

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : FABRICATION MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE

RÉALISER PAR :

NOM PRÉNOM : TOULOUM HAKIM

NOM PRÉNOM : DERDAR YEBDAS

Thème

***Etude de conception et dimensionnement du système de perçage
de trous de forme carrée***

Soutenu en septembre 2020 devant le jury composé de:

M^{lle} N.ADJOUADI

Président

Mr R. YOUNES

Rapporteur

Mr M.HADJOU

Encadreur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019 - 2020

Remerciements

Nous remercions le Bon Dieu de nous avoir donné la force, la patience et le courage d'avancer en cette période spéciale de notre existence.

À notre promoteur Monsieur HADJOU Madjid

Vous. Recevez nos plus sincères remerciements pour les moyens mis à notre disposition tout le temps passés au niveau de halle technologie. Votre expérience, vos grandes compétences et vos précieux conseils ont permis l'accomplissement de ce travail. Nous avons particulièrement apprécié votre enthousiasme et votre dynamisme communicatif, votre patience. Trouvez ici le témoignage de notre profonde admiration et de nos remerciements les plus sincères.

Tout le personnel du hall de technologie

Nous adresserons aussi nos sincères remerciements :

À tout le cadre d'enseignants qui par leur engagement scientifique et éducatif, durant ces cinq années d'études, ont été pour moi une source d'inspiration.

Mes vifs remerciements s'adressent aux MEMBRES DU JURY, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en examinant ce mémoire de fin d'étude, soyez assures de ma respectueuse considération.

Enfin, à toutes les personnes ayant contribué de près ou du loin à la réalisation de ce travail.



DÉDICACES

*À MES CHERS PARENTS QUI M'ONT ENCOURAGÉ ET SOUTENU TOUT AU
LONG DU PARCOURS DE MES ÉTUDES*

À TOUT MA FAMILLE

À TOUS MES AMIS

À TOUS MES ENSEIGNANTS

À TOUT LA PROMOTION GÉNIE MÉCANIQUE 2019/2020

YEBDAS

DEDICACE

A ma très chère mère, Porteuse de mes espoirs

A mon père pour ses sacrifices

A mes frères Yacine et Hocine

A toute ma famille

A tous mes amis, en particulier : Youva, Bizak, Fayçal, Adel, et Slimane

HAKIM

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I généralité sur l'usinage	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définitions.....	3
I.2.1 Le tournage.....	3
I.2.1.1 Principe de tournage	4
I.2.1.2 Les tours	4
I.2.1.3 Classification des machines de tour.....	5
I.2.1.4 Différentes opérations de tournage	6
I.3 Conditions de coupe en tournage.....	9
I.3.1 Vitesse de coupe.....	9
I.3.2 Vitesse d'avance V_f Avance par tour f	11
I.3.2.1 Les types d'avances	11
I.3.3 Profondeur de passe « a »	12
I.4 Paramètres géométriques de coupe	12
I.5 Éléments d'outil	13
I.5.1 Faces et arêtes de l'outil	14
I.5.2 Angles de l'outil	15
I.5.3 Outil de coupe à plaquette rapportée.....	17
I.6 Matériaux de l'outil	17
I.7 Paramètres techno-économiques d'usinage.....	19
I.7.1 Temps d'usinage	19
I.7.2 Coût d'usinage	20
I.8 Durée de vie d'un outil de coupe	20

I.9 Fraisage	22
I.9.1 Différents types des fraiseuses	22
I.9.1.1 Fraiseuses universelles.....	22
I.9.1.2 Fraiseuses de production (à programme, commande numérique).....	23
I.9.2 Procédés de fraisage	24
I.9.2.1 Fraisage en bout.....	24
I.9.2.2 Fraisage en roulant.....	24
I.9.2.3 Fraisage combiné.....	25
I.10 conclusion	25

Chapitre II

II.1 Introduction	26
II.2 Le perçage	27
II.2.1 Le foret	29
II.2.2 Différents types des forets monoblocs	32
II.2.3 Éléments de la géométrie du foret	34
II.3 Matériaux et revêtements des forets	37
II.4 Lubrification et perçage à sec ou à lubrification minimale	43
II.5 Formation des copeaux	44
II.6 Mécanismes d'enlèvement de la matière pendant le perçage	45
II.7 Bavure	46
II.8 Usure de foret	47
II.9 Perçage assisté	50
II.10 Conclusions	51

Chapitre III partie pratique

III.1 Introduction	52
III.2 Etude théorique de la trajectoire de l'outil de coupe.....	53

III 2.1 Construction (concept géométrique)	53
III.2.2 Définition du triangle de Reuleaux.....	53
III 2.3 La construction du triangle de Reuleaux	56
III 2.5 Principe de fonctionnement	59
III 2.6 Calcul des courbes	62
III.3Etude de la forme géométrique de l’outil et ses caractéristiques	63
III.3.1 Forme pour l’outil.....	63
III.3.2 Vue réelle de l'outil de coupe	64
III.3.3 Géométrie de l'outil de coupe	65
III.3.4Rapport de rotation	66
III.4Présentation et description du système étudié.....	67
III.5 Dimensionnement des éléments composant le système étudié	68
III.5.1 Choix des matériaux et leurs caractéristiques mécaniques.....	69
III.5.1.1 Outil de coupe de points	69
III.5.1.2 Support et éléments de soutien.....	70
III.5.1.3 Joint de cardon pour transmission de couple	70
III.5.1.3.1 Modèle d'accouplement universel.....	72
III.5.1.3.2 calcul de résistance de la goupille du joint de cardan	72
III.5.1.3.2.1 Calcul de la contrainte de cisaillement	73
III.5.1.3.2.2 Puissance nécessaire à la coupe	74
III.5.1.4 Perceuse	74
III.5.1.4.1 Spécifications	75
III.5.1.4.2 Présentation de la perceuse à colonne	75
III.5.1.4.3 Fonctionnement	76
III.5.2 Assemblage du mécanisme conçu	77
III 5.3 Avantages et limites.....	78
III.7 Simulation numérique de la construction conçu	75

III.7.1 Fondement du maillage	75
III.7.2 Distribution des contraintes	81
III.7.3 Gammes d'usinage du système de perçage étudié.....	84
III.6 Conclusion.....	87
Conclusion générale	88
Référence bibliographique	
Annexe	

LIST DE FIGURE

Chapitre I généralité sur l'usinage

Figure I.1 Procédure de tournage.....	3
Figure I. 2 Principe de tournage.....	4
Figure I.3 Composantes de tour.....	5
Figure I.4 Chariotage.....	6
Figure I.5 Alésage	7
Figure I.6 Dressage	7
Figure I.7 Perçage	7
Figure I.8 Rainurage	8
Figure I.9 Chanfreinage.....	8
Figure I.10 Tronçonnage	8
Figure I.11 Filetage	9
Figure I.12 Conditions de coupe	9
Figure I.13 Vitesse de coupe	10
Figure I.14 Vitesse d'avance V_f , Avance par tour f	11
Figure I.15 Différente types d'avance	12
Figure I.16 Les profondeurs de passe.....	12
Figure I.17 Paramètres géométriques de coupe	13
Figure I.18 Arêtes et parties actives d'un outil de tournage	14
Figure I.19 Mouvement relatif outil/ pièce en tournage	15
Figure I.20 Angles du taillant (outil en main)	16
Figure I.21 Angles du taillant (outil en travail)	16
Figure I. 22 Plaquettes	17
Figure I.23 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant	18
Figure I.24 Paramètres de temps technologique	19
Figure I.25 Critère d'usure VB	21
Figure I.26 Fraiseuse universelle	22
Figure I.27 Fraiseuse à C.N. à banc fixe	23

Figure I.28 Fraisage en bout	24
Figure I.29 Fraisage en roulant	24
Figure I.30 Fraisage combiné	25

Chapitre II généralité sur le perçage

Figure II.1 Exemples de trous réalisés dans des pièces issues de plusieurs secteurs de l'industrie mécanique : (A) bloc moteur et culasse (secteur automobile), (B) moteur d'avion (secteur aéronautique) et (C) plaque d'un échangeur	26
Figure II.2 Vitesse de rotation et d'avance	27
Figure II.3 Foret hélicoïdal classique ou conventionnel à queue conique, sa pointe est caractérisé par deux arêtes principales et une arête centrale rectilignes, l'exemple choisi est un peu ancien, on n'utilise plus ce genre de foret.....	28
Figure II.4 Angle au sommet ou de pointe $2p$ et angles d'hélice à différents points de l'arête de coupe.....	29
Figure II.5 Différents types de forets.....	30
Figure II.6 Evaluation de coût des pièces avec les différents types de forets	31
Figure II.7 (A) Différents types de foret, (B) Les opérations réalisées avec des forets étagé	32
Figure II.8 Différents types de la goujure : de gauche à droite on aperçoit la goujure conventionnelle, la goujure avec une épaisseur d'âme importante puis deux exemples de la goujure parabolique.....	33
Figure II.9 Foret avec une pointe conventionnelle, avec angle réduit et à double angle.....	35
Figure II.10 Quelques exemples de pointes du foret.....	36
Figure II.11 Différents matériaux et revêtements d'outils	38
Figure II.12 Image réalisée avec un MEB d'un outil revêtu avec trois couches de revêtement (A) puis une seule couche (B).....	40
Figure II.13 L'évolution de VBC pendant le perçage avec des forets revêtus et sans revêtement	41
Figure II.14 Nombre de trous percés avec des forets non revêtus et revêtus avec plusieurs types de revêtements.....	41
Figure II.15 Lubrification interne et externe.....	42
Figure II.16 Différents types de copeaux.....	44
Figure II.17 Mécanisme d'enlèvement de la matière pendant le perçage avec un foret hélicoïdal conventionnel (a) et un foret de géométrie moderne (b).....	45

Figure II.18 Trois types de bavure de L’AISI 4118, de gauche à droite : bavure uniforme, bavure transitoire et bavure en forme d’une couronne.....	46
Figure II.19 Différents types d’usure des forets : (A) usure de la dépouille, (B) usure de la face de coupe et (C) usure des listels.....	47
Figure II.20 L’usure par adhésion à gauche.....	48
Figure II.21 Exemple de rupture du foret	48
Figure II.22 Principe du perçage vibratoire.....	49

Chapitre III partie pratique

Figure III.1 Fenêtre en forme Triangle de Reuleaux	50
Figure III .2 Un cercle à l’intérieur de deux lignes parallèles	51
Figure III .3 Le triangle de Reuleaux à l’intérieur du périmètre du carré	52
Figure III .4 Triangle équilatéral	52
Figure III .5 Tapis reuleaux.....	53
Figure III .6 Courbes de largeur constante	53
Figure III .7 Périmètre et aire du triangle de Reuleaux.....	54
Figure III .8 Un cercle divisé par six.....	54
Figure III .9 Position initiale	57
Figure III.10 Rotation de 15° du triangle pour une rotation de son centre de 45°.....	58
Figure III.11 Trajectoire du centre de ce triangle.....	58
Figure III.12 Le lieu d’un sommet du triangle de Reuleaux	59
Figure III.13 L’ellipse intérieure et extérieure	59
Figure III.14 Les morceaux de courbe	60
Figure III.15 Trajet elliptique	60
Figure III.16 Triangle de Reuleaux de côté(a)	61
Figure III.17 Forme de l’outil	61
Figure III.18 Les mèches possibles.....	62
Figure III.19 Conception de l’outil avec le triangle de Reuleaux incorporé.....	62
Figure III.20 Profil de l’outil conçu.....	63
Figure III.21 L’outil pour reperçage de trous carrés.....	63

Figure III.22 La variation des angles entre la rotation du triangle autour de son axe et la rotation de son axe autour du carré	64
Figure III.23 Guide de déplacement	65
III.24 Le guide carré fixé à la perceuse portable	65
Figure III.25 Mécanisme de perçage du trou carré utilisant un joint de cardan	66
Figure III.26 Perceuse à trous carrés avec outil spécial	66
Figure III.27 Conception d'outil avec triangle de Reuleaux.....	67
Figure III.28 Image du support et des éléments de support fabriqués.....	68
Figure III.29 Joint de cardon au XVIe siècle	69
Figure III.30 Image de l'accouplement par joint de cardan choisi pour la machine.....	70
Figure III.31 Couplage Richard Schmidt.....	70
Figure III.32 Couplage Oldham.....	70
Figure III.33 Perceuse standard.....	73
Figure III.34 Principaux organes de la perceuse	74
Figure III.35 Configuration expérimentale pour la perceuse à trous carrés.....	75
Figure III.36 Carré avec les coins arrondis	76
Figure III.37 Maillage du triangle de Reuleaux.....	78
Figure III.38 Distribution des contraintes du triangle de Reuleaux.....	78
Figure III.39 déplacements.....	79
Figure III.40 Déformations.....	79

Liste des tableaux

Tableau II.1 Familles des matériaux des forêts.....37

Tableau II.2 Caractéristiques gdes différents matériaux et revêtements d'outils.....39

Nomenclature et Symbole

M_e		Mouvement de coupe
M_f		Mouvement d'avance
V_c	m/min	Vitesse de coupe
N	tr/min	Vitesse de broche
D	mm	Diamètre de la pièce
V_f	mm/min	La vitesse d'avance
f	mm/tour	Avance par tour
a	mm	Profondeur de passe
a_p	mm	Profondeur de coupe
a_f	mm	Engagement de l'arête
h	mm	Épaisseur de coupe
b	mm	Largeur de coupe.
b_D	mm	Largeur nominale de coupe
K_r	rad	Angle de direction d'arête
α	rad	Angle de direction d'arête
β	rad	Angle de taillant
γ	rad	Angle de coupe

Introduction générale

Historiquement, la recherche sur l'usinage s'est concentrée sur deux aspects : le premier aspect concerne le développement technologique qui permet d'améliorer la productivité ainsi que la qualité des pièces finies, le deuxième aspect est la modélisation qui permet la prédiction des efforts de coupe, des champs de température et des propriétés des surfaces finies [21]. Cependant, le processus de fabrication, en particulier l'usinage, joue un rôle important sur la qualité et l'intégrité des surfaces réalisées. La complexification constante des systèmes de fabrication et la concurrence amènent les technologies d'usinage à se développer rapidement. Les machines deviennent de plus en plus rapides et puissantes dans le but d'obtenir des gains de productivité [22].

La connaissance de l'impact que peut avoir l'usinage de la surface d'un produit fini à forte valeur ajoutée est d'un intérêt primordial pour les ingénieurs et les scientifiques. Les défis principaux sont alors la prédiction du copeau formé, des évolutions de la microstructure, du comportement mécanique et du comportement en corrosion des matériaux usinés. De nombreuses études adoptant des approches numériques et expérimentales ont été réalisées dans l'objectif d'analyser la formation du copeau. Par contre, beaucoup moins d'attention a été portée sur le lien entre les conditions d'usinage appliquées et les propriétés physico-chimiques des surfaces usinées qui en dépendant (rugosité de la surface, contraintes résiduelles induites, transformation de phase, recristallisation, dureté, structures de dislocation,...) [23].

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 mise en jeu lors de la coupe [24]

L'obtention des formes requises d'une pièce par enlèvement de matière est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Malgré les progrès réalisés par les procédés de mise en forme des matériaux (formage, fonderie...). L'usinage se révèle nécessaire pour l'obtention

des produits finaux [1]. L'objectif principal de l'usinage est l'augmentation du taux de productivité par la diminution du temps et du coût de production. Pour atteindre cet objectif on utilise les méthodes d'optimisation des conditions de coupe [2]

La résolution du problème d'optimisation des conditions de coupe a un intérêt considérable dans le domaine de la production mécanique puisqu'elle permet l'utilisation rationnelle des moyens de fabrication (Machine-outil, outillage...) [3].

En premier chapitre on a présenté les diverses opérations d'usinages, où on a cité les leurs paramètres et les différentes machines-outils.

Le deuxième chapitre est consacré sur le perçage et les différentes géométries des forets, et leurs mécanismes de l'enlèvement de la matière.

Dans le troisième chapitre on a étudié la conception et dimensionnement de notre système, et on a expliqué comment convertir le mouvement de rotation a un mouvement carré ; après on a fait une simulation pour vérifier la résistance de l'outil au contraintes.

I.1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement du métal à froid et sans déformation en utilisant un outil. La quantité de matière enlevée est dite copeaux et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé outil de coupe. L'opérateur utilise des machines dites machines-outils pour réaliser l'usinage d'une pièce. Dans ce chapitre nous présentons généralité sur le tournage, qui contient des définitions, les conditions de coupe et la géométrie d'outil en plus les paramètres techno-économiques de production (temps, coût).

I.2 Définitions

I.2.1 Le tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes). [4]

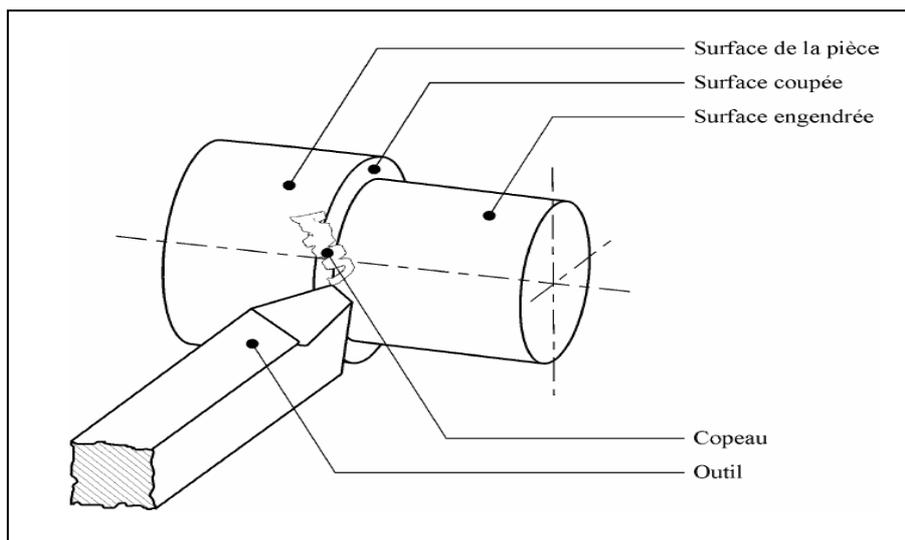


Figure I.1 Procédure de tournage

I.2.1.1 Principe de tournage

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe Me l'outil est animé d'un mouvement de translation parallèle ou oblique par rapport à l'axe de rotation c'est le mouvement d'avance Mf .

Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution tels que cylindre, cône, sphère, etc. Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [6].

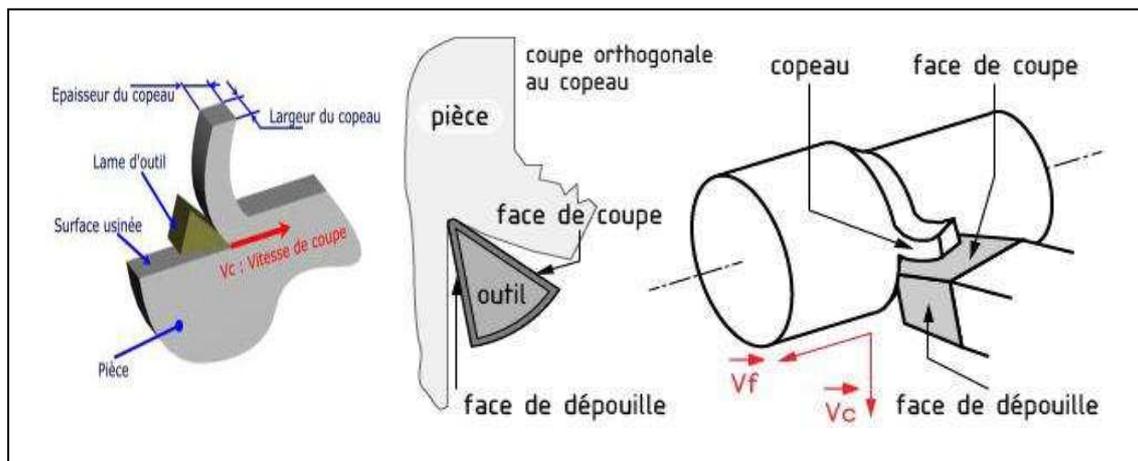


Figure I. 2 Principe de tournage [6]

I.2.1.2 Les tours

Les tours (voir Figure. I.3) permettent de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage) : cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche [7].

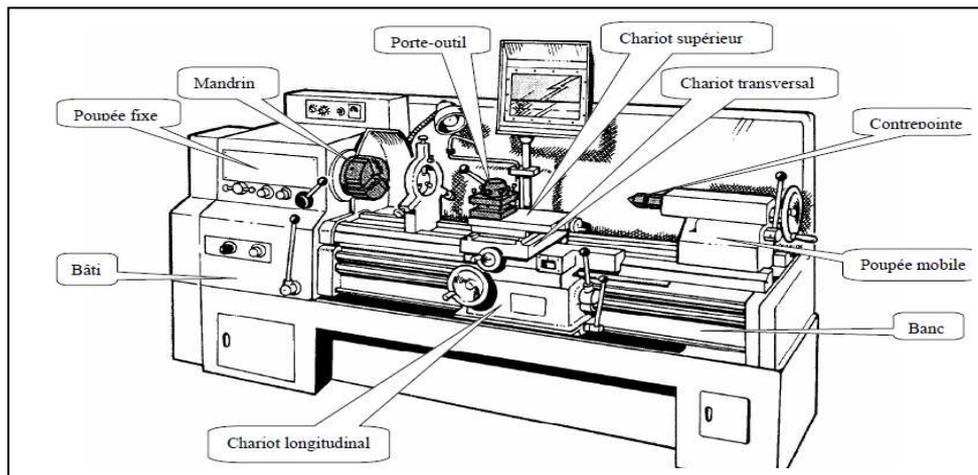


Figure I.3 Composantes de tour [7]

I.2.1.3 Classification des machines de tour

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont :

➤ Les tours parallèles à charioter et à fileter

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe [8].

➤ Les tours à copier

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque [8].

➤ Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série [8].

➤ Les tours automatiques

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries [8].

➤ Les tours automatiques multibroches

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches [8].

➤ Les tours à commande numérique

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives [8].

I.2.1.4 Différentes opérations de tournage

➤ Chariotage

Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.

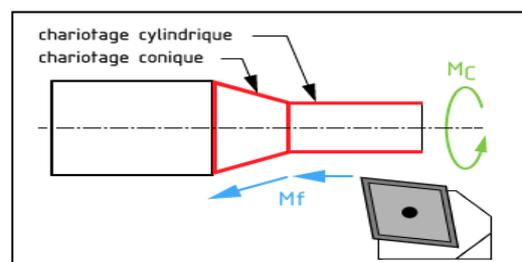


Figure I.4 Chariotage [8]

➤ Alésage

Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.

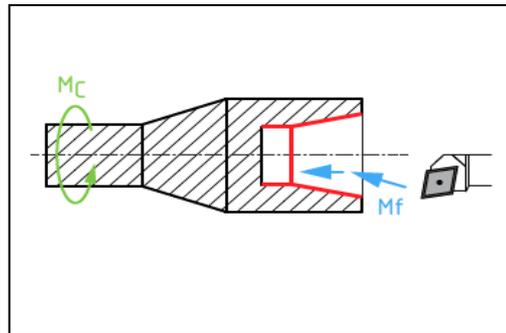


Figure I.5 Alésage [8]

➤ Dressage

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure.

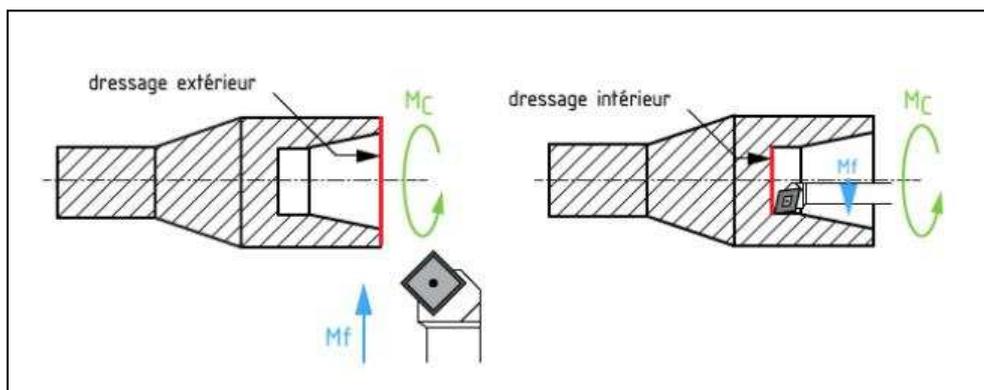


Figure I.6 Dressage [8]

➤ Perçage

Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'une forêt.

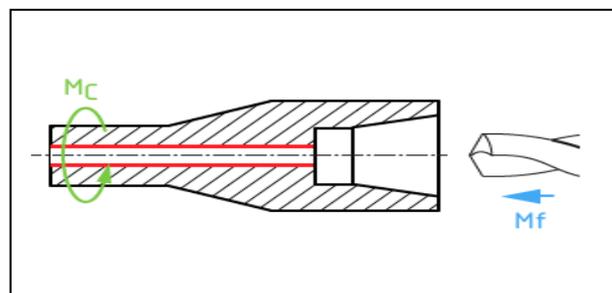


Figure I.7 Perçage [8]

➤ Rainurage

Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un céclépse ou d'un joint torique par exemple.

