

N° d'ordre : 264 / MAG / 2006

Série : 009 / GM / 2006

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de magister
En Génie Mécanique

Option : **Mécanique appliquée en engineering**

Intitulé

*Impact de la signature des outils de coupe
sur la variation de
la géométrie des pièces mécaniques*

Soutenu le : 12 / 11 / 2006

Par

BERGHIDA RIAD

Devant le jury

Président	BELLAOUAR	Ahmed	M.C Université Mentouri - Constantine
Rapporteur	BOUGHOUAS	Hamlaoui	M.C Université Mentouri - Constantine
Examineur	BOUKEBAB	Salim	M.C Université Mentouri - Constantine
Examineur	AMARA	Idriss	M.C Université Mentouri - Constantine

Remerciement

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe de recherche « Conception des systèmes mécaniques » laboratoire de génie mécanique, faculté des sciences de l'ingénieur, université Mentouri Constantine.

D'abord je remercie dieu pour ses dons et sa bienveillance, je remercie monsieur Boughouas Hamlaoui, maître de conférences à l'université de Constantine et rapporteur de ce travail pour son soutien moral et pédagogique.

Je tiens à remercier vivement monsieur Boukebab Salim, maître de conférences à l'université de Constantine, qui en collaboration avec Boughouas Hamlaoui a dirigé ce travail et membre de jury, pour sa patience et pour ses critiques constructives durant tout mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à Bellaouar Ahmed, maître de conférences à l'université de Constantine de me faire l'honneur de bien vouloir juger ce travail et être président de jury.

Je remercie monsieur Amara Idriss, maître de conférences à l'université de Constantine, de me faire l'honneur d'être un membre de jury.

Je tiens enfin, à exprimer ma profonde gratitude pour tous les enseignants du département de génie mécanique qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

A mes parents

A mes frères et mes sœurs

et à.....

Sommaire

Introduction générale	1
 Chapitre I : Aperçu sur l'usinage des métaux	
I-1 Introduction	4
I-2 Les exigences liées à l'usinage	5
I-3 Procédés d'usinage	6
I-3-1 Le fraisage	
I-3-1-1 Définition	6
I-3-1-2 Principe de travail	7
I-3-1-3 Modes de fraisage	7
I-3-2 Le perçage	
I-3-2-1 Définition	9
I-3-2-2 Principe de travail	10
I-3-3 Le rabotage	
I-3-3-1 Définition	10
I-3-3-2 Principe de travail	10
I-3-4 Le tournage	
I-3-4-1 Définition	11
I-3-4-2 Principe de travail	11
I-3-4-3 Principaux éléments d'une pièce en tournage	12
I-3-4-4 Opération de base dans le tournage	12
I-4 Mouvement relatif outil / pièce.	
I-4-1 Mouvement de coupe. M_c	14
I-4-2 Mouvement d'avance. M_a	14
I-4-3 Mouvement de pénétration. M_p	15
I-5 Les paramètres de coupe.	
I-5-1 La vitesse de coupe v_c	16
I-5-1-1 Vitesse linéaire d'un point en rotation	16
I-5-1-2 Vitesse de coupe dans le cas du mouvement de coupe rectiligne.....	17
I-5-2 La vitesse d'avance v_f et L'avance par tour f	18
I-5-3 La profondeur de passe a_p	20

I-5-4 Temps de fabrication	21
I-6 Les outils de coupe.....	22
I-6-1 Eléments de l'outil	22
I-6-1-1 Corps de l'outil	23
I-6-1-2 Partie active de l'outil	23
I-6-2 Plans de l'outil	24
I-6-2-1 Plans de l'outil en main	24
I-6-2-2 Plans de l'outil en travail	26
I-6-3 Angles de l'outil	26
I-6-4 La géométrie de l'arête de coupe	29
I-6-5 Description géométrique du contacte en tournage	30
I-7 Etat de surface.....	34
I-8 Conclusion	37

Chapitre II : Recherche bibliographique

II-1 Introduction	38
II-2 Mécanisme de formation du profil microgéométrique des surfaces usinées.....	39
II-3 Modélisation de la topographie des surfaces usinées.....	39
II-3-1 Modèle de Gao et al.	40
II-3-2 Modèle de Cheung et Lee	42
II-4 Détermination théorique de la rugosité.....	50
II-4-1 Cas du fraisage	50
II-4-2 Cas du tournage	52
II-5 Etude de la rugosité.....	56
II-6 Conclusion.....	58

Chapitre III : Impact des paramètres de coupe sur la géométrie des pièces mécaniques

III-1 Introduction.....	59
III-2 Elaboration du modèle.....	60
III-2-1 Cas traité : Le dressage	60

III-2-2	Description et modélisation	61
III-2-3	Calcul de l'altitude Z_i de point M_i	63
III-2-4	Elaboration de la maquette informatique.....	67
II-3	Conclusion	69

Chapitre IV : Simulations numériques et discussion des résultats

IV-1	Introduction	70
IV-2	Choix des avances de coupe	71
IV-3	Choix de l'outil	71
IV-4	Présentation des simulations	72
IV-5	Discussion des résultats	77
IV-6	Etude de l'évolution de la rugosité théorique en fonction de l'avance et du rayon du bec	78
	Conclusion et perspectives	84
	Références bibliographiques	86

Introduction générale

Dans un monde en perpétuelle évolution, les industries de la mécanique doivent s'adapter à de nouvelles contraintes, telle que la mondialisation des marchés qui entraîne une concurrence accrue. Les critères de choix du client sont la qualité, le prix et le délai de mis en disposition du produit. Le système doit donc être capable de réagir en terme de fiabilité, de productivité et de flexibilité [1].

Quelque soit le mode d'usinage par enlèvement de matière, le but final est d'obtenir un produit dont la qualité d'exécution sera caractérisée par une précision dimensionnelle des formes géométriques et un degré de propreté des surfaces lié directement à la notion de rugosité. Dans ce sens, le progrès technique associé au rythme toujours plus pressant de développement industriel de la construction mécanique impose des conditions de plus en plus sévères. Aujourd'hui on saurait imaginer le fonctionnement correct des organes de machines sans que la conception et la précision de réalisation des diverses pièces soient assistées d'une certaine qualité des surfaces selon lesquelles elles s'assemblent. En service, l'usure des organes touche en premier lieu les couches superficielles du métal, ce qui laisse présumer de l'importance que revêt la propreté de l'usinage à l'égard du fonctionnement et la longévité d'un ensemble. On peut même affirmer que le problème de la rugosité est directement lié à la notion d'interchangeabilité des pièces mécaniques, par le truchement des tolérances, des ajustements spécifiés, etc. [2].

La qualité des pièces mécaniques usinée est généralement déterminée par leurs erreurs de forme et le degré de finition de la surface produite par le processus de fabrication [3]. L'état de surface joue un rôle important dans la résistance à l'usure, la ductilité, et la fatigue pour les pièces usinées et il ne peut pas être négligé dans la phase de conception [4]. Une surface usinée est le résultat de la reproduction géométrique et cinématique de la forme et de la trajectoire de la pointe de l'outil [5]. Dans la pratique actuelle, il y a beaucoup de facteurs tels

que la matière de la pièce, les conditions de coupe, la géométrie de l'outil, les vibrations qui influent sur la formation du copeau et la rugosité de la surface usinée [6][7]. Comment commander le processus d'usinage et choisir l'outil de coupe approprié pour répondre à l'exigence d'exactitude des dimensions est une question importante qui pose un système complexe.

La qualité des états de surface est l'un des aspects les plus pertinents des opérations d'usinage, puisqu'elle représente la phase finale dans le cycle de production pour l'amélioration du degré de finition des surfaces et les propriétés dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques. Donc, il est important de se rendre compte de l'influence des différents facteurs impliqués dans le processus de la coupe afin de choisir les paramètres appropriés qui permettent d'atteindre la qualité des surfaces désirée et qui dépend de la géométrie de l'outil, des conditions de coupe et des phénomènes mis en jeu lors de la coupe [8].

Notre travail consiste à étudier la variation de la géométrie des pièces mécaniques élaborées par usinage en fonction des paramètres géométrique et cinématique de la coupe. Pour atteindre notre objectif, et vu le rapport étroit qui existe entre l'état de surface et la qualité des tolérances dimensionnelles des pièces usinées [9], nous avons développé un modèle mathématique qui permet de reproduire le profil théorique de la topographie d'une surface obtenue par une opération de dressage et d'étudier la variation de la rugosité en fonction des paramètres cinématique et géométrique de la coupe. Ce modèle est élaboré sur la base d'une description géométrique à 2-D d'une surface dressée. Et comme nous nous intéressons dans le présent sujet de recherche à la rugosité théorique qui est affectée principalement par l'avance et le rayon de bec de l'outil, le modèle mis au point est fonction de ces deux paramètres.

Dans ce contexte, il y a un nombre limité de chercheurs qui ont proposé des modèles mathématiques permettant la reproduction fidèle de la topographie des surfaces usinées et exprimant l'influence des différents facteurs de base de l'usinage par enlèvement de matière (propriétés du matériau usiné, vitesse de coupe, avance, géométrie de l'outil, vibrations) sur l'état de surface. Lee et Cheung [10], ont proposé un modèle mathématique qui permet de reproduire fidèlement la topographie de la surface obtenue par dressage dans différentes conditions de coupe et d'étudier la variation de la rugosité en fonction de l'avance, de la géométrie de l'outil, de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe.

Un autre modèle a été développé par Gao et al. [11]. Ce modèle exprime l'influence des vibrations induites par la rotation de l'axe sur la surface obtenue par une opération de dressage et il permet, avec l'utilisation de la simulation numérique, de générer la topographie de la face dressée.

Notre document présente une simulation numérique de l'usinage par la mise au point d'un modèle mathématique qui permet de reproduire le profil théorique de la topographie d'une surface obtenue par dressage et étudier la qualité de cette surface en fonction de l'avance et du rayon de bec de l'outil de coupe.

Pour cela notre travail a été divisé en quatre chapitres avec une introduction et une conclusion.

Dans le chapitre 1, les notions indispensables de la mise en forme par enlèvement de la matière seront développées. Après un bref survol sur les exigences liées à l'usinage, on présente les différents procédés de mise en forme par usinage. Puis un rappel de la définition des différents paramètres de coupe ainsi qu'une description géométrique de l'outil sera présenté. Dans la troisième partie de ce chapitre seront présentés quelques définitions sur l'état de surface et l'objectif à atteindre.

Le chapitre 2, sera une recherche bibliographique portée sur le mécanisme de formation du profil microgéométrique sur les surfaces usinées et les différents modèles existants et qui permettent la reproduction de la topographie des surfaces obtenues par usinage.

Dans le chapitre 3 sera présenté le développement détaillé du modèle mathématique mis au point ainsi que la procédure à suivre pour pouvoir reproduire fidèlement le profil théorique de la topographie d'une surface obtenue par une opération de dressage.

Dans la première partie du chapitre 4 seront présentés et discutés les résultats obtenus par la simulation numérique de l'opération de dressage. Dans la deuxième partie sera étudiée l'évolution de la rugosité théorique en fonction du rayon de bec et de l'avance de l'outil afin de vérifier notre modèle et valide son application.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion et des perspectives.

Chapitre I

Aperçu sur l'usinage des métaux

I-1 Introduction.

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans un intervalle de tolérance donné. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé [12].

L'usinage concerne en premier lieu les matériaux métalliques et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante qui ont subi déjà une ou plusieurs opérations de mise en forme. La mise en forme par usinage concerne également, mais de manière moins conséquente en général, toutes les autres classes de matériaux (céramiques, polymères, bois et matériaux dérivés, matériaux composites, verres, semi-conducteurs, etc.), selon des modalités spécifiques, dépendant des caractéristiques du procédé et du matériau [12].

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la combinaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance. Il existe deux manières pour générer la surface recherchée : soit par le travail de forme, soit par le travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface finalement obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la trace de l'arête de l'outil qui travaille (le point générateur) qui donne la surface finale.

Aujourd'hui, des machines à commandes numériques, c'est-à-dire équipées d'un système informatique, permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure [13].

I-2 Les exigences liés à l'usinage.

Les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de répondre aux exigences industrielles imposées, quelles soient économiques ou écologiques, etc. Aujourd'hui, l'ingénieur de fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions afin de réaliser rapidement des pièces mécaniques avec la qualité demandée et à moindre coût [14].

Par exemple, Parmi les questions qui se pose dans le cas de l'usinage :

- § Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-elle en terme de puissance et de précision ?
- § Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- § Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- § Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- § Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ...

Il y aurait encore un nombre considérable de questions à poser, dont il est difficile d'établir une liste exhaustive. L'état d'avancement des connaissances sur le plan fondamental ne peut pas apporter de réponse à toutes ces questions. En revanche, la technologie et les techniques d'usinage ont permis de faire évoluer et d'optimiser la production.

Depuis la révolution industrielle du début du siècle dernier, les machines outils ont considérablement évoluées afin de répondre à des exigences telles qu'un meilleur rendement, une plus grande sécurité, une meilleure rigidité, de plus grandes vitesses de déplacement, une puissance accrue, une amélioration de la productivité, une diminution de l'usure des outils, etc.

En contre partie, l'amélioration de toutes ces performances fait ressortir un ensemble de phénomènes dont l'ignorance ne remettait pas en cause la fabrication traditionnelle des pièces mais dont l'importance ne peut être ignorée pour des conditions d'usinage à Grandes Vitesses où les vitesses de rotation, des outils de fraisage par exemple, deviennent très importantes [14].

I-3 Procédés d'usinage

Les procédés d'usinage sont extrêmement variés et leur distinction se fait suivant trois critères essentiels [12] :

- La date de leurs apparitions ; les procédés traditionnels et les non traditionnels.
- Les phénomènes physiques correspondant ; procédés de coupe, par abrasion, et procédés physico-chimiques.
- Le type des machines et des outils utilisés ;

En fonction des outils et des machines utilisées, on distingue différents procédés d'usinage. Les procédés les plus répandus sont le tournage, fraisage, perçage, rectification, rabotage, ...etc. La fabrication débute avec ce que l'on appelle un matériau brut, elle le modifie jusqu'à ce qu'il soit conforme au dessin de détail, donc aux exigences techniques du bureau d'études [15].

I-3-1 Le fraisage

I-3-1-1 Définition

Le fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de la matière. Il est caractérisé par le recours à une machine-outil appelée fraiseuse et l'utilisation d'un outil de coupe spécial (à arêtes multiples) appelé fraise. La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage des surfaces plates et permet également, si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes [13]. La coupe en fraisage s'effectue habituellement avec des dents placées sur le périphérique et / ou sur l'extrémité d'un disque ou d'un cylindre [16].

I-3-1-2 Principe de travail

Lors d'une opération de fraisage, l'enlèvement de la matière – sous forme de copeau- résulte de la combinaison de deux mouvements : le mouvement de rotation de l'outil sur son axe d'une part et le mouvement d'avance de la pièce suivant trois axe orthogonaux d'autre part [17].

I-3-1-3 Modes de fraisage

On distingue deux modes : le fraisage de face et le fraisage de profil [17].

I-3-1-3-1 Fraisage de face

Dans ce mode, l'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraisé (figure I-1). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où l'on ne retrouve aucune trace de la forme de la génératrice de la fraise. Ce mode de fraisage est également appelé "fraisage en bout" (d'enveloppe).

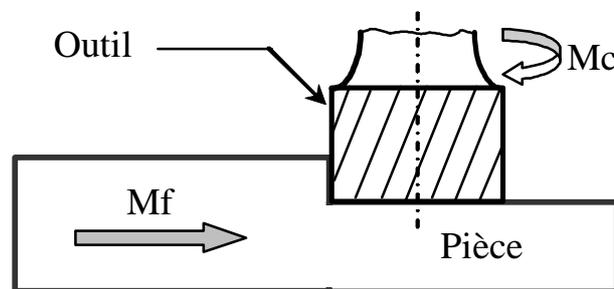


Figure I-1 [17]: Fraisage de face.

I-3-1-3-2 Fraisage de profil

Dans ce mode, la génératrice de la fraise est parallèle à la surface usinée (figure I-2). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où quelconques dans des positions diverses. Ce mode de fraisage est également appelé "fraisage en roulant" (de forme).

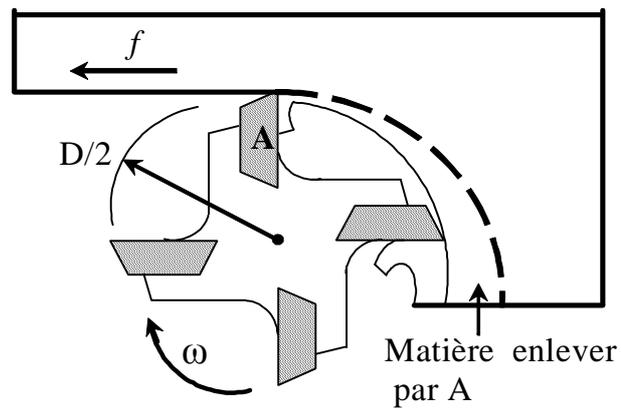


Figure I-2 [18] : fraissage de profile.

Lors d'une opération de fraissage de profil et selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce, Il existe deux manières de procéder [19] :

a - Fraissage en opposition

La direction d'avance de la pièce est à l'opposé du sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe. L'épaisseur des copeaux est nulle au départ, puis maximale à la fin de la passe (figureI-3).

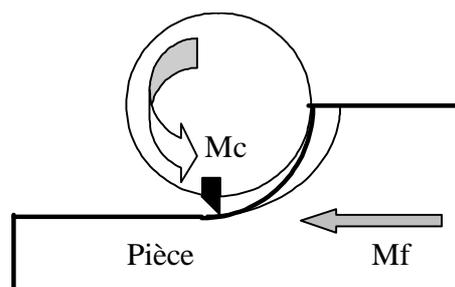


Figure I-3 [17] [19] : Fraissage en opposition.

b - Fraissage en concordance ou 'en avalant'

Dans le cas de fraissage en avalant, la direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. L'épaisseur de copeau va donc diminuer jusqu'à être égale à zéro à la fin de la passe (figure I-4).

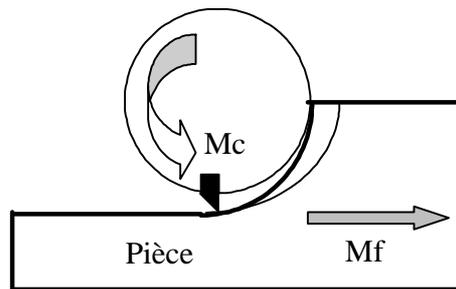


Figure I-4 [17] [19]: Fraisage en avalant.

On peut également effectué un fraisage combiné, c'est-à-dire de face et de profile en même temps [13].

I-3-2 Le perçage

I-3-2-1 Définition

Le terme de perçage regroupe toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux. En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage [20].

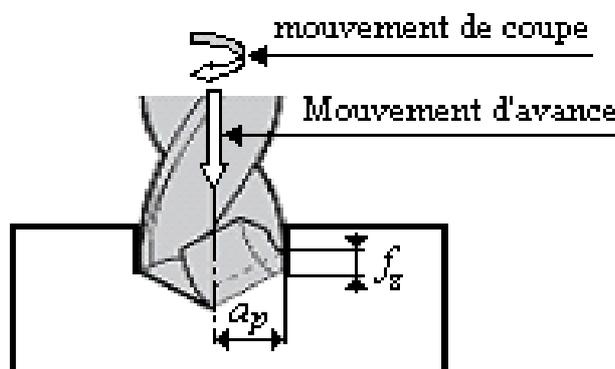


Figure I-5 [19] [21]: Le perçage.

I-3-2-2 Principe de travail

L'enlèvement de la matière lors de l'opération de perçage s'effectue par la combinaison d'un mouvement rotatif et d'un mouvement d'avance linéaire. Pour le perçage de trous courts sur les machines conventionnelles, ce double mouvement de rotation et d'avance est donné à l'outil (figure I-5). Mais l'utilisation de tours universels CN et CNC à toute fois conduite à recourir de plus en plus fréquemment à la combinaison d'une pièce en rotation et d'un foret qui ne tourne pas [20].

I-3-3 Le rabotage

I-3-3-1 Définition

Le rabotage (figure I-6) est un procédé d'usinage par enlèvement de matière sous forme de copeau. Il s'effectue sur des machines outils appelées raboteuses ou étaux-limeurs, qui sont conçus pour permettre l'emploi d'un outil d'enveloppe [21].

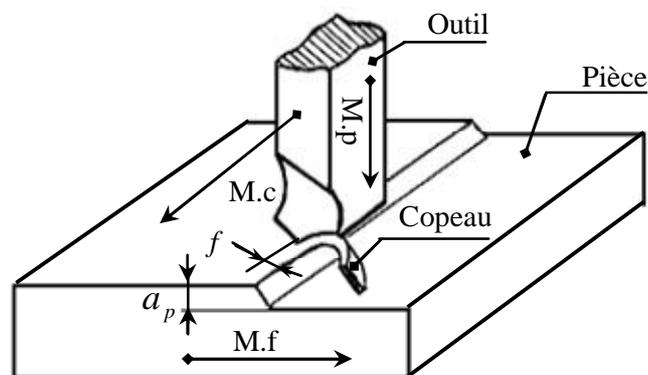


Figure I-6 [15] : Le rabotage.

I-3-3-2 Principe de travail

Lors du rabotage, le mouvement rectiligne intéresse soit la pièce, soit l'outil. Sur une raboteuse, on met en mouvement la pièce tout en déplaçant latéralement l'outil d'une certaine quantité. Sur un étau limeur, c'est l'outil qui effectue un mouvement rectiligne en revenant à l'origine à la suite

de chaque course de travail, tandis que la pièce se déplace latéralement d'une quantité égale à l'avance désirée [15].

I-3-4 Le tournage

I-3-4-1 Définition

Le tournage (figure I-7) est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils de coupe à arête unique [22]. Il s'effectue sur des machines-outils dites tour [15].

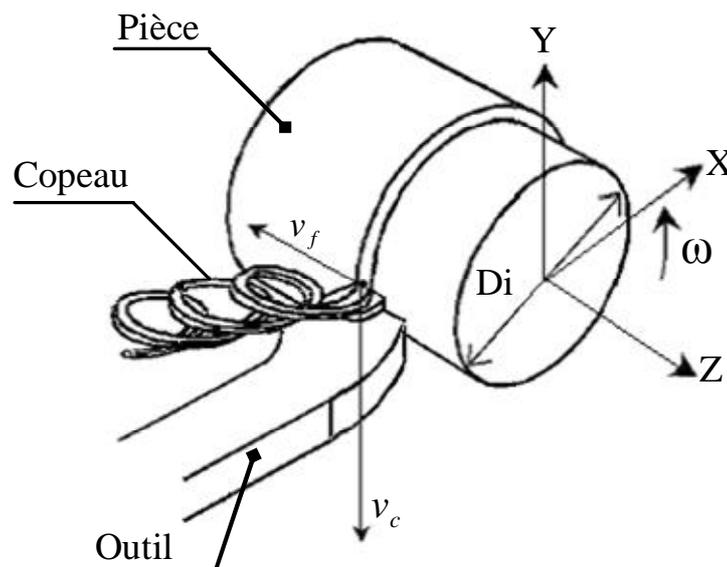


Figure I-7 [14] : Tournage.

I-3-4-2 Principe de travail

Pendant le tournage, la pièce tourne autour de son axe, tandis que l'outil s'engage dans sa surface à une profondeur déterminée. L'outil est animé d'un mouvement d'avance continu parallèle ou perpendiculaire à l'axe de la pièce [15].

I-3-4-3 Principaux éléments d'une pièce en tournage

La figure I-8 illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée 'surface de la pièce'. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage due à des opérations précédentes. La 'surface engendrée' (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée 'surface coupée' [23].

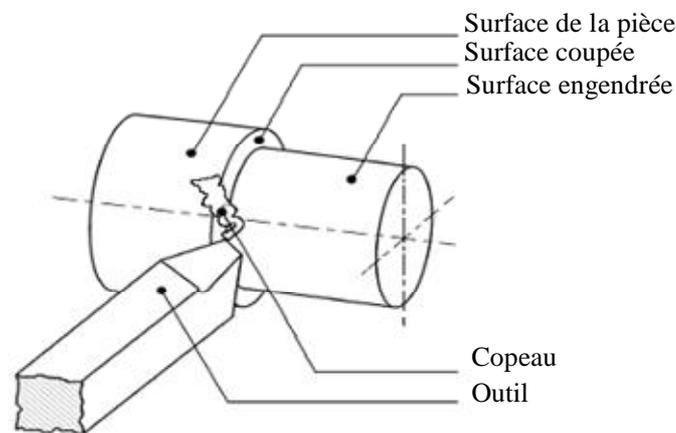


Figure I-8 [23]: Surfaces de la pièce.

I-3-4-4 Opération de base dans le tournage

Il existe quatre opérations de base (figure I-9) [22]:

- Tournage longitudinal, où chariotage (figure I-9.1) ;
- Dressage (figure I-9.2) ;
- Tournage de cônes (figure I-9.3) ;
- Contournage (figure I-9.4) ;

Pour faciliter le choix des outils et des paramètres de coupe, on peut souvent dissocier l'usinage des pièces complexes en profils de coupe élémentaires énumérer précédemment [22].

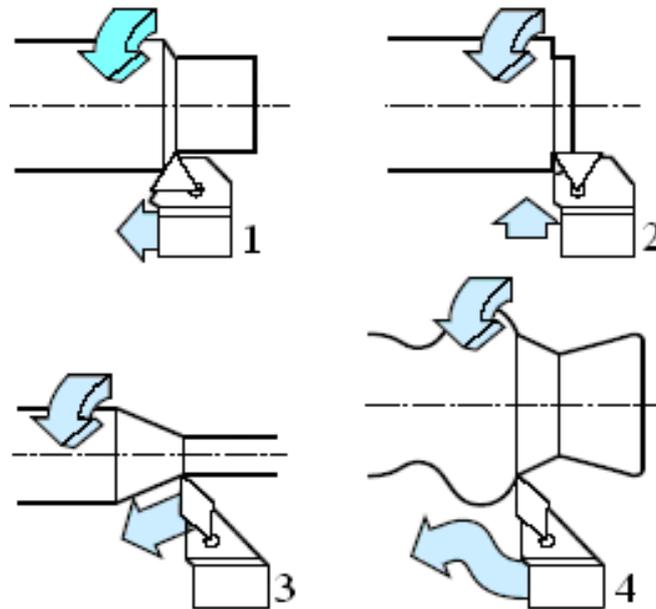


Figure I-9 [22]: Opération de base en tournage.

a. Le dressage

Lors d'une opération de dressage (figure I-9-2), la pièce est animée d'un mouvement de coupe, qui est une rotation, le mouvement d'avance de l'outil est une translation rectiligne perpendiculaire à l'axe de rotation. La combinaison de ces deux mouvements orthogonaux permet de diminuer la longueur de la pièce et génère des plans orthogonaux à l'axe [21][22]. Dans une opération de dressage, le profil de la rugosité de la surface usinée suivant le diamètre de la pièce est déterminé par l'avance et la géométrie de l'outil de coupe [24].

I-4 Mouvement relatif outil / pièce.

Un examen approfondi du mécanisme de la coupe nous conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux (figure I-10) [15].

