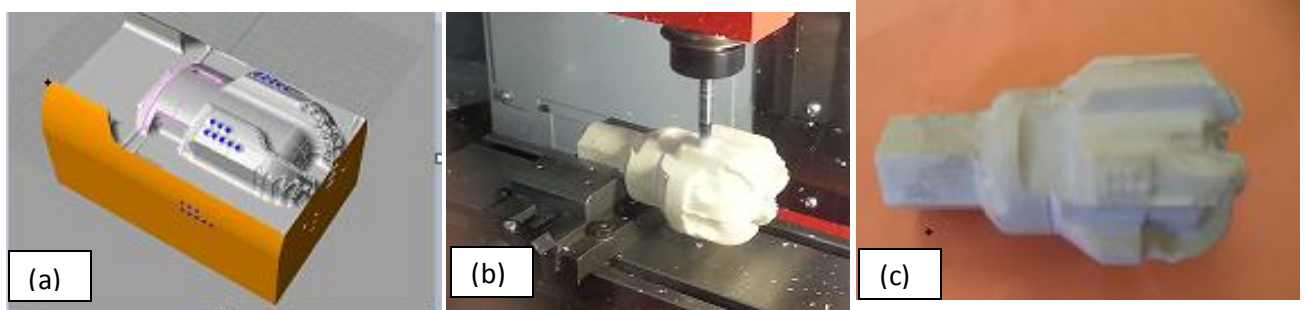


fraisage de la tête
sur une CN.

(Figure 4.25) Usinage de la partie haute de notre pièce

Etape 3 :

Mise à l'horizontale de la tête et fixation toujours sur l'hexagone afin de garder la même configuration et origine pièce par rapport à l'étape précédente.



(Figure 4.26) Usinage de la périphérie de notre pièce

(a) Model FAO

(b) Fixation sur la machine

(c) Produit final

Etapes 4,5 et 6 :

Toujours à l'horizontale en suivant la démarche de l'étape 3, en s'appuyant sur la présence de l'hexagone nous permettant la rotation de la tête de 60° à chaque fois et donc l'usinage des différentes zones de la pièce

Pièce finale



Figure 4.27 pièce finale

4.6 CONCLUSION

Dans le cadre de la réalisation de l'ébauche de cette pièce en trois axes les logiciels de F.A.O. offrent actuellement un large éventail de typologies d'opérations associées à des générateurs de trajectoire d'usinage de plus en plus performants. Toutefois, il n'existe pas encore aujourd'hui de guide méthodologique permettant de réaliser un choix optimisé du processus d'usinage (ébauche, finition) et le réglage des différents paramètres des générateurs de trajectoire. L'objectif de cette partie est de déduire la stratégie la plus performante en termes de temps d'usinage et d'état de surface. Puis on finalise avec une opération finition en 4 axes ou 5 axes tout dépend des moyens disponibles.

CONCLUSION

REFERENCES

ANNEXES

A.1. HISTORIQUE DE L'UNITE ENSP :

La société Direction Fabrication (EX .ALDIM) est créée par un protocole d'accord signé le 13 juillet 1973, entre la SONATRACH et le groupe CHRISTENSEN (USA).

ALDIM société Algérienne de fabrication et de vente des outils de forage diamantés pour l'industrie pétrolière et minière, avant 1974 ALDIM n'était qu'un magasin de stockage des outils de pétrole et ceux des mines, qu'on importait de la société Américaine CHRISTENSEN.

Comme notre pays est un partenaire potentiel avec CHRISTENSEN, ce dernier se met en collaboration avec SONATRACH pour créer ALDIM en 1976.

Par le décret 81/174 et 81/180 du 11 août 1981, portant respectivement sur la création de l'entreprise nationale des services aux puits (E.N.S.P) et sur le transfert des activités et du patrimoine de SONATRACH à l'ENSP.

Conformément au décret N° 80/242 du 04/10/1980 et relatif a la mise en œuvre de la restructuration des entreprises et conformément a l'arrêté de 15/12/1982 fixant la date d'effet de la substitution de l'ENSP à l'entreprise SONATRACH, la Société ALDIM a été intégrée à l'Entreprise Nationale de Services aux Puits (E.N.S.P) qui décida en 1985 le rachat des parts détenues par CHRISTENSEN (USA), et dont l'objectif :

A.2. FABRICATION ET COMMERCIALISATION :

- d'outils de forme diamantés pour l'industrie pétrolière, minière, hydraulique et travaux publics ;
- d'outils couronnes à éléments de coupe en carbure de tungstène ;
- de divers produits et accessoires de forme (pênes de cale, pênes de clé, brides, adaptateurs, calibres, réductions, etc.).

ANNEXE B : LES OUTILS À ÉLÉMENTS DE COUPE FIXES

B.1.INTRODUCTION

Les outils à pastilles de diamants poly cristalline existent soit avec corps acier, soit avec matrice. Les corps en acier sont usinés puis recouverts de carbure de tungstène pour limiter l'érosion. Les corps en matrice sont fabriqués par moulage à partir du même matériau au carbure de tungstène que les outils aux diamants naturels.