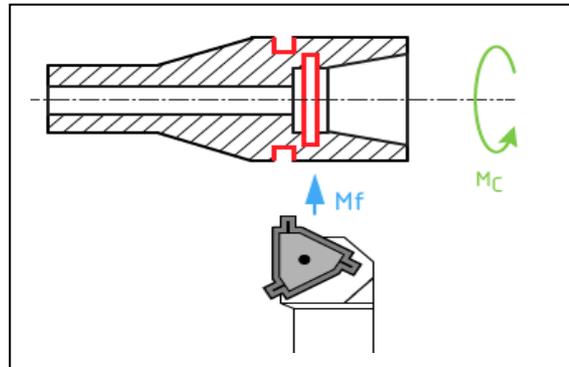


Figure I.8 Rainurage [8]

➤ Chanfreinage

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.

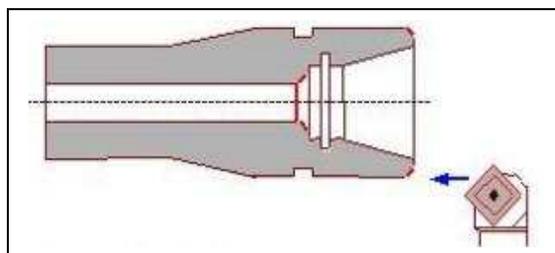


Figure I.9 Chanfreinage [8]

➤ Tronçonnage

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.

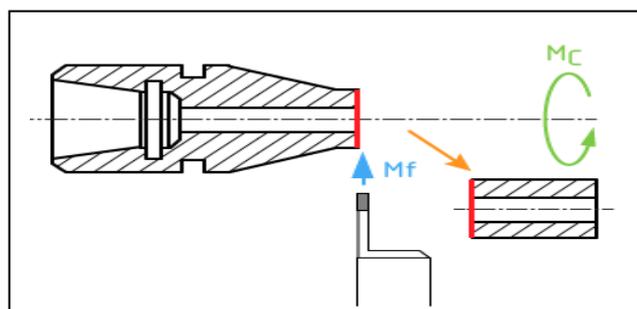


Figure I.10 Tronçonnage [8]

➤ Filetage

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.

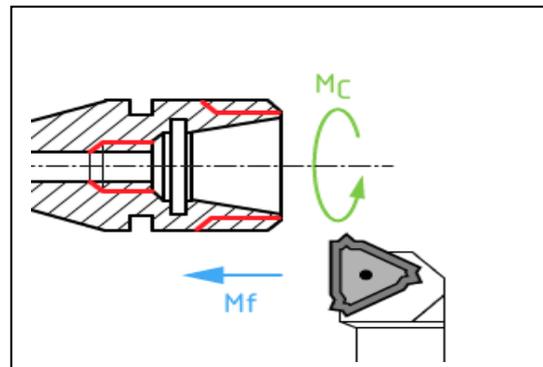


Figure I.11 Filetage [8]

I.3 Conditions de coupe en tournage

Les paramètres de coupe sont choisis mécaniques de la matière à usiner et de l'outil. Ils sont indépendants de la machine utilisée et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil.

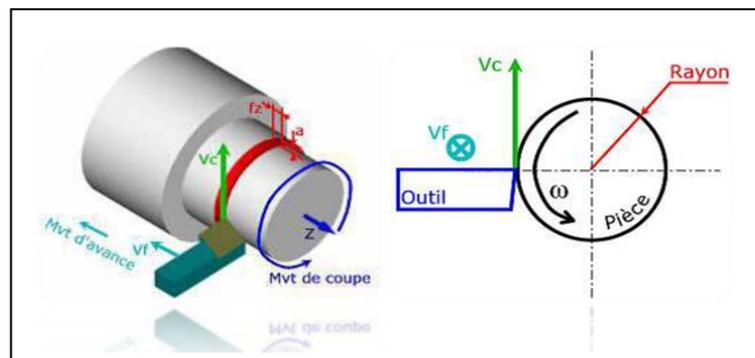


Figure I.12 Conditions de coupe [9]

I.3.1 Vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse ω *rad/s* (soit N *tr / min*), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre D , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut : [4]

$$V_C = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (\text{I.1})$$

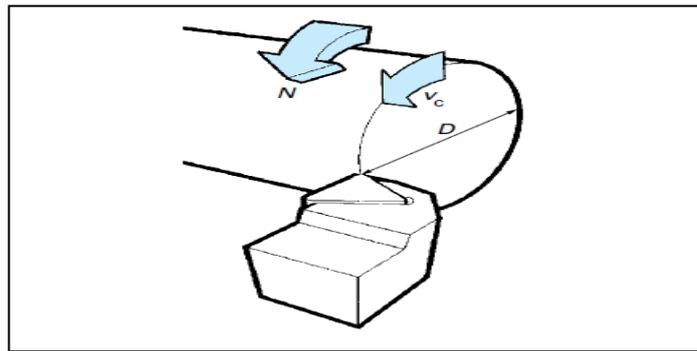


Figure I.13 Vitesse de coupe [4].

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe soit, avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique

V_c : vitesse de coupe (m / min)

D : Diamètre de la pièce (mm)

N : vitesse de rotation (tr / min)

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. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante. Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante [4].

Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment :

- des matériaux de la pièce et de l'outil.
- de la lubrification.
- de la durée de vie souhaitée pour l'outil.

I.3.2 Vitesse d'avance V_f Avance par tour f

La vitesse d'avance V_f (mm / min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti.

L'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent [4].

$$V_f = f \times N \quad (I.2)$$

V_f : vitesse d'avance (mm / min)

f : L'avance (mm)

N : vitesse de rotation (tr / min)

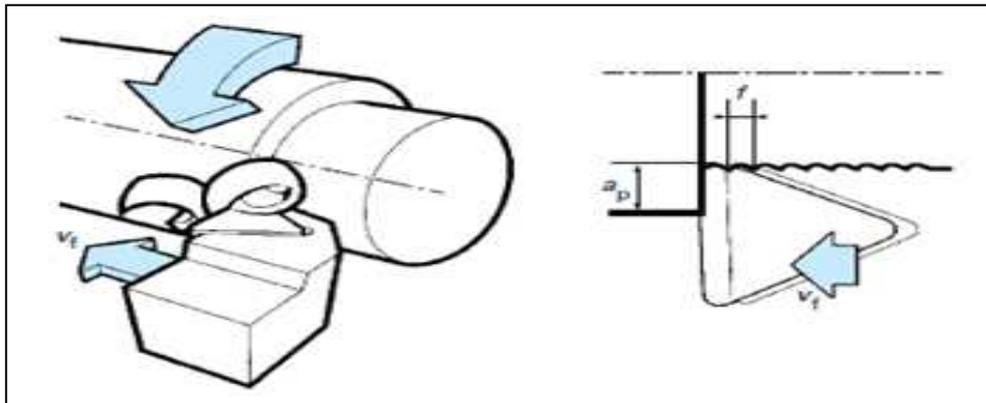


Figure I.14 Vitesse d'avance V_f , Avance par tour f [4]

I.3.2.1 Les types d'avances

On distingue trois sortes d'avance

a) Avance longitudinal

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

b) Avance transversale

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

c) Avance oblique

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

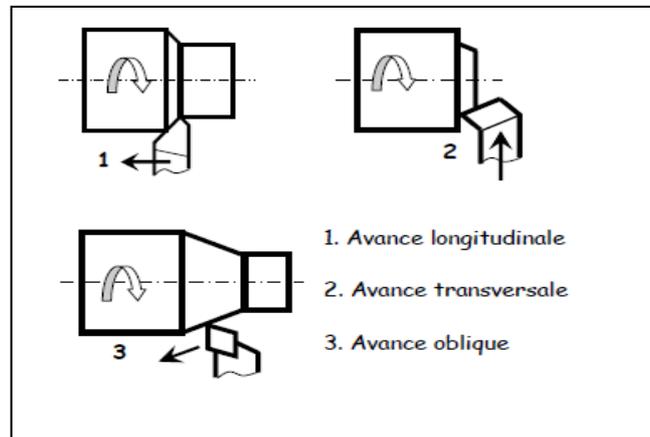


Figure I.15 Différents types d'avance [10]

I.3.2.2 Profondeur de passe «a» :

La combinaison de V_f et a permet de déterminer le volume de copeau. La profondeur de passe est nécessaire afin de déterminer la quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau.

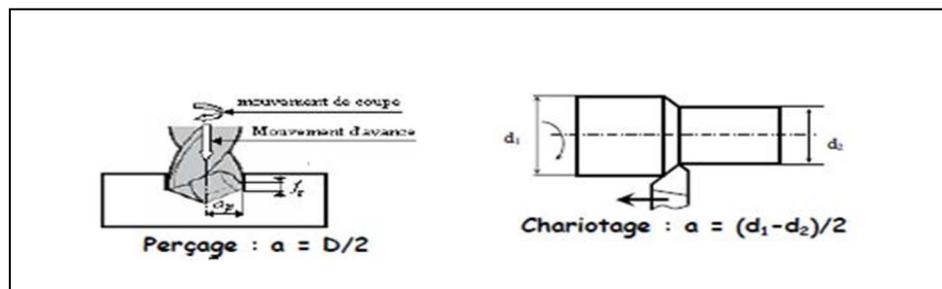


Figure I.16 Les profondeurs de passe. [8]

I.4 Paramètres géométriques de coupe

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de passe a . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe la couche de matière qui est enlevée par

une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés à la (figure I.17) [12].

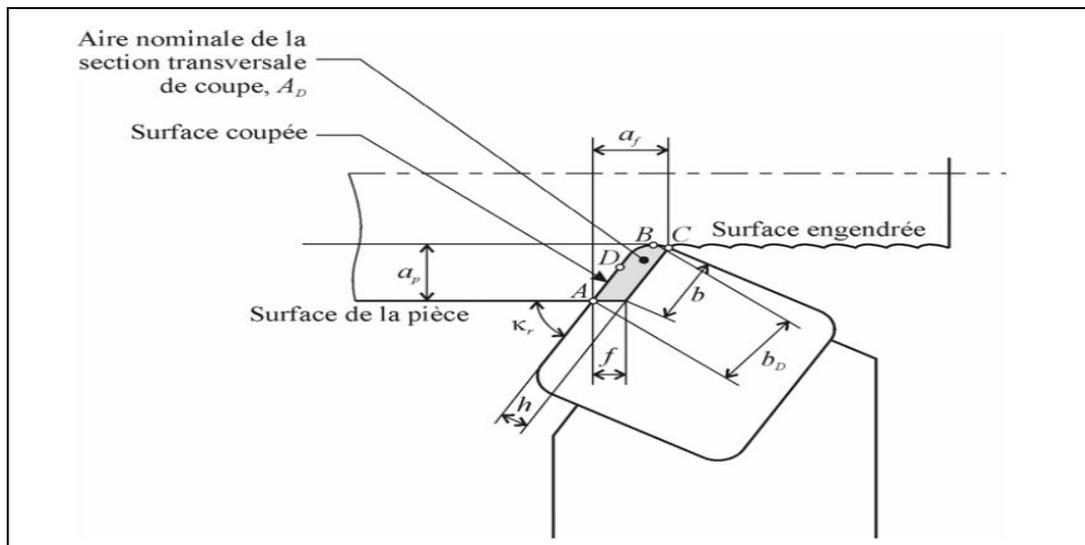


Figure I.17 Paramètres géométriques de coupe [12]

a : Profondeur de passe.

af : Engagement de l'arête.

f : Avance.

h : Épaisseur de coupe.

b : Largeur de coupe.

b_D : Largeur nominale de coupe.

K_r : Angle de direction d'arête.

I.5 Éléments d'outil

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons sur un outil de coupe en tournage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil [10].

I.5.1 Faces et arêtes de l'outil

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil et peut comporter une ou plusieurs parties actives, intersection de deux surfaces ($A_{\alpha 1}$, $A_{\gamma 1}$ Figure I.18). La partie active peut être constituée du même matériau que le corps, on parle alors d'outils monoblocs (carbures et aciers rapides) ou d'un matériau différent (inserts rapportés ou plaquettes pour les carbures, les cermets, les céramiques, les poly cristallins de bore ou de diamant). La (figure I. 18) précise le vocabulaire relatif aux différentes parties actives d'un outil de tournage.

En plus de cette description de la géométrie locale des outils, il existe une norme (ISO 1831) permettant de décrire les différentes parties constitutives des outils de tournage à plaquettes rapportées, systématiquement utilisés aujourd'hui. Cette description indique une large part des caractéristiques des outils, à l'exception de la géométrie locale des brise-copeaux frittés sur les faces de coupe, et à l'exception de la composition des plaquettes et de leurs revêtements. Ce sont en fait les deux points clés qui font la spécificité des fabricants d'outils (impossible à normaliser) [6].

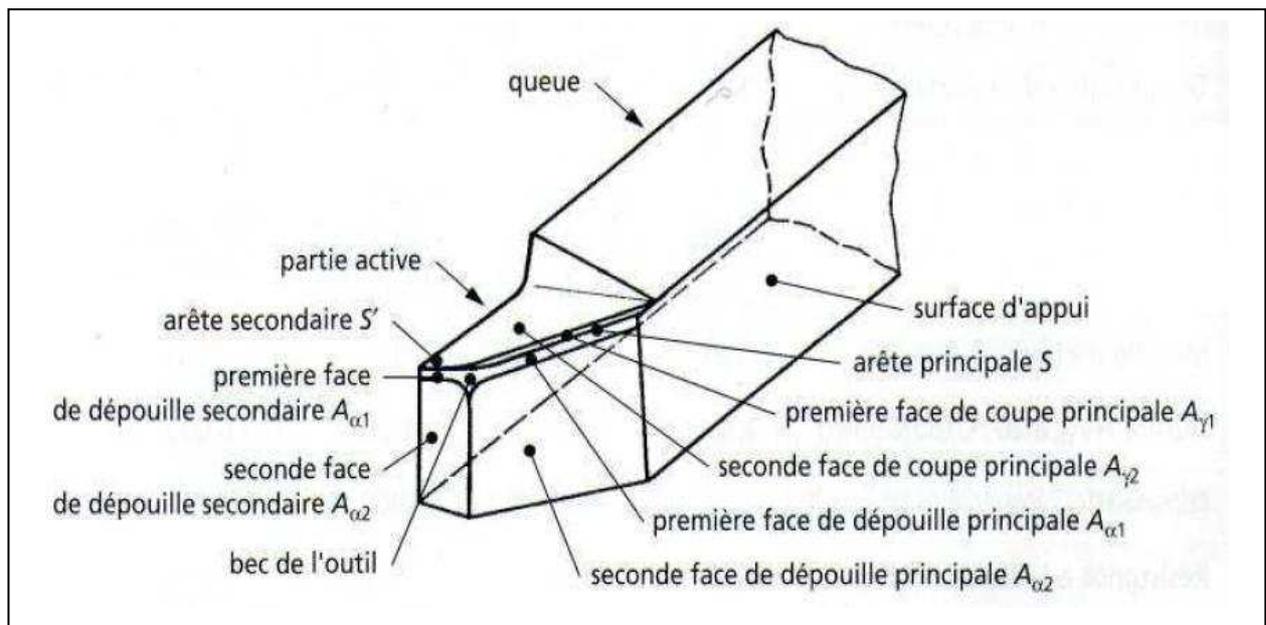


Figure I.18 Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [6]

La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces, la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée.

On appelle une arête un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Dans un outil de tournage simple, on peut distinguer une arête principale, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille principale, et une arête secondaire, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil. Il peut être droit, arrondi ou représenter l'intersection vive des deux arêtes [10].

Généralement, un outil possède un mouvement de coupe et un mouvement d'avance. On en déduit des lors un vecteur résultant du mouvement relatif outil/ pièce exprime par le vecteur V_e . A partir de la, on peut définir deux systèmes d'angles d'un outil de coupe. On définit soit les angles d'outil « en main » par rapport à la direction supposée de coupe V_e

(repère nécessaire à la fabrication des outils), soit les angles d'outils « en travail » par rapport à la direction réelle de coupe V_c (repère nécessaire pour connaître les angles effectifs durant la coupe). A l'aide de ces repères, on établit une série de plans et d'angles normalisés permettant de décrire la géométrie locale des outils.

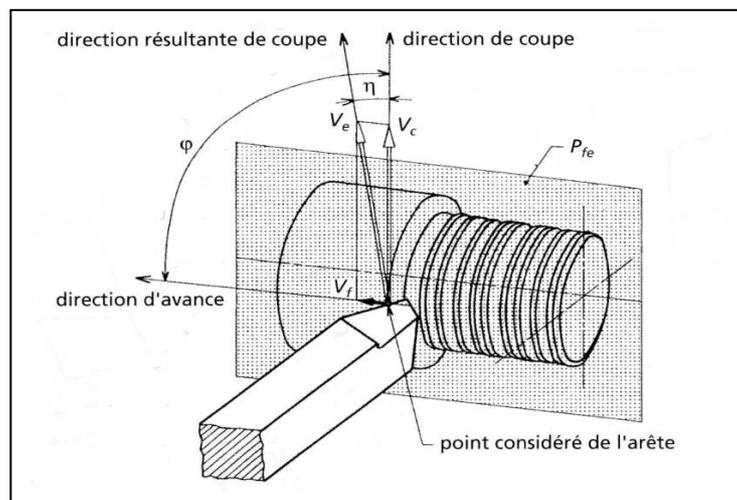


Figure I.19 Mouvement relatif outil/ pièce en tournage [5]

I.5.2 Angles de l'outil

Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur les dits phénomènes. La (figure I.20) illustre, dans les systèmes de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ [5].

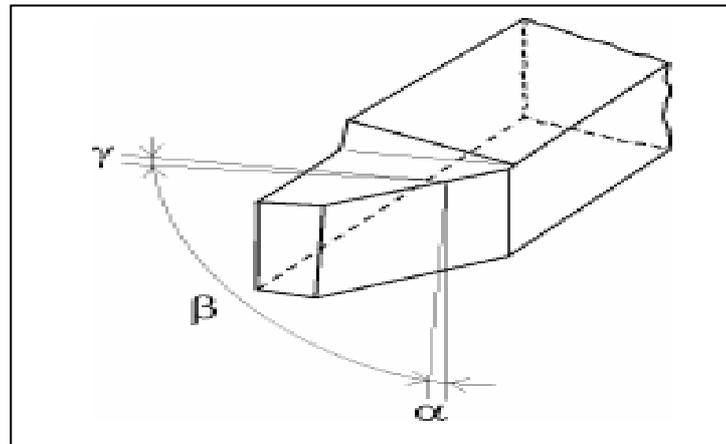


Figure I.20 Angles du taillant (outil en main) [5]

La (figure I.21) illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail : outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

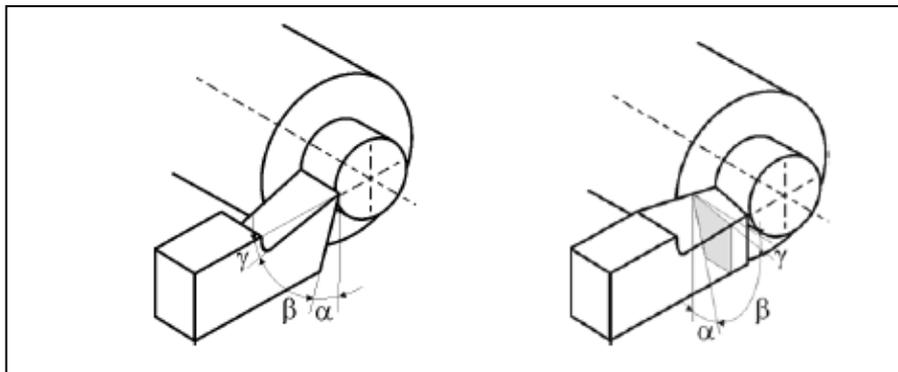


Figure I.21 Angles du taillant (outil en travail) [5]

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture détaillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° . $\beta + \gamma + \alpha = 90^\circ$

Dans le cas où la somme est supérieure à 90° , on parle de coupe négative (γ négatif). [5]

I.5.3 Outil de coupe à plaquette rapportée

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe. Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance. Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants : [4]

- Matière de la pièce, usinabilité.
- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage.
- Limitations : tolérances, état de surface.
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques.
- Stabilité, rigidité de la prise de pièce et de la pièce.



Figure I. 22 Plaquettes carbure de tournage [4]

I.6 Matériaux de l'outil

La partie active des outils de coupe et donc les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés :

- Une bonne résistance mécanique au frottement (résistance à l'usure).
- Une bonne résistance aux chocs (ténacité).
- Une bonne résistance à la pénétration (dureté).

- Une bonne résistance à la chaleur (garder ces propriétés à haute température par exemple dureté à chaud).
- Une bonne résistance à la pression.
- Une grande stabilité chimique vis-à-vis du matériau usiné et de l'atmosphère environnante (air, liquide de coupe, etc.).
- Une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température.
- Un bas prix d'achat et de mise en forme, ainsi que l'abondance des éléments de composition. [6]

Le diagramme (figure I. 23) est donné à titre indicatif pour situer les différents domaines des matériaux à outil. Il est représentatif des conditions normales d'utilisation de ces outils, en ébauche, pour les aciers et les fontes. Il ne peut être utilisé pour choisir les conditions de coupe [4].

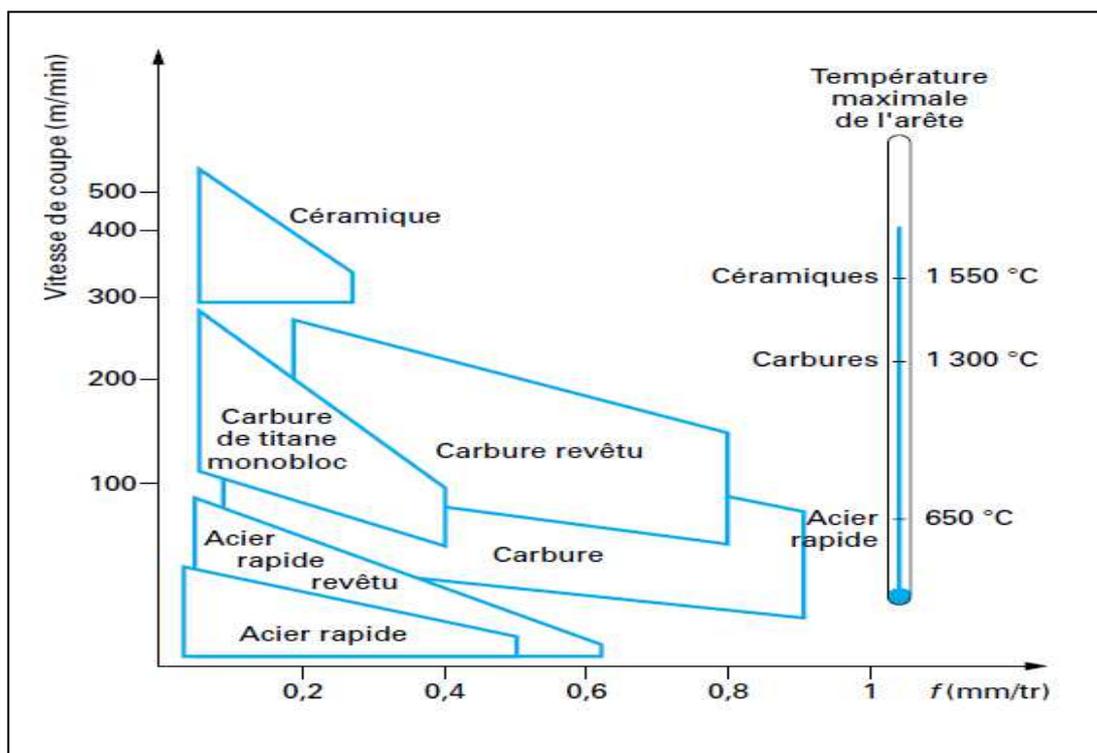


Figure I.23 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [4]

I.7 Paramètres techno-économiques d'usinage

Le coût d'usinage et le temps d'usinage sont les paramètres techno-économiques d'usinage. ces les paramètres qui déterminent l'important économique des pièces usinées [10].