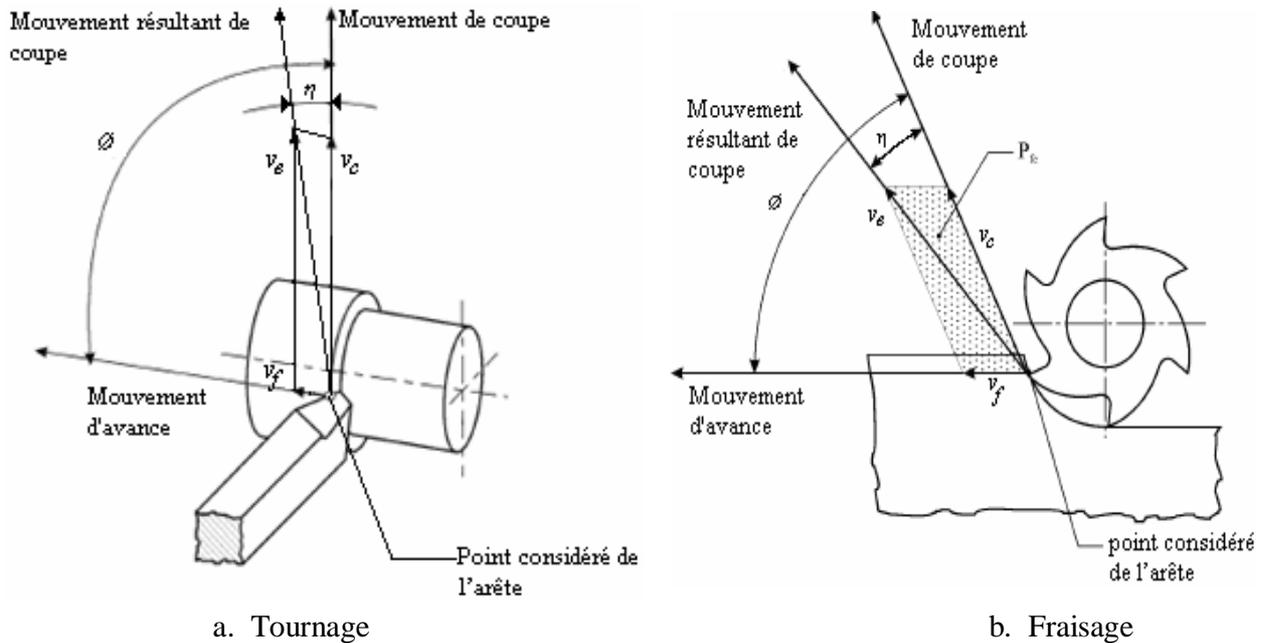


Figure I-10 [23] : Mouvements de l'outil et de la pièce.

I-4-1 Mouvement de coupe. M_c

Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce [23]. Il participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail [15].

I-4-2 Mouvement d'avance. M_a

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance a pour but de décaler latéralement une quantité 'f' dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance combinés constituent le mouvement résultant de coupe (v_e), alors que l'angle contenu entre ces deux mouvements est appelé angle de direction d'avance (\varnothing) (figure I-10) [15][23].

I-4-3 Mouvement de pénétration. M_p

C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe [15].

I-5 Les paramètres de coupe.

Les paramètres de la coupe sont, d'une part, des grandeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques) (Figure I-11) [23].

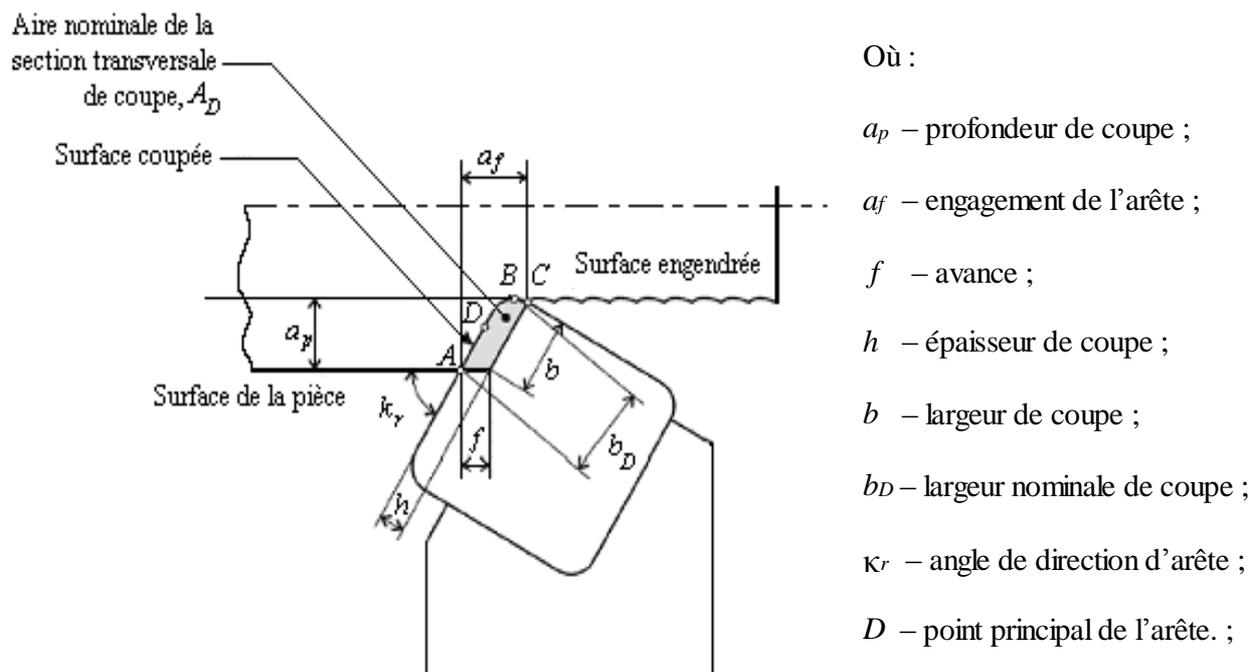


Figure I-11 [23] : Dimensions de coupe dans le cas de tournage.

I-5-1 La vitesse de coupe v_c .

La vitesse de coupe v_c , est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce [15] [23].

I-5-1-1 Vitesse linéaire d'un point en rotation.

Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation ' N ' et du diamètre ' D ' de l'élément en rotation (figure I-13). Pour le tournage, il faut prendre le diamètre du cercle qui se trouve sur le point de l'arête de coupe le plus éloigné de l'axe de rotation.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} [m / \text{min}] \quad (\text{I-1})$$

La vitesse de coupe est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce [14].

$$N = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} [tr / \text{min}] \quad (\text{I-2})$$

Où D (mm) est le diamètre final de la pièce (figure I-12).

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante [22].

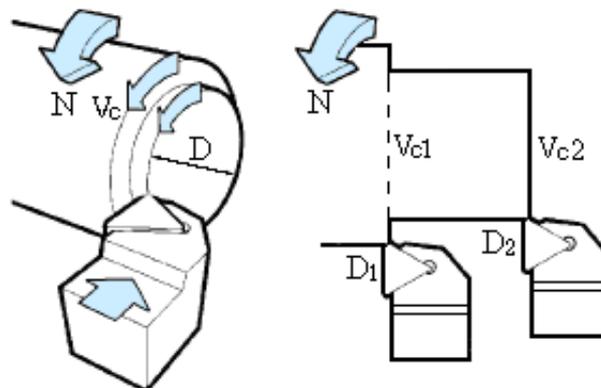


Figure I-12 [22]: Définition des trois variables ; vitesse de coupe v_c , diamètre D , vitesse de rotation N .

I-5-1-2 Vitesse de coupe dans le cas du mouvement de coupe rectiligne

Le mouvement de coupe rectiligne est généralement alternatif, car il ne peut être continu. A chaque course de travail, la vitesse augmente depuis zéro jusqu'à la valeur maximale. Ce sont les longueurs d'échappée l de l'outil (figure I.13) qui sont réservées à cette augmentation. On admet alors que la vitesse est constante pendant toute la course de travail C et qu'elle correspond à la vitesse moyenne.

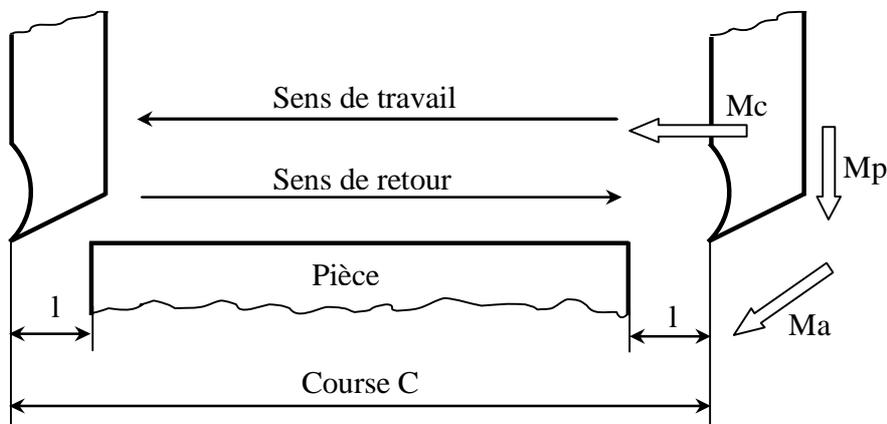


Figure I-13 [15] : Rabotage : V_c est la même en chaque point de l'arête coupante

En mouvement alternatif (rabotage par exemple), un battement comprend une course de travail (détachement du copeau) et une course de retour (à vide). On admet que la course travail et la course retour sont effectuées dans des temps égaux.

Le nombre de battements par minute est désigné par N [Bat/min] et la course C par [mm], la longueur de travail parcourue par l'outil sera :

$$e = C \times N \quad [\text{mm/mn}] \quad (\text{I-3})$$

Vu que la course de travail est égale à la course retour et que les deux courses sont effectuées dans des temps égaux, d'où le temps $t = 1/2$. Se qui nous donne une vitesse de coupe :

$$V_c = e / t = 2 \times C \times N \times 10^{-3} \quad (\text{I-4})$$

I-5-2 La vitesse d'avance v_f et L'avance par tour f .

La vitesse d'avance v_f est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce (figure I-14). Elle est exprimée soit en mm/min soit en mm/tour.

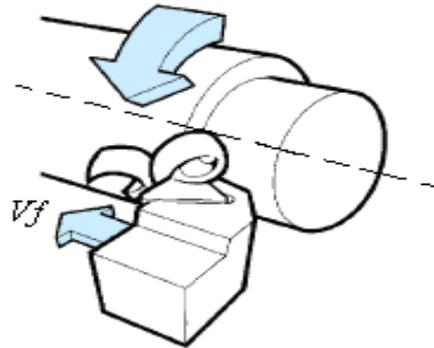


Figure [22] I-14 : Vitesse d'avance v_f .

L'avance (figure I-15) notée f , correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage) [14].

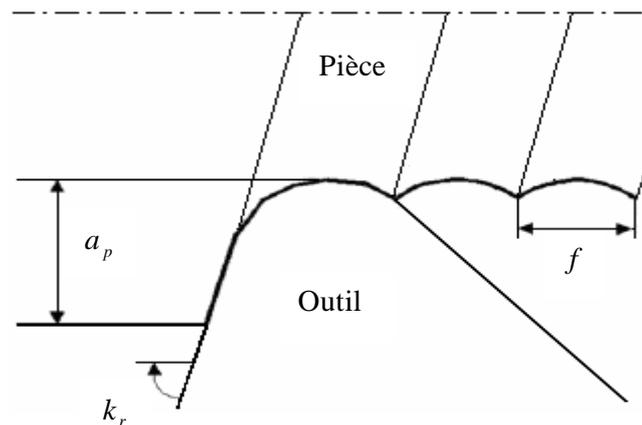


Figure I-15 [14] : L'avance f dans le cas de tournage.

Si l'avance est discontinue, par exemple dans le cas du rabotage, la vitesse d'avance n'est pas définie [23]. Dans le cas de tournage la vitesse d'avance v_f (mm/min) est égale à f (mm) $\cdot N$ (tr/min) [22].

On distingue trois sortes d'avance [15] :

I-5-2-1 Avance longitudinale

On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.

I-5-2-2 Avance transversale

On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.

I-5-2-3 Avance oblique

On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.

L'avance peut être désignée par :

- Avance par tour " f_{tr} "
- Avance par battement " f_{bat} "
- Avance par dent " f_z "
- Avance par minute " f_{min} "

Elle s'exprime respectivement par :

- Millimètre par tour "**mm/tr**", lors du tournage, fraisage, perçage,etc.
- Millimètre par battement "**mm/bat**", lors du rabotage, mortaisage,etc.
- Millimètre par dent "**mm/dent**", lors du fraisage, brochage, ...etc.
- Millimètre par minute "**mm/min**", dans tous les cas d'usinage.

L'avance représente une donnée clé pour la qualité de la surface usinée, elle influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent [22].

I-5-3 La profondeur de passe a_p .

La profondeur de passe (figure I-16) notée a_p , correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage.

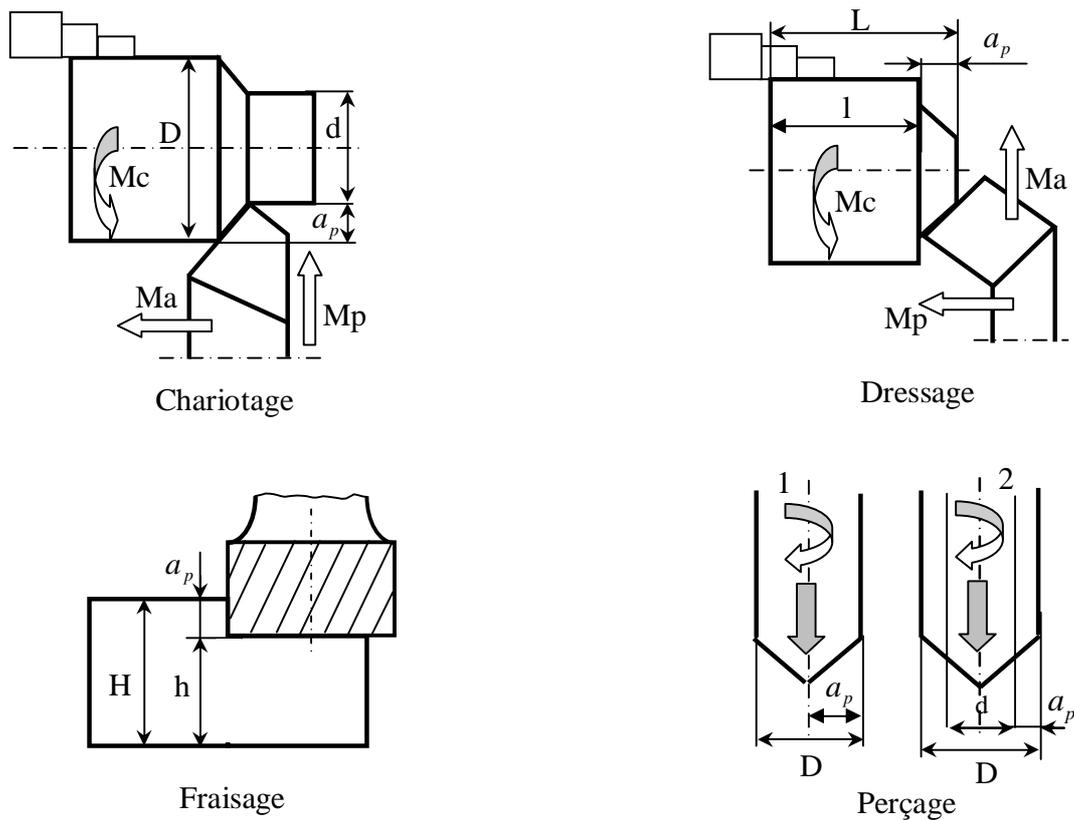


Figure I-16 [15] : Représentation de la profondeur de passe a_p .

La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [22].

Il vaut mieux enlever les surépaisseurs d'usinage sans faire beaucoup de passes. Pourtant, quand on prend une profondeur de passe très grande, la précision d'usinage diminue à cause de la présence des efforts de coupe très élevés. Dans ces cas, des vibrations apparaissent et l'état de surface devient plus mauvais.

D'habitude, on choisit la profondeur de passe en dépendance des surépaisseurs d'usinage et de la rugosité superficielle demandée. Aussi le nombre de passe dépend de la rigidité des système 'machine-outil – pièce – outil'. Si ce système a une faible rigidité, ou si on usine des pièces ayant le diamètre assez petit et la longueur assez grande, on choisit dans ce cas une profondeur de passe faible [15].

La profondeur de passe et l'avance vont influencer aussi la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière [14].

I-5-4 Temps de fabrication [15].

- a. **Temps manuels « Tm »** ; c'est la durée d'un travail physique ou mental dépendant uniquement de l'opérateur, il est exprimé en centième de minutes [Cmin].
- b. **Temps technico-manuels « Ttm »** ; c'est la durée pendant laquelle le travail dépend des actions composantes et simultanées de l'opérateur et de la machine.
- c. **Temps masqué « Tz »** ; c'est la durée d'un travail humain ou machine accompli pendant l'exécution d'un travail prédominant.
- d. **Temps série « Ts »** ; c'est la durée des opérations nécessaires pour équiper le poste, ainsi que celles intervenant lors du montage de poste de travail.
- e. **Temps fréquentiel « Tf »** ; c'est la durée d'une action, ou d'un ensemble d'actions qui modifie périodiquement le déroulement du cycle.
- f. **Temps technologique « Tt »** ; c'est la durée pendant laquelle le travail effectué dépend uniquement des moyens matériels.

I-6 Les outils de coupe.

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement sous forme de copeaux [25]. Il existe une très grande variété d'outils de coupe : différents type de géométries, de matériaux et de revêtements. Malgré leur destination ainsi que leur aspect extérieur différents, n'importe quel outil comporte une partie active, c'est à dire celle qui enlève directement le copeau. La partie active de tous les outils de coupe, quelque soit sa forme ressemble à un outil de tournage classique. Tandis que les dents des outils de coupe spéciaux, tels que la meule ont des grains dont les arêtes enlèvent les copeaux.

On exige de l'outil d'avoir les propriétés suivantes [15]:

- La pression d'exécution de la forme de la pièce à usiner.
- La précision des cotes à usiner.
- L'état de surface de la pièce à usiner.
- L'efficacité influence sur le rendement du travail.
- La solidité (stabilité).
- Le prix de revient bas.

I-6-1 Eléments de l'outil

Les principaux éléments des différents outils sont semblables. Un outil de coupe peut être caractérisé par une géométrie d'arête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés [14]. Généralement, dans un outil de coupe on trouve les éléments suivants (figure I-17) [26].

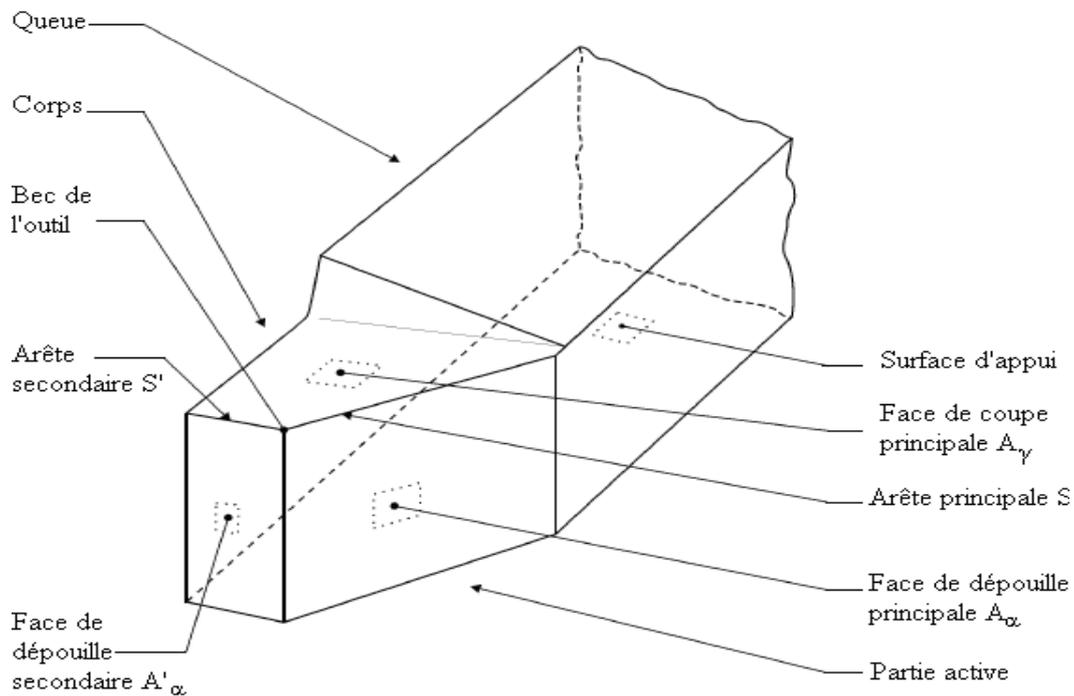


Figure I-17 [23]: Eléments de l'outil.

I-6-1-1 Corps de l'outil

C'est la partie de l'outil qui porte les éléments composants l'outil (éléments coupants où les plaquettes) et qui sert à sa fixation et à sa mise en position sur la machine.

I-6-1-2 Partie active de l'outil

C'est la partie qui intervient directement dans l'opération de coupe. La partie active de l'outil est composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arrêts tranchants.

I-6-1-2-1 Face de coupe : A_γ

C'est la surface sur laquelle glisse le copeau lors de la coupe.

I-6-1-2-2 Face de dépouille : $A\alpha$

C'est la surface devant laquelle passe la surface coupée par l'outil. On distingue la face en dépouille principale et la face en dépouille secondaire. La face en dépouille principale est celle dont l'intersection avec la face de coupe donne l'arête tranchante principale.

I-6-1-2-3 Arrêt tranchante principale : S

C'est l'arête tranchante destinée à l'enlèvement de la matière. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille principale $A\alpha$.

I-6-1-2-4 Arrêt tranchante secondaire : S'

C'est une arête qui commence à l'extrémité de l'arrêt principale et qui s'étend dans une autre direction. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille secondaire $A\alpha'$. Certains outils possèdent plusieurs arrêtes secondaires.

I-6-1-2-5 Bec de l'outil

C'est la partie où se rejoignent l'arête principale et l'arête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, ou vive.

I-6-2 Plans de l'outil. (Figure I-18)**I-6-2-1 Plans de l'outil en main**

- Plan de référence de l'outil, Pr : plan passant par le point considéré de l'arête et contenant l'axe de l'outil (pour un outil tournant) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil (pour un outil classique).
- Plan d'arête de l'outil, Ps : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil Pr .

- Plan de travail conventionnel, P_f : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r , au point considéré de l'arête, et parallèle à la « direction supposée d'avance » de l'outil.
- Plan vers l'arrière de l'outil, P_p : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r et au plan de travail conventionnel P_f , au point considéré de l'arête.

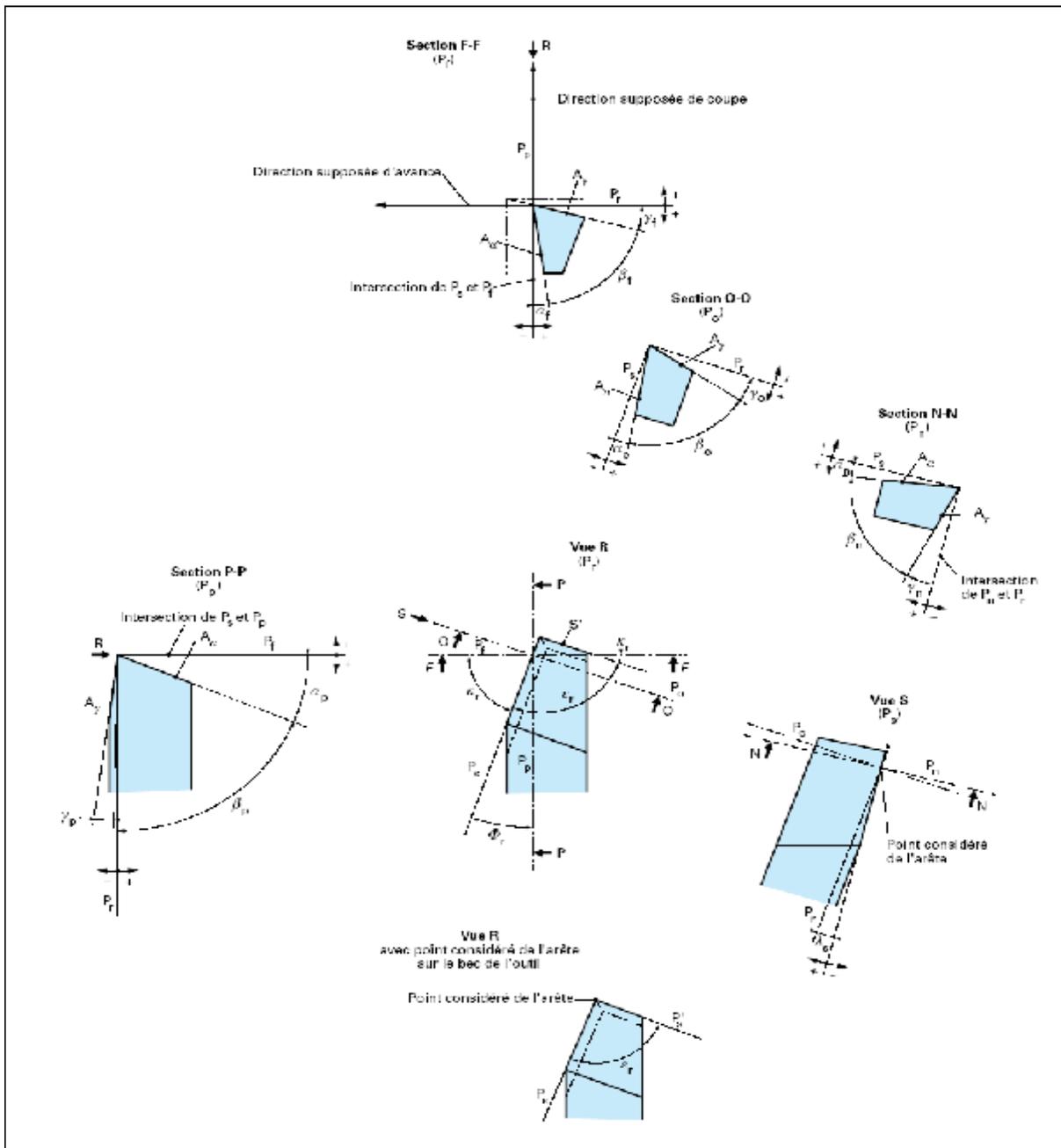


Figure I-18 [27] : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariotier droit.

I-6-2-2 Plans de l'outil en travail.

- Plan de référence en travail, P_{re} : plan perpendiculaire au point considéré de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point.
- Plan d'arête en travail, P_{se} : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} . Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe.
- Plan de travail, P_{fe} : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} .
- Plan vers l'arrière en travail, P_{pe} : plan perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} et au plan de travail P_{fe} , au point considéré de l'arête.

I-6-3 Angles de l'outil. (Figure I-18)

I-6-3-1 Angles d'arête de l'outil en main.

- Angle de direction d'arête de l'outil k_r (figure I-19): angle aigu mesuré dans le plan de référence P_r entre le plan d'arête P_s et le plan de travail P_f . Il est mesuré de P_f vers P_s et dans le sens où la trace de P_s dans P_r s'éloigne du bec de l'outil [26].

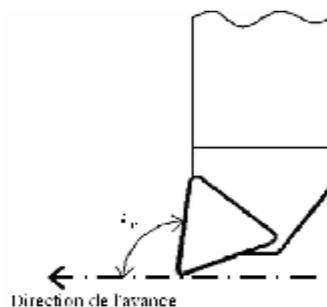


Figure I-19 [14] : Angle de direction d'arrêt de l'outil.

- Angle d'inclinaison d'arête de l'outil I_s (figure I-20) : angle aigu mesuré dans le plan d'arête P_s , entre l'arête et le plan de référence P_r . Il est positif lorsqu'en s'éloignant de la pointe de l'outil l'arrêt se trouve en dessous du plan P_r .

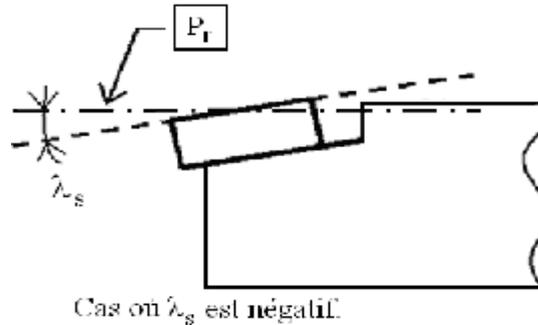


Figure I-20 [14] : Angle d'inclinaison d'arrêt.

- Angle de pointe de l'outil ϵ_r : C'est l'angle mesuré dans le plans P_r , entre le plan d'arête P_s et le plan d'arête secondaire P_s' .
- Angle de direction d'arête secondaire de l'outil k_r' : C'est l'angle, mesuré dans le plan P_r , entre le plan conventionnel de travail P_f et la projection de l'arête secondaire dans le plans de référence de l'outil P_r .

Les angles de direction d'arête de l'outil, de pointe de l'outil et de direction d'arête secondaire de l'outil sont liés par la relation : $k_r + e_r + k_r' = 180^\circ$

I-6-3-2 Angle d'arrêt de l'outil en travail

- Angle de direction d'arête en travail k_{re} : c'est l'angle mesuré dans le plan P_{re} , entre les plans P_{fe} et P_{se} . La convention de sens adoptée pour k_{re} est la même que pour l'angle k_r .
- Angle d'inclinaison d'arête en travail I_{se} : c'est l'angle mesuré dans le plan P_{se} , entre l'arête et le plan P_{re} . La convention de signe pour l'angle I_{se} est la même que pour l'angle I_s .