Les outils diamantés sont de trois types :

- à diamants naturels ;
- à taillants PDC ou diamants polycristallins ;
- à taillants TSP ou diamants polycristallins thermostable.

Ces trois types sont spécifiques par la nature des éléments de coupe qui détruisent la roche de manière mécanique différente : le diamant naturel abrase la roche et travaille comme une macro meule, les diamants polycristallins cisailent la roche en découpant des copeaux comme un outil de tournage des métaux. La forme de tous ces outils de forage est monobloc ce qui leur confère une certaine solidité.

Un outil diamanté est caractérisé par :

- Le corps de l'outil ;
- Le profil ;
- La densité des cutters ;
- Les angles caractéristiques des pastilles ;
- La longueur utile.

B.1.LE CORPS DE L'OUTIL :

Actuellement, il existe deux types de corps d'outil suivant le matériau de fabrication :

- Corps en carbure de tungstène (matrix body) ;
- Corps en acier (steel body);

B.1.1.Corps en carbure de tungstène "matrix body" : (figure 6)

Ils sont fabriqués par moulage, un composé de poudre de carbure de tungstène avec un liant (alliage) est moulé autour d'un manchon en acier. Le liant lie les particules en carbure de tungstène et facilite ainsi l'adhésion métallurgique entre le carbure de tungstène et le manchon d'acier.

Les cutters sont directement brasés dans des logements qui ont été aménagés dans le corps. Avant de braser les cutters, les logements sont nettoyés. Pour neutraliser tout effet d'oxydation

durant le brasage un traitement est appliqué sur les logements des cutters. Ces derniers sont positionnés dans leurs logements et fixés par un système de fixation.

Afin d'assurer une bonne répartition de la brasure autour des cutters et une bonne adhésion entre les cutters au niveau des logements, le corps de l'outil est chauffé dans une atmosphère réductrice à une température 700°C. Au refroidissement le liant se consolide, le système de fixation enlevé et le brasage est terminé.

a) Les avantages du matrix body :

- Le corps en carbure de tungstène résiste à l'abrasion, ce qui lui donne une durée de vie toujours supérieure à la durée de vie du cutter lui-même.
- Logement (emplacement) aménagé dans le corps de l'outil pour recevoir le cutter, donne une protection contre les chocs que peut avoir l'outil. C'est-à-dire que ce dernier peut travailler avec des torques très importants sans dommage ces cutters.

b) Les inconvénients du matrix body :

- Son prix est sensiblement plus élevé que le "steel body" ;
- Une fois utilisé, cet outil ne peut pas être réutilisé ;
- Toute la surface du cutter ne peut pas être utilisée du fait de sa position dans la matrix.

B.1.2. Le corps en acier "steel body" : (Figure C.7)

Les outils en corps en acier sont fabriqués par usinage, ils sont plus résistants aux chocs que les outils en carbure de tungstène. Leur inconvénient principal est que le corps en acier présente une faible résistance à l'érosion, c'est pour cela qu'on fait une protection du diamètre de l'outil en carbure de tungstène sur toute la hauteur du gage extérieur (la partie alésage).

Dans ce type d'outil, on utilise des cutters PDC type cylindrique, qui sont brasés directement dans le logement sur le corps en acier. Le corps est chauffé pour une éventuelle extension des logements au moment de refroidissement de l'outil

a) Les avantages du steel body

- Possibilité de remplacer les cutters cylindriques après utilisation de l'outil si toutefois il n'y a pas érosion du corps ;
- Possibilité de pouvoir utiliser toute la surface du cutter étant donné que ce type de cutter est entièrement exposé.

b) Les inconvénients du stell body

- Une usure très rapide du corps en acier qui limite considérablement sa durée de vie.
- Cette dernière est directement proportionnelle à la qualité de solide contenu dans la boue. Toutefois cette usure peut être réduite en renforçant avec une métallisation dure sur la surface d'attaque de l'outil ;
- Ce type de cutter (sa forme cylindrique) se casse à la base du corps sous l'effet d'un impact très important.

C.1. LE PROFIL :

Il existe principalement trois types de profils :

- Profil plat ou avec un faible cône intérieur ;
- Profil double cône (cône très prononcé) ;
- Profil parabolique.

B.1.3.LE PROFIL PLAT :

A utiliser en formation très tendre à cause de nombre limité de cutters.

B.1.4.LE PROFIL DOUBLE CONE :

Ce type de profil est bien étudié pour les formations plus dures, en effet ce profil a l'avantage d'augmenter la surface d'attaque de l'outil et par conséquent d'augmenter le nombre de cutters. De plus l'usure des cutters est plus homogène pour les profils en pointe de cône que les autres types de profils.

B.1.5.LE PROFIL PARABOLIQUE :

Ce profil a les mêmes caractéristiques que le profil double cône. En plus, il est facile à diriger avec un moteur de fond dans un puits dévié. Ce profil donne une grande surface sur laquelle un nombre important d'élément peut être fixé.