I.7.1 Temps d'usinage

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. Il s'exprime par la relation :

$$T_u = t_m + t_{cs} \times \left(\frac{t_m}{T}\right) + t_r + t_n \quad (\text{I.3})$$

t_{cs} (Temps outil) : temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire,

T : Durée de vie de l'outil de coupe.

t_r : Temps de retour.

t_n : Temps de montage et démontage de la pièce.

t_m (Temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une avance), puisque on détermine le temps technologique comme suite :

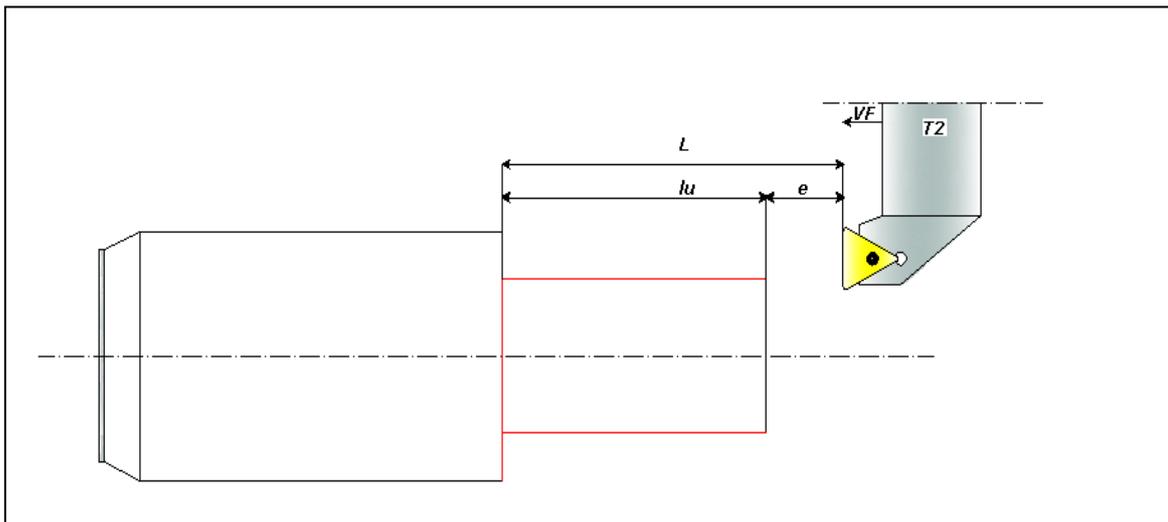


Figure I.24 Paramètres de temps technologique [10].

l_u : Longueur usinée

e : Distance de sécurité

V_f : vitesse d'avance

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = l_e + u \quad (\text{I.4})$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

$$t_m = \frac{L}{V_f} \quad (\text{I.5})$$

$$t_m = \frac{\pi \times D \times L}{1000 \times V_c \times f} \quad (\text{I.6})$$

I.7.2 Coût d'usinage

Généralement, la formule du coût d'usinage sous la forme :

Coût total = frais fixes + coût machine + coût outil

Le coût d'usinage unitaire est le coût nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce, il s'écrit comme suit :

$$C_u = (C_0 \times t_m) + (C_0 \times t_{cs}) + C_t \times \left(\frac{t_m}{T}\right) \times (t_r + t_h) \quad (\text{I.7})$$

C_u : Coût d'usinage unitaire

C_0 : Coût de machine en [\$/min].

C_t : Coût d'une arrête de coupe en [\$/arrête].

I.8 Durée de vie d'un outil de coupe

Compte tenu de la complexité du phénomène, il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la "durée de vie" de l'outil.

La durée de vie d'un outil est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considérée dans des conditions de coupe données.

Généralement on choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants :

- Défaillance brutale due à la déformation plastique de l'arête. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou les outils en céramique.
- Usure frontale, employé pour tous les outils, caractérisés soit par l'usure frontale moyenne soit par l'usure frontale maximale.
- Usure en cratère, employé seulement pour les outils en carbure métallique, caractérisé par la profondeur du cratère [6].

La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille dans la zone b (figure I.25) VB en mm .

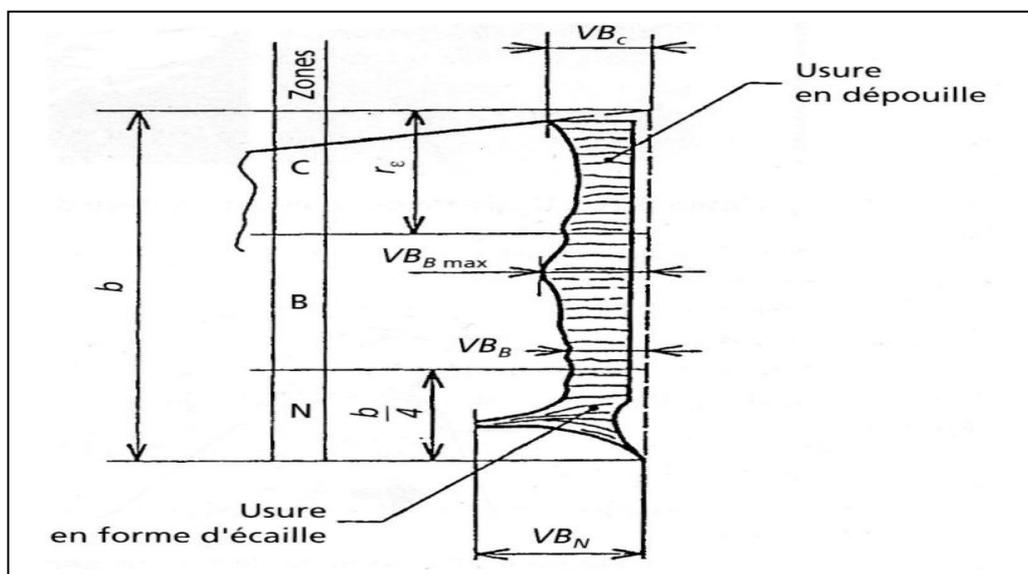


Figure I.25 Critère d'usure VB [6]

En fait la durée de vie de l'outil est fonction des différents paramètres, soit :

- Les conditions de coupe
- Le matériau et la géométrie de l'outil
- Le matériau et l'état physique de la pièce
- La lubrification

Généralement seules les conditions de coupe sont prises en considération et on établit des lois d'usure pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées [13].

I.9 Fraisage

L'opération de fraisage est sans aucun doute l'une des plus polyvalentes, permettant l'obtention de surfaces planes précises et aussi dans le cas des fraiseuses à commande numérique, de profils complexes et de surfaces 3D. Dans ce type de mise en forme, l'outil est entraîné en rotation par la broche de la machine, et un déplacement relatif est effectué entre la pièce et l'outil de coupe afin de produire sur la pièce la forme désirée. Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines peuvent également servir pour des opérations de tournage. L'outil, une fraise, est fixé dans la broche et est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions. On note qu'il existe plusieurs types de fraiseuses [26].

I.9.1 Différents types des fraiseuses

Le fraisage s'effectue sur différents types de machines

I.9.1.1Fraiseuses universelles

Cette machine (Figure I.26) sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière (les copeaux) [7].

Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions. L'appellation « fraiseuse à commande numérique » n'est pas très utilisée, on parlera plutôt de centre d'usinage 3 axes.

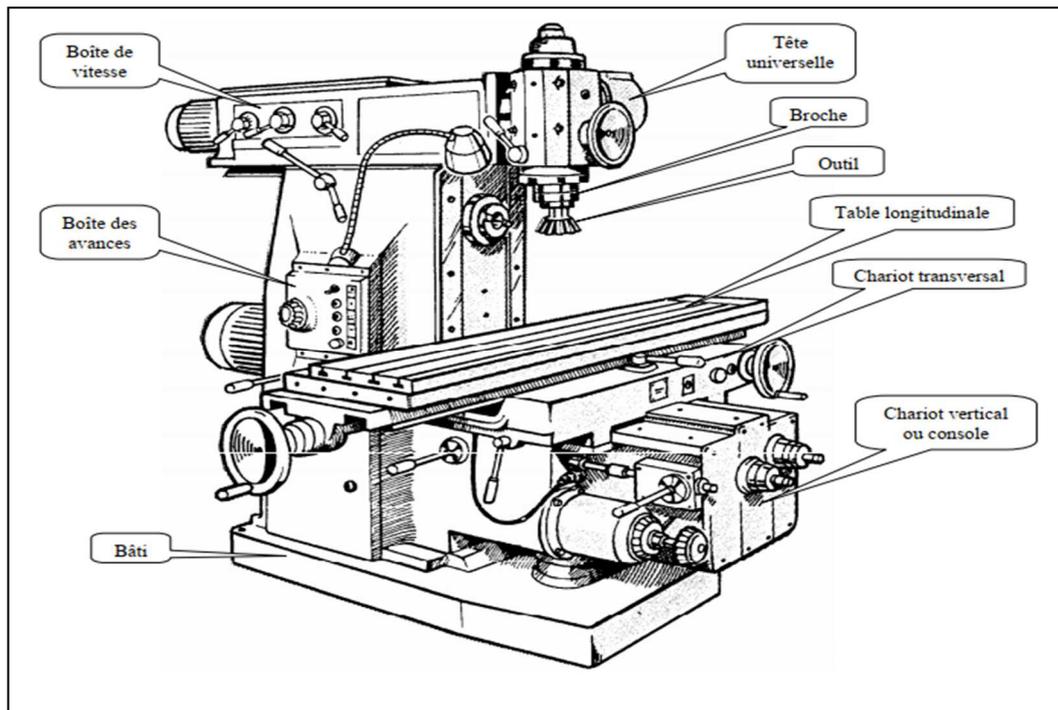


Figure I.26 Fraiseuse universelle [7]

I.9.1.2 Fraiseuses de production (à programme, commande numérique)

La commande numérique (CN) est une technique utilisant des données composées décodées alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologique nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé (Fig. I.27). La fraiseuse à commande numérique est une fraiseuse connectée à un système de commande numérique [27].



Figure I.27 Fraiseuse à commande numérique à banc fixe [27]

I.9.2 Procédés de fraisage

I.9.2.1 Fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner (FigI.28). La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure [28].

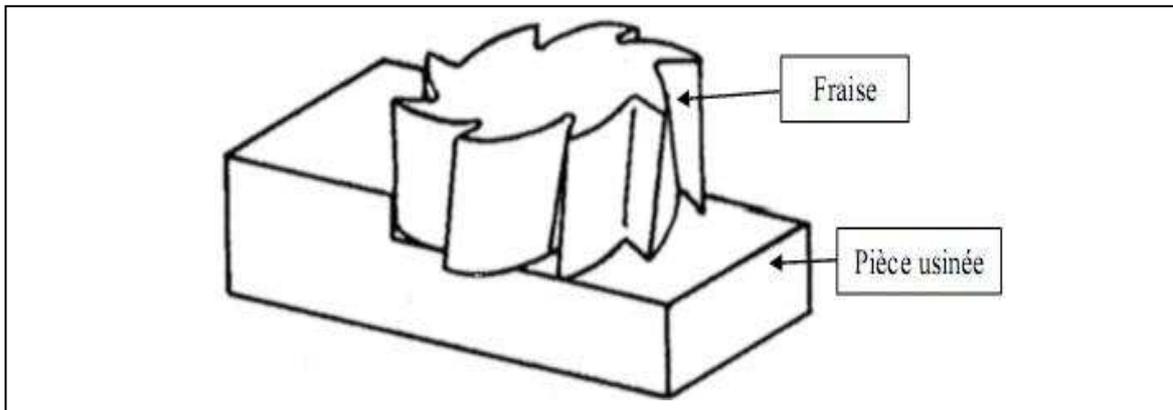


Figure I.28 Fraisage en bout [28]

I.9.2.2 Fraisage en roulant

Pour ce type de fraisage en roulant, l'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre (Figure I.29). La charge de la machine est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi : la denture est chargée/déchargée progressivement [28].

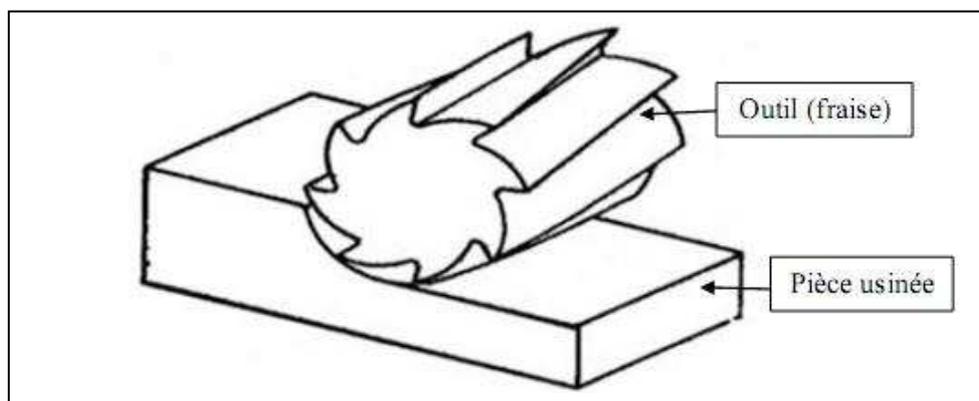


Figure I.29 Fraisage en roulant [28].

I.9.2.3 Fraisage combiné

Pour le fraisage combiné, la fraise coupe avec son diamètre et sa partie frontale (Figure I.30) [28]

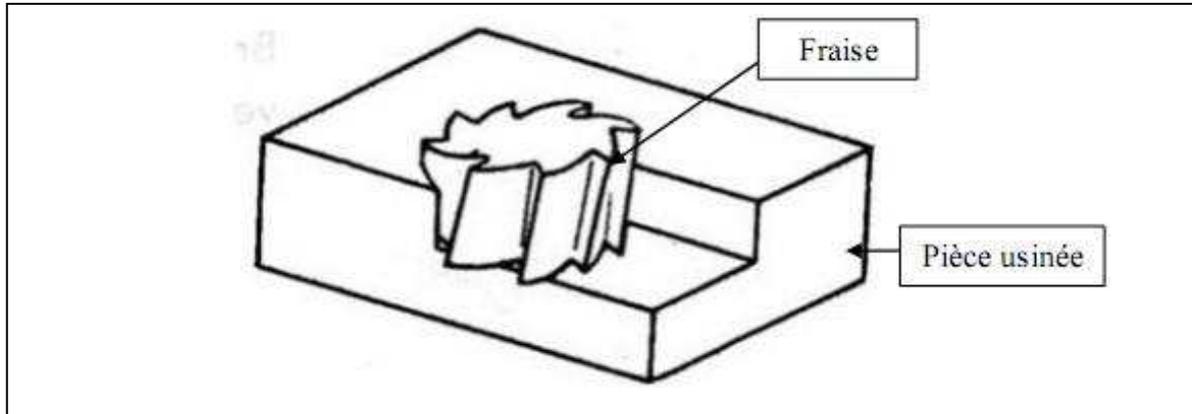


Figure I.30 : Fraisage combiné [28]

I.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre de notre étude le procédé de tournage ainsi que les paramètres techno-économiques, pour pouvoir réaliser une modélisation multi-passe du problème d'optimisation des conditions de coupe.

Dans le plus part des opérations d'usinage en tournage l'obtention des dimensions finale de la pièce on doit souvent effectuer par plusieurs passes de coupe, ou les paramètres d'usinage peuvent être déterminé en fonction de l'expérience de l'opérateur de la machine ou suivant le guide de coupe fournie par le fabricant de l'équipement.

II.1 Introduction

Le perçage est l'opération d'usinage la plus courante dans l'industrie mécanique. Parmi les différents procédés employés pour l'exécution des trous, le perçage à l'outil coupant effectué par un foret reste de loin le plus utilisé. Ce travail est consacré à l'étude du perçage à l'outil coupant (foret) de trous courts, de diamètre inférieur à 30 mm. Les forets monoblocs (réalisés en un seul matériau : acier rapide ou carbure de tungstène) ou brasés (inserts en matériau dur au niveau des parties actives brasés dans un corps en acier ou en carbure de tungstène), sont les forets employés pour effectuer ce type de trous. Sur les machines modernes d'un coût horaire élevé, les forets à géométrie conventionnelle ou classique en acier rapide ne satisfont pas aux critères de performances permettant d'atteindre un niveau de rentabilité satisfaisant. C'est pourquoi, l'utilisation de forets réaffûtés à géométries modifiées a augmenté au rythme de l'apparition de ses machines-outils. Cette géométrie modifiée a radicalement transformé les conditions de perçage des trous courts. Avec ces outils, on remarque des évolutions au niveau de l'arête centrale du fait de l'amincissement de l'âme du foret. Cela permet d'éliminer les problèmes liés aux efforts axiaux élevés au niveau de cette région.

Malgré ces améliorations, de nombreux problèmes liés au perçage peuvent avoir lieu, comme par exemple : l'erreur de forme, de surface, les bavures, le délaminage dans le cas des matériaux composites, la vibration, le broutement et l'usure ou la rupture de l'outil. Ces difficultés sont dues à un mauvais choix de l'outil ou des conditions de coupe utilisées. En outre de nouvelles nuances de matériaux sont développées dont leur usinabilité et leur condition de coupe optimale restent à déterminer. Pour résoudre ces problèmes, il faut choisir voire même développer la géométrie du foret, la matière et le revêtement de l'outil. Pour valider la géométrie et déterminer les meilleures conditions et stratégies de coupe pour un matériau donné, de nombreux essais, beaucoup de temps et des moyens techniques et financiers sont nécessaires. Ainsi, l'intérêt de la modélisation du perçage est de permettre d'économiser du temps et de l'argent.

II.2 Le perçage

Le perçage est une opération d'usinage consistant à faire un trou dans une pièce. Ce trou peut traverser la pièce de part en part, on l'appelle trou débouchant ou bien ne pas la traverser, c'est alors un trou borgne. Ce trou peut être effectué par un foret, par découpe à l'aide d'un poinçon (trous débouchant), par électroérosion, par laser, par brochage, etc. Ce trou peut servir à faire passer une pièce ou un fluide, il peut être lisse ou taraudé pour recevoir un rivet ou une vis d'assemblage. L'étude est limitée au perçage de trous cylindriques lisses réalisés à l'aide d'un outil rotatif coupant appelé foret. Le perçage est l'opération d'usinage la plus courante dans l'industrie mécanique, la (Figure II.1) donne quelques exemples de pièces de l'industrie automobile et de l'industrie aéronautique. Parmi les perçages à l'outil tournant coupant (foret), on peut distinguer : le perçage de trous courts, traité dans cette étude et le perçage de trous profonds appelé forage. Les trous courts sont caractérisés par un faible rapport entre la profondeur et le diamètre : de l'ordre de 5 à 6 pour les diamètres inférieurs à 30 mm et de 2 pour les diamètres supérieurs. Ce rapport entre la profondeur et le diamètre du trou est limité par la technologie disponible, de sorte qu'il peut évoluer au rythme du développement de nouveaux outils. Les trous courts, de diamètre généralement compris entre 10 et 20 mm, sont les plus répandus

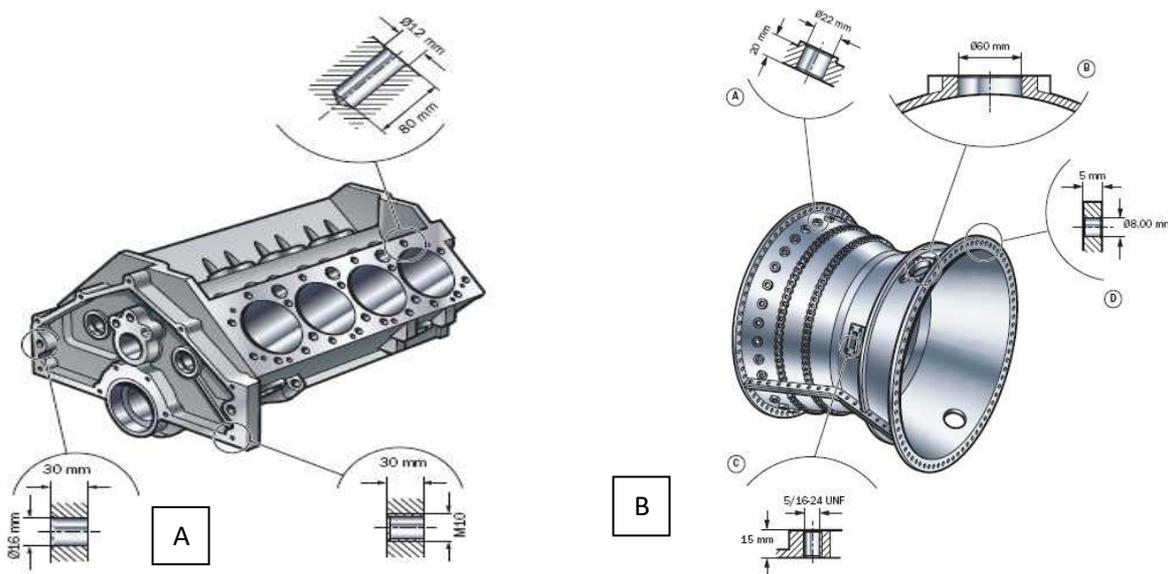


Figure II.1 Exemples de trous réalisés dans des pièces issues de plusieurs secteurs de l'industrie mécanique : (A) bloc moteur et culasse (secteur automobile), (B) moteur d'avion (secteur aéronautique) [25]

Le perçage avec un foret combine deux mouvements : une rotation et une translation, ces deux mouvements sont caractérisés par :

La vitesse de rotation du foret, exprimée en tours par minute et notée N , à la périphérie du foret elle correspond à une vitesse :

$$V_c = \pi \times D \times N / 1000 \quad (\text{II.1})$$

Avec D :

L'avance exprimée en mm par tour et notée f (mm/tr), elle correspond à une vitesse d'avance :

$$V_f = f \times N \times 1000 \quad (\text{II.2})$$

Avec V_f :

Si le foret possède deux arêtes principales de coupe, l'avance par arête est alors $f/2$.

Le choix des conditions de coupe (vitesse de rotation et avance) dépend du foret (de sa géométrie et des matériaux qui constituent), de la matière à usiner et l'utilisation ou non

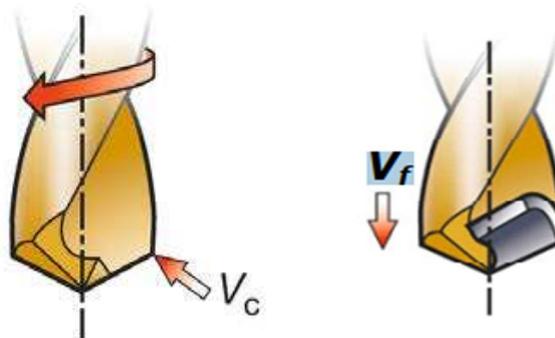


Figure II.2 Vitesse de rotation et vitesse d'avance [25]

Le perçage peut être réalisé sur un tour à commande numérique, le mouvement de rotation est alors donné à la pièce et le mouvement d'avance correspond au déplacement du chariot porte outil. Plus couramment, il est réalisé sur des centres d'usinage verticaux

ou horizontaux, les mouvements d'avance et de rotation sont alors imposés au foret. Le développement des machines et l'amélioration des forets ont radicalement modifié l'opération de perçage, des trous courts de grande qualité dimensionnelle et d'état de surface peuvent aujourd'hui être réalisés sans pré-trou de centrage, usinage préliminaire, et sans usinage consécutif pour obtenir la qualité requise.

II.2.1 Le foret

Le foret, (Figure II. 3), est un outil qui sert à produire un trou dans une pièce. C'est un outil rotatif muni de deux ou plusieurs arêtes de coupe, de deux ou plusieurs goujures hélicoïdales ou rectilignes.

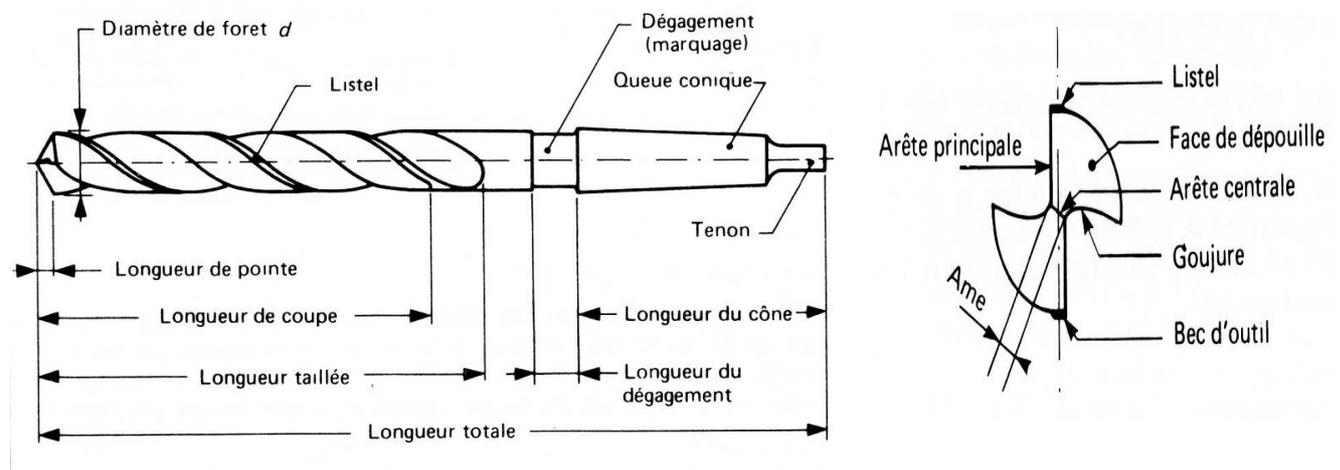


Figure II.3 Foret hélicoïdal classique ou conventionnel à queue conique, sa pointe est caractérisé par deux arêtes principales et une arête centrale rectilignes, l'exemple choisi est un peu ancien, on n'utilise plus ce genre de foret.

- ✓ Les parties essentielles d'un foret sont les suivantes :
- ✓ La queue : elle assure le positionnement et l'entraînement du foret.
- ✓ Les parties actives : arêtes de coupe : elles assurent la formation du copeau et le centrage du foret dès l'attaque dans la matière. La géométrie des parties actives est déterminée par l'affûtage ; elle conditionne la qualité du travail réalisé ainsi que la tenue à l'usure du foret
- ✓ Les goujures : elles forment la face de coupe de l'outil et participent à la formation du copeau, elles servent également à évacuer celui-ci et à amener le fluide de coupe au

niveau des parties actives. La forme et l'état de surface des goujures ont une grande importance pour la formation et l'évacuation du copeau.