I-6-3-3 Angles des faces.

La position des faces de coupe et de dépouille est définie dans des plans de sections particuliers qui passent tous par un point considéré de l'arête (Figure I-21). Lorsqu'on fait une section de l'outil par ces plans et quelque soit le plan considéré pour définir la section on trouve [17][26] :

- Angle de dépouille α : angle aigu entre la face de dépouille $A\alpha$ et le plan d'arête P_s (P_{se}).
- Angle de taillant β : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et la face de dépouille $A\alpha$.
- Angle de coupe γ : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et le plan de référence P_r (P_{re}).

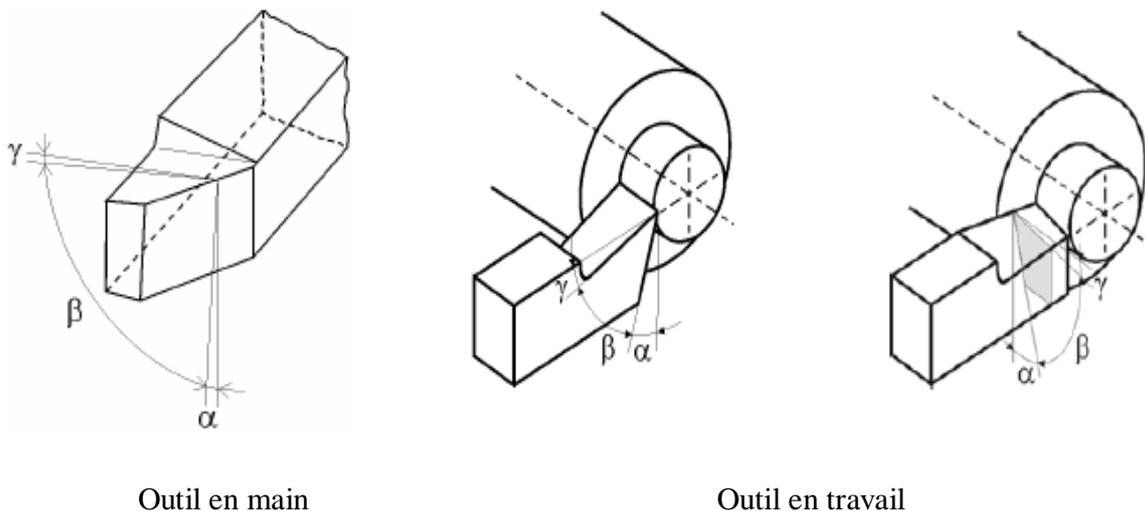


Figure I-21 [23] : Angles des faces.

Dans un même plan de section, que ce soit dans le système de l'outil en main ou de l'outil en travail, ces trois angles sont liés par la relation : $(\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ)$

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section suivants:

- P_o (P_{oe}) : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence P_r (P_{re}) et au plan d'arête P_s (P_{se}), au point considéré de l'arête (figure I-22) ;

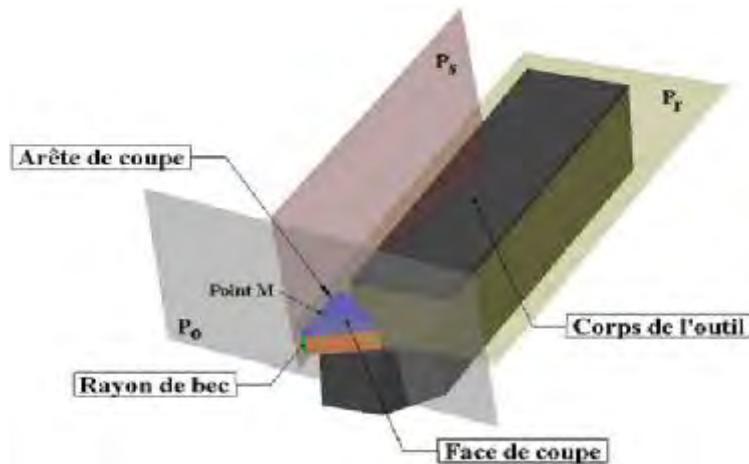


Figure I-22 [14] : Définition basique d'un outil en tournage.

- P_n (P_{ne}) : plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré ($P_n = P_{ne}$) ;
- P_f : plan de travail conventionnel (plan de travail P_{fe}) ;
- P_p : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail P_{pe}) [27].

I-6-4 La géométrie de l'arête de coupe.

La plupart des modèles de coupe tridimensionnelle caractérisent l'outil suivant trois plans distincts matérialisés par la face de coupe et les faces de dépouilles principale et secondaire (figure I-23.a) [28]. En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de 3 plans raccordés par deux rayons (figure I-23.b) : le rayon de bec r_ϵ et le rayon d'acuité R de l'arête de coupe, qui est souvent négligée dans un grand nombre de modèles [14].

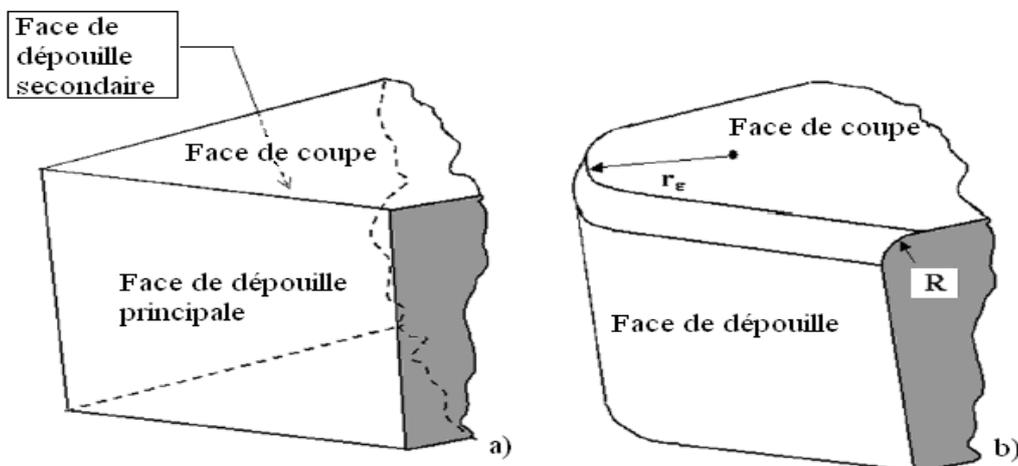


Figure I-23 [28] : Géométrie de l'arrêt de coupe.

I-6-5 Description géométrique du contact en tournage.

La surface tridimensionnelle de contact entre l'outil et la pièce est relativement complexe. La définition suivante (figure I-24) découpe la surface de contact à partir d'une ligne directrice (ou ligne d'arête) et d'une ligne d'esquisse (ou ligne de coupe) [14].

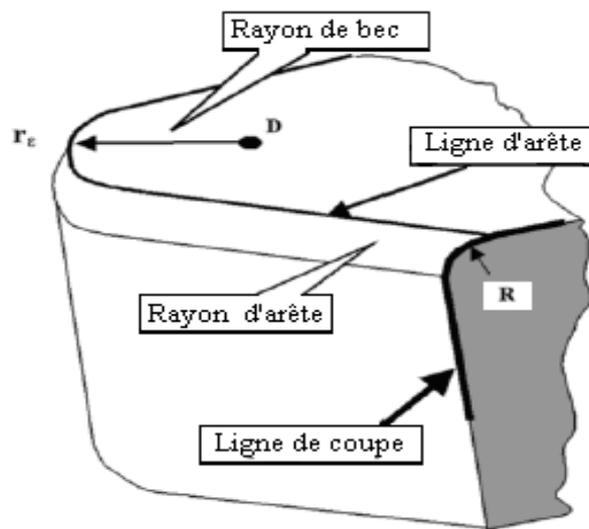


Figure I-24 [28] : Description géométrique de l'outil.

I-6-5-1 Définition de la ligne d'arête

La ligne d'arête permet de définir en partie la surface de contact entre l'outil et la pièce. Elle est découpée en une zone rectiligne et une zone curviligne (figure I-25). Les dimensions de ces zones dépendent des paramètres géométriques de l'outil tels que l'angle de direction d'arrêt k_r et le rayon du bec r_e mais aussi des paramètres cinématiques de coupe tels que la profondeur de passe a_p et l'avance f [14].

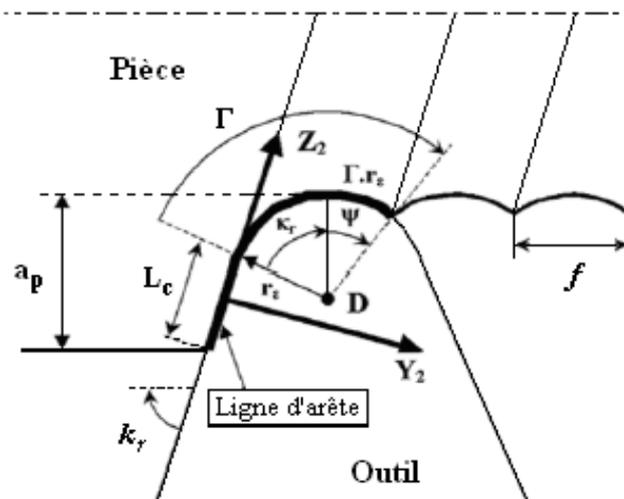


Figure I-25 [28]: Description géométrique de contact.

Ainsi, la longueur de contact de la partie rectiligne de l'arête L_c peut s'exprimer par [14]:

$$L_c = \frac{a_p + r_e (\cos(k_r) - 1)}{\sin(k_r)} \quad (\text{I-5})$$

La longueur de la partie curviligne de l'arête en contact avec la matière dépend de l'angle de contact Γ :

$$\Gamma = k_r + \Psi \quad (\text{I-6})$$

Où Ψ est l'angle complémentaire de contact sur la face de dépouille secondaire (figure I-25) :

$$\Psi = \arccos \left(\frac{\sqrt{r_e^2 - \frac{f^2}{4}}}{r_e} \right) \quad (\text{I-7})$$

La longueur de contact totale L_{cT} s'exprime finalement sous la forme :

$$L_{cT} = L_c + r_e \Gamma \quad (\text{I-8})$$

I-6-5-2 Définition de la ligne de coupe.

La ligne de coupe permet de compléter la définition de la surface de contact entre l'outil et la pièce. Elle est délimitée par trois zones : la zone BO (face de coupe), la zone OJ (acuité d'arête) et la zone JK (face de dépouille) (figure I-26). Géométriquement, la ligne de coupe est définie par la longueur Y entre les points B et O, puis par la longueur L entre les points J et K. le raccordement entre ces deux droites est déterminé par le rayon d'acuité R [28].

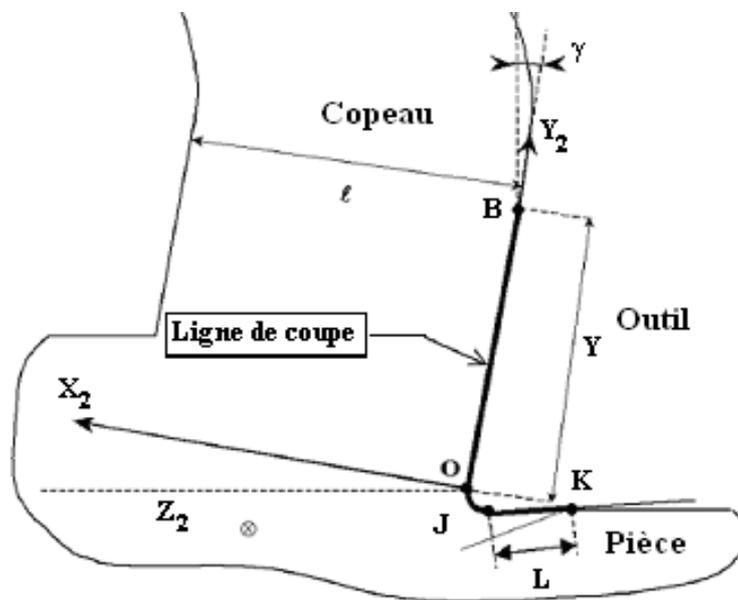


Figure I-26 : Description géométrique de la zone de la coupe.

La longueur Y apparaît comme une inconnue du problème et sera évaluée à partir de considérations d'équilibre. La longueur de contact outil / pièce suivant la dépouille principale L est estimée à partir de la pression hydrostatique p_0 en O, du module de young E de la pièce, de la vitesse de coupe V_c , de la vitesse d'avance V_f et du rayon d'acuité R [14].

$$L = \frac{K_A P_0 (1 + V_f)(1 - R)}{E(1 + V_c)} \quad (\text{I-9})$$

Où, K_A et V_f sont des paramètres correctif.

I-6-5-3 Considérations sur la cinématique du copeau.

Des observations expérimentales ont montré que la cinématique du copeau est dépendante des paramètres d'usinage. L'orientation du copeau, définie par l'angle Ξ dans le plan de la face de coupe, peut être exprimée à partir d'une moyenne des normales à la ligne de contact pondérée par les longueurs de contact (Figure I-27) [28].

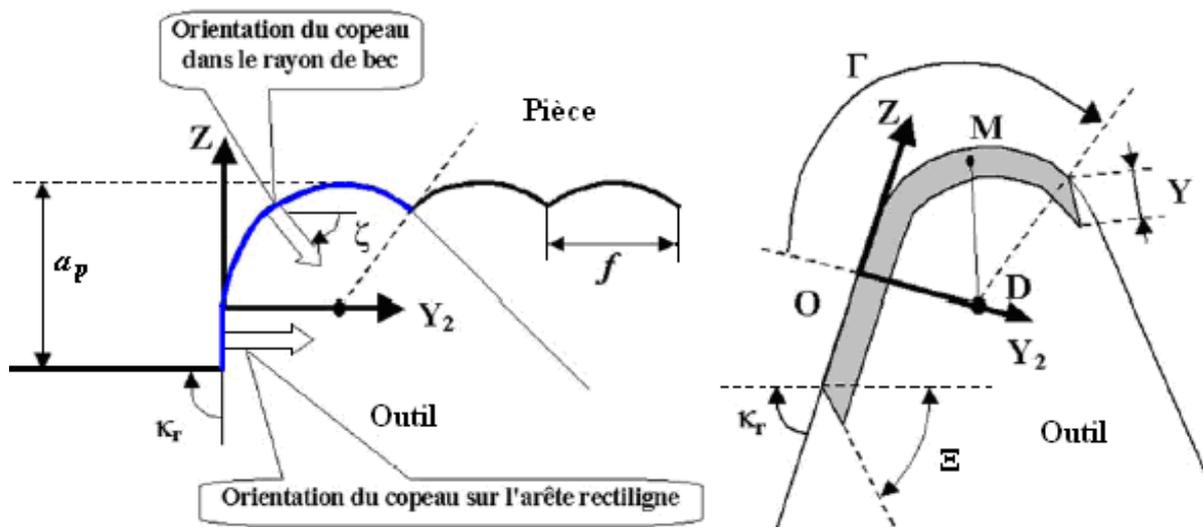


Figure I-27 [28] : Paramètres cinématiques du copeau et répartition du contact sur la face de coupe.

L'angle d'éjection du copeau Ξ peut être défini par la relation [14] :

$$\Xi = \frac{\Gamma_e r_e}{L_{cT}} \left(\frac{1}{\Gamma_0} \int_0^{\Gamma} z dz \right) \quad (\text{I-10})$$

I-7 Etat de surface

I-7-1 Définition

On appelle états de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profilomètres, qui relèvent le profil de la surface (figure I-28). L'état de surface comprend l'ondulation (irrégularités d'ordre deux) et la rugosité (irrégularités d'ordre trois) [29].

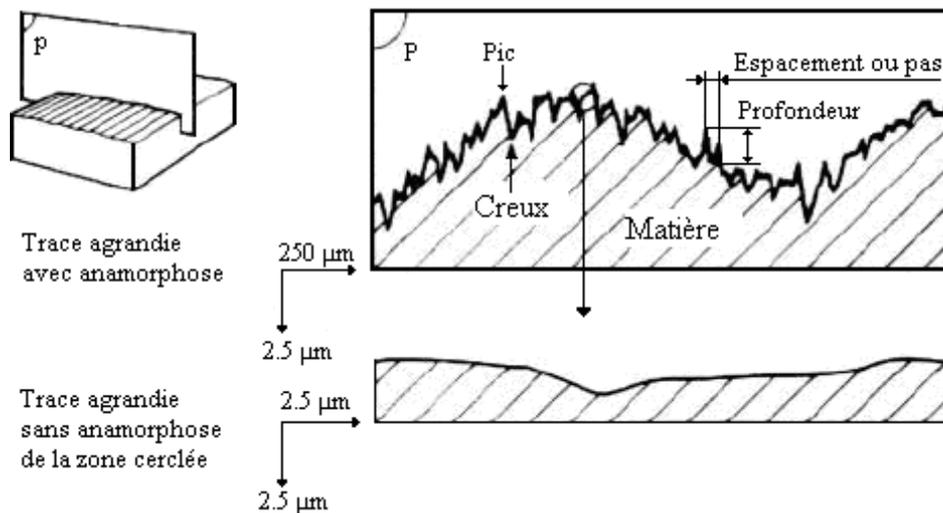


Figure I-28 [29] : Relevé d'un profil d'état de surface.

I-7-2 Classement des défauts de surface

Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils de coupe, à la matière usinée, etc. [30]. Sur la surface d'une pièce obtenue par usinage, on distingue quatre principaux types de défauts, d'ordre macro où microgéométrique [31]:

1. Écarts de forme et de position ;
2. Ondulations (défauts périodiques) ;

3. Signature du procédé d'élaboration : stries, sillons (défaut périodique ou pseudopériodique) ;
4. Défauts accidentels ; arrachements, piqûres, etc.

Les autres défauts :

5. Structure cristalline ;
6. Réseau cristallin ;

I-7-3 La rugosité

La rugosité (figure I-29) comprend les irrégularités le plus souvent sensibles à l'ongle : par exemple, traces d'outil d'une pièce usinée, « grain » d'une surface sablée où revêtue. Pour les pièces mécaniques, ce sont généralement des irrégularités de pas inférieur à $500\ \mu\text{m}$, avec un ratio largeur/profondeur dans la plage 100/1 à 5/1. La rugosité influe sur l'aptitude au frottement (particulièrement pendant la période de rodage), l'usure, l'adhésivité des revêtements, la résistance à la flexion et aux efforts alternés, à la corrosion, etc [29].

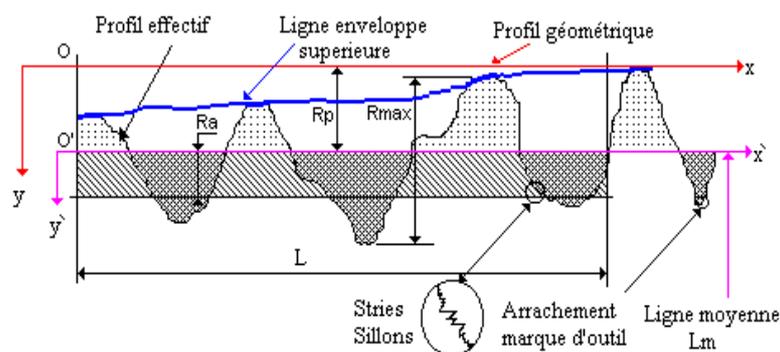


Figure I-29 [30] : La rugosité.

Lors de l'usinage, les facteurs influant sur la rugosité sont l'avance de l'outil, son affûtage, les ondulations de sa face de coupe, le brise-copeaux, le rayon de pointe, la qualité et le filtrage du lubrifiant, le diamantage de la meule en rectification, les vibrations de haute fréquence, etc. [27][31].

Suivant les procédés d'usinage et les conditions de coupe utilisés, la surface usinée est plus ou moins rugueuse. La valeur maximale du défaut de rugosité est indiquée par un chiffre en micron qui augmente quand la profondeur des stries augmente. On peut reconnaître le mode de génération d'une surface à la forme des stries (figure I-30) [32].

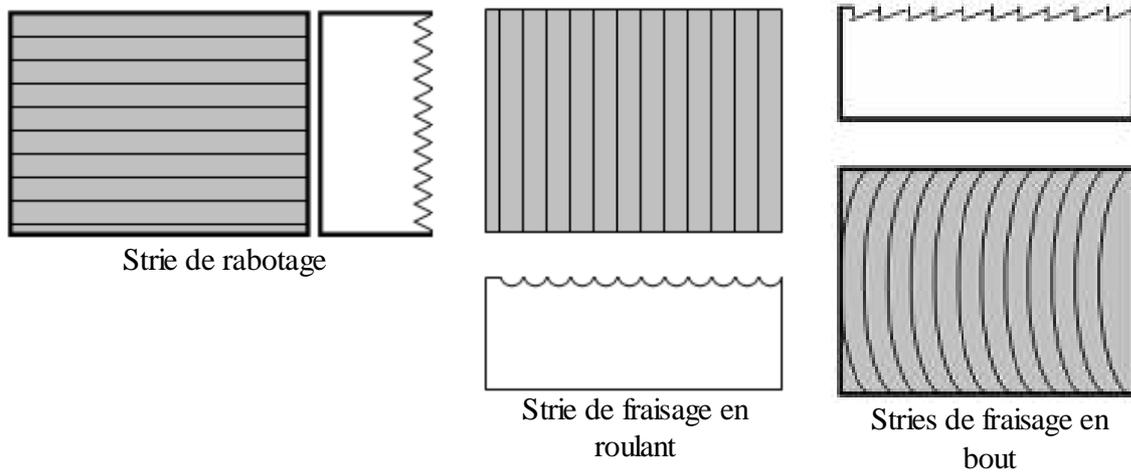


Figure I-30 [32] : Forme des stries obtenus par différents procédés d'usinage.

I-7-4 Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface

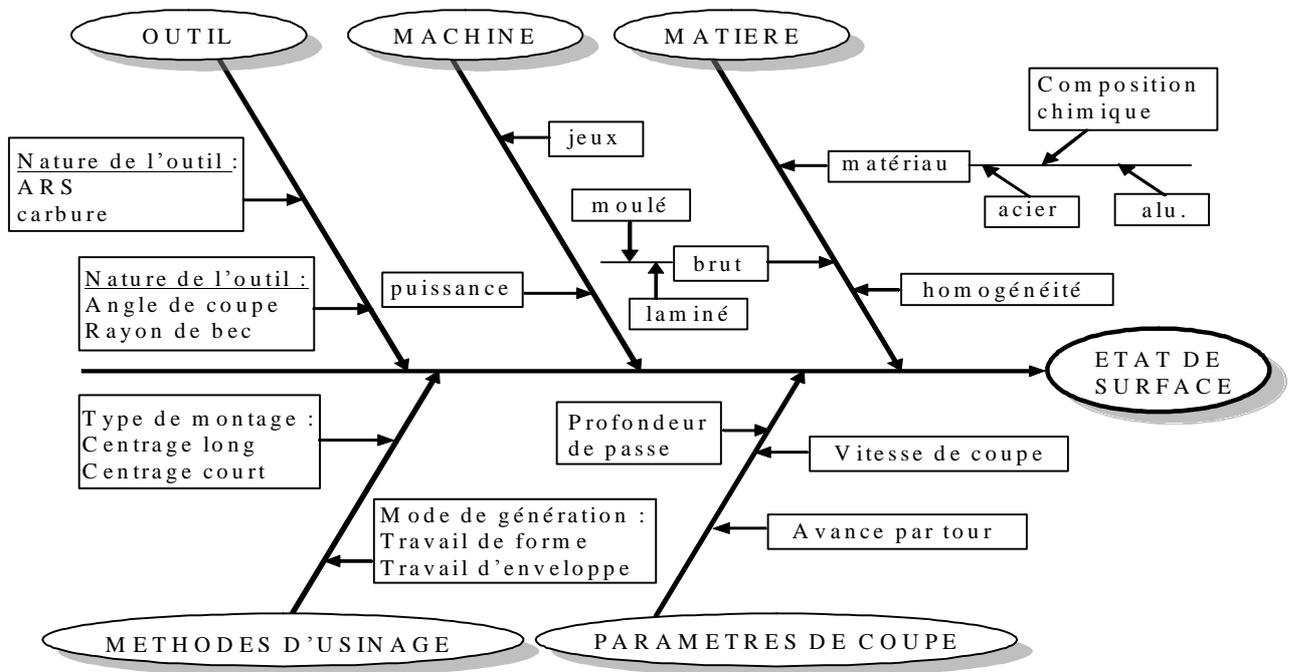


Figure I-31 [24]: Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface.

Parmi les divers facteurs qui affectant l'état de surface d'une pièce mécanique, les facteurs dominants sont la géométrie de l'outil de coupe, l'avance, et les vibrations relatives entre l'outil et la pièce [24]. La figure I-31 représente les différents facteurs qui peuvent influe sur l'obtention de l'état de surface désiré dans le cas d'usinage.

Dans cette étude on s'intéresse à la rugosité théorique (défaut de troisième ordre), qui est influencé principalement par deux paramètres essentiels :

- La géométrie de l'outil de coupe.
- L'avance de l'outil.

Pour cela, nous allons développer un modèle mathématique qui permet la reproduction fidèle du profil théorique d'une surface obtenu par une opération de dressage.

I-8 Conclusion.

Ce premier chapitre, représente un aperçu sur l'usinage des métaux. Les contraintes industrielles liées à l'usinage sont présentées. Les exigences industrielles sont de plus en plus importantes et la modélisation de la coupe doit fournir des moyens d'optimiser le processus d'usinage.

Les principaux procédés d'usinage sont présentés, leur définition et leur principe de travail. Les notions indispensables de la mise en forme par enlèvement de matière sont développées. Un rappel de la définition des paramètres de coupe et un rappel sur l'état de surface et les différents défauts de surface sont effectués.

Chapitre II

Recherche bibliographique

II-1 Introduction

La qualité des pièces mécaniques usinée est généralement déterminée par leurs erreurs de forme et le degré de finition de la surface produite par le processus de fabrication. L'état de surface joue un rôle important dans la résistance à l'usure, la ductilité, et la fatigue pour les pièces usinées et il ne peut pas être négligé dans la phase de conception [3]. La structure géométrique d'une surface usinée est le résultat de la reproduction géométrique et cinématique de la forme et de la trajectoire de la pointe de l'outil [4] [5]. Dans la pratique actuelle, il y a beaucoup de facteurs tels que la matière de la pièce, les conditions de coupe, la géométrie de l'outil, et les vibrations qui influent sur la formation du copeau et la rugosité de la surface usinée. Comment commander le processus d'usinage, et choisir l'outil de coupe approprié pour répondre à l'exigence d'exactitude est une question importante qui constitue un système complexe [3].

L'action de point générateur des divers outils coupants travaillant suivant des modes différents demeure sensiblement la même à quelques détails près n'engageant pas les principes mêmes de la coupe. Pour cette raison, il semble qu'il existe une loi générale qui reflète ce caractère universel du processus de coupe et regroupe toutes les relations entre les facteurs de base de l'usinage par enlèvement de matière sous forme de copeaux et la qualité des surfaces obtenues. Une telle loi présenterait un intérêt primordial pour la pratique et la théorie de la coupe [2].

II-2 Mécanisme de formation du profil microgéométrique des surfaces usinées.

Au première vue, la génération d'une surface usinée faite intervenir autant la forme que les traces laissées par le tranchant au contact de la pièce pendant leur mouvement relatif. La coupe donne lieu à bon nombre de phénomènes, tels que [2] :

- a. déformations élastiques et plastiques du matériau travaillé ;
- b. apparition dans certaines conditions, d'une « arête rapportée », dépôts naissant sur l'arête tranchante de l'outil ;
- c. effets dynamiques qui se manifestent par les vibrations du système mécanique : machine-outil, outil, pièce ;
- d. frottements entre le copeau et la face de dégagement ainsi qu'au contact entre facette d'usure sur le plan en dépouille et la pièce usinée.

L'existence de ces phénomènes justifie l'affirmation que les traces (défauts microgéométrique) laissées par l'outil coupant lors de son passage sur la surface qu'il engendre différeront du tout au tout de celles que l'on aurait pu attendre en limitant l'analyse à la seule action des parties tranchantes de l'outil. En conclusion, les propriétés physico-mécaniques de la couche superficielle ainsi que son aspect microgéométrique (rugosité) mettent en jeu l'action concomitant de tous les facteurs évoqués précédemment.