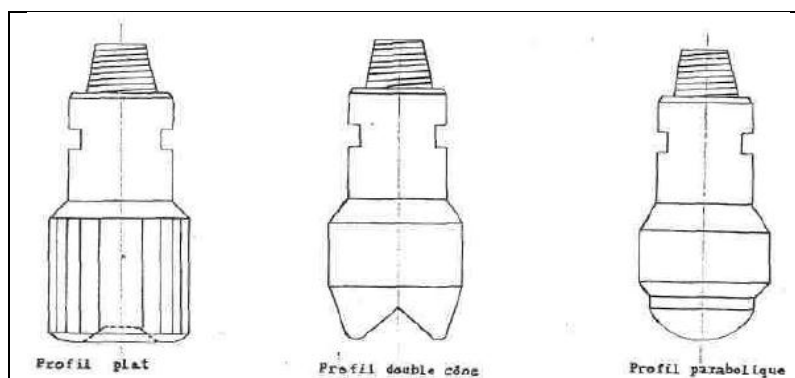


Figure B.1 : Schéma représentant les différents profils.

B.2.LA DENSITÉ DES CUTTERS :

Il est possible d'effectuer des mesures qualitatives de performance d'un outil sur les différentes densités et de distribution des cutters. En général, lorsque la densité des cutters augmente, la vitesse de pénétration diminue. Si on augmente la densité des cutters d'un outil PDC, on réduit la charge effective par cutter. Ce qui donne une durée de vie prolongée du cutter et un prix de l'outil plus cher. Actuellement, le nombre et le positionnement des cutters sur la surface de l'outil sont donnés afin d'assurer que chaque cutter fournisse la même quantité de travail.

$$\text{contrainte par cutter} = \frac{\text{WOB total/nombre de cutter}}{\text{la surface de coupe}}$$

WOB : Weight on bit (travail sur l'outil).

Il existe plusieurs tailles des pastilles :

- Très petite (8 mm de diamètre) : utilisée pour les formations dures ;
- Petite (13 mm de diamètre) : utilisée pour les formations moyennement dures ;
- Large (19 mm de diamètre) : utilisée pour les formations tendres à moyennement tendres ;
- Trop large (25 mm de diamètre) : pour les formations très tendres.

B.3.LES ANGLES CARACTERISTIQUES DES PASTILLES :

On définit trois angles caractéristiques sur les pastilles PDC :

- L'angle de coupe W_c (back rake angle) ;
- L'angle de dépouille W_d (clearance angle) ;
- L'angle latéral W_s (side rake angle).

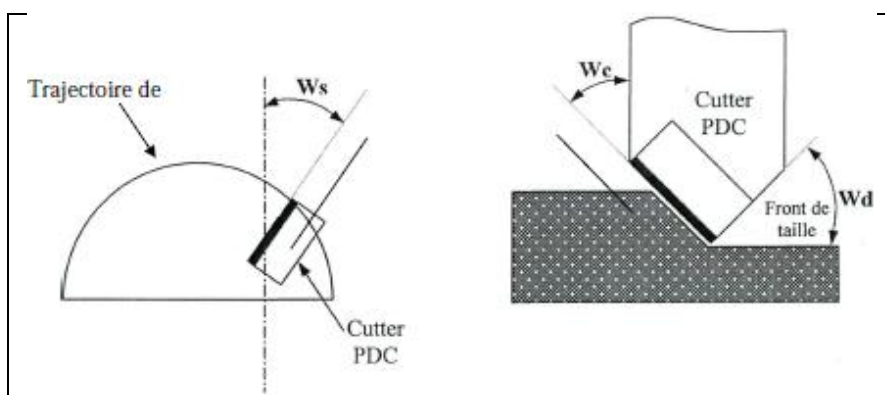


Figure C.2 : Schéma représentant les différents angles.

B.3.1.L'angle de coupe W_c :

C'est l'angle entre la face de coupe de la pastille et la normale à la surface de l'outil. Si l'angle de coupe diminue (inclinaison postérieure), l'action coupante devient plus efficace. C'est-à-dire qu'avec le même poids sur l'outil, une coupe plus profonde sera faite avec une inclinaison postérieure moins accentuée. L'angle de coupe W_c est généralement compris entre 10-15° suivant les fabricants.

B.3.2.L'angle de dépouille W_d :

C'est l'angle entre la face arrière de la pastille et le fond de saignée creusée. Il est égal à l'angle de coupe, mais l'apparition d'usure sur le PDC entraîne sa réduction jusqu'à une valeur nulle. Il résulte alors un accroissement d'effort normal F_n et une réduction des performances de l'outil.

B.3.3.L'angle lateral W_s :

C'est l'angle qui détermine l'inclinaison de la pastille par rapport à sa trajectoire de coupe. Il réside dans le fait que les copeaux des roches sont poussés non seulement suivant la direction de coupe mais aussi vers les parois du forage.