✓

Les listels : ils frottent sur la portion du trou usiné, ils assurent le guidage de l'outil, ils sont généralement rectifiés

Les caractéristiques nominales du foret sont :

- ✓ Le diamètre du foret D
- ✓ L'angle au sommet ou de pointe $2p$ (Figure II 4) : c'est l'angle compris entre les projections des arêtes de coupe sur un plan parallèle à celles-ci et contenant l'axe de l'outil,
- ✓ L'épaisseur d'âme $2w$,
- ✓ L'angle d'hélice δ_0 à la périphérie du foret (Figure II 4). Notons que cet angle varie le long de l'arête de coupe.

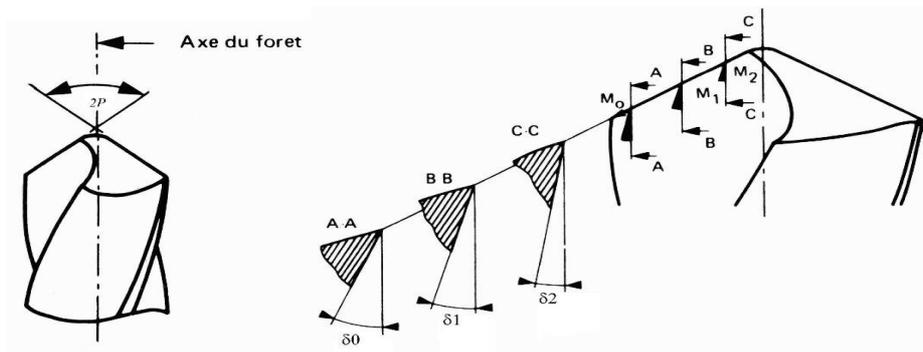


Figure II.4 Angle au sommet ou de pointe $2p$ et angles d'hélice à différents points de l'arête de coupe

Les forets pour le perçage de trous courts sont caractérisés par leur extrémité (pointe du foret) qui permet d'assurer le centrage du foret, obtenir une parfaite symétrie des arêtes de coupe et équilibrer les efforts de coupe. Les forets pour trous courts peuvent être classés en deux grandes catégories :

- ✓ les forets monoblocs (réalisés en un seul matériau : acier rapide ou carbure de tungstène) ou brasés (inserts en matériau dur au niveau des parties actives brasés dans un corps en acier ou en carbure de tungstène), ils peuvent être revêtus, ils sont réaffûttables, enfin ils sont utilisés pour les trous de petits diamètres (étudiés dans ce mémoire) et les forets à plaquettes indexables pour les trous de grands diamètres.

- ✓ Le corps du foret est en acier et les plaquettes en carbure de tungstène revêtues ou non (Figure II.5)

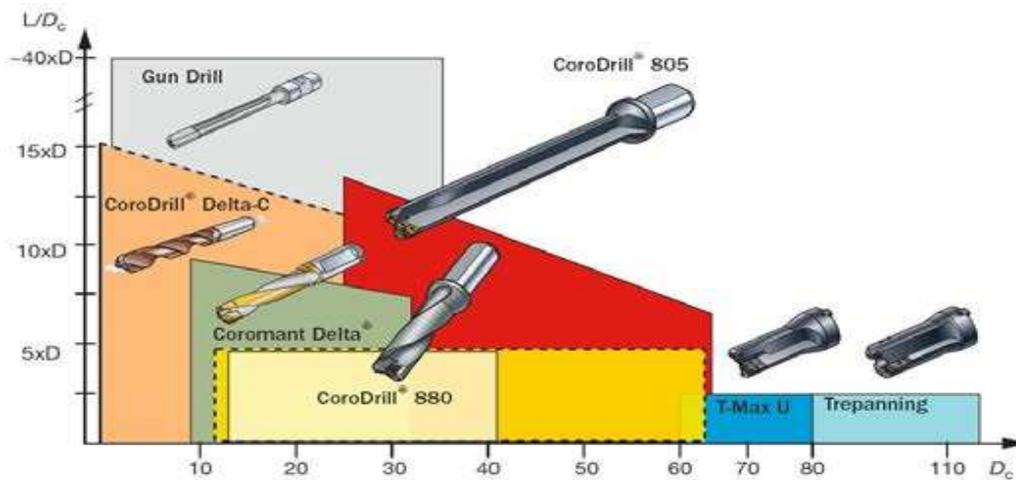


Figure II.5 Différents types de forets [25]

Avec le faible coût d'utilisation de la machine qu'il permet, le foret à plaquettes indexables est le choix le plus économique au niveau du prix de revient par pièce : les plaquettes indexables peuvent être changées jusqu'à 40 fois au cours de la durée de vie du foret. Les forets à plaquettes indexables ne couvrent toutefois pas la plage la plus courante de diamètres de trous, ce qui explique que les forets conventionnels en acier rapide demeurent prédominants dans le domaine du perçage des trous courts.

Sur les machines modernes d'un coût horaire élevé, ces forets en : acier rapide ne satisfont pas aux critères de performances permettant d'atteindre un niveau de rentabilité satisfaisant. Il est en effet nécessaire, dans la plupart des applications, de perdre un temps précieux en pré-perçage et finition. C'est pourquoi, l'utilisation de forets réaffûtables à géométries modifiées a augmenté au rythme de l'apparition de machines dont le coût horaire est élevé Figure (II.6)

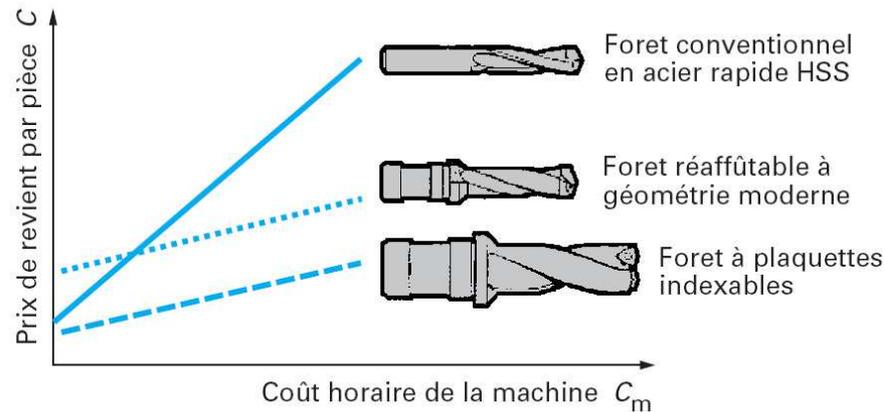


Figure II.6 Evaluation de coût des pièces avec les différents types de forets [26]

II.2.2 Différents types des forets monoblocs

Pour les petits trous de 2,50 à 12,7 mm de diamètre, on utilise principalement des forets monoblocs ou brasés réaffûtables. Une différenciation doit cependant être effectuée entre les forets en acier rapide (HSS) classiques ou conventionnels, les forets en carbure également classiques et les forets en carbure à géométrie de coupe modifiées : définies par une pointe non forcément conique, des arêtes principales parfois incurvées et un amincissement de l'âme.

Cette géométrie modifiée a radicalement transformé les conditions de perçage des trous courts. Sa propriété d'auto-centrage, qui rend inutile l'exécution d'avant-trous et les tolérances étroites qu'elle respecte, en combinaison avec des matériaux de coupes modernes, permettent un usinage rentable en une seule opération, jusqu'à la classe de tolérance IT9 et avec un fini de surface Ra 1 µm. Avec ces outils, on remarque des évolutions au niveau de l'arête centrale du fait de l'amincissement de l'âme du foret. Cela permet d'éliminer les problèmes liés aux efforts axiaux élevés et à l'inefficacité de la coupe à proximité de la pointe du foret. Cela, joint aux taux nettement plus élevés d'enlèvement de matière, signifie que les temps d'usinage sont de 3 à 4 fois plus courts par rapports aux forets hélicoïdaux classiques.

Plusieurs familles de forets monoblocs existent pour effectuer les différents types de trous (différents diamètres et profondeurs). La matière de la pièce usinée peut jouer un

rôle dans le choix du type du foret, mais elle influence d'avantage la géométrie de la pointe du foret. On peut donc distinguer plusieurs types Figure(II.7) :

- ✓ Le foret hélicoïdal Figure (II.3) conventionnel ou classique : Ce type du foret était le plus couramment utilisé ;
- ✓ Le foret étagé Figure(II.7) : foret à diamètres étagés utilisé pour réaliser des trous avec deux diamètres différents ou avec un chanfrein ;
- ✓ Le foret avec trous de lubrification (deux trous de lubrification débouchent sur la face en dépouille et amènent au fond du trou le lubrifiant) : le lubrifiant refroidit l'arête de coupe, chasse les copeaux dans les goujures et lubrifie les surfaces. Il est employé pour augmenter la vitesse d'avance et la profondeur du trou percé et avec certain matériau dur ;
- ✓ Le foret à trois ou quatre goujures : caractérisé par une rigidité et une stabilité remarquable, il est employé pour le perçage de précision, de la fonte et de l'aluminium
- ✓ Le foret à goujure rectiligne : utilisé pour le perçage à très grande vitesse, souvent avec une lubrification centrale à haute pression pour évacuer les copeaux.

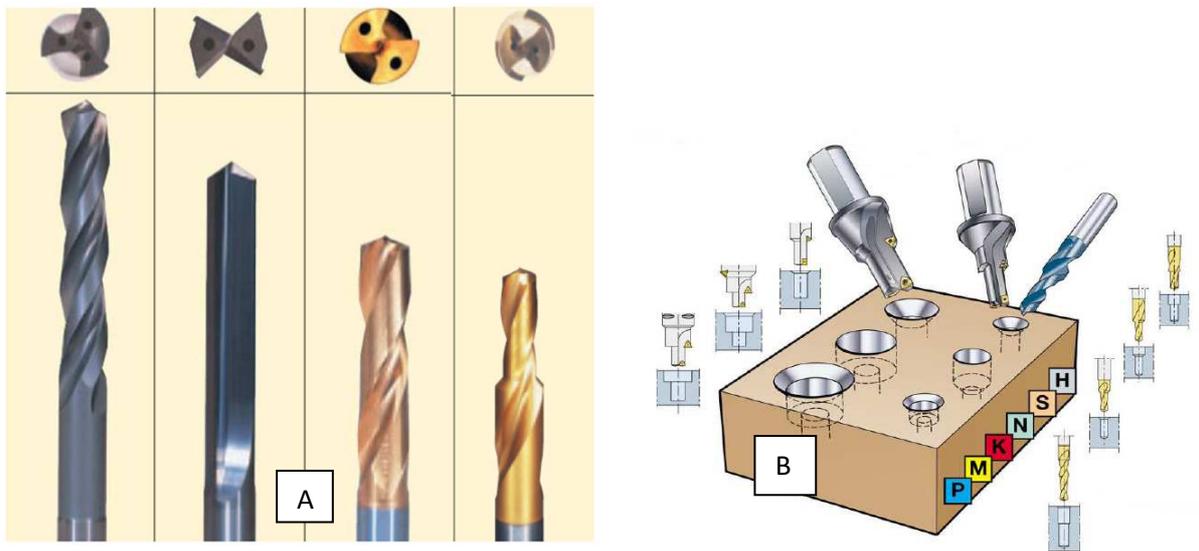


Figure II.7 (A) Différents types de foret [3], (B) Les opérations réalisées avec des forets étagés [25]

Les outils disponibles aujourd'hui incluent une grande diversité de produits permettant de nombreuses combinaisons. En vue de parvenir à des résultats optimaux dans chaque contexte d'usinage particulier en perçage, il est indispensable de préciser les paramètres suivants avant de passer au choix de l'outil et des conditions d'usinage :

- ✓ Diamètre et profondeur du trou ;
- ✓ Tolérances à respecter ;
- ✓ Coût machine ;
- ✓ Forme de la pièce ;
- ✓ Matière à usiner ;
- ✓ Puissance et stabilité de la machine.

II.2.3 Éléments de la géométrie du foret

La géométrie du foret est un élément déterminant pour la performance du perçage, la qualité de surface du trou et la durée de vie du foret. C'est un paramètre essentiel pour le calcul des efforts de coupe générés pendant le perçage. La géométrie du foret peut être décomposée en deux parties essentielles : la goujure et la pointe. L'intersection de ces parties forme les parties actives du foret ou les arêtes de coupe.

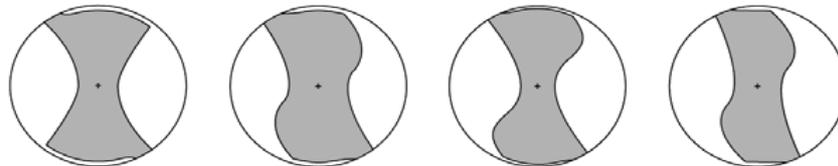


Figure II.8 Différents types de la goujure : de gauche à droite on aperçoit la goujure conventionnelle, la goujure avec une épaisseur d'âme importante puis deux exemples de la goujure parabolique [25].

Le choix de la goujure (Figure II.8) est important pour l'évacuation des copeaux et la rigidité du foret. On peut distinguer :

- ✓ La goujure conventionnelle ou classique avec une épaisseur d'âme qui varie entre 0,1 et 0,25 fois le diamètre du foret. Elle se rencontre sur les forets dits classiques
- ✓ La goujure avec une épaisseur d'âme plus importante (de 0,2 à 0,35 fois le diamètre), l'âme est alors amincie sur la pointe du foret. Elle garantit une rigidité

supérieure, pour le perçage de matériaux durs (alliages de titane, de nickel, aciers à haute résistance...) et l'utilisation de vitesses d'avance élevées

- ✓ La goujure parabolique qui facilite la formation et l'évacuation des copeaux, possède une rigidité élevée due à son épaisseur d'âme (entre 0,30 et 0,45 du diamètre du foret).

La pointe est la partie active du foret. C'est elle qui donne la forme finale aux arêtes de coupe. Les paramètres nominaux du foret comme l'angle au sommet et l'angle de dépouille ne suffisent pas pour définir la pointe. On peut distinguer plusieurs types d'affûtages qui définissent la forme des faces de dépouille et celle de l'âme. Différents types d'amincissements peuvent également être effectués au niveau de l'âme pour améliorer les performances du foret. Parmi le grand nombre des pointes disponibles sur le marché nous présentons ci-dessous les plus courantes

La pointe conventionnelle ou classique Figure(II.9) : les faces de dépouille sont des portions de deux cônes symétriques par rapport à l'axe du foret. L'intersection des deux portions de cône forme l'arête centrale pratiquement rectiligne. L'angle de coupe obtenu sur cette arête centrale est très négative, en outre sa forme linéaire réduit l'auto-centrage du foret et détériore en conséquence la précision du trou obtenu. Plusieurs variantes de cette pointe existent comme à titre d'exemple le foret avec un angle de pointe réduit et le foret à double angle. La première modification réduit la surface de coupe à la périphérie, et par conséquent les fissures et le broutement quand le foret débouche (trou débouchant). Elle est utilisée souvent avec les matériaux plastiques ou les matériaux tendres non ferreux. Le foret à double pointe a été développé pour les fontes et les matériaux abrasifs. L'objectif est de diminuer l'usure des périphéries et des listels du foret. Ce qui améliore non seulement la tenue à l'usure mais la qualité, la tolérance du trou et la fragmentation des copeaux. Ce type de pointe peut être utilisé également dans le cas des matériaux non durs afin d'éviter les bavures.

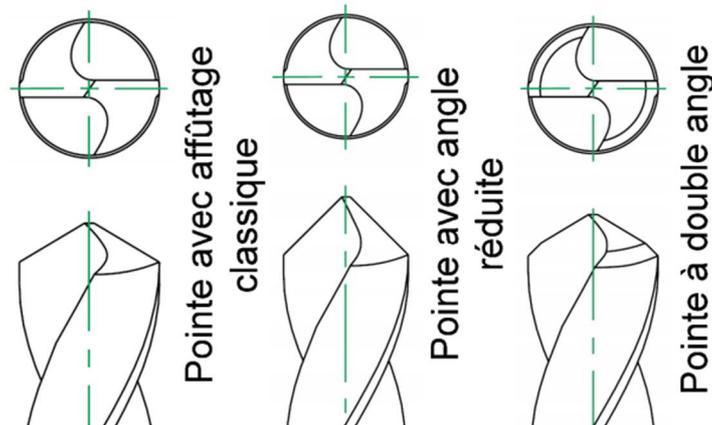


Figure II.9 Foret avec une pointe conventionnelle, avec angle réduit et à double angle.

La pointe hélicoïdale (Figure 10) : l'arête centrale droite du foret conventionnel est modifiée. Une autre arête centrale en forme de S est employée. Cette forme particulière a pour propriété essentielle d'augmenter sensiblement l'angle de dépouille vers le centre du foret. Cette modification de l'arête centrale aide à améliorer l'auto-centrage du foret.

La Pointe avec des faces de coupe réduite (Figure 10) : elle est obtenue en altérant la face de coupe pour obtenir une surface plane dans une zone proche des arêtes de coupe (de la périphérie jusqu'aux arêtes centrales). Ceci permet de diminuer les angles de coupe, d'améliorer la rigidité des arêtes et la fragmentation des copeaux.

La pointe « crankshaft » (Figure II.10) : Elle a été développée pour effectuer les trous profonds de lubrification dans le vilebrequin des voitures, d'où l'origine de son nom. Elle est caractérisée par une contre dépouille et un amincissement au niveau de l'âme du foret. Par la suite, son utilisation a été étendue à des diverses applications. Avec un angle de sommet de 118° et 135° ses avantages sont nombreux : réduction des efforts axiaux, formation des copeaux fragmentés et évacuation facilitée grâce aux deux faces positives de coupe.

La pointe « Racon » Figure(II.10) : Avec ses arêtes de coupe de forme incurvées, le foret a un angle de pointe variable le long de ces arêtes. Cette géométrie particulière, des arêtes de coupe (plus longues que les arêtes conventionnelles) génèrent des efforts de coupe par unité de longueurs moins élevées, ce qui implique une génération de la chaleur moins importante. Comme pour les forets avec double angles de la pointe, la périphérie du foret doit être conçue pour réduire l'usure des listels. La pointe Racon

permet de réduire la bavure dans le cas des trous débouchants, et d'augmenter la durée de vie du foret avec les matériaux abrasifs. Mais elle possède un auto-centrage réduit d'où le besoin de l'utilisation du canon de guidage

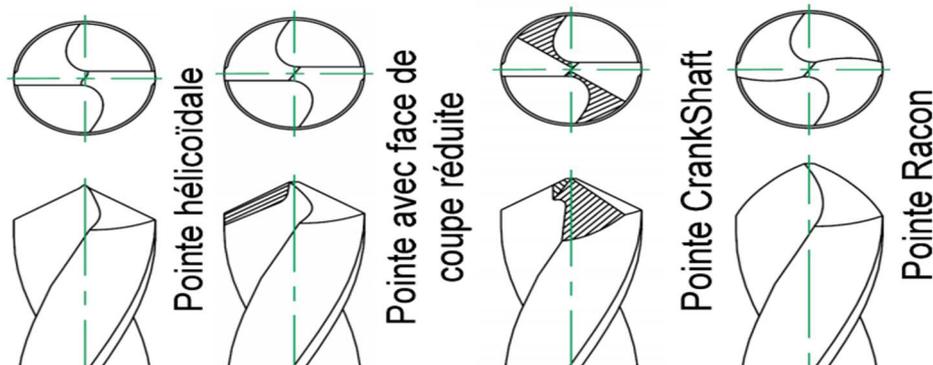


Figure II.10 Quelques exemples de pointes du foret [25]

II.3 Matériaux et revêtements des forets

Avec l'évolution des machines-outils, des vitesses de coupe et d'avance plus importantes sont pratiquées (Usinage à Grande Vitesse, UGV). L'utilisation de l'UGV n'est pas possible sans l'évolution parallèle d'une nouvelle génération de matériaux pour les outils et les revêtements et enfin sans la définition de nouvelles géométries améliorant les performances de ces outils. Les performances des outils en UGV sont principalement évaluées par leur durée de vie caractérisant leur tenue aux contraintes mécaniques et thermiques et leur résistance à l'usure.

Les matériaux employés pour les forets doivent satisfaire plusieurs critères :

- ✓ Stabilité mécanique, physique et chimique à des hautes températures ;
- ✓ Résistance à l'usure ;
- ✓ Ténacité à la rupture fragile

Malheureusement, ces trois critères ne peuvent être satisfaits en même temps. Par exemple plus le matériau est réfractaire plus il est fragile (Tableau 1).

<i>Familles</i>	<i>Stabilité thermique</i>	<i>Résistance au choc</i>	<i>Résistance à l'usure</i>
Acier rapide (HSS)	Augmente ↓	Augmente ↑	Augmente ↓
Carbure			
Cermet			
Diamant			

Tableau II.1 Familles des matériaux des forets

- ✓ Les aciers rapides (High Speed Steel, HSS) sont des aciers spéciaux à haute performance de très grande ténacité et d'une dureté très élevée, grâce à de fortes teneurs en éléments carburigènes (tungstène, molybdène, vanadium et chrome). Pour améliorer leur dureté à chaud, du cobalt peut également être ajoutée (5 à 10%). Ils sont largement employés dans la fabrication des forets conventionnels. On peut distinguer plusieurs nuances d'acier rapide en fonction du pourcentage de cobalt qui sert à améliorer la stabilité thermique de ce dernier. Cependant, dans l'UGV, les contraintes thermiques sont plus importantes que dans l'usinage conventionnel d'où le besoin de matériaux ayant une résistance thermique supérieure.
- ✓ Le carbure de tungstène est un matériau issu de la métallurgie des poudres. Il est principalement constitué de particules très dures de carbure de tungstène (WC) dans une matrice cobalt (Co) servant de liant. Plus la teneur en cobalt est élevée, plus la ténacité est importante et plus la résistance à l'usure est moindre. On peut distinguer plusieurs types de carbure selon la taille des grains et le pourcentage en cobalt. En effet, à la différence des outils en acier rapide, le module d'Young élevé des carbures permet l'obtention d'une bonne précision et d'un bon état de surface. Mais le principal problème réside dans la tenue de l'arête de coupe à l'usure. En effet, les outils carbures ont une durée de vie de 2 à 5 fois inférieure en UGV qu'en usinage conventionnel. Ceci incite donc à l'application de revêtements de surface ou à l'utilisation d'autres matériaux d'outils.
- ✓ D'autres matériaux comme le cermet (un matériau composé par du céramique et d'un composant métallique comme le cobalt, le molybdène ou nickel) et la céramique peuvent encore être employés pour leur excellente résistance et leur stabilité thermique et chimique. Cependant, leur ténacité (résistance au choc) est limitée, ce qui limite leur utilisation à certaines applications spécifiques.
- ✓ Enfin le diamant polycristallin (PolyCristallin Diamond, PCD) est un diamant synthétique produit par l'agglomération de particules de diamant dans une matrice

métallique. Il est fritté et aggloméré à un substrat de carbure de tungstène par un procédé à haute température et haute pression. Par sa nature, le diamant polycristallin présente un fort coefficient de dureté ; il est aussi plus résistant à l'abrasion et aux chocs multidirectionnels. Ses propriétés physiques de dureté, de résistance à la compression et de conductivité thermique lui confèrent une résistance à l'abrasion qui lui permet surtout d'usiner avec des vitesses de coupe plus importantes qu'avec des outils carbures, tout en assurant des états de surface excellents pour des durées de vie plus élevées.

Notons que les forets réaffûttables pour les trous de petits diamètres peuvent être conçus d'une seule matière (foret monobloc), ou de deux matières (par exemple foret plaquette carbure : le corps est formé d'une première matière le HSS sur laquelle une plaquette carbure est brasée pour former les arêtes de coupe après affûtage).