II-3 Modélisation de la topographie des surfaces usinées.

Afin d'avoir une meilleure compréhension du mécanisme de la génération des surfaces usinées, et leurs relations avec la variation de la géométrie des pièces mécaniques, des modèles mathématiques qui permettent la reproduction fidèle de la structure géométrique des surfaces usinées ont été développées. Ces modèles sont établis sur la base d'une description géométrique de la surface usinée et ils sont fonction des différents paramètres géométrique et cinématique de la coupe. Ces modèles une fois mis au point, permettent l'étude de l'état de surface des pièces usinées et leurs variations en fonction des différents paramètres de coupe qu'ils soit géométrique ou cinématique.

II-3-1 Modèle de Gao et al.

Gao et al. [11], proposent un modèle mathématique qui permet la reproduction des surfaces obtenues par une opération d'usinage. Ce modèle se compose de deux éléments fondamentaux : une grille sinusoïdale qui est désigné sous le nom de la grille d'angle, et un détecteur de pente bidimensionnel. La grille d'angle qui est une superposition des ondes sinusoïdaux dans les deux directions X et Y, a une microstructure tridimensionnelle. Le détecteur de pente bidimensionnel est utilisé pour lire la pente locale du profil de la surface en chaque point le long des axes X et Y. A partir de la lecture des pentes locales du profil de la surface, le détecteur de pente peut fournir les composantes directionnelles x et y de sa position par rapport à la surface.

La figure II-1 représente la surface formée par la grille d'angles tridimensionnelle et le détecteur de pente qui permet de relever la pente locale du profil de la surface en chaque point et de fournir les coordonnées x, y du point p (x, y) qui représentent sa position par rapport à la surface.

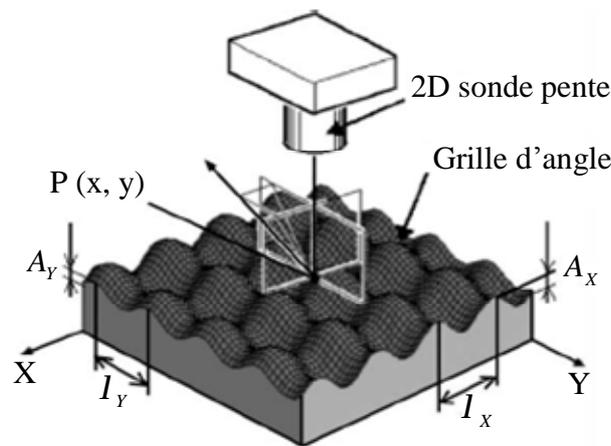


Figure II-1 [11]: Schémas du système utilisé pour le développement du modèle.

La hauteur du profil de la surface au point p, et qui est une superposition des ondes sinusoïdales dans les deux directions X et Y, peut être exprimé par :

$$f(x, y) = A_x \sin\left(\frac{2\cdot p}{I_x} x\right) + A_y \sin\left(\frac{2\cdot p}{I_y} y\right) \quad (\text{II-1})$$

Où A_x, A_y sont les amplitudes des fonctions sinusoïdales dans la direction X et la direction Y, respectivement. I_x et I_y sont les longueurs d'ondes spatiales correspondantes.

Le reflet du rayon laser projeté par le détecteur de pente sur la surface est reçu par ce dernier pour la lecture de la pente locale de la surface au point p. Les deux sorties $a(x)$ et $b(y)$ de détecteur suivant les deux directions, qui indiquent la pente de la surface peut être exprimé par :

$$a(x) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = A_x \frac{2 \cdot p}{I_x} \cos\left(\frac{2 \cdot p}{I_x} x\right) \quad (\text{II-2})$$

$$b(y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = A_y \frac{2 \cdot p}{I_y} \cos\left(\frac{2 \cdot p}{I_y} y\right) \quad (\text{II-3})$$

Les coordonnées x et y de la position de détecteur de pente est alors déterminé à partir des pentes local de la surface $a(x)$ et $b(y)$ comme suite :

$$x = \frac{I_x}{2 \cdot p} \cos^{-1}\left(\frac{I_x}{2 \cdot p \cdot A_x} a(x)\right) \quad (\text{II-4})$$

$$y = \frac{I_y}{2 \cdot p} \cos^{-1}\left(\frac{I_y}{2 \cdot p \cdot A_y} b(y)\right) \quad (\text{II-5})$$

L'amplitude et la longueur spatiale des ondes sinusoïdaux utilisée pour l'obtention du modèle de la surface, sont conçues pour être de l'ordre de 100 nm et 100 μm dans les deux directions X et Y respectivement. Expérimentalement, et suivant les caractéristiques de la machine utilisée pour l'obtention du modèle de la surface, la pièce usinée à un diamètre de 150 mm. Bien que les erreurs du profil de la surface sinusoïdale peuvent être réduites par les résultats de calibrage, la longueur d'onde sinusoïdale doit être de l'ordre des sub-micromètres et l'amplitude doit être de l'ordre des nanomètres.

Lors d'une opération de dressage l'outil de coupe se déplace de l'extérieur vers le centre de la pièce de rayon r_0 , la pointe de l'outil décrit une spirale dont le centre se situe sur l'axe de rotation. Lorsque la rotation de l'axe et l'avance de l'outil dans la direction X sont

synchronisées, la position de pointe de l'outil dans le plan XY peut être exprimée en coordonnées polaires par :

$$(r_i, q_i) = \left(r_0 - \frac{F_i}{pT}, 2p \frac{i}{p} \right) \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{II-6})$$

Où

- F (mm/min) est la vitesse d'avance dans la direction X.
- P (battement/révolution) est le nombre de battement de l'axe de rotation pour chaque révolution.
- T (tour/min) est la vitesse de rotation.
- i représente l'impulsion de i ème rotation.
- N est le nombre total de battements.

Pour générer la surface constituée par la grille sinusoïdale défini dans l'équation (II-1), l'altitude $z(i)$ de chaque point de la surface obtenue par l'opération de dressage est donnée par :

$$z(i) = f(r_i \cos q_i, r_i \sin q_i) = f\left(\left(r_0 - \frac{F_i}{pT}\right) \cos\left(2p \frac{i}{p}\right) \times \left(r_0 - \frac{F_i}{pT}\right) \sin\left(2p \frac{i}{p}\right)\right) \quad (\text{II-7})$$

Le modèle de Gao et al. permet de donnée la hauteur de chaque point de la surface usinée avec la prise en compte des vibrations due à la rotation de l'axe.

II-3-2 Modèle de Cheung et Lee.

Cheung et Lee [10] ont proposé un autre modèle pour la reproduction de la surface usinée obtenue par une opération de dressage, ce modèle est basé sur une description géométrique à 2-D de la surface usinée.

Le profil de la rugosité est estimé sur la base d'un modèle 2-d de la topographie de la surface usinée. Le facteur dominant et pris en considération est les vibrations. Comme l'effet de l'anisotropie provoquée par le changement de l'orientation cristallographique est prise en considération aussi, un déplacement additionnel de l'outil est introduit dans le système de coupe [10].

Dans la modélisation de la topographie d'une surface obtenue par dressage, les données de rugosité sont déterminées à partir du profil de rugosité estimé à un nombre fini de sections radiales équidistantes sur la pièce usinée comme montré dans figure II-2.

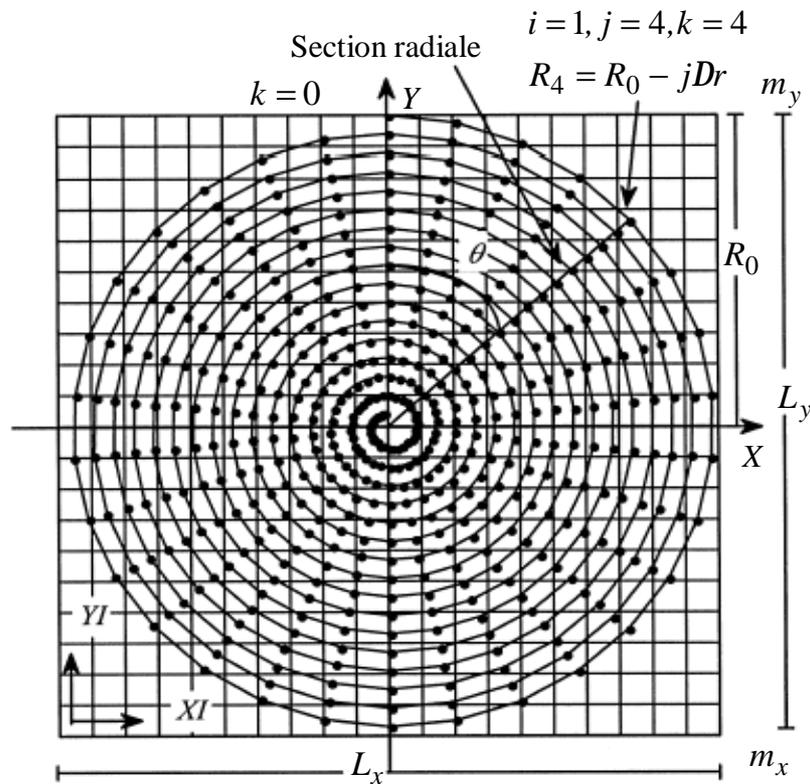


Figure II-2 [10]: Trajectoire de la pointe de l'outil et tracé linéaire des données de la surface.

Dans le modèle 2-D représenté sur la figure II-2, le rapport entre les vibrations de la machine f_z et la vitesse de rotation de l'axe V en tour/min est déterminé par [33] :

$$\frac{60f_z}{V} = a + \varepsilon \quad (\text{II-8})$$

Où a est 0 ou un nombre entier positif et ε est une fraction décimale comprise entre -0.5 et 0.5. Le déphasage \varnothing entre les ondulations successives peut être défini sur la base de ε comme [34]:

$$f = 2pe \quad (\text{II-9})$$

En prenant l'axe des X suivant la direction de l'avance, et l'axe des Z suivant la profondeur de passe, la position de l'outil dans le plans x, z peut être exprimée en terme de déphasage \varnothing et l'avance s par :

$$z_T(x) = z_m + A \left[1 - \cos \left(f \frac{x}{s} \right) \right] \quad (\text{II-10})$$

Où $z_m(x)$ et $z_T(x)$ sont les vibrations induites par la matière et le déplacement total de l'outil. A est l'amplitude des vibrations relatives entre l'outil et la pièce usinée.

Lorsque le point de départ de l'outil est considéré à l'origine (périmètre de la pièce), le profil de l'arrête tranchante de l'outil $z(x)$ peut être exprimé par :

$$z(x) = \frac{x^2}{2R} \quad (\text{II-11})$$

Où R est le rayon du bec de l'outil.

Le profil de la surface usinée est constitué par les mouvements successifs de profil de la pointe de d'outil à des intervalles égaux à l'avance de d'outil le long de la position de l'outil décrit par l'Eq. (II-10). La rugosité de la surface dépend des positions successives du point générateur de l'outil qui débute l'enlèvement de la matière à partir du profil formé par les opérations d'usinage précédentes.

A partir de l'équation (II-10), la position de point générateur de l'outil peut être écrite comme :

$$z_T(i) = z_m(i) + A \{ 1 - \cos [(i-1)f] \} \quad \text{Pour } i = 1, 2, \dots, N. \quad (\text{II-12})$$

N , représente le nombre des spires produites par l'outil sur la surface usinée, il est calculé par :

$$N = \frac{R_0}{s} \quad (\text{II-13})$$

R_0 , représente de rayon de la pièce (figure 4).

Le profil du i ème outil et le profile du $(i+1)$ ème outil utiliser peuvent être déterminés a partir des équations (II-11) et (II-12) :

$$z_i(x_i) = z_T(i) + \frac{[x_i - (i-1)s]^2}{2R} \quad (\text{II-14})$$

$$z_{i+1}(x_{i+1}) = z_T(i+1) + \frac{(x_{i+1} - is)^2}{2R} \quad (\text{II-15})$$

Avec $i = 1, 2, \dots, N-1$

Les intersections $T_{i,i+1}(x_{i,i+1}, H_{i,i+1})$ du profil formé par le i ème et le $(i+1)$ ème outil (figure II-3), $z_i = z_{i+1}$ et $x_i = x_{i+1}$, sont données par :

$$x_{i,i+1} = \frac{R[z_T(i+1) - z_T(i)] + (i+1/2)s^2}{s} \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (\text{II-16})$$

La hauteur $H_{i,i+1}$ de l'endroit d'intersection est déterminée par:

$$H_{i,i+1} = z_T(i+1) + \frac{\{2R[z_T(i+1) - z_T(i)] - s^2\}^2}{8Rs^2} \quad (\text{II-17})$$

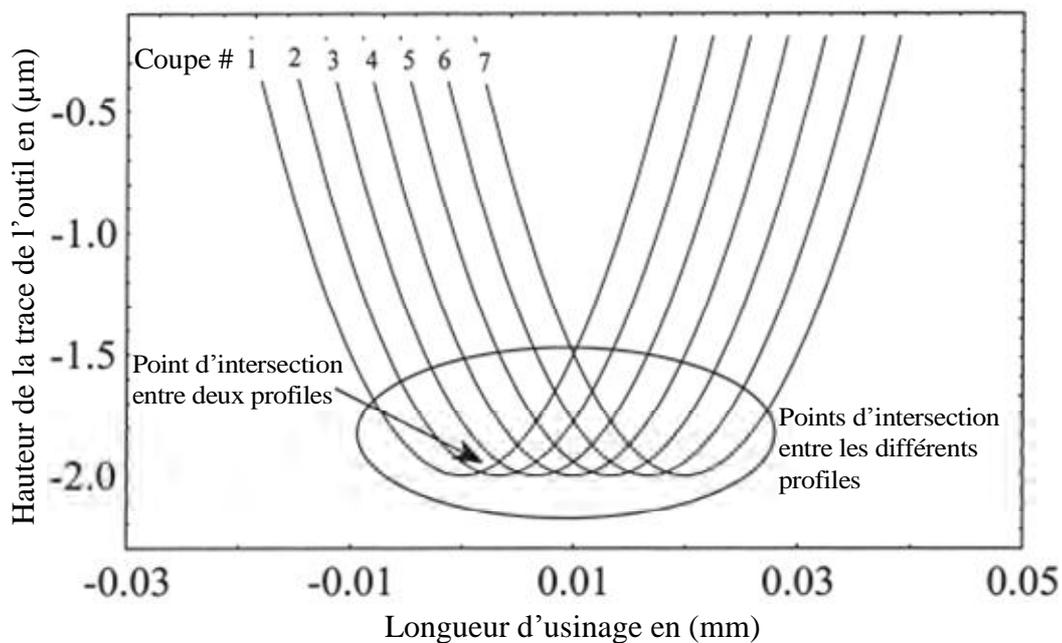


Figure II-3 [33] : Illustration graphique du mouvement idéal de l'outil le long de la direction de l'avance : avance, 10mm/min ; vitesse de l'axe, 3000 tours/min ; profondeur de passe, 2 µm ; rayon de bec, 0.1 mm, aucun vibration relative existe entre l'outil et la pièce.

Dans le modèle développé par Cheung et Lee, les données de la rugosité sont déterminées à partir d'une description géométrique qui décompose la surface dressée en un nombre fini de sections radiale N_p (figure II-2) et qui peut être exprimé par :

$$N_p = [2p / Dq] \quad (\text{II-18})$$

Où Dq est la résolution angulaire adoptée.

La modalisation de la topographie de la surface usinée commence par la détermination de la position de l'outil suivant les trois dimensions [H27]. le déplacement relatif en fonction du temps dans la direction de la coupe $Z_c(t)$ entre l'outil et la pièce peut être exprimé par :

$$Z_c(t) = Z_m(t) + A \sin(2pf_z t - f) \quad (\text{II-19})$$

Le déphasage f peut être calculé à partir des équations (II-8) et (II-9). Lorsque la vitesse de rotation de l'axe et l'avance sont constant, la vitesse angulaire $w = Dq / Dt$ et le nombre des spires $N = R_0 / s$ sont constants, le nombre total N_t des positions occupées par l'outil peuvent être données par :

$$N_t = \frac{2pN}{wDt} \quad (\text{II-20})$$

La forme discrète de déplacement relative entre l'outil et la pièce peut être dérivé à partir des équations (II-19) et (II-20) comme :

$$Z_c(j) = Z_m\left(\frac{jDq}{w}\right) + A \sin\left\{\frac{2pf_z jDq}{w} - f\right\} \text{ pour } j = 0,1,2,\dots,N_t \quad (\text{II-21})$$

Pendant l'opération de dressage, le point générateur de l'outil décrit une spirale dont le centre se trouve sur le centre de la pièce (figure II-2). Simultanément, l'outil se déplace relativement à la pièce avec un mouvement harmonique simple dû aux vibrations relatives existantes entre l'outil et la pièce. La spirale décrite par l'outil dans le plan XY peut être exprimée en coordonnées polaires comme :

$$R_j = R_0 - jDr \quad \text{pour } j = 0,1,2,\dots,N_t \quad (\text{II-22})$$

$$q_j = jDq$$

Les coordonnées correspondantes dans le plan XY sont données par :

$$X_c(j) = (R_0 - jDr) \sin(jDq) \quad \text{pour } j = 0,1,2,\dots,N_t \quad (\text{II-23})$$

$$Y_c(j) = (R_0 - jDr) \cos(jDq)$$

Les équations (II-22) et (II-23) décrivent la trajectoire de l'outil dans les trois dimensions. La position de la pointe de l'outil dans la K ème section radiale peut être transformée à partir du système de coordonnées cartésiennes X-Y-Z à un système de coordonnées polaires $R_k - Z_k$ en considérant que R_k est l'axe suivant le rayon de la k ème section radiale avec $k = 0,1,2,\dots,N_p$.

Dans la k ème section radiale, les coordonnées de la position de la pointe de l'outil dans un système de coordonnées polaires $R_k - Z_k$ peut être obtenue à partir des équations (II-21) et (II-22) comme suit :

$$q_t(i, k) = kDq + 2p(i-1), \quad (\text{II-24})$$

$$r_t(i, k) = R_0 - [k + (i-1)N_p] \Delta R, \quad (\text{II-25})$$

$$Z_T(i, k) = Z_m \left\{ \frac{[k + (i-1)N_p] Dq}{w} \right\} + A \left\{ \frac{2pf_z [k + (i-1)N_p] Dq}{w} - f \right\} \quad (\text{II-26})$$

Avec $i = 1,2,\dots,N$

$$Z_m(i, k) = Z_m \left\{ \frac{[k + (i-1)N_p] Dq}{w} \right\} \quad \text{pour } i = 1,2,\dots,N, \quad (\text{II-27})$$

$$Z_v(i, k) = A \sin \left\{ \frac{2pf_z [k + (i-1)N_p] Dq}{w} - f \right\} \quad \text{pour } i = 1,2,\dots,N, \quad (\text{II-28})$$

Où $Z_m(i, k)$ et $Z_v(i, k)$ représente le déplacement entre l'outil et la pièce due à l'anisotropie de la matière usinée et les vibration de la machine respectivement.

Par conséquent, l'équation (II-26) peut être écrite comme :

$$Z_T(i, k) = Z_m(i, k) + Z_v(i, k) \quad (\text{II-29})$$

La hauteur du profil obtenue par la i ème et la $(i+1)$ ème opération d'usinage, compté à partir de la première opération pour la k ème section radiale, peut être dérivée des équations (II-11), (II-15), et (II-29) comme :

$$Z_{k,i}(r_{k,1}) = Z_T(i, k) + \frac{[r_{k,i} - (i-1)s]^2}{2R} \quad (\text{II-30})$$

$$Z_{k,i+1}(r_{k,i+1}) = Z_T(i, k) + \frac{[r_{k,i+1} - is]^2}{2R} \quad (\text{II-31})$$

Où $i = 1, 2, \dots, N-1$ et $(r_{k,i}, Z_{k,i})$ sont les coordonnées de chaque point $M_{k,i}$ du profil de la surface de la k ème section radiale de la pièce, obtenue par la i ème opération d'usinage.

Au points d'intersection $T_{k,i,i+1}(r_{k,i,i+1}, H_{k,i,i+1})$, entre les profils obtenues par la i ème et la $(i+1)$ ème opération d'usinage pour la k ème sections radiale, c'est à dire, $Z_{k,i} = Z_{k,i+1}$ et $r_{k,i} = r_{k,i+1}$:

$$r_{k,i,i+1} = \frac{R[Z_T(i+1, k) - Z_T(i, k)] + \left(i - \frac{1}{2}\right)s^2}{s} \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (\text{II-32})$$

A partir des équations (II-30) et (II-31), la hauteur $H_{k,i,i+1}$ de l'endroit d'intersection entre les profils de la i ème et la $(i+1)$ ème opération pour la k ème sections radiales est déterminée par :

$$H_{k,i,i+1} = Z_T(i+1, k) + \frac{[r_{k,i,i+1} - is]^2}{2R}$$

$$= Z_T(1+1, k) + \frac{\left\{ 2R[Z_T(i+1, k) - Z_T(i, k)] - s^2 \right\}^2}{8Rs^2} \quad (\text{II-33})$$

Avec $i = 1, 2, \dots, N-1$.

Il est possible de reproduire la topographie de la surface par l'application des équations (II-32) et (II-33) pour toutes les sections radiales, c'est-à-dire $k = 1, 2, \dots, N_p$, et les tracer sur les éléments extérieurs d'un treillis de croix (voir la figure II-2) définie comme suit:

$$XI = \left[\frac{[L_x / 2 + r_k \sin(kDq)]}{L_x} m_x \right] \quad (\text{II-34})$$

$$YI = \left[\frac{[L_y / 2 + r_k \cos(kDq)]}{L_y} m_y \right] \quad (\text{II-35})$$

$$ZI = Z_k \quad (\text{II-36})$$

Où $k = 0, 1, 2, \dots, N_p$, m_x et m_y sont le nombre des éléments de la surface suivant les directions X et Y respectivement. L_x et L_y sont la longueur et la largeur de la région simulé.

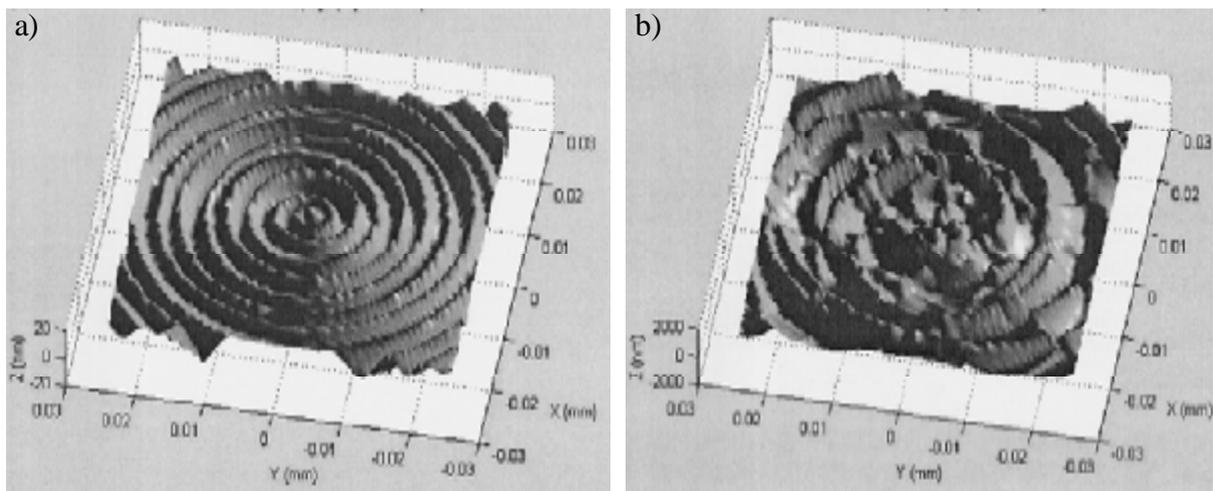


Figure II-4 [33] : Image virtuelle de la topographie d'une face dressée

(Modèle 3D de Cheung et Lee)

a – Sans prise en compte des vibrations.

b - Avec la pris en compte des vibrations.

Dans des conditions idéales, le profil de la rugosité est formé par la répétition du profil du point générateur de l'outil à des intervalles égale à l'avance par tour de la pièce [33]. Mais il existe toujours des vibrations relatives entre l'outil de coupe et la pièce usinée. Avec l'utilisation du modèle de Cheung et Lee, l'image virtuelle (obtenue par simulation numérique) d'une surface usinée obtenue par une opération de dressage dans différentes conditions de coupe est représentée sur la figure II-4.

Le modèle établi par Cheung et Lee permet de reproduire fidèlement la surface obtenue par une opération de dressage avec ou sans la prise en compte des vibrations relatives entre l'outil et la pièce usinée. Ce modèle permet aussi l'étude de l'évolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe, l'avance, le rayon de bec, et la profondeur de passe.

II-4 Détermination théorique de la rugosité

II-4-1 Cas de fraisage

1. Lors d'une opération de fraisage de face et dans des conditions idéales, le profil de la rugosité théorique mesuré parallèlement à la direction de l'avance et coïncident avec l'axe de rotation de la fraise est une fonction de l'avance, et de l'angle de concavité du tranchant (figure II-5).

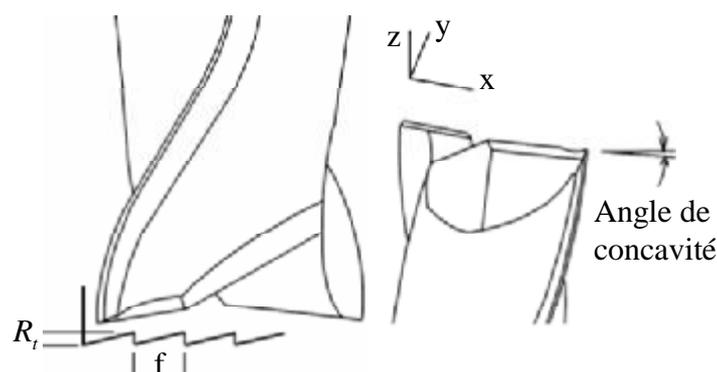


Figure II-5 [3]: Profil théorique de la surface ($R=0$).

De la figure II-5, pour un rayon de tranchant $R=0$, la valeur de la rugosité est donnée par [3] :

$$R_t = \frac{f}{\cot k} \quad (\text{II-37})$$

Où f est l'avance par dent, et k est l'angle de concavité.

La rugosité arithmétique moyenne R_a peut être écrite comme suivant ;

$$R_a = \frac{f}{4 \cot k} \quad (\text{II-38})$$

L'amélioration de l'état de surface peut être réalisé par l'utilisation d'un petit angle de concavité et des petites avances dans le modèle théorique.

2. Avec une fraise à faux rond (figure II-6), la valeur de la rugosité théorique est donnée par [35] :

$$R_t = 125 \frac{f_z^2 \cdot Z^2}{R} \quad (\text{II-39})$$

Avec :

Z ; nombre des dents.

f_z ; avance par dent.

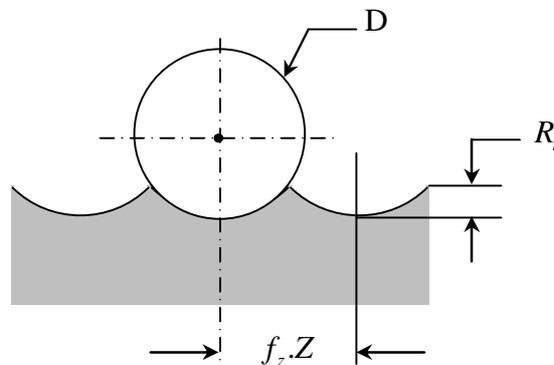


Figure II-6 [35][36]: Rugosité théorique.

3. Avec une fraise sans faux-rond, la surface produite est une suite de cycloïdes et la rugosité théorique s'exprime par [27] :

$$R_t = 125 \frac{f_z^2}{\left[\frac{D}{2} \pm \frac{f_z \cdot Z}{p} \right]} \quad (\text{II-40})$$

Avec : + ; fraisage en opposition, - ; fraisage en avalant.

II-4-2 Cas de tournage

Dans le cas de tournage, la profondeur totale de la rugosité théorique peut être calculée de la manière suivante [2]:

- a. Avec un outil-couteau sans rayon pratiqué à l'extrémité du bec ($r_e = 0$, figure II-7), R_t répond à la relation :

$$R_t = \frac{f}{\cot k_r + \cot k_{r1}} \quad (\text{II-41})$$

Où :

f ; Avance en mm/tr.

k_r ; Angle de direction principale.

k_{r1} ; Angle de direction secondaire.