L'inclinaison latérale est étudiée de façon à ce que tous les cutters soient en position de travail en même temps et toujours avec un maximum de surface d'attaque. Étant donné que chaque cutter à un angle différent selon sa position sur la face de l'outil, actuellement cet angle est généralement défini par calcul informatique.

En résumé, on peut dire que l'inclinaison latérale des pastilles PDC a un effet positif sur le travail des pastilles en améliorant les performances de l'outil, car cette inclinaison permet un bon nettoyage des pastilles sans gêner la génération des copeaux.

B.4.LA LONGUEUR UTILE L_d :

C'est la distance entre la matrice de l'outil et le fond de saignée creusée par le PDC. Si L_d est la distance mesurée suivant la verticale entre la matrice de l'outil et le centre de la pastille de diamètre D , alors le rapport L_d/D est appelé L_d edge (L_d angle). Ces deux paramètres sont d'une importance capitale dans le système d'évacuation des copeaux et du nettoyage du puits et aussi sur les efforts latéraux.

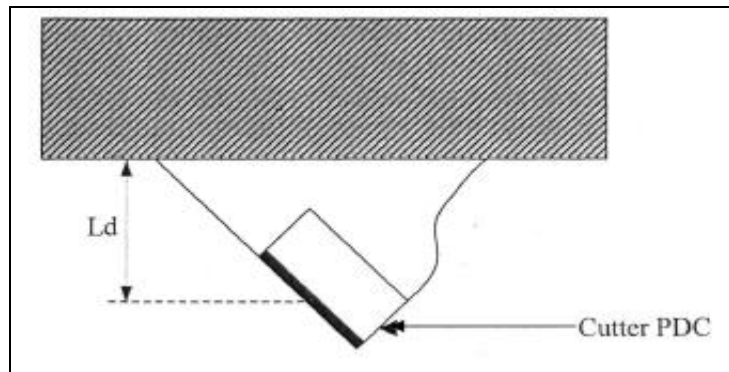


Figure B.3 : Schéma représentant la longueur utile.

B.4.MODE DE TRAVAIL ET L'USURE D'UN OUTIL PDC :

B.4.1.Les efforts appliqués sur le cutter :

Lorsqu'un cutter PDC coupe une roche à une profondeur de passe h , est soumis à un effort résultant R , dont la composante normale à la face de la pastille appelée effort de coupe F_c , qui est responsable de la rupture de la roche par cisaillement. Cet effort résultant présente également une composante latérale F_j . Les efforts latéraux de chaque pastille sont équilibrés entre eux de sorte que l'effort latéral soit nul

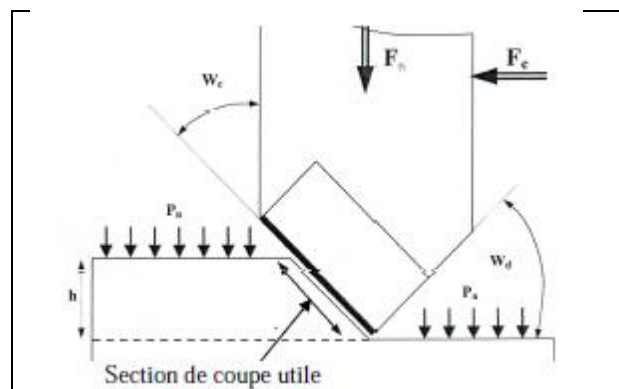


Figure C.4 : Schéma qui montre les différents efforts appliqués sur le cutter.

- La force de coupe F_c (horizontal force) ;
- La force normale F_n (poids sur l'outil) ;
- La force latérale F_j ;

B.4.2.Principe de fonctionnement :

Le balayage de fond du trou est obtenu par le mouvement de rotation de l'outil autour de l'axe de forage. Tous les points de l'outil PDC décrivent dans son mouvement des cercles concentriques, en particulier chacun des éléments de l'outil, qui est maintenu enfoncé dans la roche sous l'effet de la charge verticale, cet élément repousse dans son mouvement de rotation

un élément de roche dont l'épaisseur est égale à la profondeur dont il s'est enfoncé, et à chaque instant il écrase un élément nouveau de la roche vierge.

Si la vitesse de rotation de l'outil et la résistance de la roche est uniforme, chaque élément d'outil en contact avec le fond du trou, aura une trajectoire hélicoïdale dont le pas égal à l'avancement de l'outil par tour.