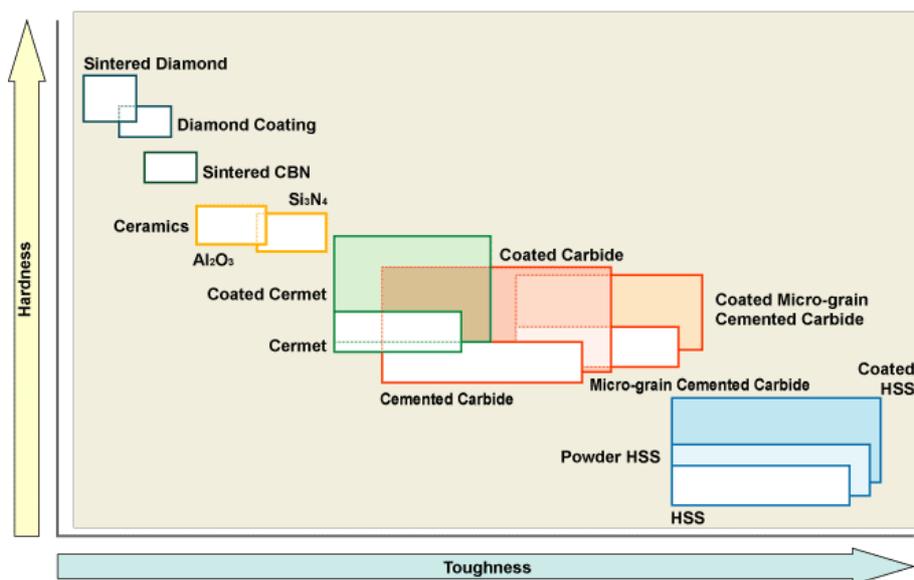


Figure II.11 Différents matériaux et revêtements d'outils [28]

Le revêtement est une technologie qui améliore la capacité et la performance des outils coupants. L'outil n'est pas modifié chimiquement, mais revêtu d'une fine couche de quelques μm . Parmi les procédés d'exécution de revêtement, on peut citer le Physical Vapor Déposition. Il est réalisé sous vide à une température inférieure à 600°C . C'est une méthode très répandue pour la déposition d'un revêtement en métal dur. Un revêtement correctement appliqué et adapté à la matière usinée permet

d'augmenter la durée de vie et la performance de l'outil ainsi que les caractéristiques des pièces usinées. Il permet de :

- ✓ Réduire le coefficient de frottement,
- ✓ Créer une barrière thermique en diminuant le coefficient de conduction entre l'outil et la pièce à usiner
- ✓ Constituer une surface inerte chimiquement

Hard Materials	Hardness (HV)	Energy Formation (kcal/g · atom)	Solubility in Iron (%.1250°C)	Thermal Conductivity (W/m·k)	Thermal * Expansion (x 10 ⁻³ /K)	Tool Material
Diamond	>9,000	–	Highly Soluble	2,100	3.1	Sintered Diamond
CBN	>4,500	–	–	1,300	4.7	Sintered CBN
Si ₃ N ₄	1,600	–	–	100	3.4	Ceramics
Al ₂ O ₃	2,100	-100	≈ 0	29	7.8	Ceramics Cemented Carbide
TiC	3,200	-35	< 0.5	21	7.4	Cermet Coated Carbide
TiN	2,500	-50	–	29	9.4	Cermet Coated Carbide
TaC	1,800	-40	0.5	21	6.3	Cemented Carbide
WC	2,100	-10	7	121	5.2	Cemented Carbide

* 1W/m · K=2.39 × 10³cal/cm · sec · °C

Tableau II.2 Caractéristiques des différents matériaux et revêtements d'outils [28]

Plusieurs types de revêtements sont employés avec les forets. Par exemple :

- ✓ Nitrure de titane (TiN) employé pour de nombreuses applications conventionnelles, contribue à l'amélioration de la dureté et de la résistance à l'usure. Cependant ses performances thermiques et son coefficient de frottement sont moyens par rapport aux autres revêtements.
- ✓ TiAlN est caractérisé par une dureté légèrement supérieure au TiN, une ténacité et une stabilité chimique et thermique élevées. Son coefficient de frottement est moyen.
- ✓ Sulfure de molybdène (MoS₂) est un revêtement non dur employé comme lubrifiant solide du fait de son faible coefficient de frottement, dans les opérations où l'utilisation des lubrifiants liquides est impossible. Il possède une bonne résistance thermique et une ténacité faible. Il est employé généralement comme une couche complémentaire avec un revêtement multicouche dur.

Il existe également d'autres procédés (CVD : chemical vapour deposition) et types (PCBN : polycrystalline cubic boron nitride) de revêtement, ainsi que des revêtements

multicouches Figure (II.12) dont les couches peuvent être ou non de même matière. La performance d'un revêtement dépend de la matière usinée et de la technologie utilisée pour sa déposition. Le choix des matériaux d'outils et de leurs revêtements est important. Il dépend des différents critères caractérisant le comportement du couple outil-matière.

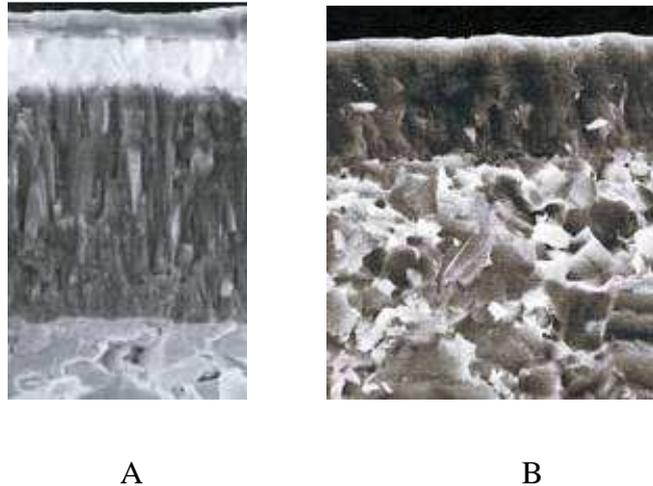


Figure II.12. Image réalisée d'un outil revêtu avec trois couches de revêtement (A) puis une seule couche (B) [28]

L'importance et l'efficacité des revêtements, ont été étudiées par plusieurs auteurs. Tönshoff et al. Figure(II.13) ont comparé les performances des forets revêtus (TiN et TiAlN), par rapport à un autre non revêtu. Les courbes d'évolution de la largeur moyenne de la bande d'usure en dépouille VBc Figure(II.13) pendant le perçage montrent l'efficacité des revêtements. Harris et al. Ont étudié la performance de plusieurs types de revêtements (monocouche et multicouches) pendant le perçage à sec de l'acier. Ils ont montré Figure(II.14) qu'un bon revêtement peut augmenter d'une manière significative la durée de vie du foret (de 750 à 2250 trous).[6]

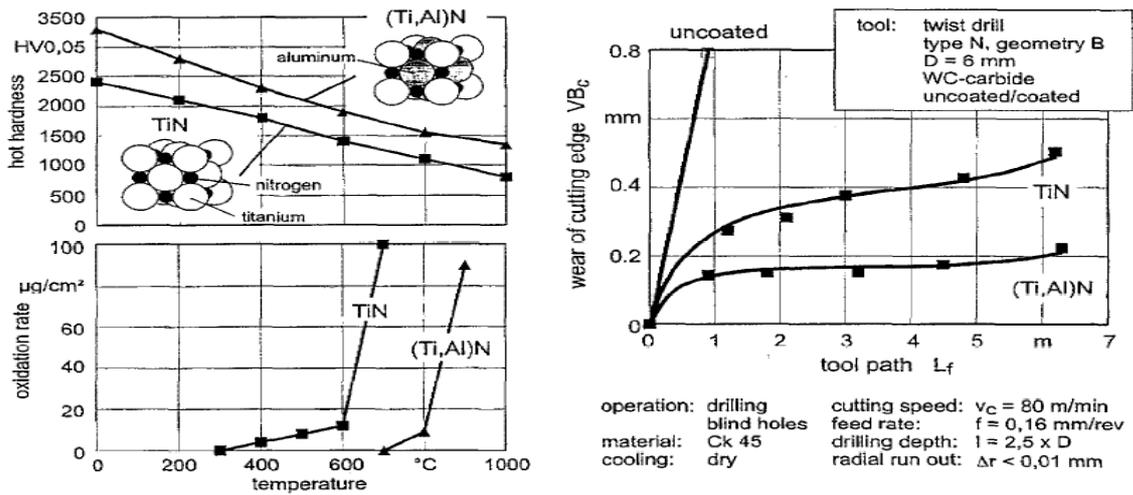


Figure II.13 L'évolution VB_c pendant le perçage avec des forets revêtus et sans revêtement [29]

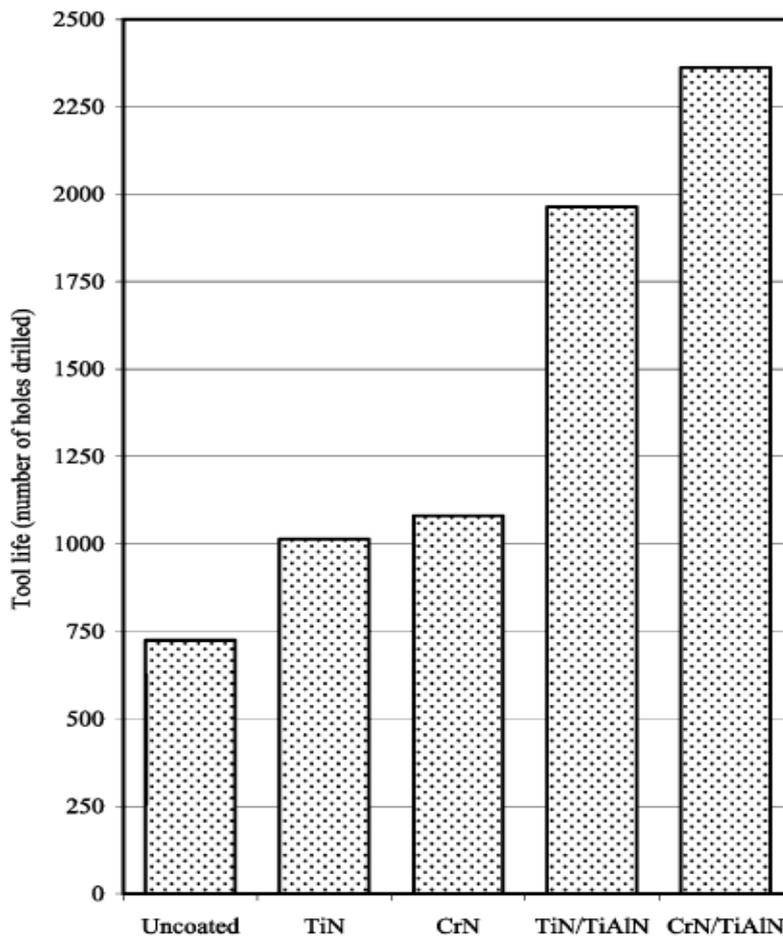


Figure II.14 Nombre de trous percés avec des forets non revêtus et revêtus avec plusieurs types de revêtements [30]

II.4 Lubrification et perçage à sec ou à lubrification minimale

Le perçage de trous courts avec des forets en carbure permet d'atteindre des taux élevés d'enlèvement de matière avec cependant une très importante génération de chaleur. Cette chaleur générée et l'important volume de copeaux produit sont évacués par le liquide de coupe dont l'apport, interne ou externe, s'effectue sous haute pression. Les conditions extrêmes rencontrées en perçage en ce qui concerne l'évacuation des copeaux et les hautes températures rendent nécessaires une pression et un débit correct du liquide de coupe pour garantir un usinage fiable et des résultats de bonne qualité. Il existe des diagrammes fournissant des valeurs guides, mais qu'il faut cependant parfois ajuster en fonction des conditions d'usinage effectives et, entre autres, de la nature de la matière usinée.

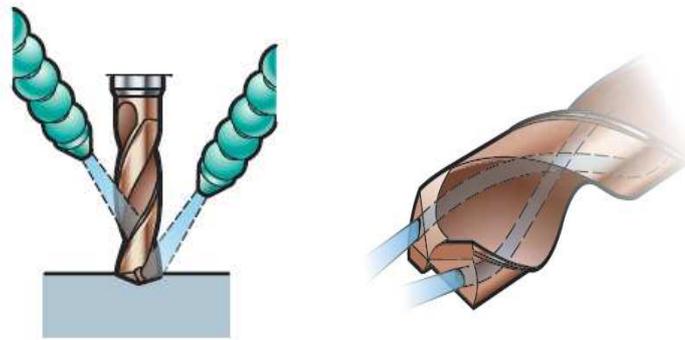


Figure II.15 Lubrification interne et externe [25]

Aujourd'hui, l'usinage lubrifié est encore largement répandu dans l'industrie mécanique. Cependant des travaux de recherche ont été conduits pour minimiser voire éliminer l'emploi des fluides de coupe et un nouveau concept de lubrification minimale (ou de quantité minimale de lubrifiant) et d'usinage à sec a été introduit [29] [35].

En plus d'être nocifs pour l'environnement et la santé humaine, l'emploi de ces lubrifiants occasionne des coûts de production et d'évacuation des déchets plus élevés. Suivant les pièces usinées, l'usinage à sec permet d'économiser jusqu'à 17% du coût total de la pièce fabriquée, cette économie est principalement réalisée grâce à la suppression de plusieurs postes budgétaires, à savoir : l'approvisionnement en lubrifiant, le traitement et l'évacuation des fluides usagés [31] [32] et le nettoyage des pièces après usinage. La réduction des coûts associée à la minimisation de la pollution réalisée

par l'usinage à sec est la principale clé permettant à l'industrie de rester compétitive et rentable pour l'avenir.

La caractéristique essentielle de la lubrification minimale est d'obtenir l'effet réfrigérant du lubrifiant par l'application d'un jet d'air comprimé. Un faible apport de lubrifiant est alors nécessaire, à condition qu'il soit injecté de manière efficace dans la zone de coupe. Ce lubrifiant est complètement utilisé et les copeaux formés sont quasiment secs. Cependant, tous les effets produits par l'utilisation classique de la lubrification (fort débit de fluide de coupe) ne sont pas obtenus par la lubrification minimale. Toutefois, les résultats obtenus avec la lubrification minimale en perçage sont excellents en comparaison de ceux obtenus avec la lubrification classique [33]. La lubrification minimale est alors une solution alternative intéressante d'un point de vue économique, mais aussi pour le respect de l'environnement. Elle combine en effet les deux fonctions (refroidissement et lubrification) avec une quantité extrêmement faible de lubrifiant, elle a donc le potentiel suffisant pour combler l'intervalle entre lubrification classique et usinage à sec.

II.5 Formation des copeaux

La matière à usiner, la géométrie de l'outil, la vitesse de coupe, l'avance et le choix du liquide de coupe influent sur la formation des copeaux. Une forte avance et/ou une vitesse de coupe réduite produisent des copeaux plus courts Figure 16. La longueur des copeaux peut être considérée comme acceptable lorsque ceux-ci peuvent être évacués sans problème au niveau des goujures.

Des essais de l'outil, sous différentes combinaisons de vitesses de coupe et d'avance, dans la matière concernée, sont nécessaires pour trouver les bonnes conditions de fonctionnement de l'outil et de formation des copeaux. Il faut, pour assurer une bonne évacuation du copeau, que les arêtes de coupe forment un copeau continu, donc ne débouchent pas transitoirement dans le vide après amorçage du processus de coupe. Quand le foret attaque la surface de la pièce selon une direction oblique, il est donc nécessaire que le rapport vitesse de coupe sur vitesse d'avance soit inférieur à une valeur critique.

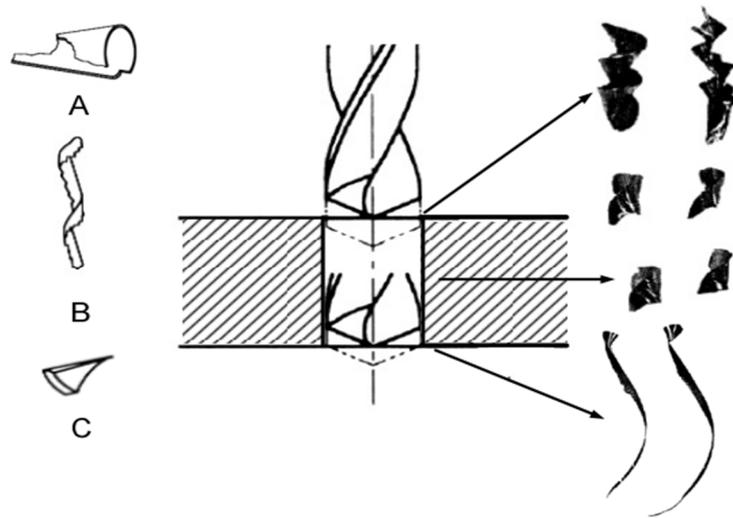


Figure II.16 Différents types de copeaux [33]

II.6 Mécanismes d'enlèvement de la matière pendant le perçage

Les mécanismes d'enlèvement de la matière pendant le perçage avec un foret hélicoïdal conventionnel sont classés en deux catégories :

- ✓ La formation des copeaux le long des arêtes principales qui est très semblable à une opération de coupe Figure 17a.
- ✓ La formation des copeaux le long de l'arête centrale est plus complexe. En effet, au centre du foret, où la vitesse d'avance est plus importante que la vitesse de rotation, l'enlèvement de la matière est plus proche d'une indentation que de la coupe. Enfin, sur l'autre partie de l'arête centrale, la vitesse de rotation n'est pas nulle : l'enlèvement de la matière est semblable à un mécanisme de coupe avec des conditions très sévères (angle de coupe négatif).

Dans les forets avec des géométries modernes, l'amincissement au niveau de l'arête centrale contribue à l'amélioration des conditions de coupe dans cette région en modifiant l'angle de coupe Figure 17b. L'indentation est réduite à une zone très petite de quelque dizaine de micromètres juste au centre du foret

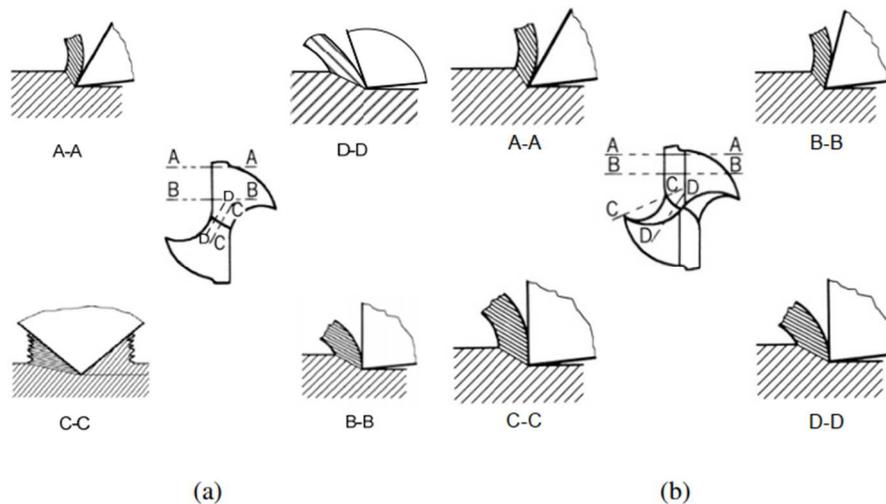


Figure II.17 Mécanisme d'enlèvement de la matière pendant le perçage avec un foret hélicoïdal conventionnel (a) et un foret de géométrie moderne (b)[33].

II.7 Bavure

Comme pour la majorité des opérations d'usinage, le perçage d'un trou débouchant peut entraîner la formation d'une bavure sur la face inférieure et parfois supérieure de la pièce. Le terme bavure signifie Figure 18 un surplus involontaire de matière souvent de très faible épaisseur qui n'existe pas avant le perçage, c'est une petite lamelle de métal très déformée restant attachée au bord du trou. La plupart des problèmes liés à la bavure sont causés par la bavure inférieure. Ces problèmes sont très variables : du mauvais alignement pour les assemblages, réduction de la durée de vie en fatigue (causée par le comportement de la bavure comme un point d'initiation d'une fissure) et des sérieuses dégradations dans les pièces en mouvement. Pour ces raisons il est préférable d'éviter ou de minimiser les bavures, sinon une opération supplémentaire d'ébavurage s'avère parfois nécessaire. La forme et la taille de bavure dépend de plusieurs paramètres : par exemple la matière percée et les conditions de coupe [36].

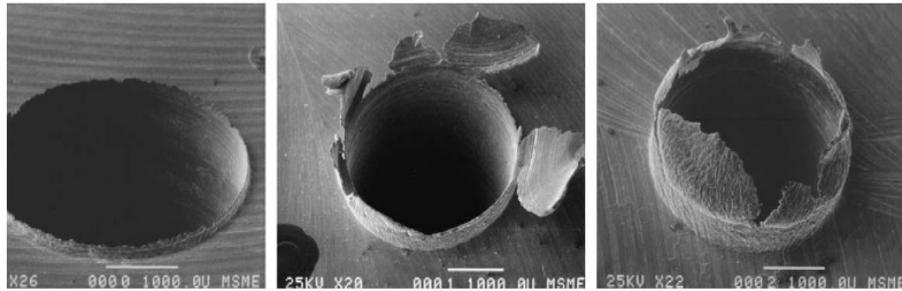


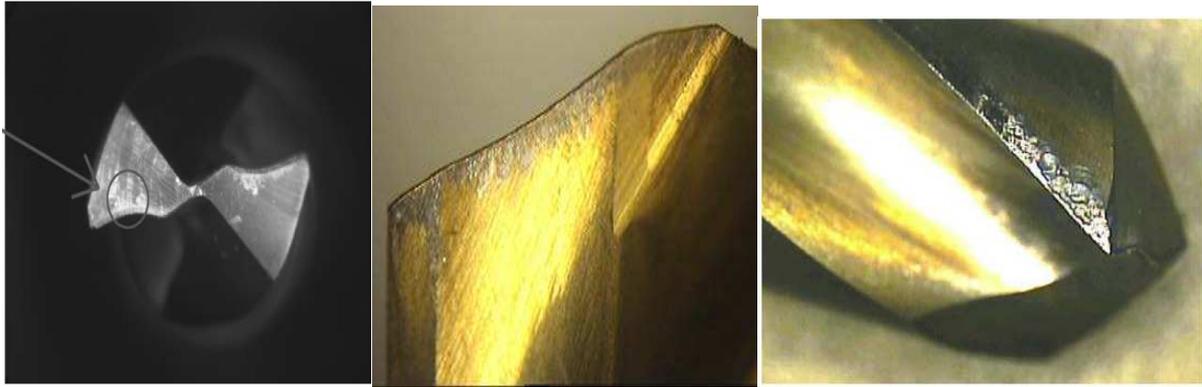
Figure II.18 Trois types de bavure de L’AISI 4118, de gauche à droite : bavure uniforme, bavure transitoire et bavure en forme d’une couronne [36]

Plusieurs chercheurs ont étudié ce phénomène afin de comprendre et de contrôler la formation des bavures. Cependant aucun modèle analytique ou empirique n’est capable de résoudre efficacement ce problème. En effet la complexité de l’opération du perçage et les nombreux paramètres qui gouvernent la formation de la bavure rendent la modélisation difficile [36].

II.8 Usure de foret

Les parties du foret, en contact avec la pièce ou le copeau s’usent. On peut distinguer trois types d’usure :

- ✓ L’usure de la dépouille Figure 19-a, est caractérisée par un marquage le long des arêtes principales et centrales dans la direction de l’écoulement du métal. Elle est maximum au niveau du bec à cause de la vitesse de coupe élevée en cette partie du foret
- ✓ L’usure des listels Figure 19-c, est parfois accompagnée par une entaille ; cette usure est gênante car elle oblige à enlever lors de réaffûtage une partie importante de matière. Ce type d’usure est important lorsque le matériau usiné est abrasif, écrouissable ou bien si l’affûtage n’est pas symétrique.
- ✓ L’usure de la face de coupe Figure 19-b, est constatée parfois sous forme d’une usure en cratère. Elle ne perturbe pas le fonctionnement du foret. il est rare de le faire disparaître par affûtage.



(A)

(B)

(C)

Figure II.19 Différents types d'usure des forets : (A) usure de la dépouille [37], (B) usure de la face de coupe et (C) usure des listels [38].

L'usure est causée par plusieurs phénomènes ou mécanismes:

- ✓ L'abrasion Figure (II.19) a-b, est due au frottement de la matière de la pièce le long de la partie avant de la face de dépouille, ou de copeau le long de la face de coupe.
- ✓ L'adhésion Figure (II.20) est un phénomène dû à l'action conjuguée de la température et de la pression exercée par le copeau sur la face de coupe. Lorsque ces conditions sont réunies des microsoudures se développent dans la zone de contact. Ces microsoudures peuvent former ensuite ce qu'on appelle une arête rapportée qui peut s'arracher de l'outil et causer un cratère.
- ✓ La diffusion Figure (II.20) est un micro-transfert à l'échelle d'atome entre le copeau et l'outil.

Il nécessite comme l'adhésion une température et une pression au niveau du contact outil-copeau élevées. Le taux d'adhésion croît généralement avec la température.

- ✓ L'oxydation peut avoir lieu à des hautes températures. Les oxydes formés sont facilement enlevés ce qui aboutit à une usure importante de l'outil.

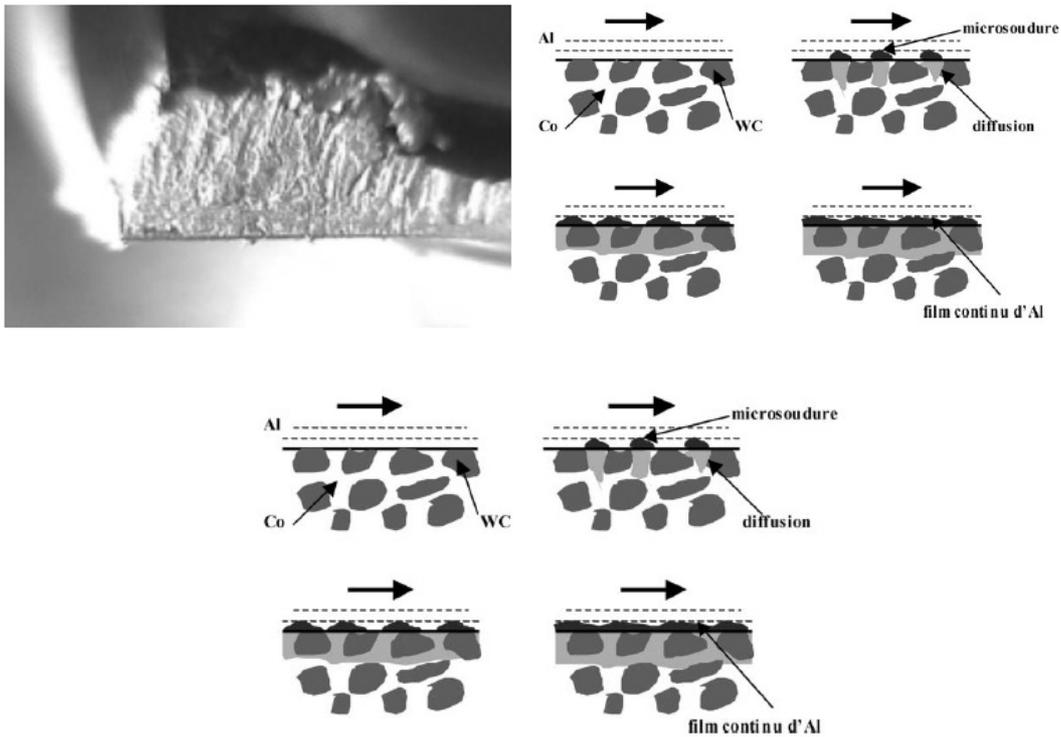


Figure II.20 L'usure par adhésion à gauche [38] [39]

Chacun de ces différents mécanismes dépend d'un grand nombre de paramètres (par exemple : matières de l'outil et de la pièce, conditions de coupe, l'utilisation de lubrification). Ils peuvent intervenir simultanément, successivement ou individuellement. Enfin l'usure peut aboutir à une rupture catastrophique du foret Figure (II. 21).