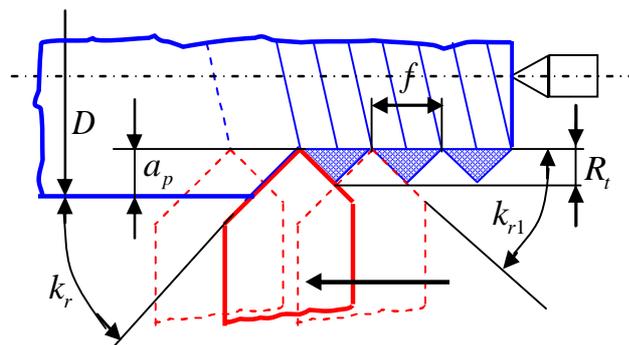


Figure II-7: Tournage avec outil sans rayon de raccordement sur le bec ($r_e = 0$).

L'absence de rayon de raccordement sur le bec est intéressante pour l'étude expérimentale et la pratique industrielle car l'angle de dépouille et l'angle de direction conservent respectivement une valeur constante en tout point de l'arrête de coupe, ce qui facilite la déformation de la matière et contribue à une usure uniforme sur toute la partie active du tranchant. La relation (II-41) permet de remarquer qu'en réduisant l'angle d'attaque, R_t diminue.

- b. La figure (II-8) représente le cas le plus courant dans la pratique ; le profil théorique de la surface usinée est engendré par les deux arêtes tranchantes limitées aux points A et C et la zone courbe de rayon r_e marquée par le point B.

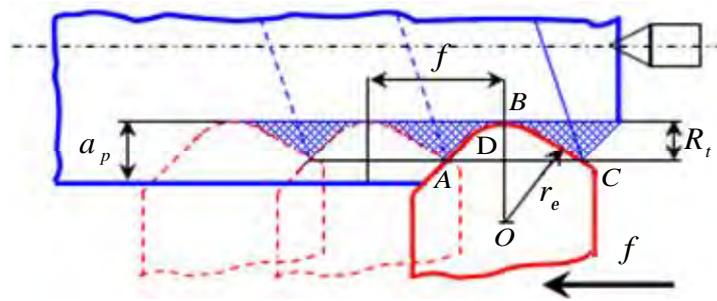


Figure II-8: Génération de profil par la portion ABC du tranchante.

La hauteur théorique d'aspérités répond à la relation (valable aussi pour le fraisage en roulant) :

$$R_t = r_e - \sqrt{r_e^2 - \frac{f^2}{4}} \quad (\text{II-42})$$

Dans ce cas, $k_r > \arcsin \frac{f}{2r_e}$ et $k_{r1} > \arcsin \frac{f}{2r_e}$

On pourra aussi utiliser la formule approchée ;

$$R_t = \frac{f^2}{8r_e} \quad (\text{II-43})$$

c. Lorsque les deux tranchants participent à la génération de R_t (figure II-9), la hauteur des aspérités devient :

$$R_t = \frac{1}{\cot k_r + \cot k_{r1}} \times \left[f - r_e \left(\operatorname{tg} \frac{k_r}{2} + \operatorname{tg} \frac{k_{r1}}{2} \right) \right] \quad (\text{II-44})$$

Avec $k_r < \arcsin \frac{f}{2r_e}$ et $k_{r1} < \arcsin \frac{f}{2r_e}$.

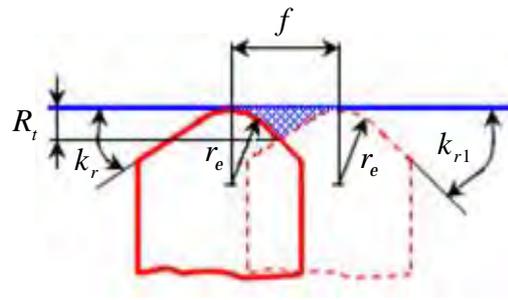


Figure II-9 : Génération du profil par les deux arrêtes tranchantes.

- d. Si le bec de l'outil est arrondi dissymétrique (figure II-10), la moitié droite est constituée d'un arc de cercle de rayon r_e tandis que la moitié gauche comporte une partie courbe de rayon r_e raccordée à une partie rectiligne sous l'angle k_r . On a pour R_t :

$$R_t = r_e(1 - \cos k_r) + f \sin k_r \cos k_r - \sin k_r \sqrt{f \sin k_r (2r_e - f \sin k_r)} \quad (\text{II-45})$$

Avec $k_r < \arcsin \frac{f}{2r_e}$ et $k_{r1} > \arcsin \frac{f}{2r_e}$.

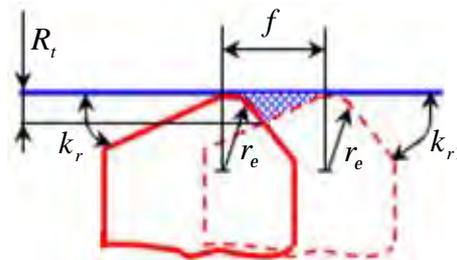


Figure II-10 : Bec de l'outil dissymétrique.

- e. Enfin, dans le cas représenté sur la figure II-11, donc symétrique du cas précédent, on peut écrire R_t sous la forme :

$$R_t = r_e(1 - \cos k_{r1}) + f \sin k_{r1} \cos k_{r1} - \sin k_{r1} \sqrt{f \sin k_{r1} (2r_e - f \sin k_{r1})} \quad (\text{II-46})$$

Avec $k_r = \arcsin \frac{f}{2r_e}$ et $k_{r1} = \arcsin \frac{f}{2r_e}$.

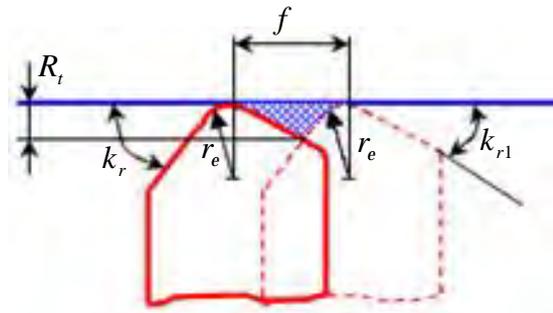


Figure II-11 : Bec de l'outil dissymétrique inversé par rapport à d .

f . Pour le tournage de surfaces sphériques et toriques à l'aide d'un outil à pointe vive, $r_e = 0$ (figure II-12, a) la hauteur et la profondeur totale de la rugosité théorique R_t répond à la relation suivante :

$$R_t = R \left[\sqrt{1 + 4 \sin^2 \frac{q}{2} \left(\frac{\sin^2 \left(\frac{q}{2} + k_{r1} \right)}{\sin^2 (q + k_r + k_{r1})} \right)} + 4 \sin \frac{q}{2} \sin c \frac{\sin \left(\frac{q}{2} + k_{r1} \right)}{\sin (q + k_r + k_{r1})} - 1 \right] \quad (\text{II-47})$$

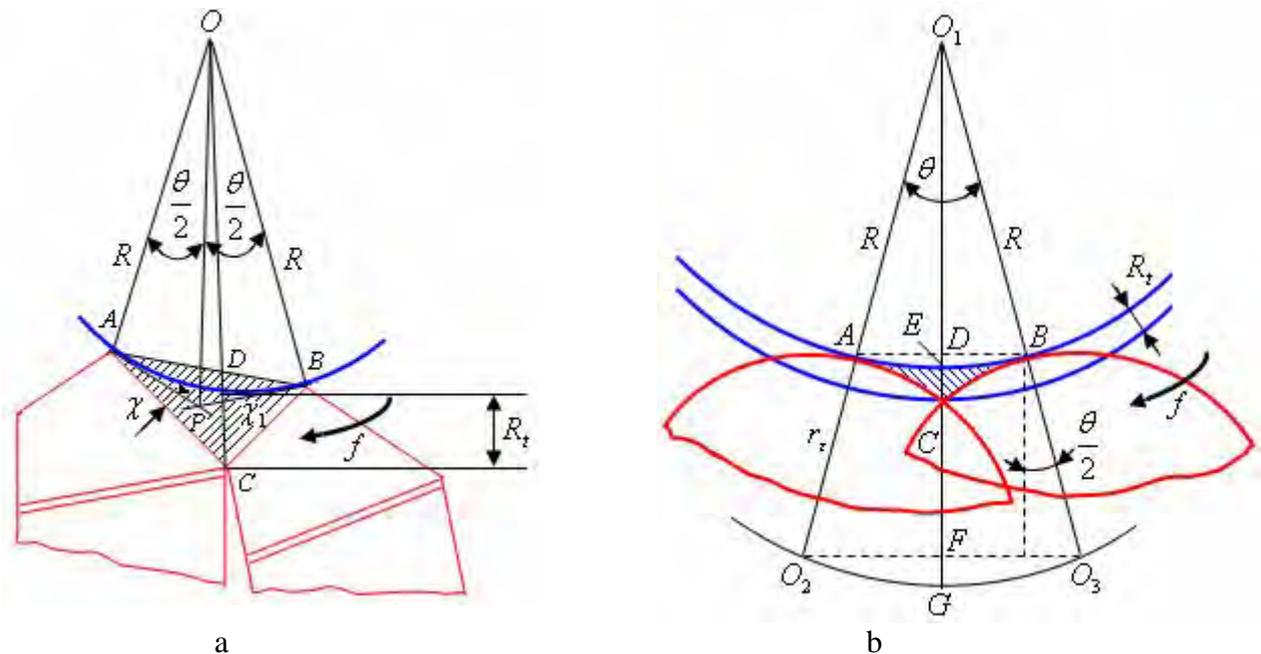


Figure II-12 : Hauteur théoriques des aspérités sur pièces sphérique ou toriques

a. Outil à pointe vive ($r_e = 0$) ; b. Outil à pointe arrondie ($r_e > 0$) ;

Où R (mm) : Rayon de la pièce usinée.

θ (rd) : Déplacement angulaire de l'outil pour une rotation de la pièce.

La figure II-12, a montre deux positions successives de l'outil distantes de l'avance (f). L'angle θ s'écrit alors :

$$q = \frac{f}{R}$$

Avec : f (mm/tr) ; Avance de l'outil.

On remarquera à partir de la relation II-47 que pour une valeur constante de l'angle θ , la profondeur total de la rugosité augmente avec le diamètre de la pièce usiné. Parallèlement, pour un même θ , plus le diamètre tourné sera grande et plus l'avance de l'outil devra l'être.

g. Dans le cas où l'outil aurait sa pointe arrondie (figure II-12, $b ; r_e > 0$) la hauteur théorique de la rugosité sur pièces sphériques ou toriques devient :

$$R_t = r_e \cos \frac{q}{2} - R \left(1 - \cos \frac{q}{2} \right) - \sqrt{r_e^2 - (r_e + R)^2 \sin^2 \frac{q}{2}} \quad (\text{II-48})$$

II-5 Etudes de la rugosité.

Le processus de la génération de la surface pendant l'usinage des pièces mécanique et l'influence des différents paramètres de coupe et la géométrie de l'outil ont été étudiés par un certain nombre de chercheurs.

Gokkaya et Muammer [7] ont étudié l'influence du rayon de bec de l'outil de coupe, la profondeur de passe, et l'avance sur la qualité d'état de surface des pièces mécanique usinée. Pour leurs étude ils ont utilisé un outil de coupe en carbure et un acier de type AISI 1030 tourner a sec sur une machine-outil à commande numérique avec trois différents rayons de bec (0.4, 0.8 et 1.2 mm). Les résultats expérimentaux obtenus montre que le taux d'amélioration de la rugosité est de l'ordre de 293 % lorsque le rayon de bec est augmenté de 0.4 à 1.2 mm. Quand l'avance de l'outil est réduite de 0.35 mm/tr à 0.15 mm/ tr, la rugosité est amélioré par un taux de 313 %, et la réduction de la profondeur de passe 0.5 mm à 0.25 mm permet d'obtenir une amélioration de la rugosité de 23%.

Pour analyser le processus de génération de la rugosité dans le tournage d'ultra-précision, Cheung et Lee [24] proposent un modèle basé sur un système de simulation numérique. Le système de simulation est basé sur un modèle de la rugosité qui prend en considération l'effet de la géométrie de l'outil, les paramètres de coupe, et les vibrations. Ce modèle est évalué par une série de coupe expérimentale. Les résultats indiquent que le système de simulation peut bien prédire les paramètres de la rugosité et le profil de la surface obtenue par le tournage avec un outil en diamant et dans diverses conditions de coupe. Avec l'utilisation de l'analyse spectrale, le système permet également d'analyser les effets des vibrations sur la qualité de la surface des pièces usinées et diagnostiquer les erreurs de la machine.

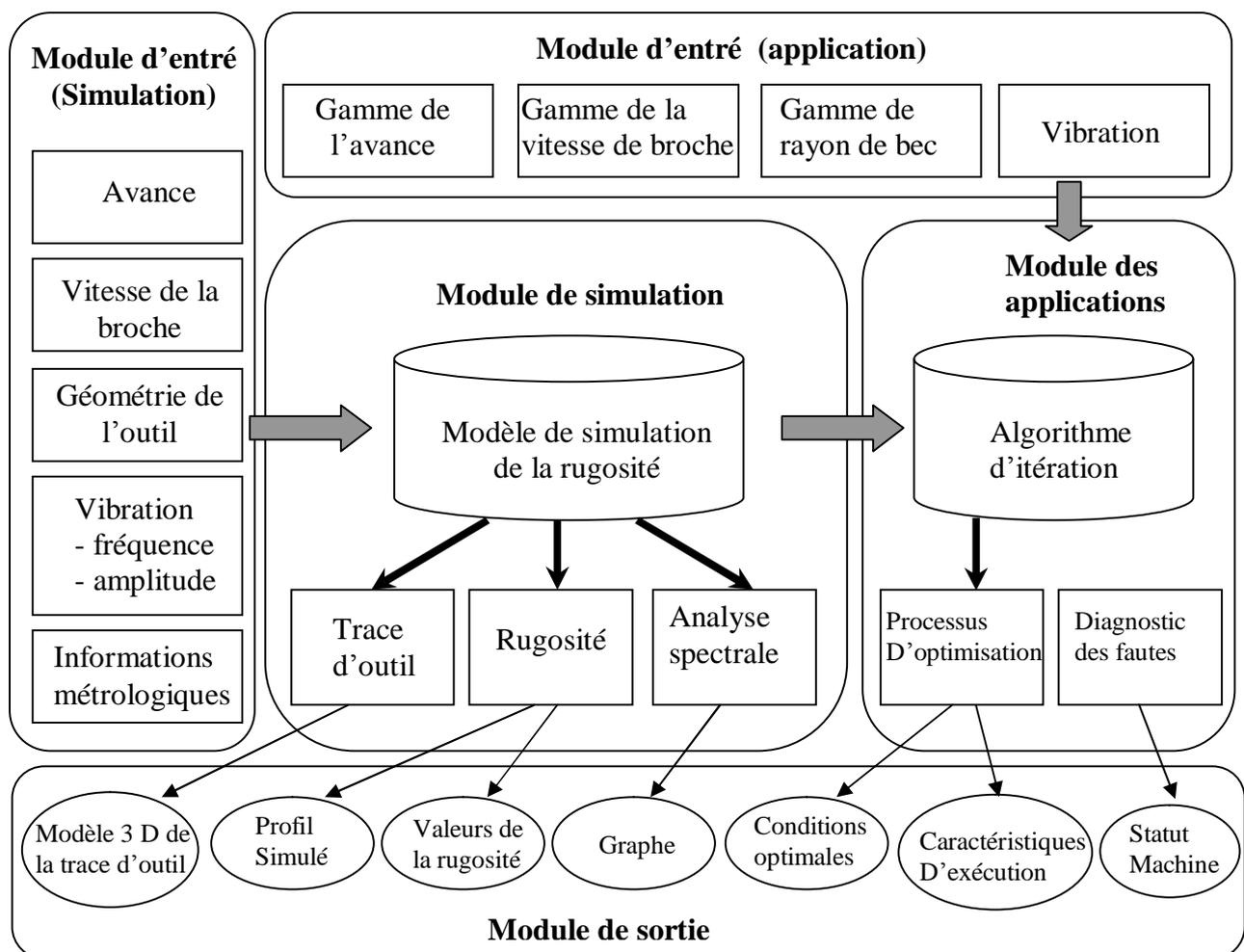


Figure II-13 [24] : Diagramme schématisé du système de simulation de Cheung et Lee.

Franco, Estrems, et Faura [8] dans leurs études concernant la rugosité, développent un modèle numérique qui permet de prédire le profil et la rugosité d'une surface obtenue par fraisage de face en fonction de la géométrie de l'outil, l'avance, et les erreurs de l'outil.

Wang et Chang [3] proposent une analyse de l'influence des conditions de coupe et de la géométrie de l'outil sur une surface obtenue par une opération de fraisage (AL2014-T6). Les paramètres considérés sont la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, et l'angle de concavité des dents de la fraise. Les modèles de la surface pour la coupe a sec et avec l'utilisation d'un lubrifiant ont été construits par la méthode de réponse des surfaces (RSM) et les résultats expérimentaux. Ils montrent que la valeur de la rugosité augmente avec l'augmentation de l'avance et de l'angle de concavité.

Dans leurs études au sujet de la variation de la rugosité en fonction des paramètres de coupe et de la géométrie de l'outil, Kopac et Bahor [7], montre que les outils de coupe qui possèdent un grand rayon de bec permettent d'avoir des petites valeurs de la rugosité.

II-6 Conclusion.

Le mécanisme de formation de profil microgéométrique sur les surfaces usinée dépend directement des paramètres cinématiques et géométriques de la coupe. En plus de ces paramètres, il existe un nombre de phénomènes tels que : déformations élastiques et plastiques, effets dynamiques qui se manifestent par des vibrations du système mécanique, ... etc., mise en jeu par le processus de la coupe et qui influent sur le mécanisme de génération des surfaces. Pour étudier ce mécanisme, des modèles mathématiques englobent les effets de toutes les paramètres évoqués précédemment ont été développés. Ces modèles mis au point permettent de reproduire ou de prédire fidèlement la topographie de la surface usinée dans différentes conditions de coupe et étudier la variation du profil de la surface en fonction de chaque paramètre.

Chapitre III

Impact des paramètres de coupe sur la géométrie des pièces mécaniques

III-1 Introduction.

L'introduction sur une grande échelle de l'automatisation des processus d'usinage montre que la qualité des pièces mécaniques élaborées et celle des outils de coupe susceptibles de répondre aux besoins de la technologie moderne (rendement et productivité élevés tout en respectant les états de surfaces spécifiés) ont un rôle de premier plan en construction mécanique. C'est pourquoi la connaissance la plus intime des relations exprimant l'influence des facteurs de base de l'usinage par outil coupant (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, géométrie de l'outil, etc.) sur l'état de la surface travaillée, représente aujourd'hui un intérêt primordial pour la pratique et la théorie de la coupe [2].

Lors d'une opération d'usinage, la qualité de la pièce usinée dépend directement des paramètres de coupe qui sont la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la géométrie de l'outil. Dans l'industrie, le choix de ces paramètres de coupe est encore largement basé sur les connaissances acquises au cours des années et sur des essais longs et coûteux. Un mauvais choix des paramètres de coupe peut générer des effets indésirables tels que des vibrations importantes, des efforts excessifs, une usure prématurée de l'outil, conduisant à des qualités de surfaces et des tolérances de fabrication médiocres [37].

Pour pouvoir reproduire une surface usinée (par simulation numérique) obtenue par une opération d'usinage, il est nécessaire de développer un modèle mathématique qui englobe l'influence des paramètres de coupe et la géométrie de l'outil.

Dans ce chapitre, on présente le développement d'un modèle mathématique qui permet de donner l'image virtuelle de la surface d'une pièce obtenue par usinage (tournage/dressage). Et comme nous nous intéressons à la rugosité théorique qui est affectée principalement par l'avance et le rayon de bec de l'outil, le modèle sera établi en tenant compte de ces deux paramètres. Cependant, les modèles élaborés jusqu'à maintenant ont considéré d'autres facteurs comme la vitesse de coupe et les vibrations.

III-2 Elaboration du modèle.

III-2-1 Cas traité : Le dressage

Le modèle mathématique proposé va reproduire l'image virtuelle d'une surface dressée. Lors d'une opération de dressage, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne perpendiculaire à l'axe de rotation, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère une surface orthogonale à l'axe (figure III-1).



Figure III-1 [22]: Dressage d'un tube.

III-2-2 Description et modélisation

Dans le cas d'une opération de dressage d'une surface sur un tour parallèle (figure III-2), le point générateur de l'outil en se déplaçant décrit une spirale dont le centre est sur l'axe de rotation de la broche. Cette forme de spirale est due au mouvement rectiligne continu de l'outil de coupe d'une part, et la rotation de la pièce d'autre part.

La forme de la surface usinée dépend des caractéristiques géométriques de l'arrête tranchante de l'outil et de l'avance. Dans ce cas, on cherche à connaître l'altitude Z_i d'un point M_i dont les coordonnées sont X_i et Y_i dans le plan de mesure, définit comme le plan tangent extérieur dans un repère $R(o,x,y,z)$.

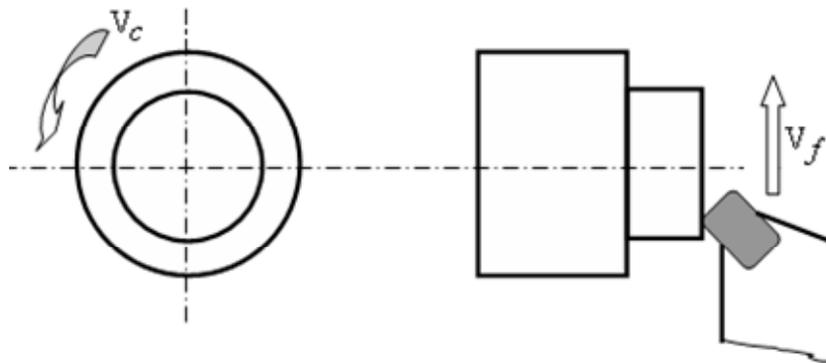


Figure III-2 : Description de l'usinage de la surface.

Etant donné que le point générateur de l'outil décrit une spirale dont l'origine se trouve sur le périmètre de la pièce et le centre sur l'axe de la broche. La distance entre les crêtes correspond à l'avance par tour de l'outil (f). Les sillons sont générés par le bec d'outil. Dans le cas d'une arrête tranchante arrondie, ces sillons sont des portions de cercles de rayon r_ϵ en première approximation (figure III-3).

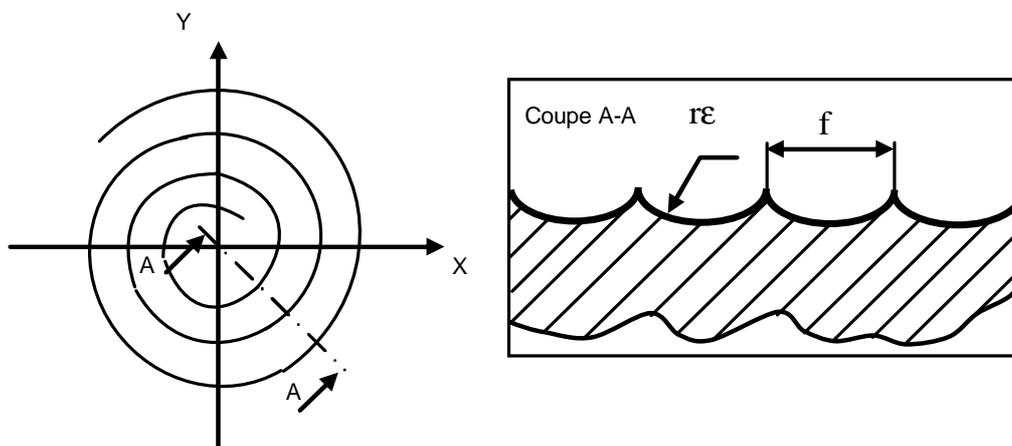


Figure III-3 : Modélisation de l'usinage de la surface. 1^{ère} approximation.

Condition d'application :

Dans le cas où les sillons générés par le bec de l'outil sont des portions de cercles, il faut que l'avance de l'outil soit trop importante (figure III-4). Cela se traduit géométriquement par :

$$f < f_{\max} = 2 r_e \sin(k_r')$$

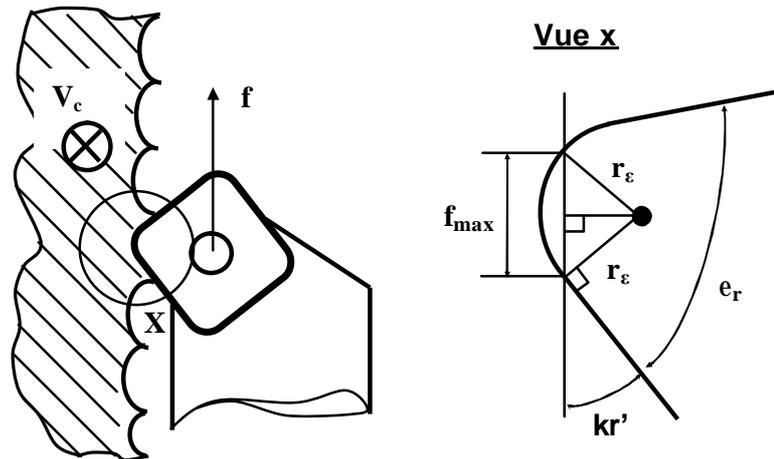


Figure III-4 : Modélisation si $f < f_{\max} = 2 r_e \sin(k_r')$.

Dans le cas contraire où la forme de l'arrête tranchante de l'outil est une combinaison d'une portion de cercle complétée par une ou deux portions linéaires en fonction de la géométrie de l'outil, le sillon sera une combinaison des deux formes précédentes (figure III-5).

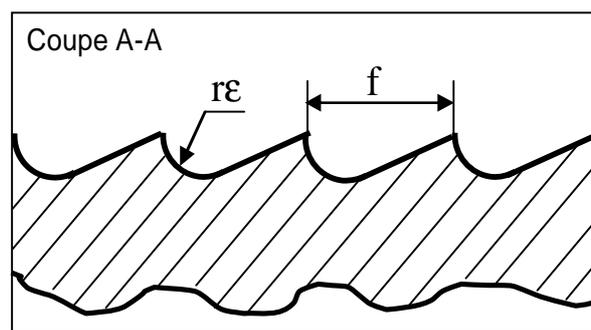


Figure III-5 : Modélisation de la surface usinée ; 2^{ème} approximation.

Condition d'application :

Cette situation impose une avance: $f > f_{\max} = 2 r_e \sin(k_r')$, ce qui correspond au cas d'étude où la forme du sillon obtenue est à la fois une portion de cercle et une droite (figure III-6).

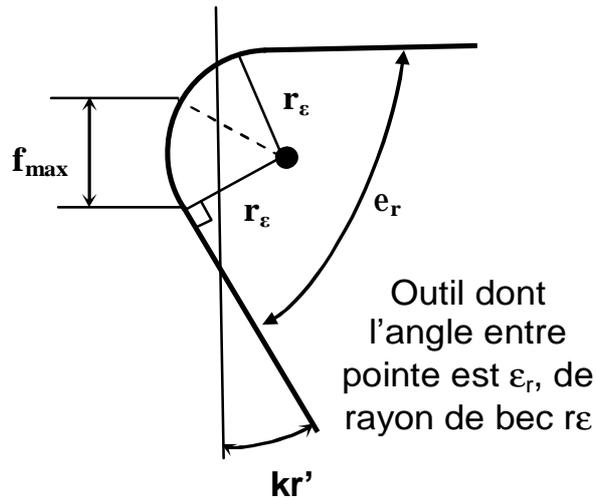


Figure III-6 : Modélisation si $f > f_{\max} = 2 r_\epsilon \sin(k_r)$.

Dans cette étude, nous limitons notre travail au premier cas, c'est-à-dire, lorsque les sillons générés par le bec de l'outil sont des portions de cercles de rayon r_ϵ .

III-2-3 Calcul de l'altitude Z_i de point M_i dans le cas où $f < f_{\max}$.

L'altitude Z_i de point M_i dépend directement des paramètres géométriques de l'outil tel que le rayon de bec r_ϵ mais aussi des paramètres cinématique de la coupe tels que l'avance f . Elle s'exprime aussi en fonction de nombre des spires effectuées par l'outil qui est donnée par :

$$N = \frac{Rp}{f} \tag{III-1}$$

Où ; Rp est le rayon de la pièce usinée.