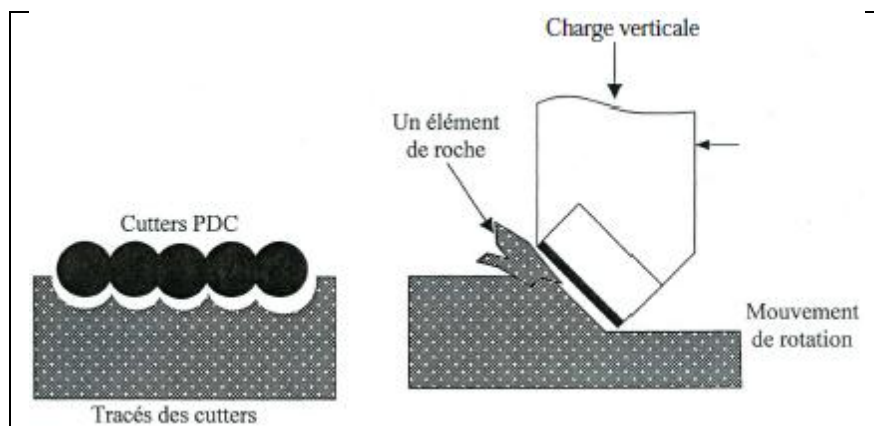
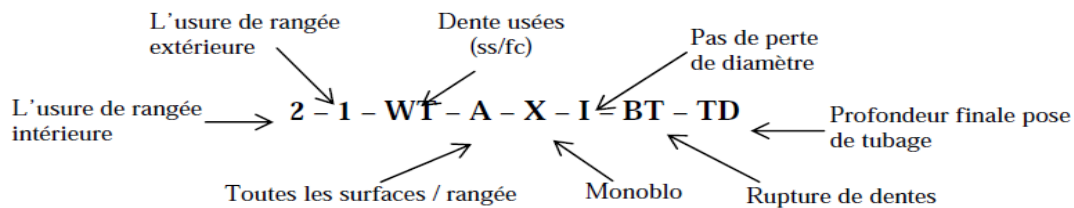


Figure B.4 : Schéma qui montre le principe de fonctionnement des cutters PDC.

B.4.3.L'usure des outils :

La nomenclature d'usure des outils s'applique aussi bien aux outils à molettes qu'aux outils diamantés et les couronnes. Cette nomenclature se fait à l'aide de huit caractères.

- Le premier caractère : Exprimé par un chiffre allant de 1 à 8, qui définit l'usure de la rangée intérieure de l'outil ;
- Le deuxième caractère : Exprimé par un chiffre allant de 1 à 8, qui définit l'usure de la rangée extérieure de l'outil ;
- Le troisième caractère : Exprimé par deux lettres majuscules, définissant les caractéristiques de l'usure ;
- Le quatrième caractère : Exprimé par une lettre majuscule, définissant la localisation de l'usure ;
- Le cinquième caractère : Exprimé par des lettres et des chiffres, définissant le type de l'outil (monobloc ou à molettes). Et si c'est un outil à molettes, il nous donne l'état des roulements ;
- Le sixième caractère : Il définit la perte de diamètre. S'il n'y a pas c'est la lettre I, et s'il y a de la perte, il nous donne la valeur de la perte de diamètre ;
- Le septième caractère : Il nous donne autres caractéristiques d'usure ;
- Le huitième caractère : Il définit la raison de la remontée de l'outil.



B.5.CLASSIFICATION DES OUTILS A ELEMENTS DE COUPE FIXES :

Les fabrications des outils PDC produisent une grande gamme d'outils, de toutes dimensions, conçues pour différentes applications. L'institution d'un codage commun pour les outils de forage à élément de coupe fixe est une aide à l'évolution et la comparaison des outils au regard des conceptions, des pratiques opérationnelles et des performances. La classification facilite également la sélection du produit. Sept critères de classement sont employés pour identifier un outil à élément de coupes fixes :

- Type de taillant (diamant, PDC, TSP) ;
- Type de corps (acier, matrice) ;
- Profile de l'outil ;
- Caractéristiques hydrauliques ;
- Positions des taillants ;
- Taille des diamants ;
- Densité des taillants.

B.5.1.Classifications IADC (international association of drilling contractor) des outils a éléments de coupe fixes :

La classification IADC (établie en 1987) remplace celle de 1981 qui ne s'appliquait qu'aux outils à diamants naturels. Cette classification se fait à l'aide de quatre caractères. Elle est cohérente avec la classification des tricônes.

La classification est représentée par un code à quatre caractères :

- Une lettre pour le type de taillants ;
- Un chiffre pour le profil d'outil. Ce chiffre indique le profil général de l'outil et varie de 1 (profil long) à 9 (profil plat) ;
- Un chiffre pour le type d'hydraulique ;
- Un chiffre pour la dimension (cutter size) et la densité des taillants (cutter density).

Exemple : Le premier caractère est une lettre qui elle définit le type de diamant utilisé comme élément de coupe et le matériau constituant le corps de l'outil :

- D : pour les outils diamant naturel à corps fritté.
- M : pour les PDC à corps fritté (alliage à base de carbure de tungstène).
- S : pour les PDC à corps acier.

- T : pour les TSP à corps fritté (alliage à base de carbure de tungstène).
- O : pour les autres types.