Pour déterminer quand il est nécessaire de réaffûter ou de remplacer le foret, on peut s'appuyer sur différents critères. Les critères normaux à cet égard sont l'état de surface et la dimension du trou, mais il est également courant de se baser sur 80 % de la durée de vie estimée de l'outil.[38]

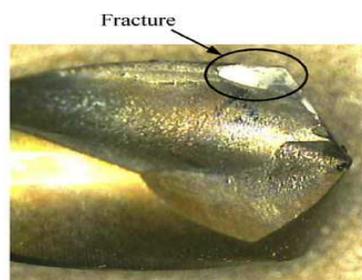


Figure II.21 Exemple de rupture du foret [38]

II.9 Perçage assisté

Pour terminer ce chapitre II, il faut noter que des nouvelles technologies sont en cours de développement afin d'améliorer la performance du perçage. Parmi ces méthodes on cite comme exemple le perçage vibratoire [40].

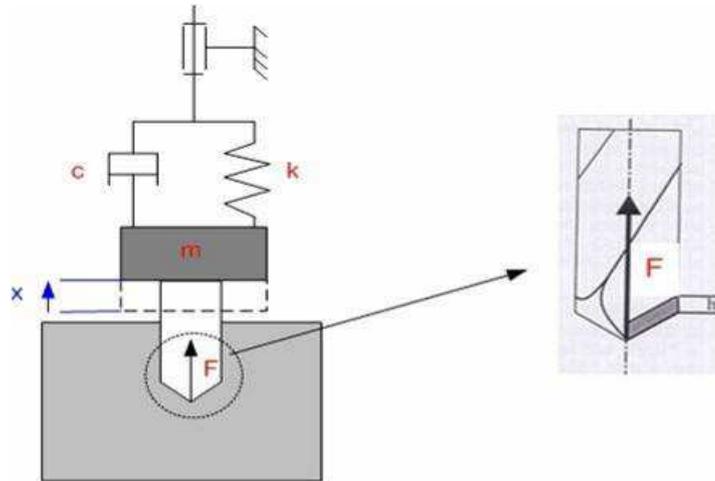


Figure II.22 Principe du perçage vibratoire [40]

En se basant sur le constat qu'une des principales difficultés du perçage des trous profonds réside dans la fragmentation et l'évacuation du copeau, ce type de perçage suppose résoudre ce problème en rajoutant un mouvement vibratoire axial au déplacement classique du foret. Cette modification nécessite l'utilisation d'une tête spéciale permettant de générer le mouvement souhaité. Plusieurs étapes de développement sont nécessaires afin d'obtenir une tête fiable et compatible avec la majorité des machines-outils :

- ✓ Modéliser les efforts de coupe.
- ✓ Etablir les zones de stabilités.
- ✓ Développer des simulations numériques pour définir le comportement vibratoire de la tête de perçage.

Les premiers résultats observés avec cette technologie sont encourageants. Cependant des études supplémentaires sont nécessaires avant l'industrialisation de cette technologie.

II.10 Conclusions

Le perçage des trous courts de diamètre généralement compris entre 10 et 20 mm est une opération très courante dans l'industrie mécanique. Les outils employés pour réaliser ce type de trous sont majoritairement des forets monoblocs.

Les progrès effectués dans le domaine des machines-outils ont incités les fabricants des forets à développer des géométries de plus en plus complexes et à utiliser dans la fabrication de ceux-ci des matériaux et des revêtements de plus en plus performants. Ces forets munis d'une géométrie modifiée ont radicalement transformé les conditions de perçage des trous courts. Leur propriété d'auto-centrage, les tolérances étroites qu'ils respectent, et les taux nettement plus élevés d'enlèvement de matière montrent l'efficacité de ces géométries.

Malgré ces améliorations, de nombreux problèmes liés au perçage peuvent avoir lieu, comme par exemple : l'erreur de forme, de surface, les bavures, le délaminage dans le cas des matériaux composites, la vibration, le broutement et l'usure ou la rupture de l'outil. Ces difficultés sont dues à un mauvais choix de l'outil ou des conditions de coupe utilisées. En outre, des nouvelles nuances de matériaux sont développées dont leur usinabilité et leur condition de coupe optimale sont à déterminer.

Pour résoudre ces problèmes, il faut choisir voir même développer, la géométrie du foret, la matière et le revêtement de l'outil. Pour valider la géométrie et déterminer les meilleures conditions et stratégies de coupe pour un matériau donné, de nombreux essais. Optimiser le procédé et économiser du temps et de l'argent sont les principales motivations d'une modélisation du perçage. Pour effectuer cette tâche, une étude bibliographique sur les modèles de coupe développés pour le perçage constitue l'étape suivante de notre travail de recherche.

III .1 Introduction

Le trou sert à diverses fins dans tous les éléments de la machine. Ces trous peuvent être ronds, carrés, rectangulaires ou toute autre forme selon l'exigence ou la conception [41]. Pour les trous circulaires, les machines sont disponibles sur le marché. Mais pour les trous carrés ou tout autre type de trous, les méthodes actuellement utilisées sont le brochage, l'électrode à décharge et l'électrochimie. Trop coûteux et nécessitent des outils ou des machines spéciales. Le triangle de Reuleaux est un exemple d'une large classe de géométrie découverte par l'ingénieur en mécanique allemand Franz Reuleaux. Il a débuté avec le célèbre triangle sinueux qui commence à être utilisé dans de nombreux mécanismes Watts Brother Tool Works. Bien que Franz Reuleaux n'a pas été le premier à dessiner et à étudier la forme formée par l'intersection de trois cercles aux coins d'un triangle équilatéral. Mais l'utilisation de cette courbe et de ses propriétés spéciales pour produire des trous polygonaux a été donnée par Sir James Watts en 1914 et la géométrie n'a cessé d'évoluer de jour en jour reproduisant exactement le carré dans lequel elle tourne. Le Triangle de Reuleaux est l'exemple d'une large classe de découvertes géométriques comme la bande Mobius qui n'a pas trouvé beaucoup de d'applications pratiques jusqu'à relativement tard dans le développement intellectuel de l'humanité. Ce n'est que vers 1875, lorsque le distingué Allemand l'ingénieur mécanicien Franz Reuleaux a traité du célèbre triangle de Reuleaux sinueux qu'il a commencé à être utilisé dans de nombreux mécanismes par Watts Brothers Tool Works. [41]

Leonhard Euler a étudié ces formes qu'il nommait « orbiforme ». Reuleaux est le premier à avoir caractérisé cette courbe comme une courbe de largeur constante et suspecté les applications cinématiques de cette figure(III.1).

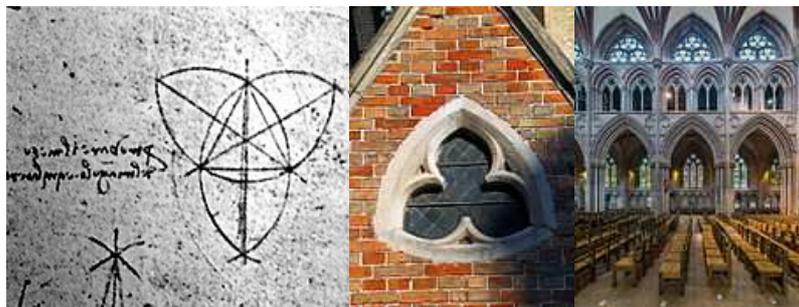


Figure III.1 Fenêtre en forme Triangle de Reuleaux [41]

III.2 Etude théorique de la trajectoire de l'outil de coupe

III 2.1 Construction (concept géométrique)

Ces dessins illustrent comment le concept géométrique, étudié par les mathématiciens, est utilisé dans notre vie quotidienne.

Prenons une roue, c'est à dire un cercle. Une des propriétés du cercle est sa largeur constante. Dessinons deux tangentes parallèles au cercle, et fixons leur distance. Nous commençons à les faire tourner. La courbe (dans notre cas le cercle) est toujours en contact avec les deux lignes. C'est la définition même d'une courbe fermée avec une largeur constante.

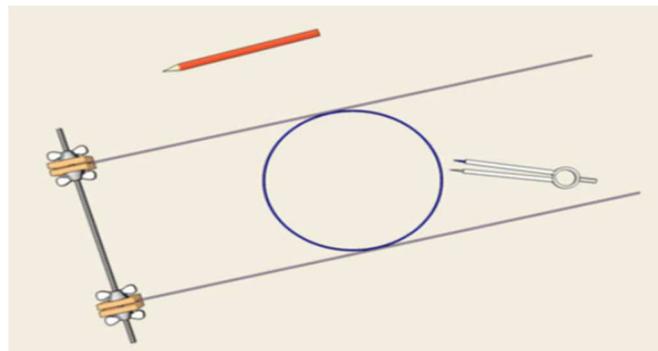


Figure III .2 Un cercle à l'intérieur de deux lignes parallèles [42]

III.2.2 Définition du triangle de Reuleaux

a. Théorie

Le triangle de Reuleaux est une figure plane de largeur constante : il peut tourner entre deux droites parallèles qui sont à une distance fixe, en restant entre les deux et en contact permanent avec les deux lignes parallèles.

Ajoutons une autre paire de droites parallèles tangentes au triangle et formant un angle droit avec celles déjà existantes. Nous obtenons un carré. Le triangle de Reuleaux, si l'on fait tourner de façon convenable, sera toujours à l'intérieur du carré et à tout moment en contact avec tous les côtés du carré.

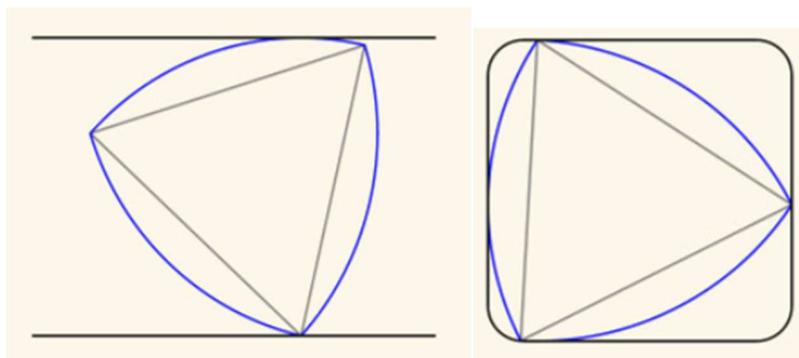


Figure III .3 Le triangle de Reuleaux à l'intérieur du périmètre du carré [42]

Pour être plus précis, nous devrions prendre un carré avec les coins légèrement arrondis. Pour que le triangle de Reuleaux meuve (se déplace) à l'intérieur de ce carré. Les sommets du triangle arrondi sont en contact permanent avec les côtés du carré de guidage.

Soit un triangle équilatéral (avec les côtés égaux). Sur chaque côté on construit un arc de cercle avec un rayon égal à la longueur du côté. La courbe ainsi obtenue s'appelle «triangle de Reuleaux».

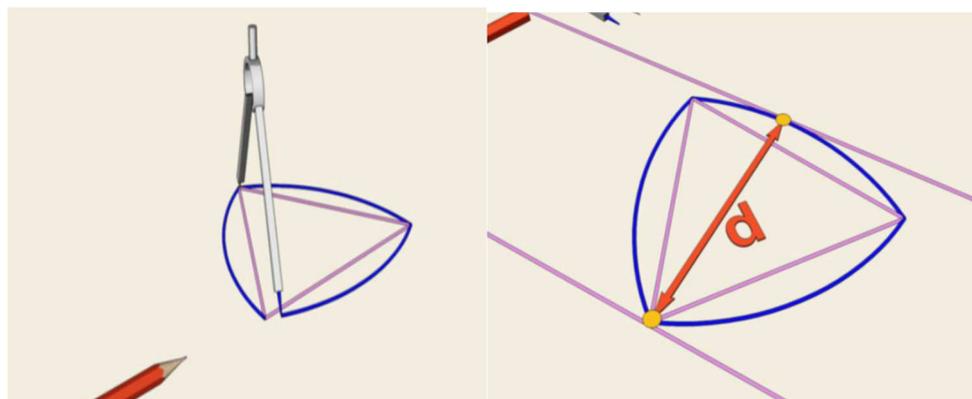


Figure III .4 Triangle équilatéral [42]

Il arrive que cette courbe à une largeur constante. Comme dans le cas du cercle, nous prenons deux lignes parallèles, fixons la distance entre elles et commençons à les faire tourner. Le triangle de Reuleaux est constamment en contact avec les deux barres parallèles. En fait, un point de contact est toujours situé dans l'un des sommets du triangle de Reuleaux, tandis que l'autre point, sur la droite parallèle, est un point de tangence avec l'arc opposé. Cela signifie que la largeur est toujours égale au rayon du cercle, à savoir la longueur du côté du triangle équilatéral initial.

b. En termes pratiques

En pratique, la largeur constante de cette courbe implique que si nous construisons des rouleaux ayant cette figure comme section, le livre va rouler sur eux, en restant parfaitement horizontal.

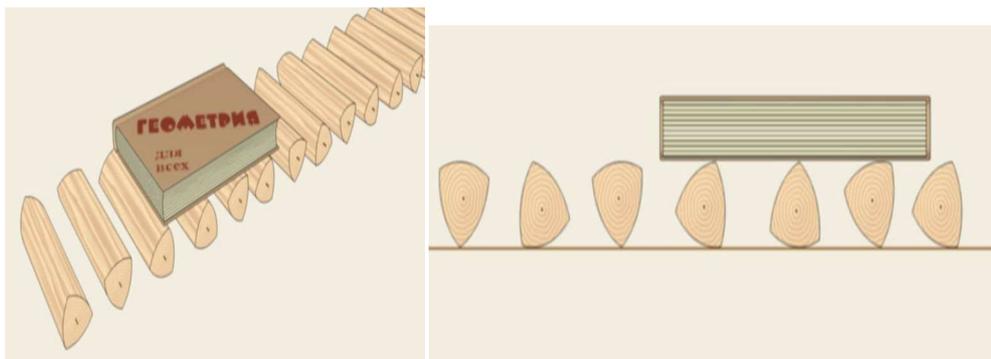


Figure III .5 Tapis reuleaux [42]

Le cercle et le triangle de Reuleaux ne sont pas les seules figures de largeur constante. Sur un polygone avec un nombre impair de côtés, ainsi que le triangle, nous pouvons construire une courbe de largeur constante. Il y a aussi des courbes asymétriques de largeur constante.

Mais il y a aussi d'innombrables autres figures de largeur constante, construites exactement sur le triangle équilatéral, et qui ne sont pas semblables, soit entre eux soit au triangle de Reuleaux. [47]

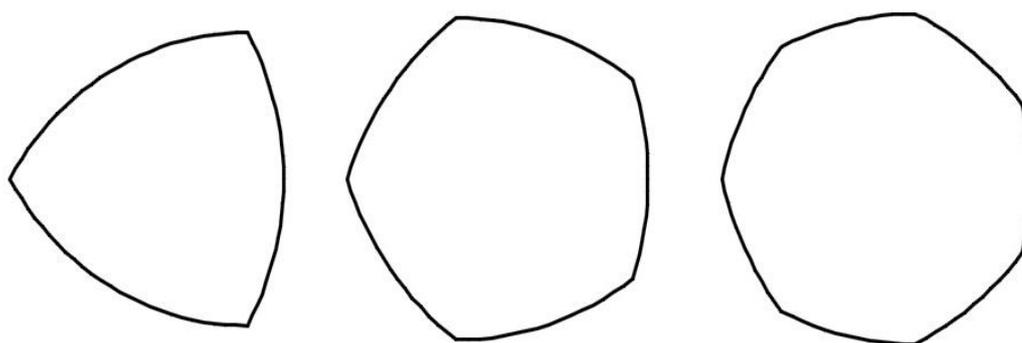


Figure III .6 Courbes de largeur constante [47]

III 2.3 La construction du triangle de Reuleaux

- On trace un triangle équilatéral ABC.
- On pointe sur A avec un compas et on trace l'arc de cercle BC.
- Ainsi de suite pour les deux autres points B et C.
- Quand tout ceci est terminé nous pouvons distinguer un magnifique triangle arrondi de Reuleaux.

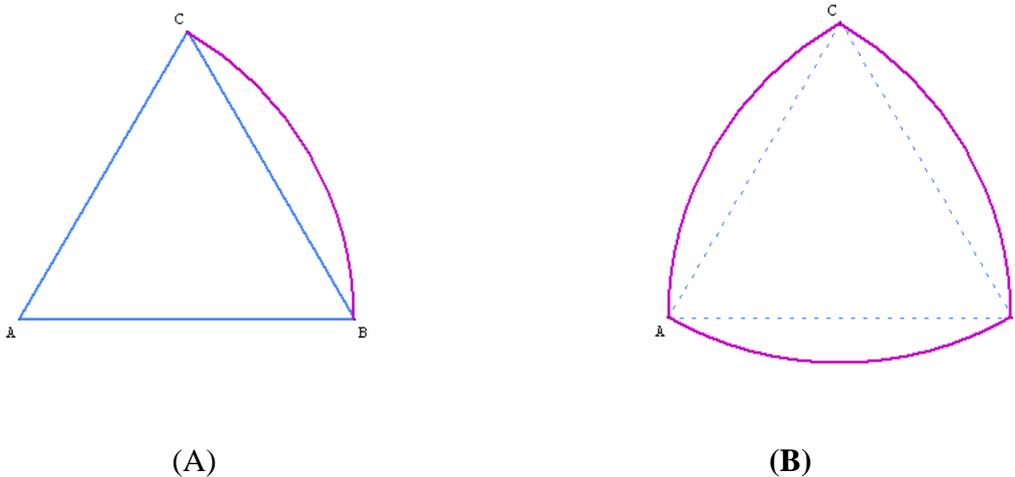


Figure III .7 Périmètre et aire du triangle de Reuleaux

Soit a la longueur du côté du triangle équilatéral définissant le triangle de Reuleaux

a. Périmètre :

Le périmètre du triangle de Reuleaux est égal à 3 fois la longueur d'un arc de cercle de rayon et d'angle (au centre) de 60°

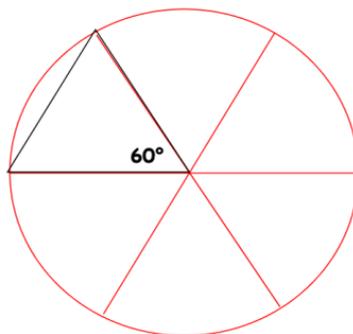


Figure III .8 Un cercle divisé par six

Pour ce cercle de rayon r_1 , un angle de 360° correspond à $2\pi r_1$, un angle de 1° correspond à $\frac{2\pi r_1}{360}$

Un angle de 60° correspond à $\frac{2\pi r_1 \times 60}{360}$

$$\frac{2\pi r_1 \times 60}{360} = \frac{2\pi r_1 \times 60}{6 \times 60} = \frac{\pi r_1}{3} \quad (\text{III.1})$$

Nous remarquons que l'angle de 60° représente le sixième de 360° . donc la longueur d'un arc de cercle est

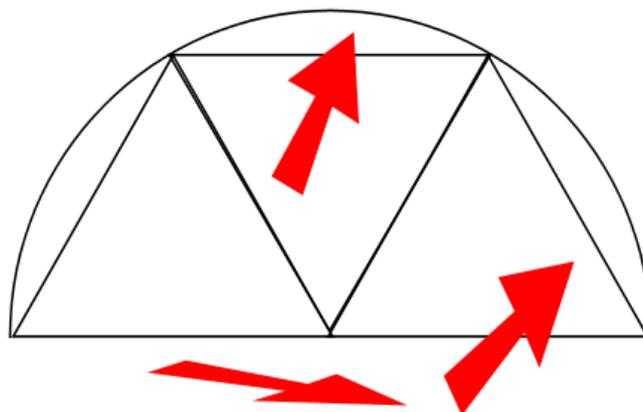
$$\frac{1}{6} \times 2\pi r_1 = \frac{2\pi r_1}{6} = \frac{\pi r_1}{3} \quad (\text{III.2})$$

Le périmètre du triangle est donc

$$3 \times \frac{\pi r_1}{3} = \pi r_1 \quad (\text{III.3})$$

Le périmètre est : πr_1

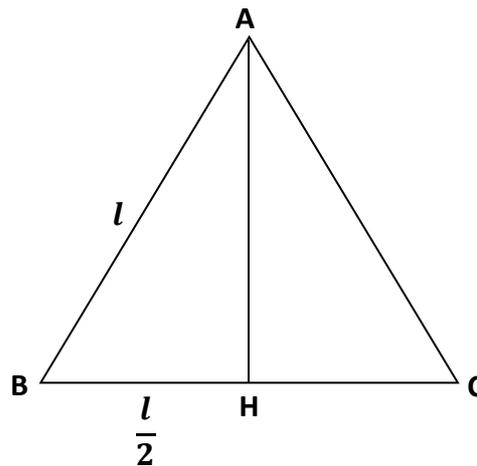
Remarque : Le périmètre d'un triangle de Reuleaux de diamètre D est égal à la moitié de la circonférence d'un cercle de rayon .



Aire :

Calcul de l'aire d'un triangle équilatéral de côté l :

Soit H le pied de la hauteur issue de A. Dans un triangle équilatéral, la hauteur est également médiatrice. Donc H est le milieu de [BC]. Dans le triangle ABH rectangle en H, nous avons, d'après le théorème de Pythagore :



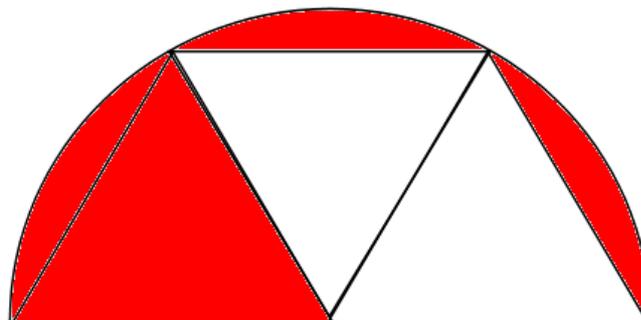
$$AB^2 = AH^2 + HB^2$$

$$l^2 = AH^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \Leftrightarrow l^2 = AH^2 + \frac{l^2}{4} \Leftrightarrow l^2 - \frac{l^2}{4} = AH^2 \Leftrightarrow \frac{4l^2}{4} - \frac{l^2}{4} \Leftrightarrow AH^2 = \frac{3l^2}{4}$$

$$AH = \frac{l\sqrt{3}}{2}$$

L'aire d'un triangle équilatéral de côté (l) est donc $\left(\frac{\text{base} \times \text{hauteur}}{2}\right)$:

$$A = \frac{l \times \frac{l\sqrt{3}}{2}}{2} = \frac{l^2\sqrt{3}}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{l^2\sqrt{3}}{4} \quad (\text{III.3})$$

b. Calcul de l'aire du triangle de Reuleaux

L'aire du triangle de Reuleaux est la somme des aires colorées sur le dessin ci-dessus. L'aire d'un tel triangle est donc égale à l'aire d'un demi disque de rayon a diminuée de deux fois l'aire d'un triangle équilatéral de côté a (les deux triangles non colorés).

$$A = \frac{\pi l^2}{2} - 2 \times \frac{l^2 \sqrt{3}}{4} \text{ Soit } A = \frac{\pi l^2}{2} - 2 \times \frac{l^2 \sqrt{3}}{4} = \frac{\pi l^2}{2} - \frac{l^2 \sqrt{3}}{2}$$

En mettant $\frac{l^2}{2}$ en facteur, nous obtenons :

$$A = \frac{l^2}{2} (\pi - \sqrt{3})$$

III 2.5 Principe de fonctionnement

On utilisera la théorie du triangle courbé de Reuleaux de largeur constante pour percer des trous de forme carré.

On a donc une boîte carrée avec son centre en orangé et un triangle de Reuleaux en bleu pâle avec son centre en blanc. Sur un des sommets du triangle, on a mis une petite tige pour aider à faire tourner le triangle autour de son centre (figure III.8).

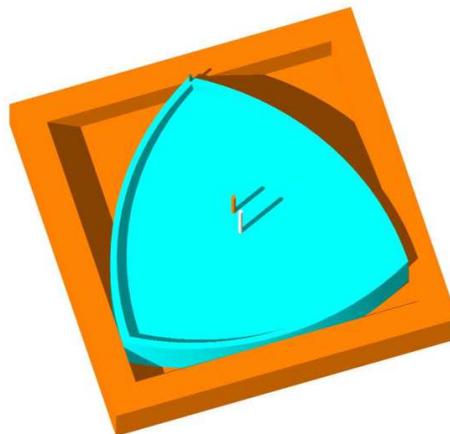


Figure III .9 Position initiale [43]

Quand on essaie de tourner le triangle, on s'aperçoit qu'il reste toujours collé au carré sur les 4 côtés, mais que son centre se déplace.