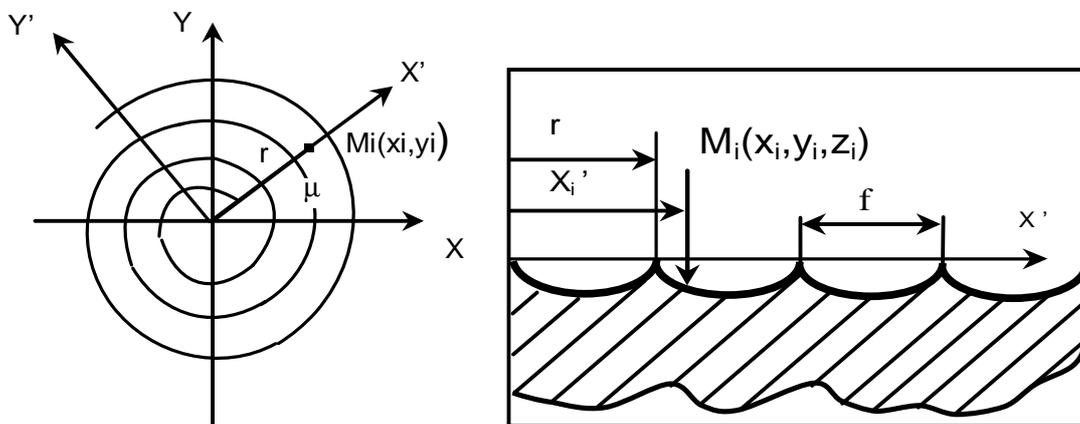


Figure III-7 : Calcul de l'altitude Z_i d'un point M_i .

La mise en équation de la spirale en coordonnées polaires dans le cas où $f < f_{\max}$ (figure III-7) nous donne :

$$r = \frac{m \cdot f}{2 \cdot p} \quad (\text{III-2})$$

1. Calcul de la coordonnée x'_i et de la distance x

x'_i , représente la coordonnée de point M_i suivant l'axe des X dans un repère $O(x', y', z)$.

Elle représente aussi la distance de point M_i du centre de la spirale (figure III-8).

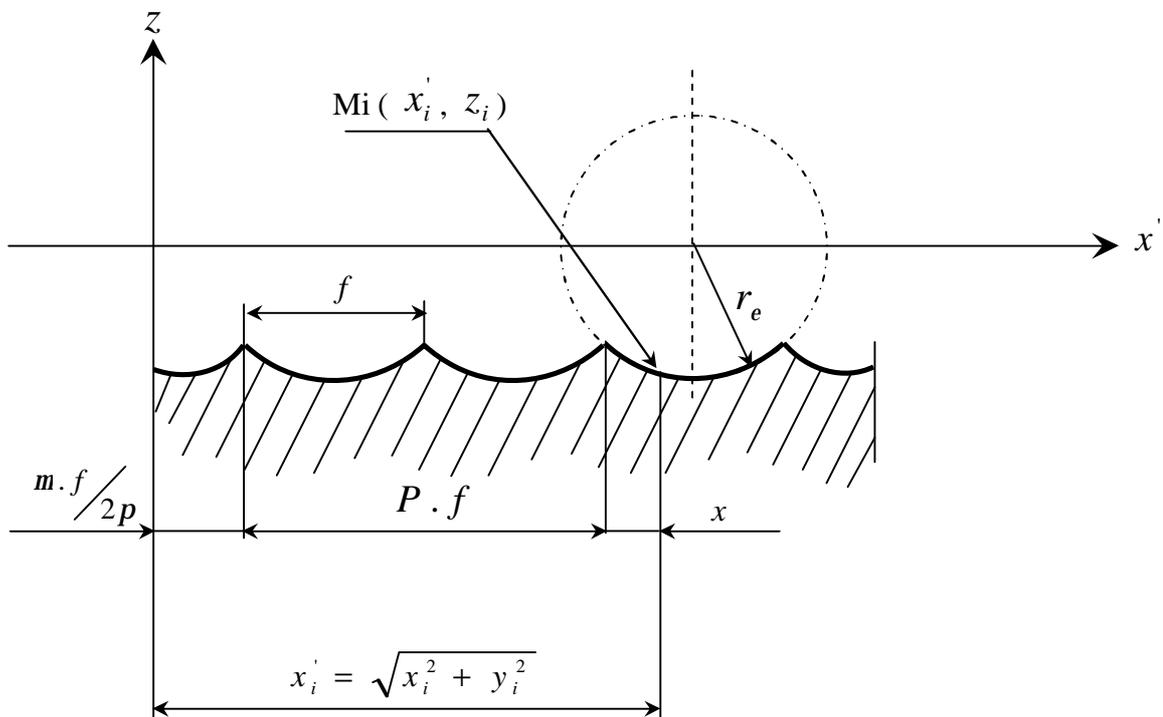


Figure III-8 : Représentation de x'_i et de la distance x .

Dans le repère $O(x', y', z)$, la distance x'_i de point M_i à partir du centre de la spirale peut s'exprimer par :

$$x'_i = \frac{m \cdot f}{2p} + P \cdot f + x \quad (\text{III-3})$$

D'où

$$x = x_i' - \frac{m \cdot f}{2 \cdot p} - P \cdot f \quad (\text{III-4})$$

Et on sait que la distance x_i' , dans le repère O (x, y, z) est donnée par :

$$x_i' = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (\text{III-5})$$

Le changement de x_i' par son expression dans (III-4) nous donne :

$$x = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \frac{m \cdot f}{2 \cdot p} - P \cdot f \quad (\text{III-6})$$

Le paramètre P représente la partie entière du nombre des spires, et il est exprimé par :

$$P = \text{partie entière} \left(\frac{x_i'}{f} - \frac{m}{2 \cdot p} \right) \quad (\text{III-7})$$

2. Calcul de l'altitude Z_i .

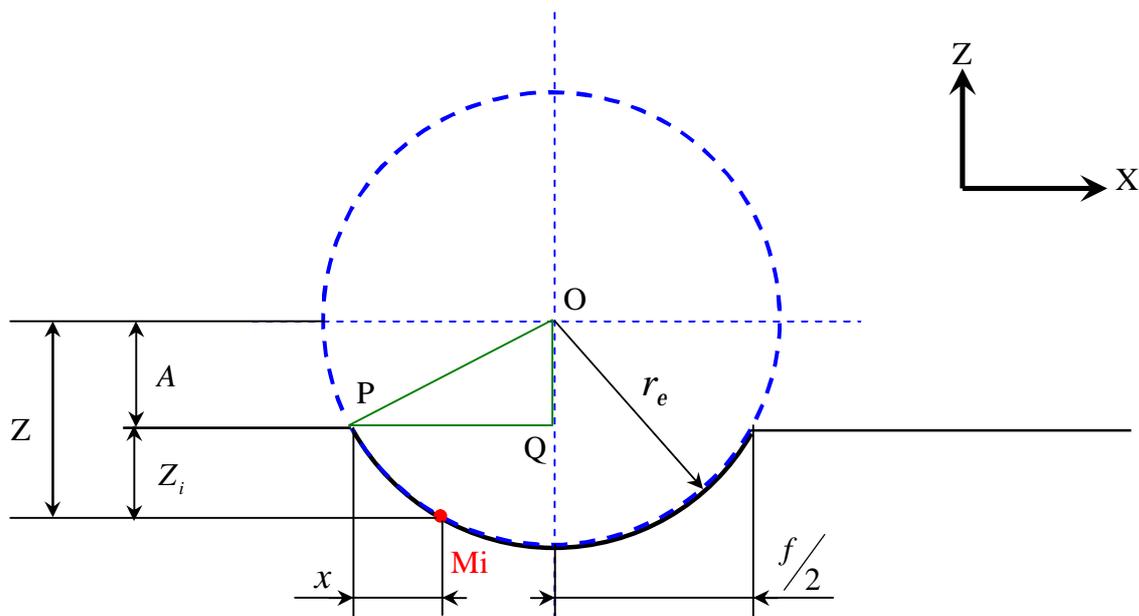


Figure III-9 : Représentation de l'altitude Z_i .

A partir de la représentation graphique de l'altitude Z_i (figure III-9) on peut écrire :

$$Z_i = A - Z \quad (\text{III-8})$$

La distance A peut être calculé à partir de triangle vert OPQ (figure III-9) de la manière suivante:

$$r_e^2 = A^2 + \left(\frac{f}{2}\right)^2 \quad (\text{III-9})$$

D'où

$$A = \sqrt{r_e^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2} \quad (\text{III-10})$$

Pour calculer la distance Z , on applique l'équation de cercle au point Mi qui va nous permet d'écrire :

$$Z^2 + \left(x - \frac{f}{2}\right)^2 = r_e^2 \quad (\text{III-11})$$

D'où

$$Z = \sqrt{r_e^2 - \left(x - \frac{f}{2}\right)^2} \quad (\text{III-12})$$

La substitution de (III-6) dans (III-12) nous donne :

$$Z = \sqrt{r_e^2 - \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \frac{m.f}{2.p} - P.f - \frac{f}{2}\right)^2} \quad (\text{III-13})$$

La substitution de (III-10) et (III-13) dans l'équation (III-8) nous permet d'écrire :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \frac{m.f}{2.p} - P.f - \frac{f}{2}\right)^2} \quad (\text{III-14})$$

Après des simplifications, l'altitude Z_i de chaque point M_i s'exprime sous la forme :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left[\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \left(\frac{(m + 2 \cdot P \cdot p) \cdot f}{2 \cdot p} + \frac{f}{2} \right) \right]^2} \quad \text{(III-15)}$$

Avec : $m = \text{Arc tan} \left(\frac{y_i}{x_i} \right)$ Elle varie de $0 \div 360^\circ$.

$$P = \text{partie entière} \left(\frac{x_i}{f} - \frac{m}{2 \cdot p} \right)$$

r_e : Représente le rayon du bec de l'outil.

f : L'avance de l'outil.

III-2-4 Elaboration de la maquette informatique.

Après avoir obtenue le modèle mathématique qui exprime l'altitude Z_i du point M_i à partir d'une modélisation de l'usinage de la surface et de la trace laissée par le point générateur de l'outil, on l'introduit dans un simulateur approprié qui permet de générer un fichier de point X_i, Y_i, Z_i qui représente l'image virtuelle de la surface usinée (figures III-10 et III-11).

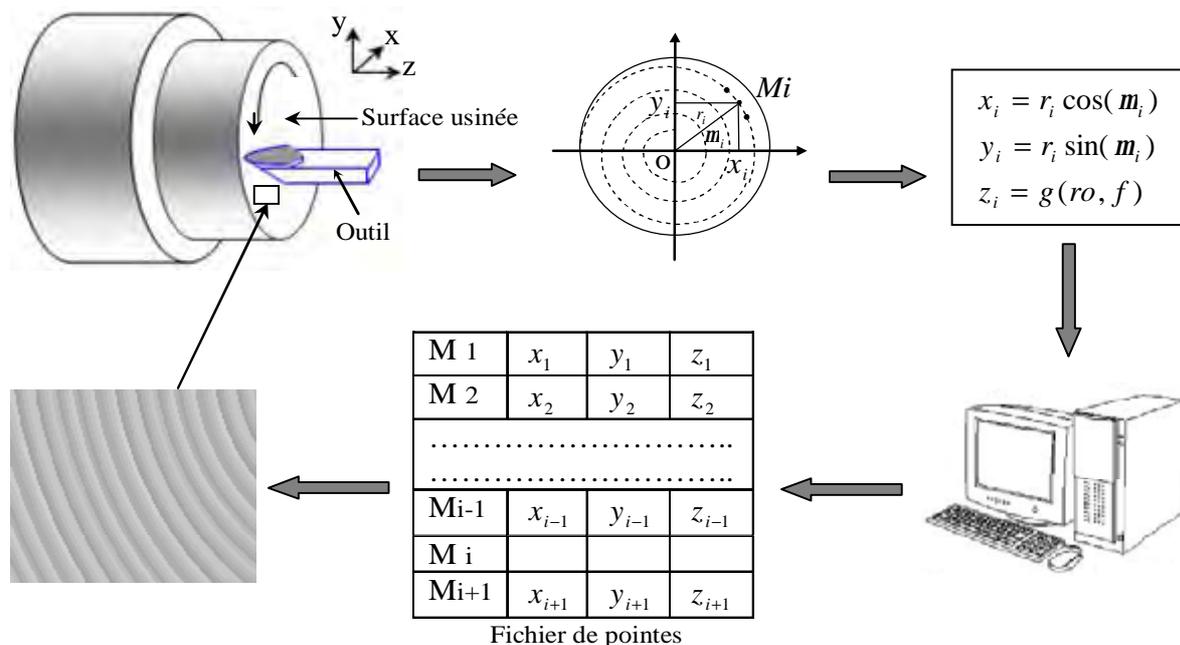


Figure III-10 : Procédure à suivre pour la reproduction de la surface usinée par simulation numérique.

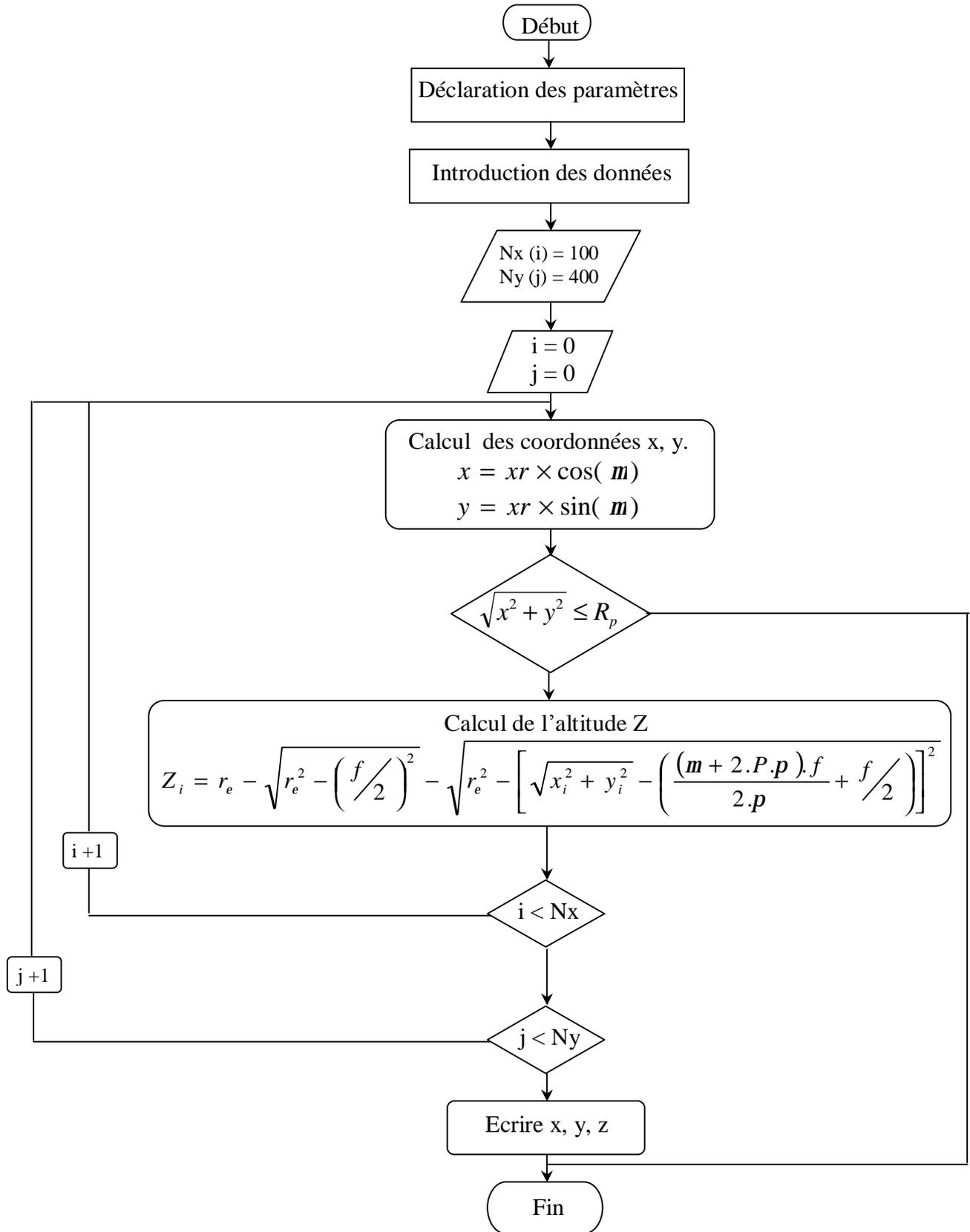


Figure III-11 : Organigramme pour le génération du fichier des points x, y, z.

Lors de l'écriture de l'algorithme, les paramètres pris en compte et qui sont considérés comme entrées sont :

Le rayon de la pièce usinée R_p ;

Le rayon du bec de l'outil r_e ;

L'avance de l'outil f ;

Les sorties doivent être :

Les coordonnées X_i, Y_i, Z_i de chaque point M_i de la surface usinée.

II-3 Conclusion

Dans le présent chapitre nous proposons un modèle mathématique qui permet de donner une image virtuelle de la surface obtenue par une opération de dressage. Puisque on s'intéresse à la rugosité théorique, qui est influencée principalement par l'avance et le rayon du bec de l'outil, le modèle mathématique proposé et qui permet la reproduction fidèle de la surface usinée est fonction de ces deux paramètres (avance et rayon du bec).

Une description de la surface usinée et une modélisation géométrique de la trace laissée par l'outil de coupe ont été faites. Le développement détaillé du modèle mathématique et la procédure à suivre pour reproduire la surface usinée est présenté. Ensuite, un organigramme qui permet d'utiliser le modèle développé pour générer le fichier de points qui représente l'image virtuelle de la surface obtenue par une opération de dressage est réalisé.

Nous désirons par la présentation de ce chapitre de donner une idée sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques usinées en fonction des paramètres de coupe ainsi que la géométrie de l'arrête tranchant de l'outil de coupe.

Chapitre IV

Simulations numériques et discussion des résultats

IV-1 Introduction

La simulation numérique est largement répandue dans l'étude des procédés de mise en forme par enlèvement de matière sous forme de copeau. C'est un outil très puissant pour l'évaluation des performances du processus sans le besoin d'effectuer des expériences longues et coûteuses [24].

Dans ce chapitre, une série des simulations à été effectuée et présentée pour évaluer les performances du modèle développé dans le chapitre III. Par ces simulations on s'intéresse à la rugosité théorique (défaut de troisième ordre), qui est influencé principalement par deux paramètres essentiels :

- La géométrie de l'outil de coupe.
- L'avance de l'outil.

La simulation est faite en deux étapes (figure IV- 1) :

1. La génération d'un fichier de points avec l'utilisation d'un programme codé en fortran 90. Ces points représentant les coordonnées X_i , Y_i , Z_i , des points M_i appartenant à la surface dressée.

2. Avec ce fichier de points et avec l'utilisation d'un logiciel de génération des surfaces (TECPLOT par exemple), on génère la figure correspondante à ce fichier. Cette figure représente l'image virtuelle de la surface obtenue par l'opération de dressage. Pour la génération des surfaces à partir des fichiers de points, on a choisi le TECPLLOT pour leur simplicité et leur qualité supérieure de la représentation des surfaces en 3-D.

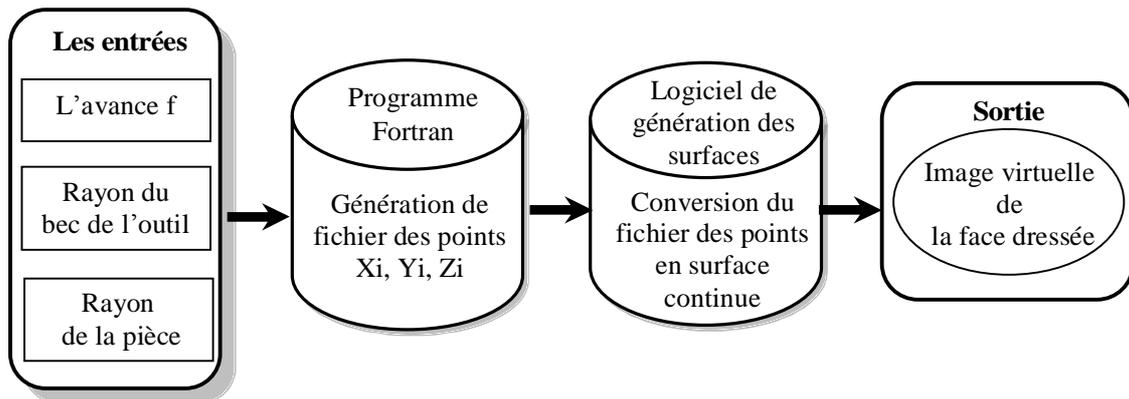


Figure IV-1 : Diagramme schématique de la simulation.

IV-2 Choix des avances de coupe

Comme précisé plus haut, le facteur le plus important influant sur la rugosité théorique (défaut de troisième ordre) est l'avance. Pour cela, nous avons opté pour les valeurs suivantes :

- 1- $f = 0.4 \text{ mm / tr.}$
- 2- $f = 0.6 \text{ mm / tr.}$
- 3- $f = 0.8 \text{ mm / tr.}$

Le choix de ces avances a été établi pour permettre une représentation fidèle du modèle mis au point.

IV-3 Choix de l'outil

Etant donné que le modèle développé dans le chapitre III est fonction entre autre du rayon de bec de l'outil qui influe directement sur la rugosité théorique, nous avons opté pour les valeurs suivantes qui permettent de mieux apprécier la trace de la spirale laissée par l'outil :

- 1- $r_e = 0.4 \text{ mm.}$
- 2- $r_e = 0.8 \text{ mm.}$
- 3- $r_e = 1.2 \text{ mm.}$

IV-4 Présentation des simulations

Le tableau suivant illustre les différentes simulations à réaliser.

Simulation	Rayons de bec r_e [mm]	Avances f [mm/tr]
1	0.4	0.4
2	0.8	0.4
3	1.2	0.4
4	0.4	0.6
5	0.8	0.6
6	1.2	0.6
7	0.4	0.8
8	0.8	0.8
9	1.2	0.8

Tableau IV-1: récapitulatif des simulations

Les résultats obtenus par simulations sont présentés sur les figures suivantes :

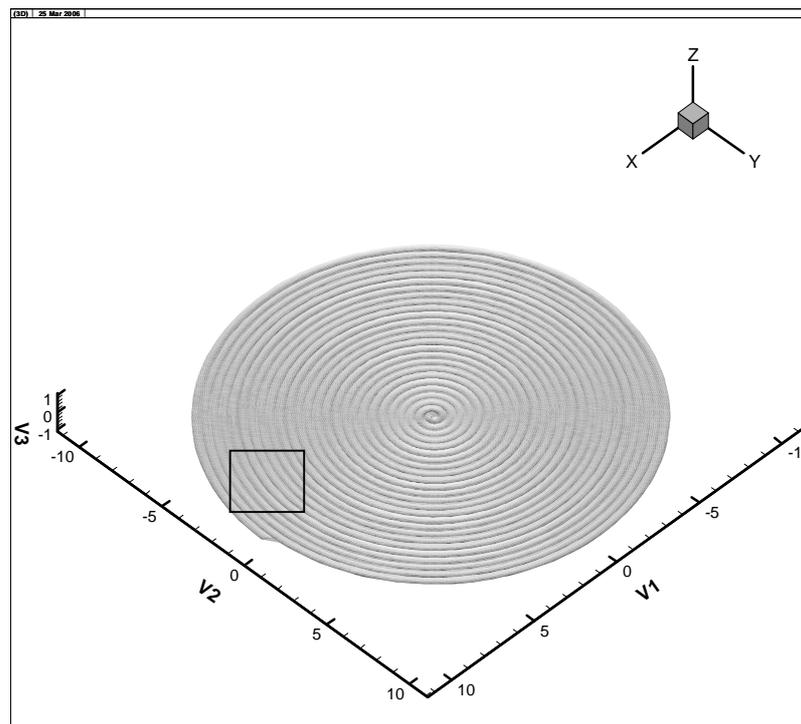


Figure IV-2 : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.4$ mm/tr, $r_e = 0.4$ mm

Pour une meilleure illustration du résultat de cette simulation, nous effectuons une coupe partielle dans le sens radial de la surface usinée (figure IV-3).

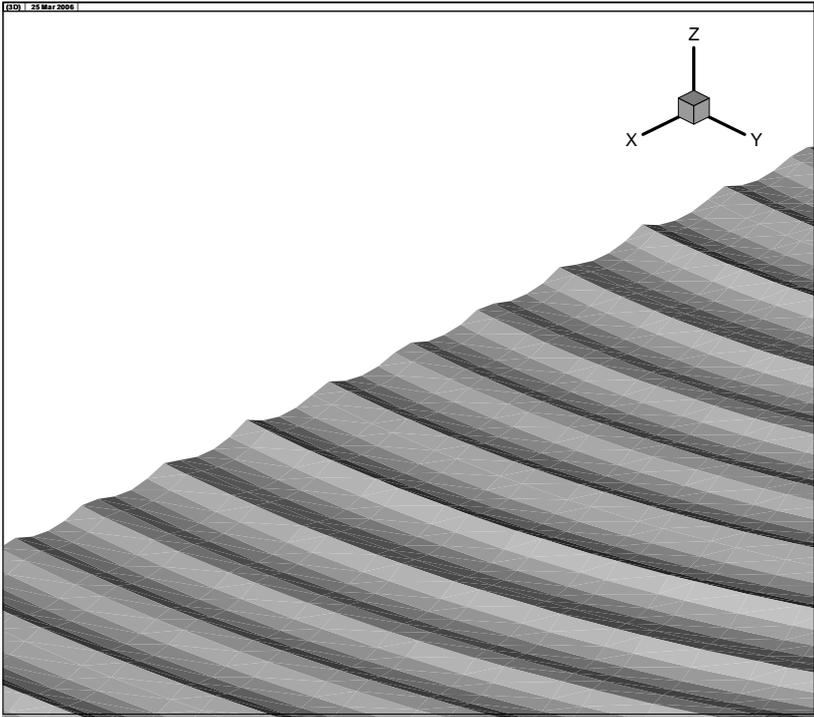
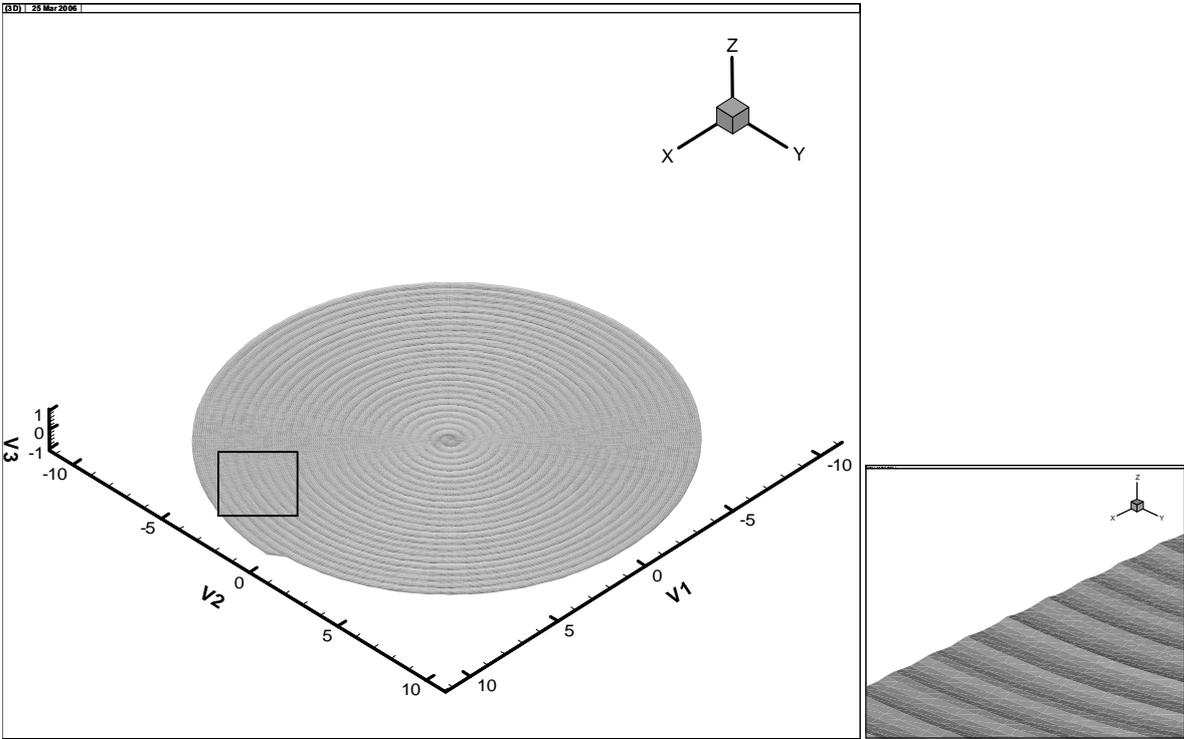


Figure IV-3 : Coupe partielle

Le même traitement s’applique pour les simulations suivantes.