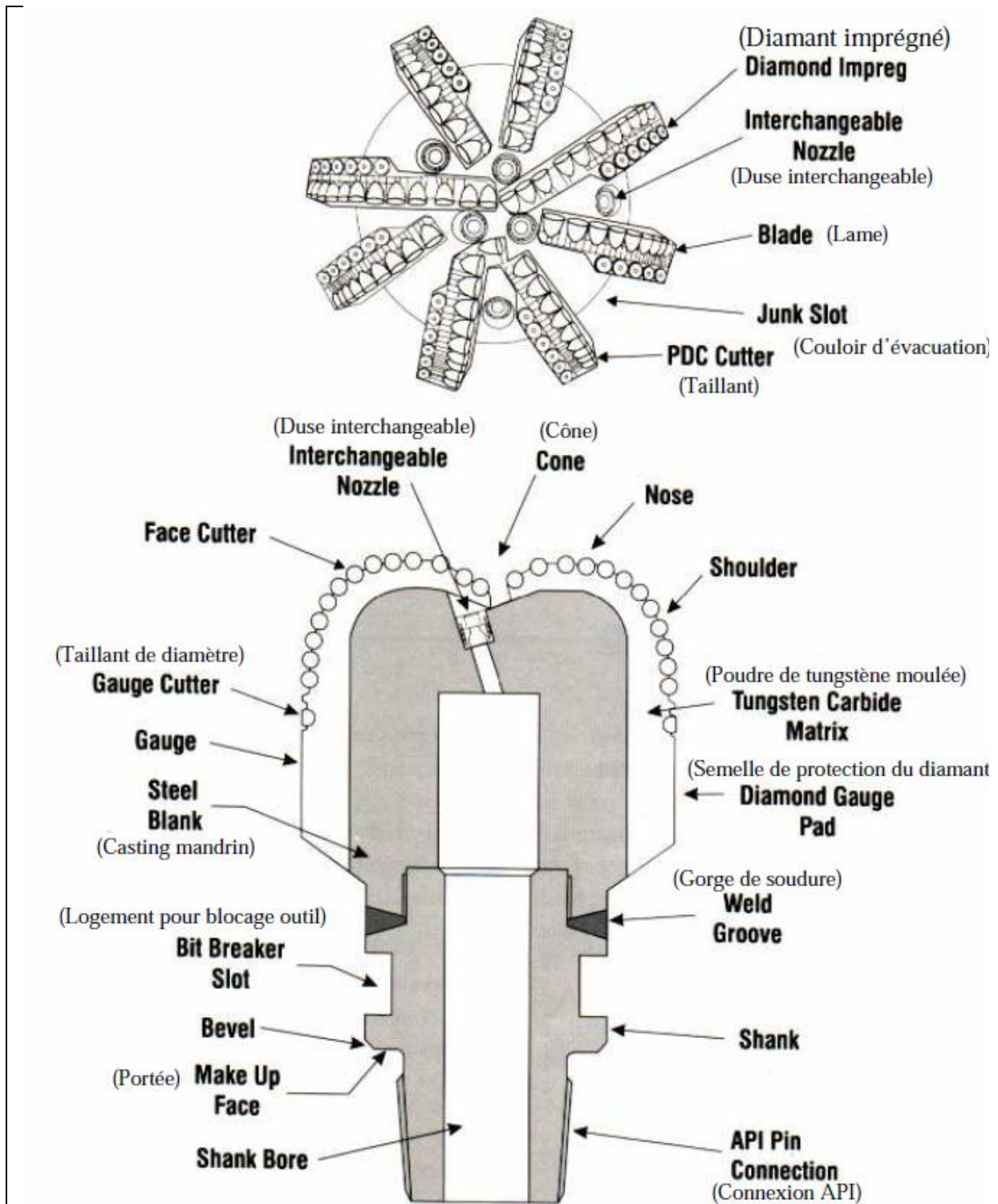


Figure B.5 : Terminologie outil PDC – Matrix Body.