Une rotation du triangle autour de son centre, dans le sens des aiguilles d'une montre, induit d'ailleurs une rotation de son centre autour de celui du carré dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, (figure III.9).

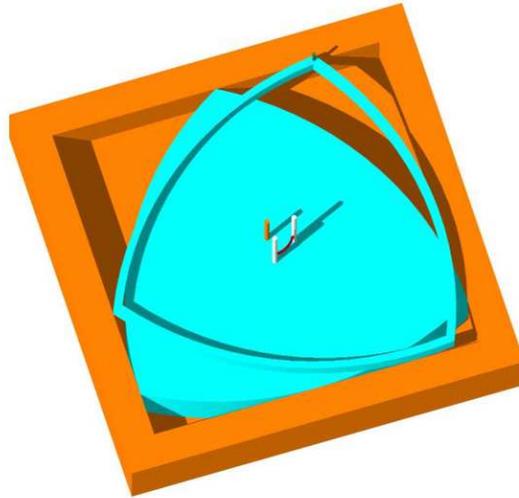


Figure III.10 Rotation de 15° du triangle pour une rotation de son centre de 45° [43]

Si vous déplacez le centre de ce «triangle» le long d'une certaine trajectoire, son sommet dessinera presque un carré et le triangle même couvrira, en balayant, toute la surface à l'intérieur de la figure ainsi obtenue.

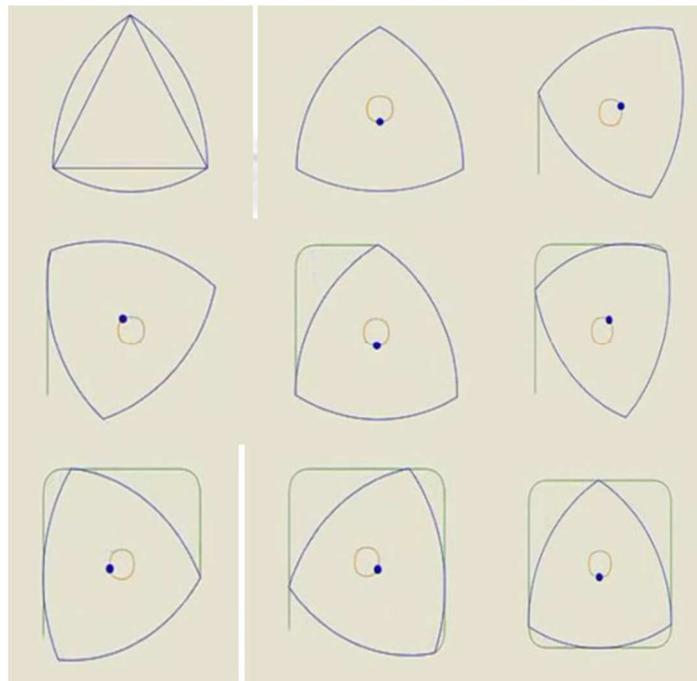


Figure III.11 Trajectoire du centre de ce triangle [44]

Les côtés de cette figure, à l'exception de petits morceaux au coin, seront strictement rectilignes ! Et en prolongeant ces segments de droites on obtiendra exactement un carré.

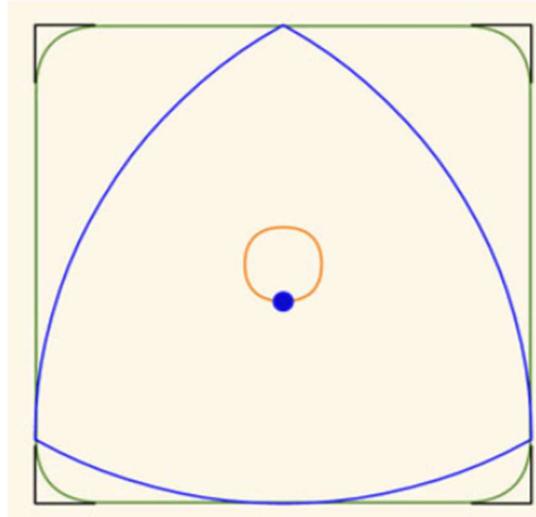


Figure III.12 Le lieu d'un sommet du triangle de Reuleaux [42]

Afin de réaliser ce que nous avons décrit, le centre du triangle de Reuleaux doit se déplacer le long d'une trajectoire, qui est l'union de quatre arcs égaux d'ellipses. Les centres des ellipses sont situées sur les sommets du carré tandis que les demi axes sont inclinés de 45° par rapport aux côtés du carré, et ont longueur égale à $k \times (1 + 1/\sqrt{3})/2$ et $k \times (1 - 1/\sqrt{3})/2$. K étant la longueur du côté du carré.

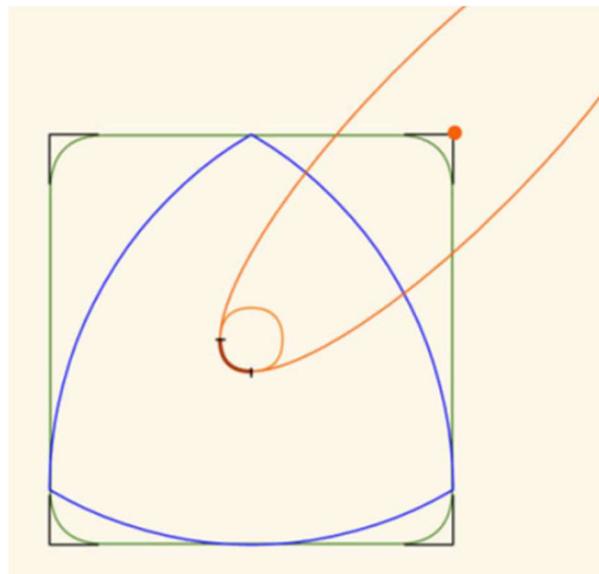


Figure III.13 L'ellipse intérieure et extérieure [42]

Les morceaux de courbe qui remplacent les coins aux angles droits sont également avec leur centres aux sommets du carré, inclinés de 45° par rapport aux côtés du carré, et ayant longueur égale à $k \times (\sqrt{3} + 1)/2$ et $k \times (\sqrt{3} - 1)/2$ respectivement.

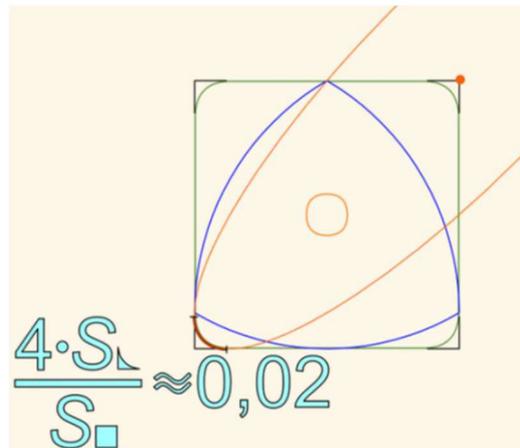


Figure III.14 Les morceaux de courbe [42]

La surface aux coins qui est exclue est à peu près le 2 pour cent de tout le carré ! Si maintenant vous avez le foret d'une perceuse ayant la forme du triangle de Reuleaux, alors vous pouvez percer des trous carrés un peu « arrondis » aux coins, mais avec les côtés parfaitement droits !

III 2.6 Calcul des courbes

On s'aperçoit que le déplacement du centre du triangle autour de celui du carré n'est pas un cercle mais plutôt qu'il suit un trajet elliptique. Le trajet complet est formé de 4 portions d'ellipse. On l'appellera l'ellipse interne. De même le trajet des sommets du triangle dans les coins du carré suit une autre portion d'ellipse. On l'appellera l'ellipse externe.

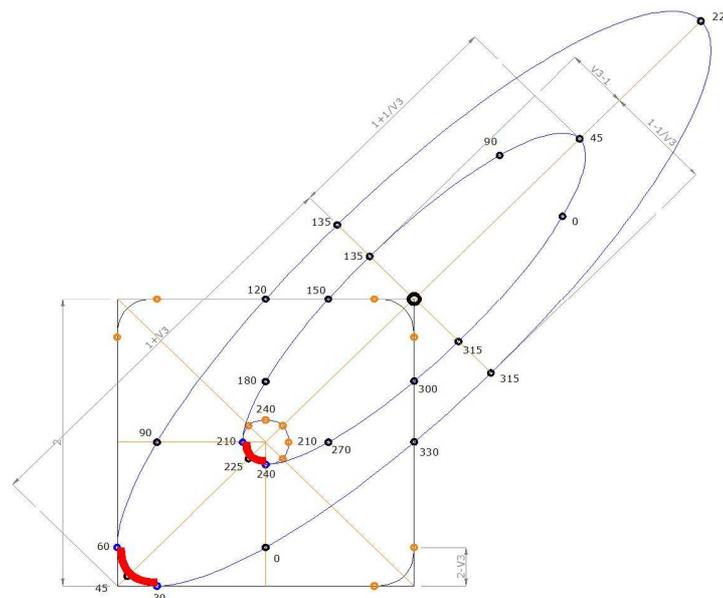


Figure III.15 Trajet elliptique [43]

III.3 Etude de la forme géométrique de l'outil et ses caractéristiques

III.3.1 Forme pour l'outil

Pour creuser un trou carré de côté a , on utilise une mèche en forme de triangle de Reuleaux de côté a . Son axe de rotation doit tourner 3 fois plus vite qu'elle dans le sens contraire, sur un cercle dont le diamètre est environ $0,15a$ [45].

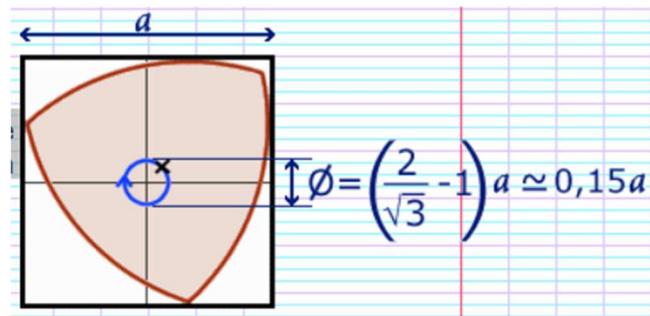


Figure III.16 Triangle de Reuleaux de côté(a) [45]

Pour creuser la matière et évacuer les copeaux, il faut lui donner des "dents".

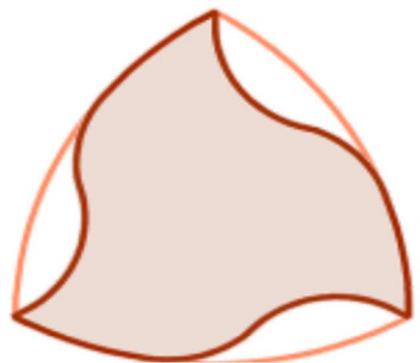


Figure III.17 Forme de l'outil [45]

Pour réaliser un outil, il faut donner forme à 3 processus :

1. Une mèche (foret) avec des arêtes tranchantes capable de couper le métal ou le bois en tournant.
2. Un guide qui sert à déplacer le centre de la mèche à l'endroit requis selon la rotation de celle-ci.
3. Un mécanisme de flottement pour permettre de transmettre la rotation de la Perceuse ou du tour à la mèche avec une translation libre du centre.

La solution générale consiste en 3 disques dont celui du centre est rainuré en deux glissières en forme de queue d'aronde, à angle droit. L'axe de la mèche peut se déplacer librement par rapport à celui de la perceuse bien que la rotation de la perceuse lui soit transmise. Une autre solution est celle d'un joint de cardan.

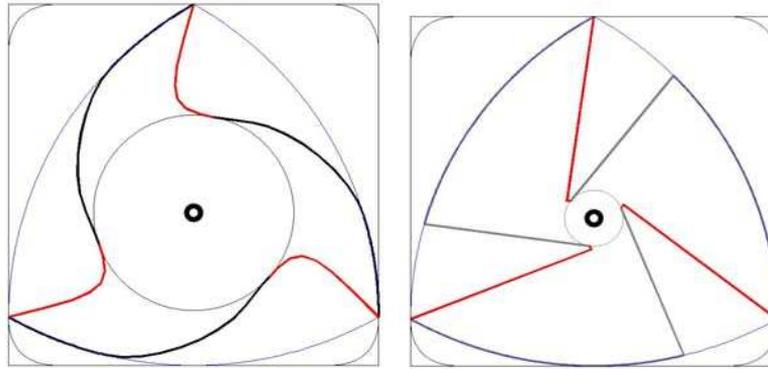


Figure III.18 Les mèches possibles

III.3.2 Vue réelle de l'outil de coupe

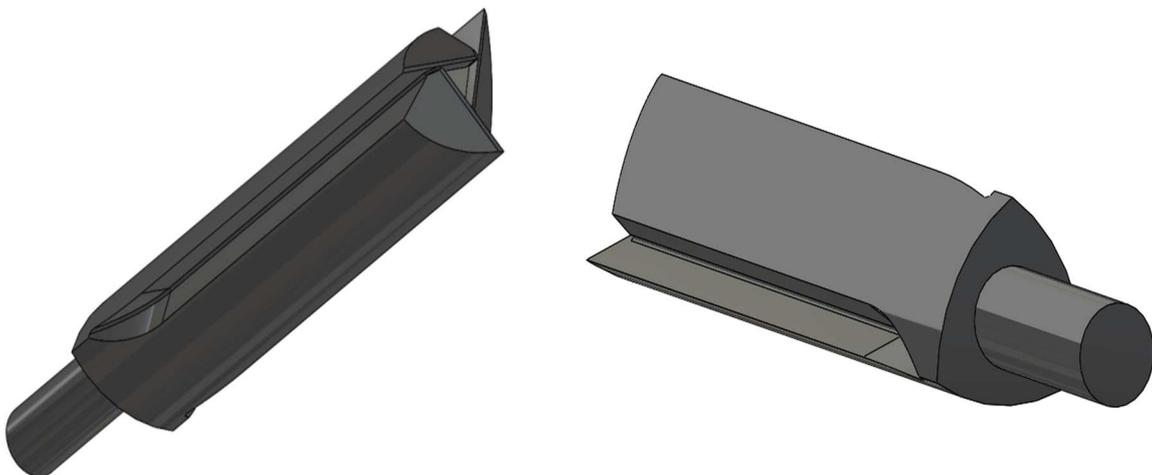


Figure III.19 Conception de l'outil avec le triangle de Reuleaux incorporé.

III.3.3 Géométrie de l'outil de coupe

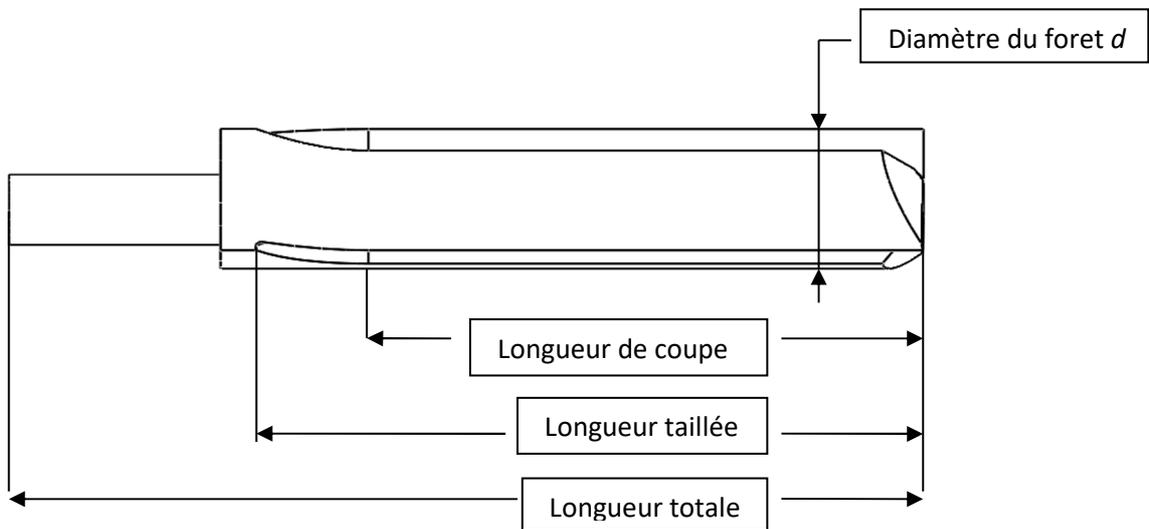


Figure III.20 Profil de l'outil conçu.

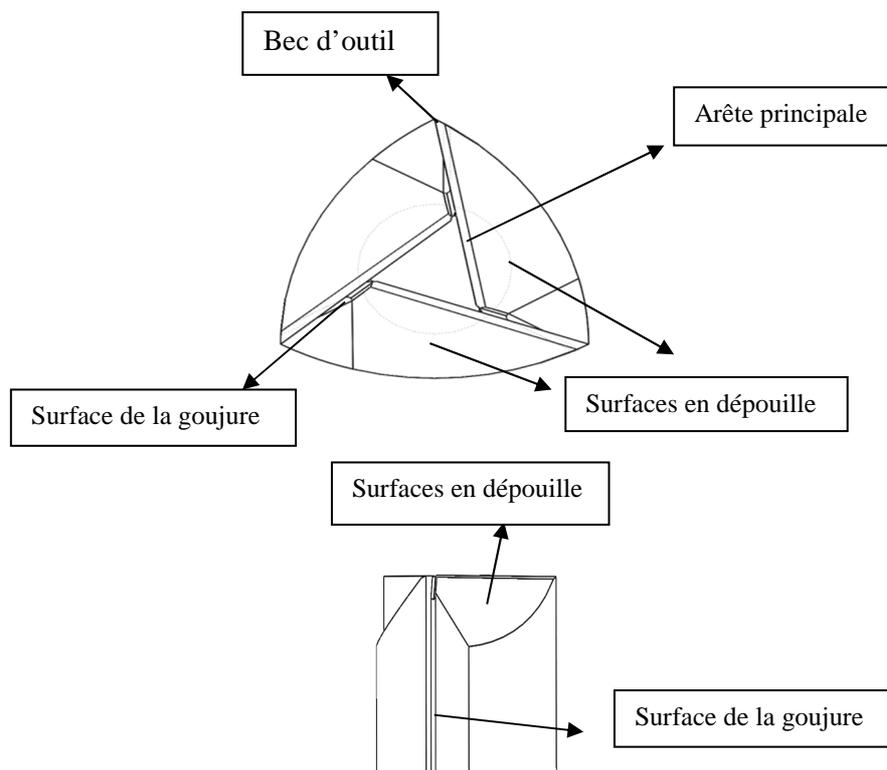
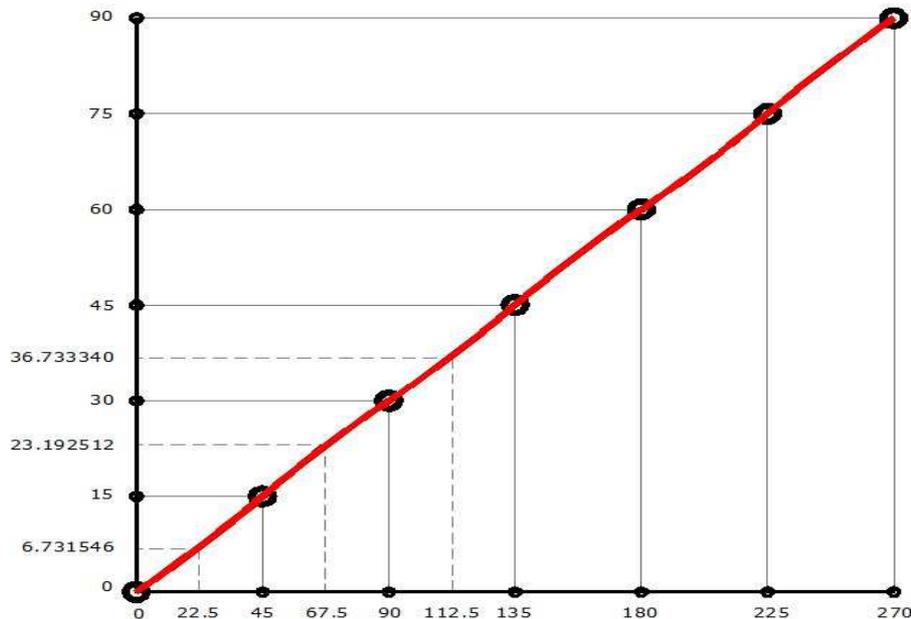


Figure III.21 L'outil pour reperçage de trous carrés.

III.3.4 Rapport de rotation

Rotation du triangle autour de son axe à l'échelle 1=3



Rotation du centre du triangle autour du centre du carré à l'échelle 1=1

Figure III.22 La variation des angles entre la rotation du triangle autour de son axe et la rotation de son axe autour du carré [43]

On remarque que lorsque le triangle fait une seule rotation, son axe tourne trois fois au tour du centre du carré.

Exemple :

On prend exactement cette valeur des valeurs multiples de 15° et 45° respectivement, mais varie un peu entre ces valeurs. Ainsi, si le rapport était constant, on devrait avoir pour une rotation du centre du triangle de 22.5° une rotation du triangle autour de son axe de 7.5° . Or celle-ci n'est que de 6.731546° . Ceci montre bien l'effet des portions d'ellipse que suit le centre du triangle au lieu de portion de cercle.

III.4 Présentation et description du système étudié

Nous avons fixé l'outil de coupe au triangle de Reuleaux qui se déplace dans un cadre carré et qui sert de guide. Le cadre lui-même est fixé à la perceuse. Maintenant, nous devons faire tourner le triangle de Reuleaux.

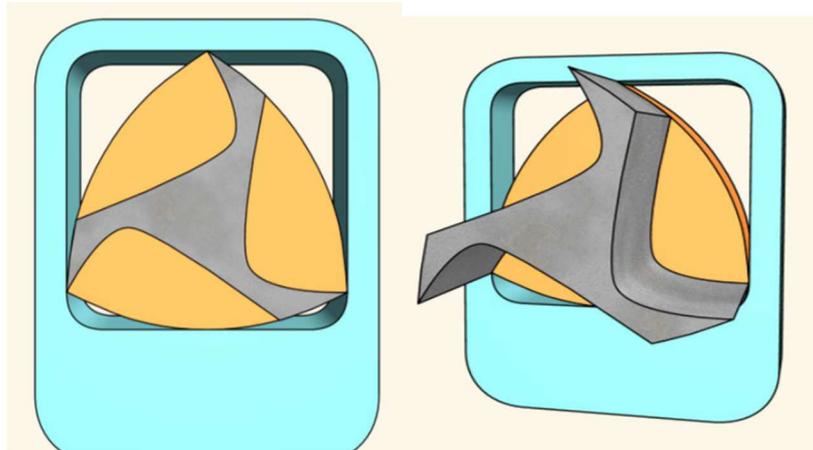


Figure III.23 Guide de déplacement [42]

Le guide carré est une pièce fixe et rigide qui guide le triangle de Reuleaux pour se déplacer suivant le périmètre du carré, ce guide carré est lié rigidement à la perceuse à l'aide de tiges en acier, et ces tiges sont fixées à la perceuse en utilisant des pinces pour fixer l'élément de support à la perceuse portable. Afin de faciliter le mouvement du triangle de reuleaux à l'intérieur du guide de forme carré, nous avons fait le trou du carré de taille légèrement plus grande que la largeur du ce que permet d'assurer la rotation de l'outil sans coincer à l'intérieur du trou carré.

Coté de carré : 18 mm

Matériau : acier doux (Z 200)

Le système peut être adapté à une perceuse portable (fig –ci-dessous)

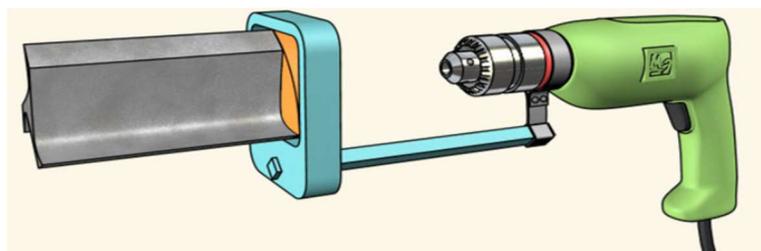


Figure III.24 Le guide carré fixé à la perceuse portable [42]

Nous devons faire tourner le triangle de Reuleaux. Ce problème technique est résolu avec l'aide d'un dispositif mécanique que vous avez probablement déjà vu de nombreuses fois dans les articulations qui connectent la remorque au camion. C'est le joint de cardan. Cette articulation est nommée d'après l'inventeur, Jérôme cardan.