FigureIV-3: $f = 0.4 \text{ mm/tr}$, $r_e = 0.8 \text{ mm}$.

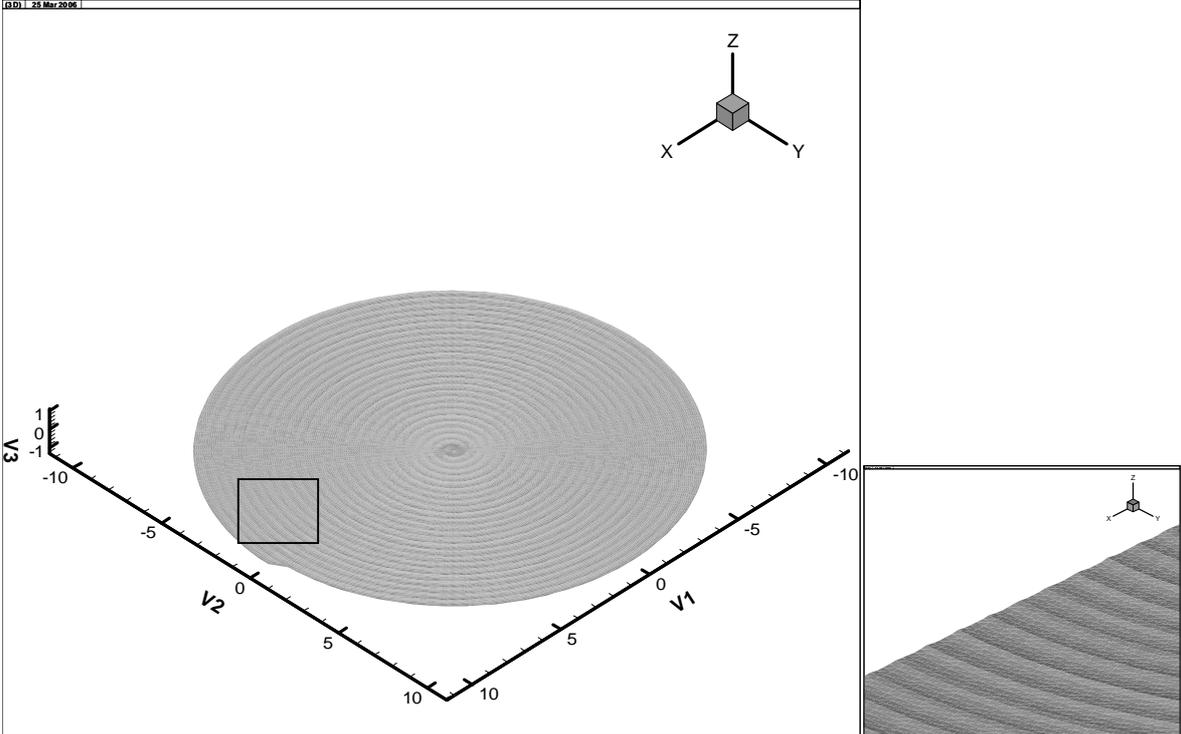


Figure IV-4 : $f = 0.4 \text{ mm/tr}$, $r_e = 1.2 \text{ mm}$.

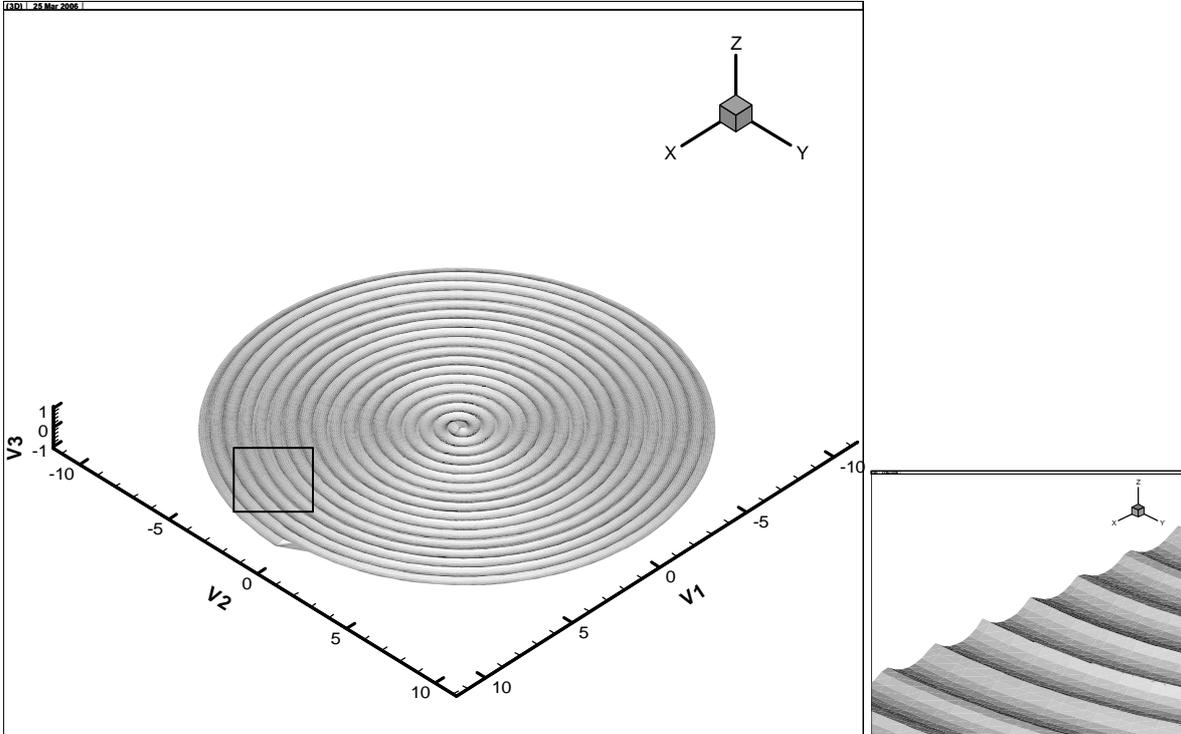


Figure IV-5: $f = 0.6 \text{ mm/tr}$, $r_e = 0.4 \text{ mm}$.

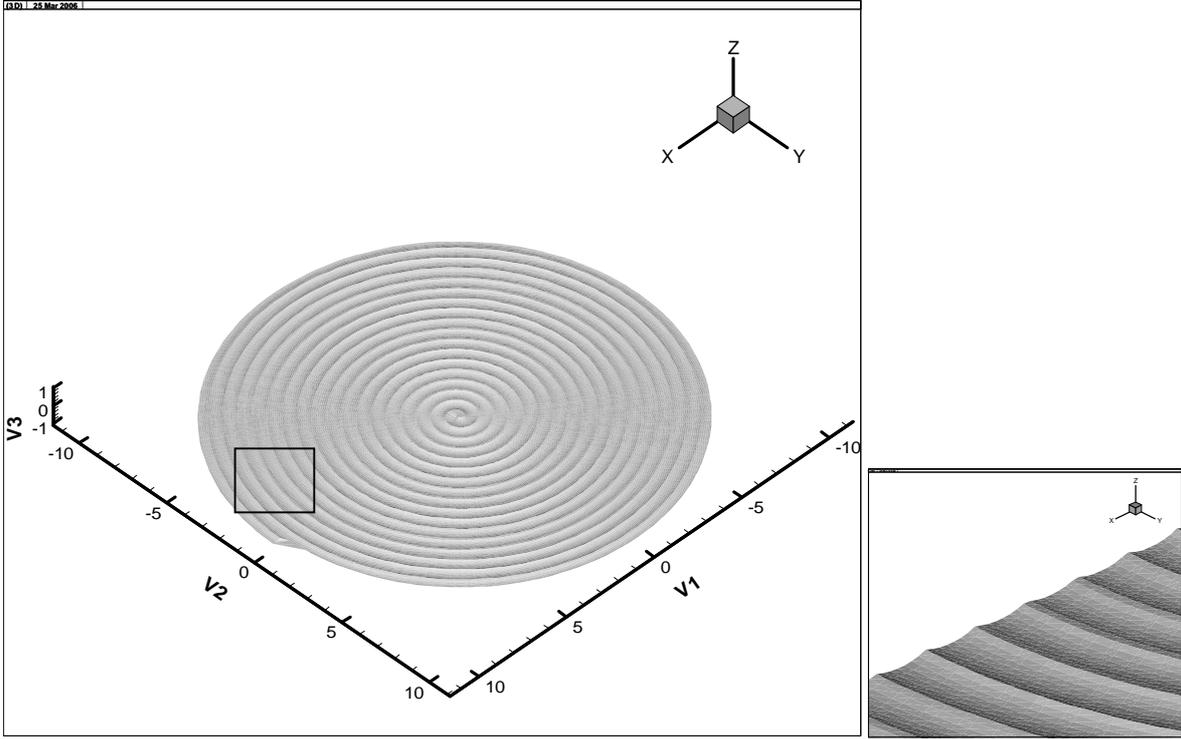


Figure IV-6: $f = 0.6 \text{ mm/tr}$, $r_e = 0.8 \text{ mm}$.

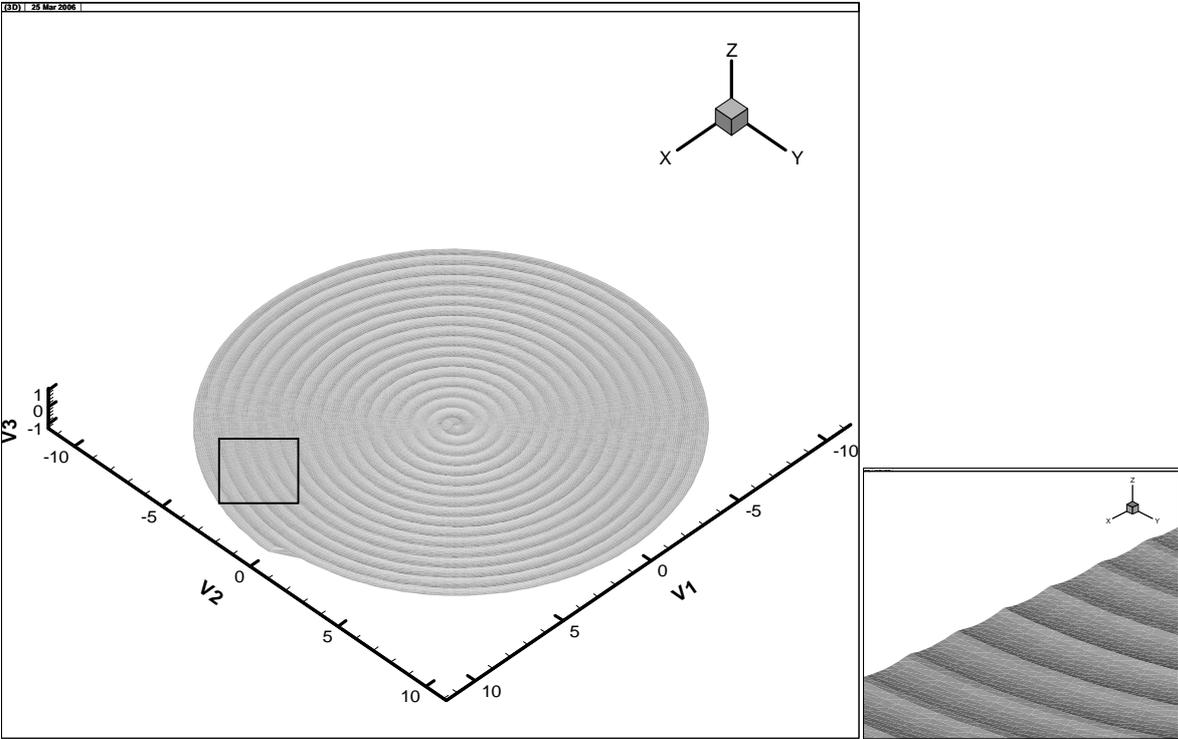


Figure IV-7: $f = 0.6 \text{ mm/tr}$, $r_e = 1.2 \text{ mm}$.

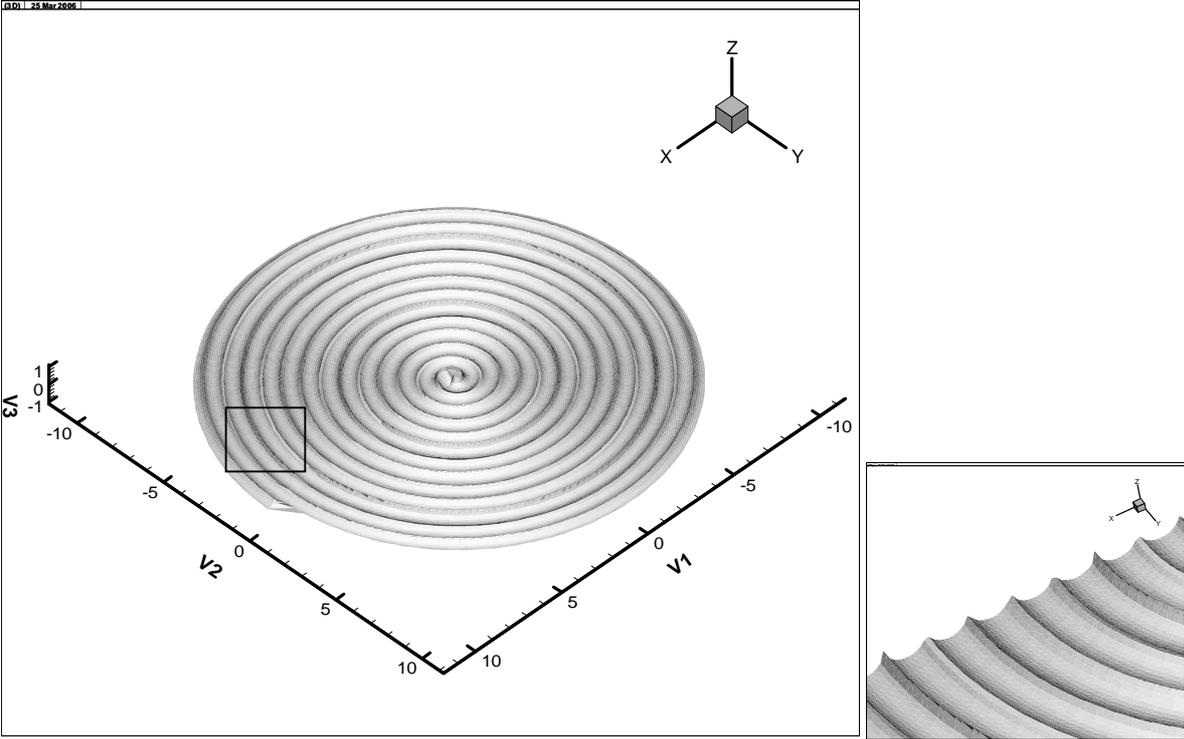


Figure IV-8: $f = 0.8 \text{ mm/tr}$, $r_e = 0.4 \text{ mm}$.

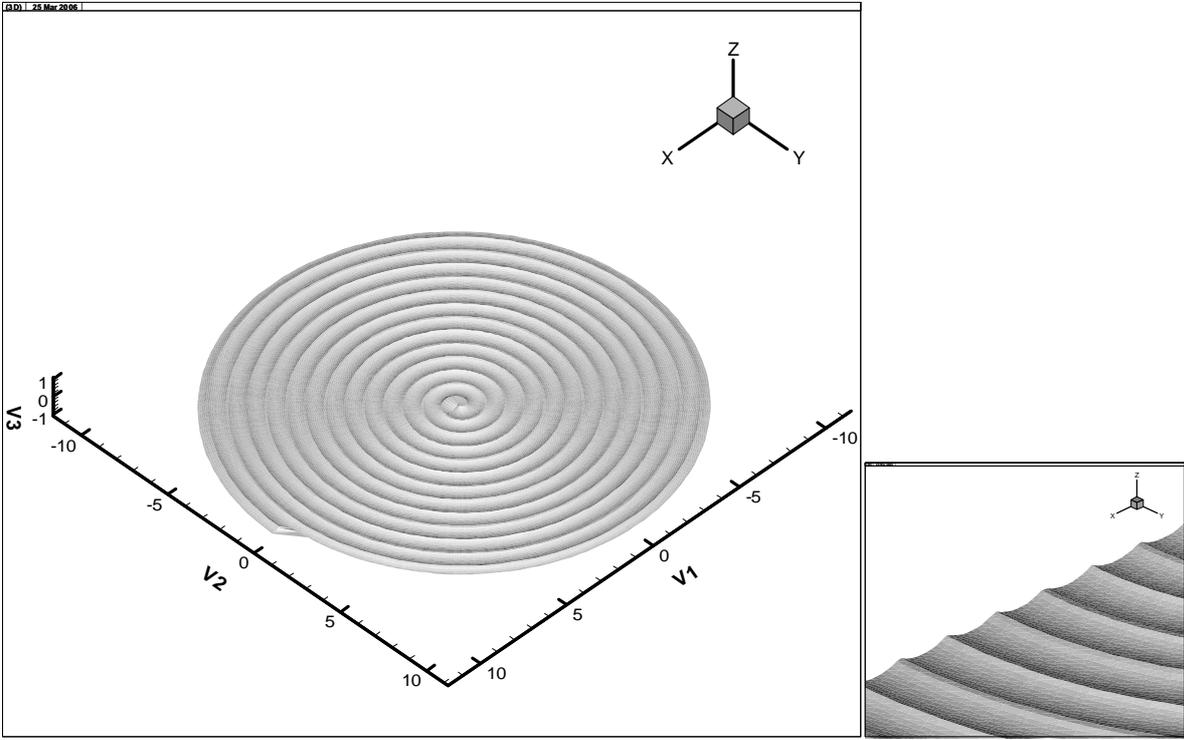
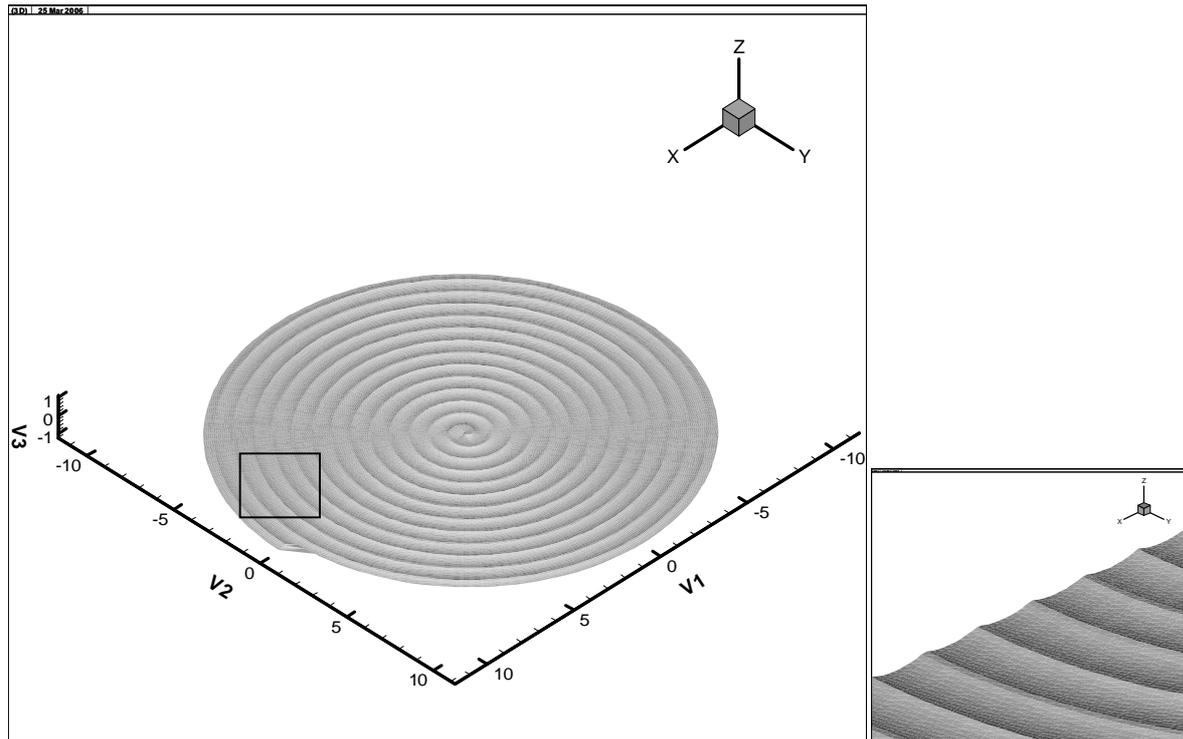


Figure IV-9 : $f = 0.8 \text{ mm/tr}$, $r_e = 0.8 \text{ mm}$.

Figure IV-10: $f = 0.8 \text{ mm/tr}$, $r_e = 1.2 \text{ mm}$.

IV-5 Discussion des résultats

Les figures présentées ci-dessus représentent l'image virtuelle d'une surface usinée obtenue par une opération de dressage. Nous avons obtenu ces résultats par simulation numérique qui est basée sur le modèle développé dans le chapitre précédent. Lors de la simulation, les paramètres considérés sont le diamètre de la pièce, l'avance, et le rayon du bec de l'outil de coupe.

Sur ces figures on voit bien la spirale décrite par le point générateur de l'outil. Cette spirale représente réellement la trace laissée par l'outil après l'usinage. On peut observer que cette trace varie en profondeur et en largeur. On constate que la rugosité théorique est fortement influencée par le rayon de bec et l'avance, où l'on remarque que pour des rayons de bec élevés et des avances faibles, la simulation obtenue se rapproche de plus en plus des cas réels où l'état de surface généré après usinage est de bonne qualité. Pour affirmer cela nous allons maintenant procéder à l'évolution de la rugosité théorique en fonction des paramètres définis précédemment.

IV-6 Etude de l'évolution de la rugosité théorique en fonction de l'avance et du rayon du bec

Si l'on suppose que le profil de la pièce est la reproduction fidèle d'une partie du profil de l'outil à l'échelle microgéométrique (figure IV-11), la profondeur totale de rugosité vaut [22]:

$$R_t [mm] = \frac{f^2}{8 r_e} \cdot 1000 \quad (IV-1)$$

Où l'avance f est donnée en mm/ tr, tandis que r_e est donnée par le (mm).

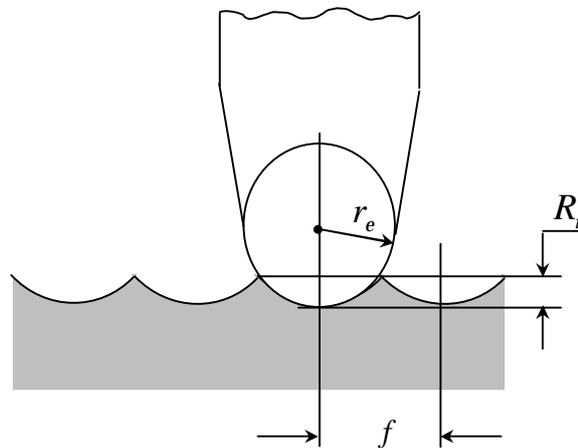


Figure IV-11 [36]: Représentation du profil de la pièce et de la rugosité théorique.

Cependant, des défauts d'arrachement de matière (défauts du 4^{ème} ordre) viennent se superposer à cette allure théorique, et d'autres facteurs entrent en compte, comme la vitesse de coupe ou l'acuité de l'arête de coupe [22]. Etant donnée que nous nous intéressons principalement par le présent projet de recherche à la rugosité théorique, nous allons dans la suite du document réaliser la mise en correspondance entre la formulation donnée par [22] et le modèle développé par nos soins en vue de valider son exactitude.

Les valeurs de la rugosité théorique R_t obtenues par calcul avec la formule IV-1 donnée par [22] pour quatre différentes valeurs de rayon du bec de l'outil et 13 différentes valeurs de l'avance par tour, sont présentées dans le tableau IV-1.

f Avance de l'outil (mm/tr)	Rayon du bec $r_e = 0.4mm$	Rayon du bec $r_e = 0.8mm$	Rayon du bec $r_e = 1.2$	Rayon du bec $r_e = 1.6$
	Valeurs de la rugosité théorique R_t (μm)			
0.1	3.125	1.562	1.041	0.781
0.15	7.031	3.515	2.343	1.757
0.2	12.5	6.250	4.166	3.125
0.25	19.531	9.765	6.510	4.882
0.3	28.125	14.062	9.375	7.031
0.35	38.281	19.140	12.760	9.570
0.4	50	25	16.666	12.500
0.45	63.281	31.640	21.093	15.820
0.5	78.125	39.062	26.041	19.531
0.55	94.531	47.265	31.510	23.632
0.6	112.5	56.250	37.500	28.125
0.65	132.031	66.015	44.010	33.007
0.7	153.125	76.562	51.041	38.281

Tableau IV-1 : Valeurs de la rugosité théorique R_t obtenues par calcul.

On remarque à partir du tableau que les valeurs de la rugosité sont inversement proportionnelle au rayon de bec, comme illustré sur la figure IV-12.

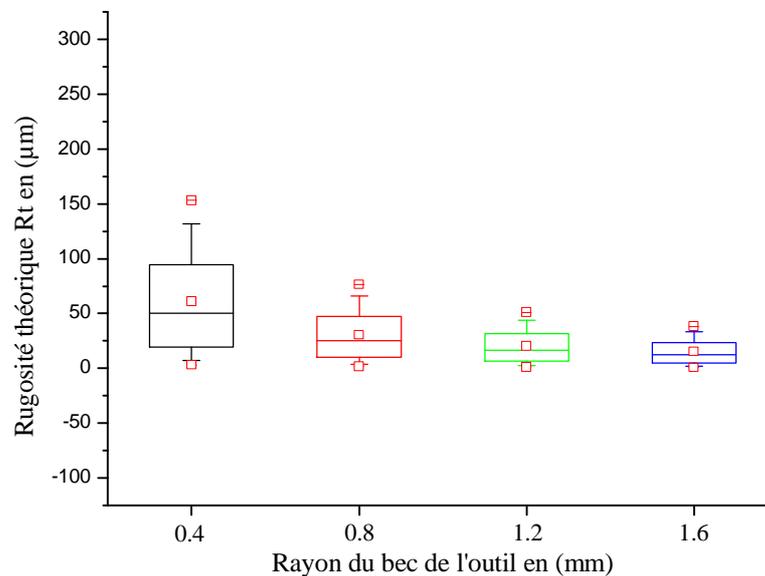


Figure IV-12 : Evolution de la rugosité théorique R_t en fonction du rayon de bec.

La deuxième remarque à effectuer c'est que, l'augmentation de l'avance de l'outil provoque une augmentation de la rugosité. L'évolution de cette dernière en fonction de l'avance pour les quatre rayons de bec est présentée sur la figure IV-13.

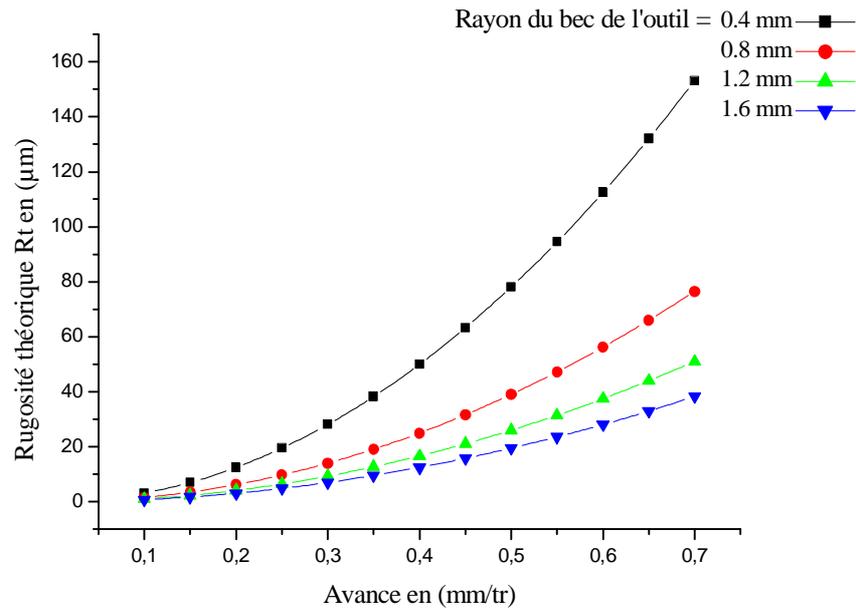


Figure IV-13 : Evolution de la rugosité en fonction de l'avance pour quatre rayons du bec différents.