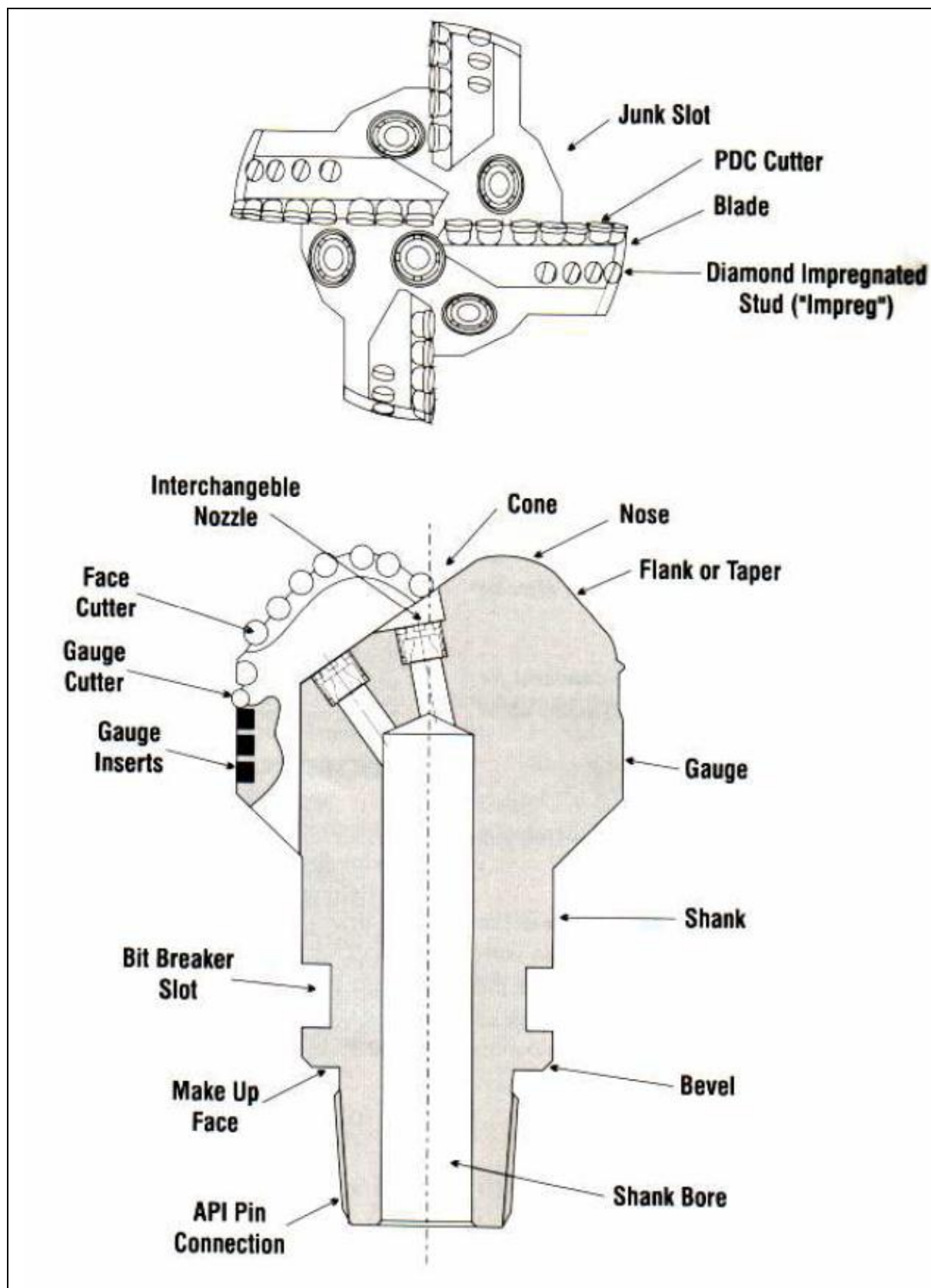
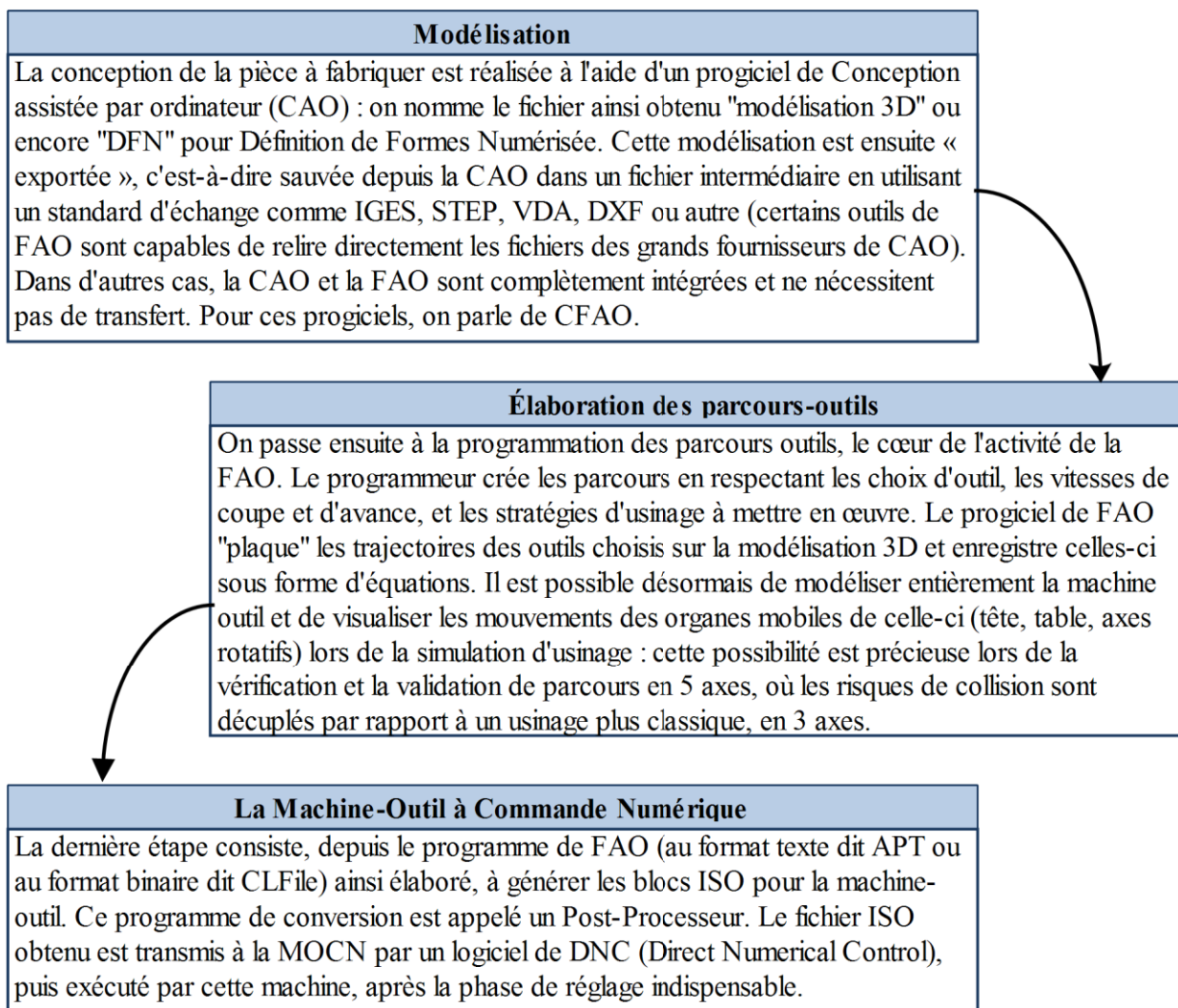


Figure B.6 : Terminologie outil PDC – Steel Body.

ANNEXE C : CamWorks

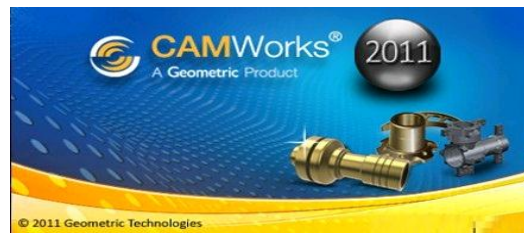
CamWorks est un système FAO (Fabrication Assister par Ordinateur), ou Le but de la fabrication assistée par ordinateur est d'écrire un fichier contenant le programme de pilotage d'une machine-outil à commande numérique. Ce fichier va décrire précisément les mouvements que doit exécuter la machine-outil pour réaliser la pièce demandée. On appelle également ce type de fichiers : programme ISO (ou blocs ISO). Tout système FAO passe par les étapes suivantes :



Vus que le choix de la société c'est porté sur le progiciel de FAO 'CamWorks' qui est totalement intégré au progiciel de CAO SolidWorks. On propose donc dans cette annexe une vue globale de ce progiciel (CamWorks).

C.1.INTRODUCTION :

CAMWorks® est un logiciel de FAO qui offre l'état de l'art en possibilités d'usinage. CAMWorks a quatre caractéristiques essentielles :



INTEGRE : CAMWorks est totalement intégré dans SolidWorks et fonctionne dans l'environnement SolidWorks/'CAMWorks Solids'. Grâce à cette intégration, vous pouvez :

- Utiliser la même interface d'utilisateur (Windows) pour la CAO et la FAO.
- CAMWorks transforme la « vue de conception » des pièces de SolidWorks en « vue de fabrication ».
- Utiliser le même fichier de pièce pour enregistrer l'information sur la conception et la fabrication (formes usinables, opérations et parcours d'outil).
- Éliminer les transferts de fichier en utilisant des formats de fichiers standard tels que IGES, SAT et Parasolid. (Les formats de fichiers IGES et SAT sont une approximation de la pièce avec une tolérance et sont donc à ce titre sujet à erreurs). Donc il génère des parcours d'outil sur la pièce SolidWorks réelle, et non sur une approximation importée.
- Générer des parcours d'outil qui sont associés à SolidWorks. Ceci signifie que si le modèle de conception est modifié, les parcours d'outil changent automatiquement avec une intervention minimale de l'utilisateur.

BASÉ SUR LA FORME : L'usinage est réalisé sur des formes telles que les trous, les poches et les bossages.

INTELLIGENT : Une base de données technologique (TechDB) permet de récupérer facilement les informations concernant les processus de fabrication utilisés sur votre site et d'appliquer ces informations pour automatiser encore davantage la programmation en code CN. La base de données technologique permet de travailler de manière cohérente avec l'équipement et d'obtenir un usinage bien réglé.

REACTIF : Dans certaines limites, si la pièce est modifiée, les formes et les parcours d'outil reflètent cette modification.

Les modules CAMWorks® sont proposés dans une variété de paquets et de combinaisons. Chaque module possède des stratégies d'usinage compétitives et des possibilités avancées pour aider à automatiser les processus d'usinage :

- Fraisage 2.5 axes, 3 axes, 4 et 5 axes Positionnés ;
- Fraisage 4 et 5 axes simultanés ;
- Tournage 2 et 4 axes ;
- Electroérosion à fil 2 et 4 axes ;
- Etc.