Nous allons maintenant utiliser le modèle mathématique développé pour évaluer la rugosité théorique.

Comme précisé au niveau de l'algorithme établi au chapitre III, la simulation permet à chaque fois de récupérer un fichier de point X_i, Y_i, Z_i (où Z_i représente l'amplitude de chaque point M_i). Dans ce cas, la différence entre l'amplitude maxi (Z_{\max}) et l'amplitude mini (Z_{\min}) représente la rugosité théorique donnée par le modèle (figure IV-14).

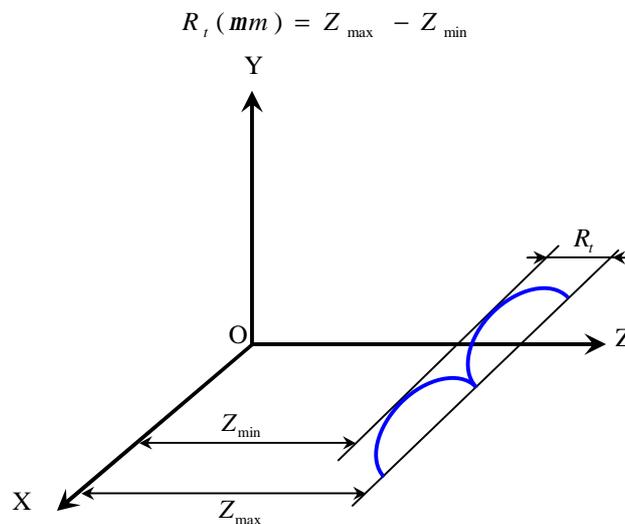


Figure IV-14 : Représentation de la rugosité théorique dans un repère $o(x, y, z)$.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

f Avance de l'outil (mm/tr)	Rayon du bec $r_e = 0.4mm$	Rayon du bec $r_e = 0.8mm$	Rayon du bec $r_e = 1.2$	Rayon du bec $r_e = 1.6$
	Valeurs de la rugosité théorique R_t (μm)			
0.1	3.1373	1.564	1.042	0.781
0.15	7.007	3.479	2.317	1.737
0.2	12.701	6.274	4.173	3.128
0.25	17.856	8.740	5.804	4.347
0.3	29.190	14.188	9.411	7.046
0.35	40.225	19.331	12.800	9.577
0.4	53.589	25.403	16.784	12.549
0.45	69.194	32.248	21.253	15.877
0.5	87.750	40.065	26.330	19.651
0.55	109.439	48.707	31.906	23.788
0.6	135.424	58.380	38.105	28.376
0.65	166.728	68.947	44.819	33.333
0.7	206.350	80.625	52.175	38.750

Tableau IV-2 : Valeurs de la rugosité théorique R_t obtenues par simulation numérique.

Ce que l'on constate c'est que comparativement au tableau IV-1, il existe une forte similitude entre les deux résultats du fait que l'on voit bien que les valeurs de la rugosité sont inversement proportionnelles au rayon de bec, comme illustré sur la figure IV-15.

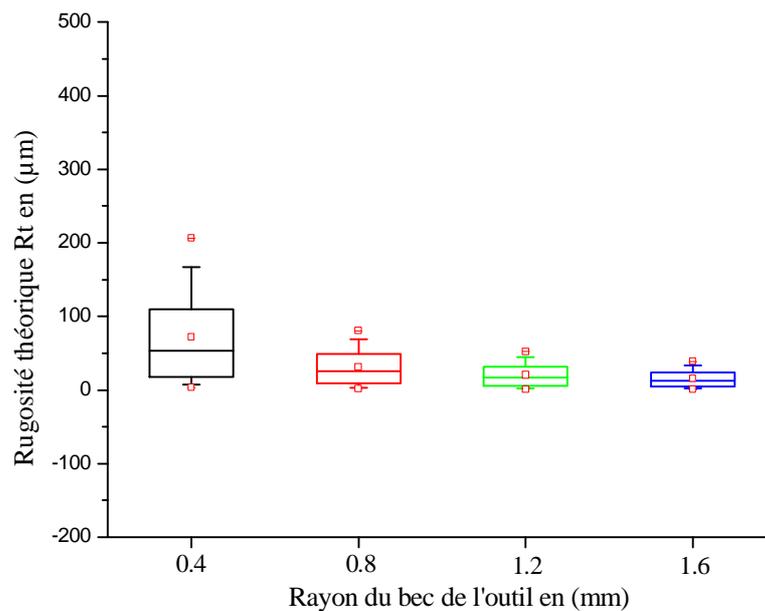
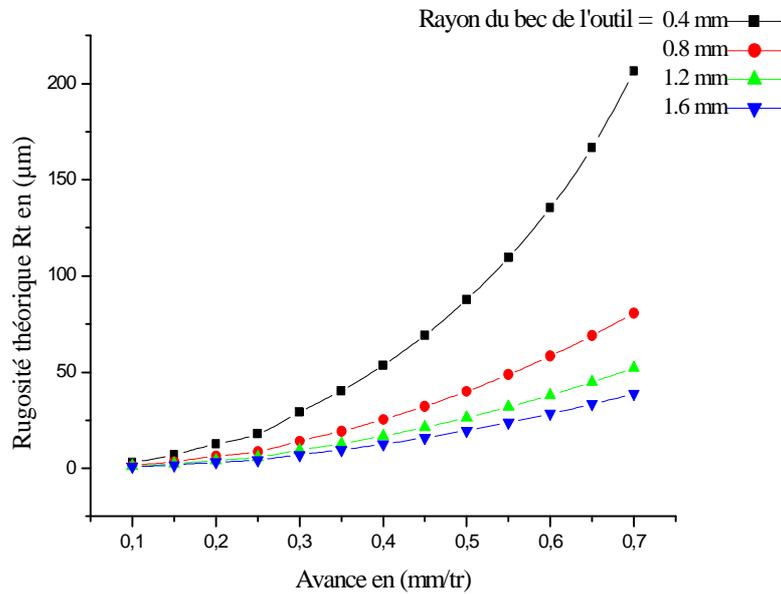


Figure IV-15 : Evolution de la rugosité R_t en fonction du rayon de bec.

La deuxième remarque à effectuer c'est que, l'augmentation de l'avance de l'outil provoque une augmentation de la rugosité (figure IV-16).



FigureIV-16 : Evolution de la rugosité R_t en fonction de l'avance pour quatre rayons de bec différents.

A partir de cet instant une mise en correspondance entre les graphes (rugosités avances) du modèle élaboré avec la formulation donnée par [22] est établie afin de vérifier la fiabilité de nos résultats (figure IV-17).

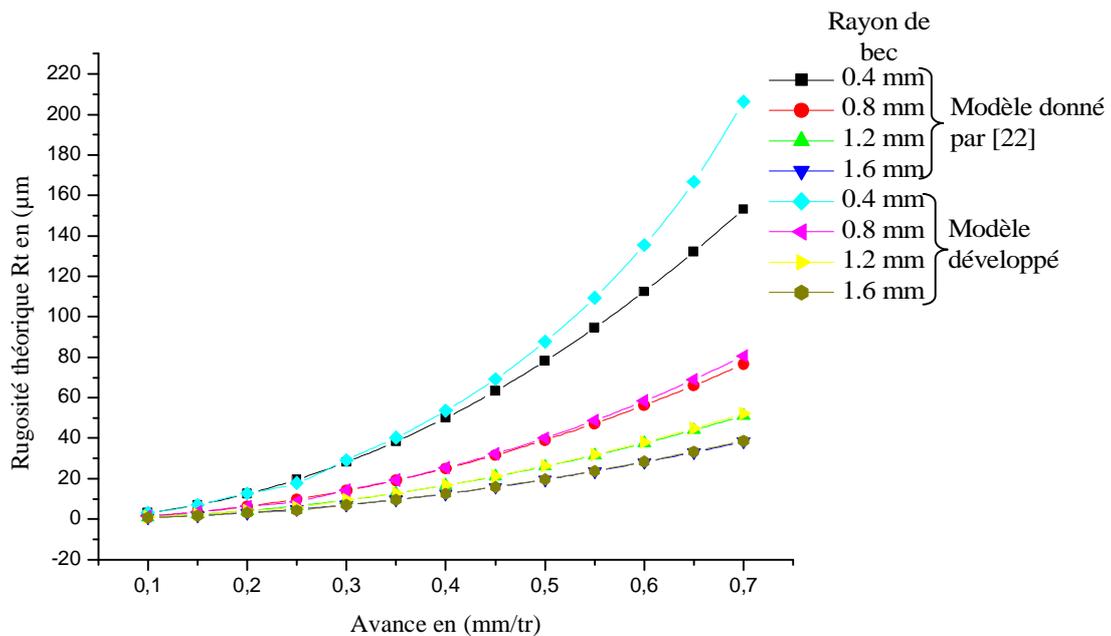


Figure IV-17 : Superposition des résultats graphiques obtenus par les deux modèles.

D'après les résultats numérique et graphique obtenus, on remarque qu'il existe une relation décroissante entre le rayon de bec de l'outil de coupe et la qualité de l'état de surface des pièces usinée, mais une relation croissante entre l'avance de l'outil et la qualité de l'état de surface.

La similitude qui existe entre les résultats numériques obtenus par la formulation donnée par [22] et le modèle développé, et le résultat de la superposition des résultats graphiques, nous donne le droit de dire que le modèle développé par nos soins est fiable.

Conclusion et perspectives

Ce travail a été réalisé dans le but d'étudier la variation de la géométrie des pièces mécaniques obtenues par enlèvement de matière au moyen d'outils coupant en fonction des paramètres géométrique et cinématique de la coupe.

Pour atteindre notre objectif, et sur la base qu'il existe un rapporte étroit en l'état de surface et la qualité dimensionnelle des pièces mécanique usinées, nous avons développé et mis au point un modèle mathématique qui permet de reproduire virtuellement le profil théorique de la topographie d'une surface obtenue par une opération de dressage. Ce modèle est élaboré sur la base d'une description géométrique de la surface usinée. Suivant l'orientation de notre travail précisé plus haut, le modèle exprime l'influence de deux paramètres essentiels qui sont l'avance et le rayon de bec de l'outil sur la surface obtenue par l'opération de dressage.

Le modèle que nous avons proposé a permis aussi l'étude de la variation de la rugosité théorique en fonction de l'avance et du rayon de bec de l'outil de coupe. La superposition des résultats graphiques (avances – rugosité théorique) obtenue par la formule approchée donnée par [22] et le modèle établi nous a permis de valider l'exactitude du modèle développé par nos soins.

Sur la base des simulations réalisées et les résultats numériques et graphiques obtenues on peut dire :

- Il existe une relation décroissante entre le rayon de bec de l'outil de coupe et la rugosité théorique de la surface. La rugosité diminue avec l'augmentation du rayon de bec.
- Il existe une relation croissante entre l'avance de l'outil et la rugosité théorique de la surface. La rugosité de la surface augmente avec l'avance.
- La bonne combinaison entre le rayon de bec et l'avance de l'outil permet d'avoir des surfaces de bonne qualité.

Donc nous pouvons dire qu'il existe une relation inversement proportionnelle entre le rayon de bec de l'outil de coupe et la variation de la géométrie de la pièce usinée. De même on peut noter l'existence d'une relation proportionnelle entre l'avance de l'outil et la variation de la géométrie de la pièce usinée.

La qualité de l'état de surface des pièces mécaniques usinées dépend directement de l'avance et du rayon de bec de l'outil de coupe. Mais il existe d'autres facteurs tels que la vitesse de coupe, la profondeur de passe, les propriétés de la matière usinée, les vibrations relatives entre la pièce usinée et l'outil de coupe qui affectent l'état de surface de la pièce. Pour cela, il est nécessaire dans le futur, de reconstruire le modèle proposé dans ce mémoire, où de développer d'autres modèles qui permettent d'exprimer l'influence des différents paramètres cinématiques et géométriques de la coupe, et reproduire la topographie de la surface des pièces usinées en vue d'une meilleure maîtrise de la variation de la géométrie des pièces mécaniques usinée.

Références bibliographiques

- [1] **H. Bouchenitfa**, « Contribution au contrôle des surfaces gauches en vue d'un recalage des moyens de productions », thèse de magister, mai 2004, Université de Constantine.
- [2] **St. Enache**, « La qualité des surface usinées », Dunod, 1972, Paris.
- [3] **Ming-Yung Wang, Hung-Yen Chang**, « Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014 – T6 », 2003, International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004 (44): 51–57.
- [4] **A. Benamar, G. Inglebert, M. Boumahrat**, « Durée de vie d'un carbure P20 pour le chariotage d'un acier C38 à rugosité contrôlée », Mécanique & Industries 2006 (6) : 635–640.
- [5] **A. Boryczko**, « Measurement of relative tool displacement to the workpiece for the assessment of influences of machining errors on surface profiles », Measurement 2002 (31): 93–105.
- [6] **P. Charbonnaud, D. Noyes, M. Ben Lazrak**, « Caractérisation itérative de paramètres de coupe optimaux par surveillance d'usinage », Mec. Ind. 2000 (1) : 177–186.
- [7] **H. Gokkaya, M. Nalbant**, « The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel », Materials and Design 2005.
- [8] **P. Franco, M. Estrems, F. Faura**, « Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools », International Journal of Machine Tools & Manufacture 2004 (44) : 1555 – 1565.

- [9] **CNOMO**, « Etat géométrique de surface », Sélection et complément de AFNOR E 05 – 015. 1993.
- [10] **W.B. Lee, C.F. Cheung**, 2000, « A dynamic surface topography model for the prediction of nano-surface generation in ultra-precision machining », *International Journal of Mechanical Sciences* 2001(43): 961 – 991.
- [11] **W. Gao, T. Araki, S. Kiyono, Y. Okazaki, M. Yamanaka**, « Precision nano-fabrication and evaluation of a large area sinusoidal grid surface for a surface encoder », *Precision Engineering* 2003 (27): 289–298
- [12] **Éric FELDER**, « Procédés d'usinage », Article B7000, *Technique de l'ingénieur*, 1997.
- [13] **Le fraisage.**
[Fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fraisage)
- [14] **Raynald Laheurte**, « Application de la théorie de seconde gradient a la coupe des matériaux », thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2004.
- [15] Cours de « Fabrication mécanique », 3^{ème} année ingénieur, génie mécanique.
- [16] **J. Carvill**, « Mechanical Engineer's Data Handbook », Elsevier Science Ltd, 1993.
- [17] **L. Rimbaud, G. Layes, J. Moulin**, « Guide pratique de l'usinage–fraisage », Collection n° 62 – Edition n° 06, 1999.
- [18] **T. Childs, K0 Maekawa, T. Obikawa, Y. Yamane**, « Metal Machining - Theory and Applications », Elsevier Science Ltd, 2000.
- [19] **Société SANDVIK-COROMANT**, « Fraisage: principe », Article BM 7082, *Technique de l'ingénieur*, 2001.

- [20] **Société SANDVIK-COROMANT**, « Perçage », Article BM 7088, Technique de l'ingénieur, 2001.
- [21] **A.Campa, J.Rollet**, «Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens », Les éditions Foucher n° 5224 – 185, 1977, France.
- [22] **Alain PASSERON**, « Tournage », Article BM 7086, Technique de l'ingénieur, 1998.
- [23] Norme ISO 3002, « Notion de base sur l'usinage ».
- [24] **C.F. Cheung, W.B. Lee**, « A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning », International Journal of Machine Tools & Manufacture 2000 (40) 979–1002.
- [25] **François BAGUR**, « Matériaux pour outils de coupe », Article BM7080, Technique de l'ingénieur, 1999.
- [26] **D. Gelin, M. Vincent**, « Eléments de fabrication », 1995.
- [27] **C. Barlier, L. Girardin**, « Mémotech ; productique matériaux et usinage », 1995.
- [28] **R. Laheurte, O. Cahuc, Ph. Darnis, A. Gérard**, « Evaluation de l'énergie mise en jeu et du comportement des outils de coupe dans l'usinage », mise en forme des métaux / CM – 09 – 015, 2002, université Bordeaux 1, France.
- [29] **Jacques BOULANGER**, « Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface », Article B7010, Technique de l'ingénieur, 1991.
- [30] **La rugosité.**
<http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [31] **L. GAZAL, R RECORDIER**, « Erreurs de forme et de position », Article R1220, Technique de l'ingénieur, 1991.

- [32] **R. Butin, M. Pinot**, « Fabrication mécanique – technologie », 1985.
- [33] **C.F. Cheung, W.B. Lee**, « Characterisation of nano-surface generation in single point diamond turning », *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2001 (41) 851–875.
- [34] **C. F.Cheung, W.B. Lee**, « A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining », *Precision Engineering* 2000 (24) 77–87.
- [35] **État de surface.**
http://www.eskenazi.ch/Eskenazi_Formation/Etat%20de%20surface.pdf
- [36] **J-L. VAVRILLE**, « Usinage d’ultraprécision ».
http://www.dr4.cnrs.fr/bfp/rdm_web/formation/pradet/cours/ultraprecision.pdf
- [37] **A. Moufki**, « Modélisation de la coupe et des procédés », Laboratoire de Physique et de Mécanique des Matériaux de Metz, France.

Intitulé du sujet : **Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques.**

Préparée par : BERGHIDA RIAD

Encadrée par : BOUGHOUAS HAMLAOUI

Résumé :

L'action de point générateur des divers outils coupants travaillant suivant des modes différents demeure sensiblement la même à quelques détails près n'engageant pas les principes mêmes de la coupe. Pour cette raison, il semble qu'il existe une loi générale qui reflète ce caractère universel du processus de coupe et regroupe toutes les relations entre les facteurs de base de l'usinage par enlèvement de matière sous forme de copeaux et la qualité des surfaces obtenue. Une telle loi présenterait un intérêt primordial pour la pratique et la théorie de la coupe.

Dans le cas d'une opération de dressage d'une surface sur un tour parallèle (fig. 1). Le point générateur de l'outil décrit une spirale dont le centre est sur l'axe de rotation de la broche. La forme de la surface usinée dépend des caractéristiques géométriques de l'arrête tranchante de l'outil. Dans ce cas, on cherche à connaître l'altitude Z_i d'un point M_i dont les coordonnées sont X_i et Y_i dans le plan de mesure, défini comme le plan tangent extérieur matière théorique dans un repère $R(o,x,y,z)$.

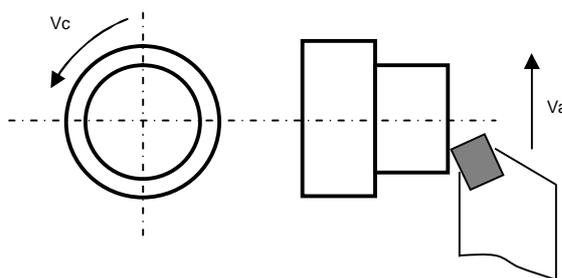


Fig. 1 : Description de l'usinage de la surface

Etant donné que le point générateur de l'outil décrit une spirale dont l'origine se trouve au centre de l'axe de broche. La distance entre crêtes correspond à l'avance par tour de l'outil (f). Les sillons sont générés par le bec d'outil. Dans le cas d'une arrête tranchante arrondie, ces sillons sont des portions de cercles de rayon r_e en première approximation (figure2).

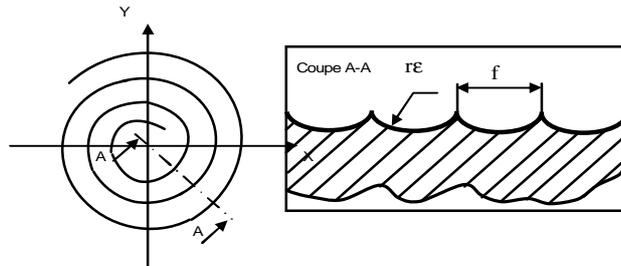


Fig. 2 : Modélisation de l'usinage de la surface

Condition d'application : il faut que l'avance de l'outil soit trop importante (figure 3). Cela se traduit géométriquement par : $f < f_{\max} = 2 r_e \sin(k_r)$.

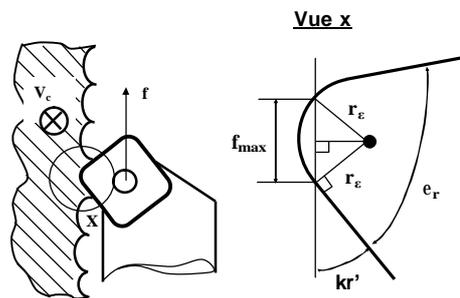


Fig. 3 : Modélisation si $f < f_{\max} = 2 r_e \sin(k_r)$.

La mise en équation de la spirale en coordonnées polaires dans le cas où $f < f_{\max}$ nous donne : $r = \frac{q \cdot f}{2 \cdot p}$ (il s'agit d'une représentation sous forme polaire).

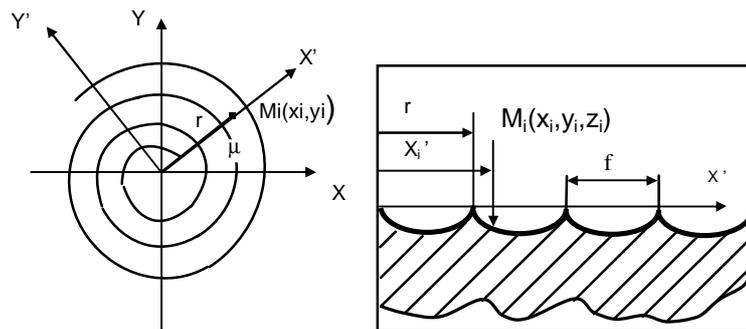


Fig. 4 : Calcul de l'attitude Zi d'un point Mi

On obtient Zi par l'équation suivante :

$$Z_i = r_e - \sqrt{\left(r_e^2 - \frac{f^2}{4}\right)} - \sqrt{r_e^2 - \left[\sqrt{(x_i^2 + y_i^2)} - \left(\frac{m + 2 \cdot p \cdot p}{2 \cdot p} + \frac{f}{2}\right)\right]^2}$$

Avec

$$m = \text{Arc tan} \left(\frac{y_i'}{x_i'} \right) \text{ et } p = \text{partie entière} \left(\frac{x_i'}{f} - \frac{m}{2 \cdot p} \right)$$

A partir de cet instant, et avec l'utilisation de FORTRAN 90 en récupère un fichier de point qui représente les coordonnées x_i, y_i, z_i , de chaque point M_i de la surface dresser. Et avec le TECPLOT qui permet la conversion du fichier de points en surface continue en récupère le profil théorique de la topographie de la surface dresser (figure 5)

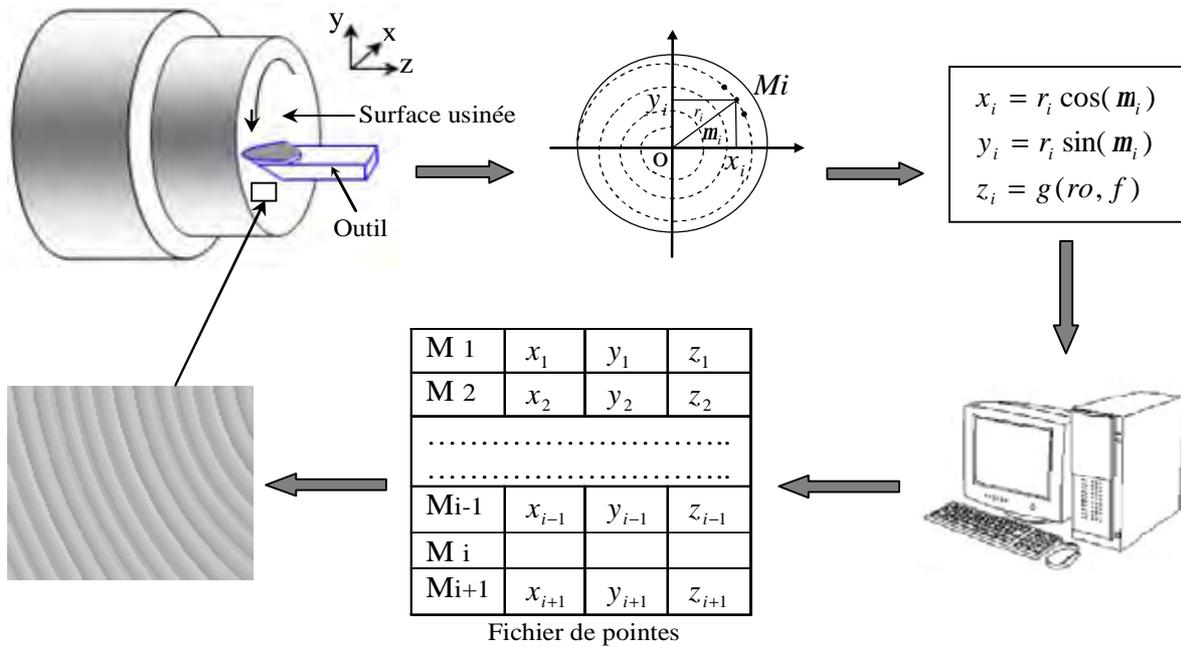


Figure III-10 : Procédure à suivre pour la reproduction de la surface usinée par simulation numérique.

Cet aperçu donne une idée sur la variation de la géométrie en fonction des paramètres de coupe ainsi que la géométrie de l'arrête tranchante. Le présent sujet de recherche consiste à retraduire la signature de l'outil de coupe selon la trajectoire pour obtenir l'image virtuelle de la surface en vue d'une modélisation la tenue de service des sous ensembles mécanique.

Résumé

Quelque soit le mode d'usinage par enlèvement de matière sous forme de copeau, le but final est d'obtenir un produit dont la qualité d'exécution sera caractérisée par une précision dimensionnelle des formes géométriques et un degré de propreté des surfaces lié directement à la notion de rugosité. Dans ce travail, nous avons étudié la variation de la géométrie des pièces mécaniques élaborées par usinage en fonction des paramètres géométrique (rayon de bec) et cinématique (avance) de la coupe. Comme il y a un rapport étroit entre l'état de surface et la qualité des tolérances dimensionnelles des pièces usinées, nous avons développé un modèle mathématique qui permet de reproduire le profil théorique de la topographie d'une surface obtenue par une opération de dressage et étudier la variation de la rugosité théorique en fonction du rayon de bec et de l'avance de l'outil.

Abstract

Some is the mode of machining by removal of matter in the form of chip, the final Goal is to obtain a product of which the quality of execution will be characterized by a dimensional accuracy of geometrical forms and a degree of surfaces cleanliness related directly to the concept of roughness. In this work, we have investigated the variation of parts geometry worked out by machining according to the geometrical parameters (ray of nozzle) and kinematics parameters (feed rate). Like there is a close connection between the surface quality and the quality of the dimensional tolerances of machined parts we have developed a mathematical model who allows to reproduce the theoretical profile of surface topography obtained by an operation of raising and to study de effects of feed rate and insert radii on the theoretical roughness.

ملخص

مهما تكن كيفية التصنيع عن طريق الخراطة بنزع المادة على شكل قطع صغيرة ، فان الهدف الأساسي هو الحصول على منتج بحيث تتميز طريقة التنفيذ بدقة الأبعاد و درجة نقاوة عالية للسطوح المنجزة مرتبطة مباشرة بمبدأ الخشونة. لقد قمنا من خلال هذا العمل بدراسة تأثير شروط القطع على تغير أبعاد القطع الميكانيكية المصنعة، و ذلك بتطوير نموذج رياضي يمكننا من إعادة تكوين الشكل النظري للسطوح المصنعة و كذا دراسة تأثير الشروط الهندسية و الحركية للقطع المتمثلة في سرعة انتقال أداة القطع و نصف قطر منقار الأداة على الخشونة النظرية و ذلك باستعمال الإعلام الآلي. ولقد اتبعنا هذا الأسلوب في الربط و الدراسة، نظرا للعلاقة الوطيدة الموجودة بين درجة خشونة السطوح و دقة أبعاد القطع الميكانيكية المصنعة.