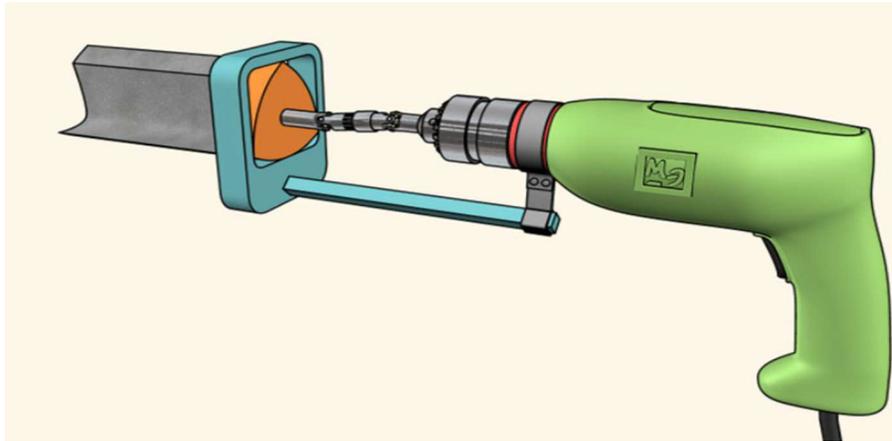


Figure III.25 Mécanisme de perçage du trou carré utilisant un joint de cardan [46]

Prenons une feuille de contreplaqué et faisons un trou carré ! Comme nous l'avons déjà dit, ses côtés seront parfaitement droits, et seuls les coins seront un peu arrondis. Si nécessaire, nous pouvons les corriger par une lime.

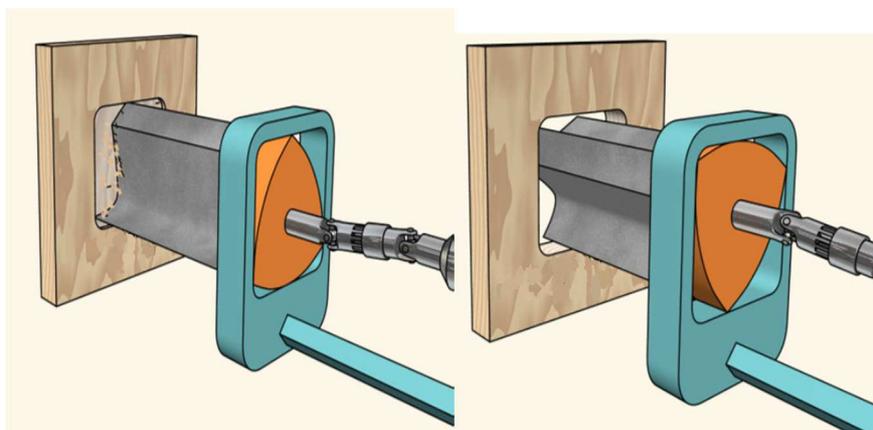


Figure III.26 Perceuse à trous carrés avec outil spécial [42]

III.5 Dimensionnement des éléments composant le système étudié

Pour Construire une telle conception, il suffit qu'il y'ait une section similaire au triangle de Reuleaux, avec les arêtes vives en correspondance des sommets du triangle.

III.5.1 Choix des matériaux et leurs caractéristiques mécaniques

III.5.1.1 Outil de coupe de points

L'outil spécial monté sur RT qui a 3 tranchants afin d'obtenir le trou carré. L'outil est en Z 200, qui a une résistance élevée à la dureté. Le pré-perçage est fortement recommandé, ce qui réduit l'usure de l'outillage et la quantité de copeaux à retirer. Il résiste également à une certaine pression sur l'outil et a donc une durée de vie plus longue. L'outil est monté sur un triangle de Reuleaux de 18 mm de diamètre et 65 mm de longueur.

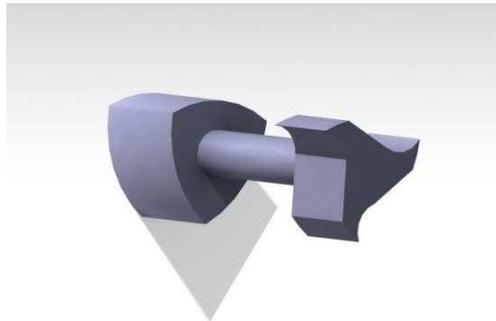


Figure III.27 Conception d'outil avec triangle de Reuleaux

➤ **Composition chimique moyenne en %**

Acier Z 200 C 12 – X 200 Cr 12

La nouvelle normalisation :

X 210 Cr 12

C (Carbone)	Cr (Chrome)	W (Tungstène)	Mn (manganèse)
2.10	12.00	0.70	0.3

➤ **Propriétés :**

Acier à 12 % de chrome, résistant à l'usure et d'une tenue à la coupe élevée.

➤ **Trempe :**

Température : 950-980 °C

Milieu de trempe : huile à 80°C, air, vide ou bain chaud 500-550°C

Dureté après trempe : 64 HRC

➤ **Recuit d'adoucissement :**

Température : 800-840 °C

Refroidissement : lent au four

Dureté : 250 HB maxi

III.5.1.2 Support et éléments de soutien

Le guide carré est une pièce fixe qui guide le triangle de Reuleaux pour se déplacer en forme de carré et aide également le RT à tourner dans un plan fixe, le guide carré est lié à la plaque de base à l'aide de deux entretoises support, ces entretoises sont boulonnées à la plaque de base à l'aide de boulons M6 ALLEN.

Afin d'obtenir le bon fonctionnement de RT à l'intérieur du guide carré, nous avons fait le trou carré de taille plus grande que la largeur de RT, nous pouvons donc assurer la rotation du triangle sans coincer à l'intérieur du trou carré. Nous avons également contraint le mouvement vertical du triangle de Reuleaux afin d'obtenir la profondeur de coupe requise.

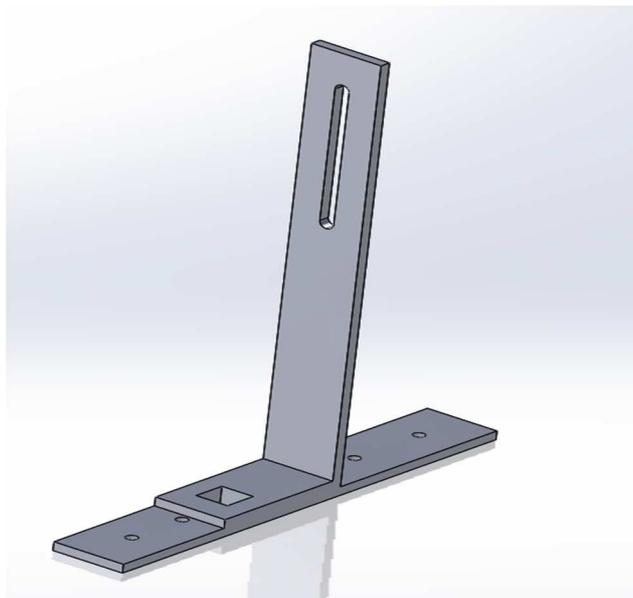


Figure III.28 Image du support et des éléments de support fabriqués.

III.5.1.3 Joint de cardon pour transmission de couple

Dans le mécanisme de perçage à trous carrés, un accouplement non coaxial peut être appliqué pour la transmission du couple, car le centre de rotation de la came (triangle de Reuleaux) est inconstant et se déplace sur une trajectoire non circulaire. Le couplage de joint de cardan est largement appliqué en tant que couplage non coaxial, qui a la capacité de transmettre le

couple entre des axes parallèles ou non parallèles et est connecté à deux joints de cardan. Le joint de cardan, conçu au XVI^e siècle comme le montre la "Fig. 28", a été appliqué sur le mécanisme d'horloge [51].

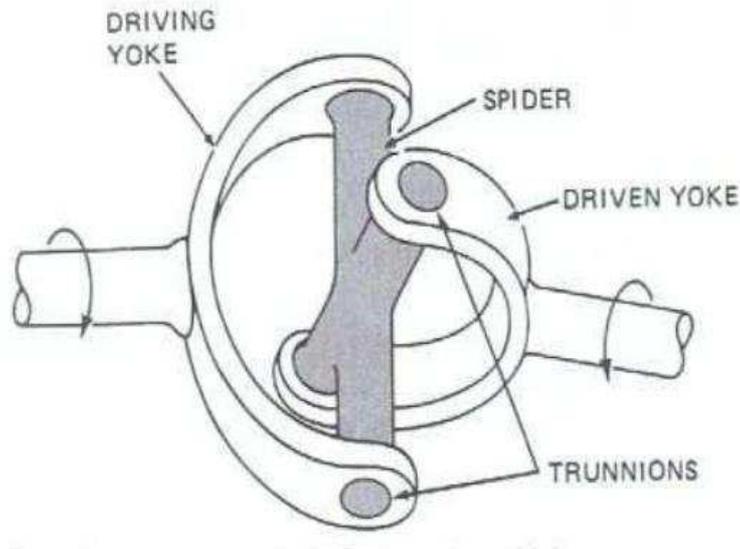


Figure III.29 Joint de cardon au XVI^e siècle [51]

Le joint de cardan est utilisé pour connecter deux arbres à un angle pour transmettre le couple. Le centre de RT doit tourner lui-même et tourne également dans un chemin non circulaire, en utilisant un joint universel RT peut tourner dans un chemin non circulaire. Accouplement ou joint pouvant transmettre une puissance rotative par un arbre à n'importe quel angle sélectionné, couplage dans une tige rigide qui permet à la tige de se «plier» dans n'importe quelle direction, et est couramment utilisé dans les arbres qui transmettent le mouvement rotatif. Il se compose d'une paire de charnières rapprochées, orientées à 90 ° l'une de l'autre, reliées par une croix arbre. Le joint universel n'est pas un joint à vitesse constante. Ils peuvent être fabriqués dans différents aciers inoxydables standards, aciers AISI 303 (1.4305), 304 (1.4301) et 316L (1.4404), mais aussi dans d'autres matériaux sur demande.



Figure III.30 Image de l'accouplement par joint de cardan choisi pour la machine.

III.5.1.3.1 Modèle d'accouplement universel

Neil Slater et Nicholas ont utilisé l'ensemble de Schmidt selon lequel le disque central est indépendant de Supposons son propre centre de rotation. Pratiquement, les trois disques tournent à la même vitesse. [48]



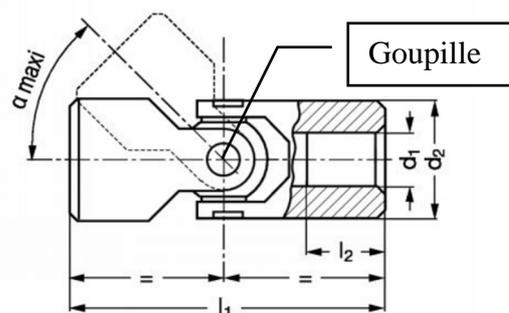
Figure III.31 Couplage Richard Schmidt [48]



Figure III.32 Couplage Oldham [49]

III.5.1.3.2 calcul de résistance de la goupille du joint de cardan

Schéma du joint de cardan :



III.5.1.3.2.1 Calcul de la contrainte de cisaillement

La goupille du joint de cardan possède 2 sections cisillées, situées toutes les deux à la distance $r_2 = 9 \text{ mm}$ de l'axe du corps de l'outil. L'effort de cisaillement F dans une section est tel que : Couple maxi

$M_{\text{maxi}} = 2 F \times r_2$. Par conséquent, l'effort tranchant

$$T = F = M_{\text{max}} / 2r_2$$

Pour vérifier la condition de résistance ($\tau \leq \tau_{\text{adm}}$) on doit calculer le diamètre d :

$$\text{On a : } P = M \cdot \omega \Leftrightarrow M = \frac{P}{\omega} \quad \text{tel que} \quad \omega = \frac{2\pi N}{60} \quad \text{et}$$

Où :

P : la puissance de la machine (w) = 1,1 kW

C : Couple moteur (N.m)

N : Vitesse de rotation en tr/mn = 450 tr/mn

ω : Vitesse de rotation enrad /s

r_2 : le rayon d'outil (m)= 9 mm

Application numérique :

$$M = \frac{1.1 \times 10^3 \times 60}{2 \times 3.14 \times 450} = 23.35 \text{ N.m} \quad (\text{III.4})$$

$$M = 2 F \cdot r_2 \Leftrightarrow F = \frac{M}{2r_2}$$

$$F = \frac{23.35}{0.009.2} = 1297,22 \text{ N} \quad (\text{III.5})$$

La Condition de résistance : Si S désigne l'aire de la section cisillée, la condition de rupture de la goupille s'écrit : $F/S = R_g$, soit $S = F/ R_g$.

Condition de résistance au cisaillement peut s'écrire : $F/S \leq R_g/s$ (coefficient de sécurité = 3)

Matière de la goupille et du joint de cardan c'est l'acier 42Cr Mo 4

Avec $R_g = 850 \text{ Mpa}$

$$S \geq 3 * 1297,22 / 850 = 4,58 \text{ mm}^2$$

$$\text{Avec } S = 3,14 d^2 / 4 \rightarrow d \geq \sqrt{4 * S / 3,14} \text{ soit } \underline{d \geq 2,42 \text{ mm}}$$

Le diamètre de la tige de couplement qui égale à 5.6 mm est supérieure au résultat trouvé (2,42 mm), donc la condition est vérifiée, alors on peut dire que notre tige va résister à l'effort de cisaillement dans ces conditions.

III.5.1.3.2 Puissance nécessaire à la coupe :

Si l'on considère que pour une lèvre la section du copeau est :

$$S_c = \frac{a \cdot D}{4} \quad (\text{III.6})$$

Expression pour laquelle (**a**) représente l'avance par tour en mm et (**D**) le diamètre du foret en mm

La puissance nécessaire à la coupe peut s'écrire :

$$P_c = \frac{K_c \cdot a \cdot D \cdot V_{c_m}}{2} \quad (\text{III.7})$$

Expression dans laquelle K_c représente l'effort spécifique de coupe en perçage en N/mm^2 et V_{c_m} la vitesse de coupe moyenne en m/s

Calcul de l'effort d'avance en perçage

Cet effort est déterminé de la même façon que l'effort de coupe, il faut seulement remplacer l'effort spécifique de coupe par l'effort spécifique d'avance k_f .

$$F_f = \frac{D \cdot f \cdot k_f}{2} \quad (\text{III.8})$$

donne des valeurs spécifique de coupe k_c et de l'effort spécifique d'avance k_f en fonction de la matière usinée et de l'épaisseur du copeau h d'après le document Hertel. Pour chaque matériau on trouve k_c sur la première ligne et k_f sur la seconde

$$h = \frac{f}{2 \sin k_r} \quad (\text{III.9})$$

III.5.1.4 Perceuse

Pour fournir un mouvement de rotation à la RT et à l'outil, on peut utiliser la perceuse à percussion. L'extrémité du joint de cardan est montée dans le porte-outil de la perceuse. La vitesse de la broche est constante pour toutes les opérations, tandis que la vitesse de coupe

varie tout au long du tranchant. La vitesse de coupe est normalement calculée pour le diamètre extérieur. Cette variation de la vitesse de coupe le long des tranchants est une caractéristique importante du perçage.



Figure III.33 Perceuse standard

III.5.1.4.1 Spécifications

La Figure III.33 présente une perceuse standard de 350 w de puissance, sa vitesse maximale est 2600 tr/min. elle exige un courant de 220 v.

III.5.1.4.2 Présentation de la perceuse à colonne :

Le mécanisme peut être monté sur une perceuse à colonne qui est une machine d'atelier fixée sur un bâti, un établi ou au sol. Elle permet des perçages précis et importants (diamètres pouvant aller de 20 à 30 millimètres dans l'acier ordinaire). Le moteur électrique, de quelques centaines de watts, fait tourner une broche par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses (souvent à courroies). Un mandrin ordinaire ou des forets à queue conique (cône Mors) peuvent être fixés à l'extrémité de cette broche qui peut coulisser verticalement lorsque l'opérateur manœuvre un volant, un levier ou par le moteur. La pièce à percer est maintenue fermement dans un étau fixé lui-même sur la table. La pièce peut être clamée directement sur la petite table ou sur le socle grâce aux glissières ou aux boutonnières. La petite table coulisse et pivote le long de la colonne supportant le moteur. Par le pivotement de la petite table on permet de libérer l'espace pour fixer de grandes pièces sur le socle. Elle peut également tourner sur elle-même ce qui permet de forer une série de trous tracés sur une circonférence.

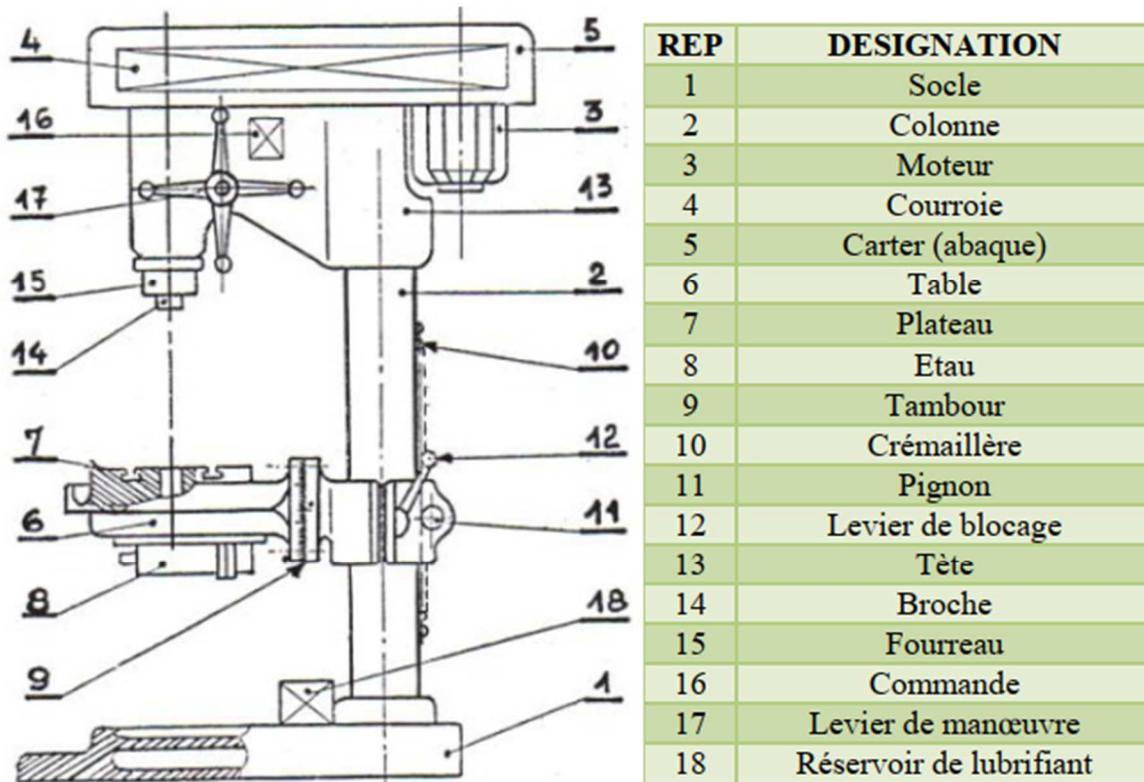


Figure III.34 Principaux organes de la perceuse [52]

III.5.1.4.3 Fonctionnement

- un moteur électrique entraîne en rotation une broche dans laquelle est maintenu le foret par l'intermédiaire du mandrin.
- Le foret est serré dans le mandrin avec une clé de mandrin.
- La descente du foret dans la pièce entraîne une découpe du matériau. Il en résulte un trou du diamètre du foret. Le trou sera de forme cylindrique.
- La pièce doit être maintenue en place par un montage, il permet de percer la pièce toujours au même endroit.

III.5.2 Assemblage du mécanisme conçu

La machine est en liaison avec le support à l'aide d'entretoises en barres d'acier pour connecter et maintenir l'ensemble de manière rigide et stable même en cas de fortes vibrations et secousses générées par les rotations de l'outil et de l'accouplement. Le support a été fixé sur la perceuse et les autres extrémités sont attachées à deux amortisseurs parallèles, ces derniers sont fixés sur les glissières de plateau. Le joint de Cardan est aligné avec le support carré et inséré dans le mandrin de la perceuse qui a le diamètre du mandrin égal au diamètre de l'accouplement.

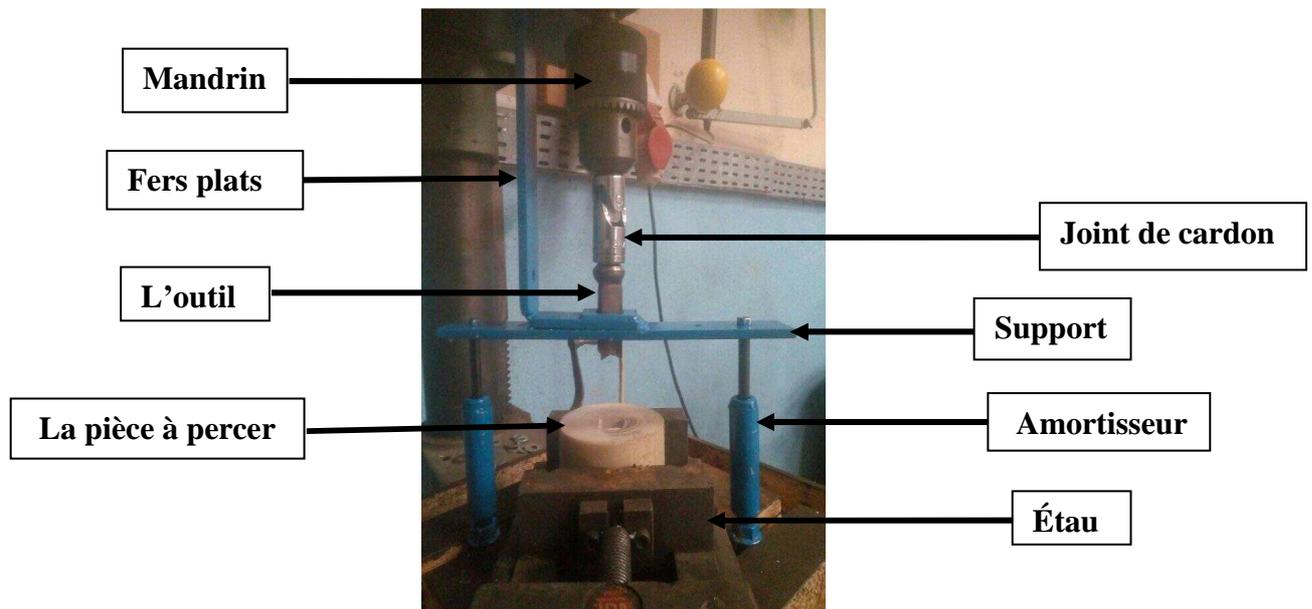


Figure III.35 Configuration expérimentale pour la perceuse à trous carrés.

Maintenant tout est prêt pour le perçage. L'essai qui a été concluant est exécuté sur une feuille de contreplaqué et un trou carré a été formé comme expliqué théoriquement auparavant, ses côtés sont droits et seuls les coins sont un peu arrondis. Si nécessaire, nous pouvons les corriger par une lime.



Figure III.36 Carré avec les coins arrondis

La seule difficulté est, comme indiqué précédemment, que la trajectoire du centre du triangle doit être composée de quatre arcs d'ellipses. A vue d'œil, cette courbe ressemble beaucoup à un cercle, et même mathématiquement est très proche de lui, mais ce n'est pas un cercle, tandis que toute excentrique (obtenue par un cercle dont le centre se déplace sur un autre cercle de rayon différent) utilisée dans les mécanismes techniques, donne un mouvement qui est strictement circulaire.

III 5.3 Avantages et limites

a. Avantages

- 1) Le seul procédé conventionnel pour créer un trou carré avec les paramètres souhaités en un minimum de temps possible.
- 2) C'est une machine compacte et légère pour fonctionner sans fatigue pour l'opérateur.
- 3) Le trou carré créé par d'autres méthodes alternatives prend du temps et n'est pas économique lorsqu'il est fait pour une production à petite échelle.
- 4) La découpe à grande vitesse du trou carré peut être effectuée là où le carré exact n'est pas requis, en évitant les opérations de finition.
- 5) Il s'agit de la conception la plus simple d'une foreuse à trous carrés avec un investissement initial minimum.

B. Limitations

- 1) Pour créer le trou de différentes formes et tailles, le support et l'outil de la machine doivent être remplacés par la taille souhaitée du trou.
- 2) Les vibrations et le bruit créés dans la machine en raison du plus grand nombre de composants mobiles sont difficiles à amortir en raison de la limitation de conception, telles que le poids et la taille de la machine.
- 3) Le coût combiné du nombre d'outils et de support requis pour la variation de taille et de forme n'est pas économique pour la production à petite échelle.

III.7 Simulation numérique de la construction conçue**III.7.1 Fondement du maillage**

Le maillage est une étape fondamentale de la simulation. Le modèle doit être divisé en petits éléments de formes données : triangle, quadrilatère, tétraèdre. L'ensemble de tous les éléments constitue le maillage. La fonction est donnée sur chaque élément et non plus sur la structure complète. La méthode des éléments finis correspond donc à une méthode par morceau. Afin de pouvoir créer le maillage (figure III.37), on a adapté le modèle de conception (CAO) pour le calcul en éliminant des détails de forme et de topologie qui n'ont pas une emprise sur le fonctionnement du système tels que les congés, et les chanfreins. On a utilisé un maillage standard de qualité moyenne avec essais automatique de maillage volumétrique. (En utilisant le bas de calcul du logiciel SolidWorks 2014).

On veut simuler la résistance des arrêtes tranchantes soumise à l'effort de coupe

Pour la simulation nous avons choisis les paramètres suivants

- Matière de l'outil
- Matière de la pièce a usiné
- Effort de coupe estime pour calcule égale à 100N

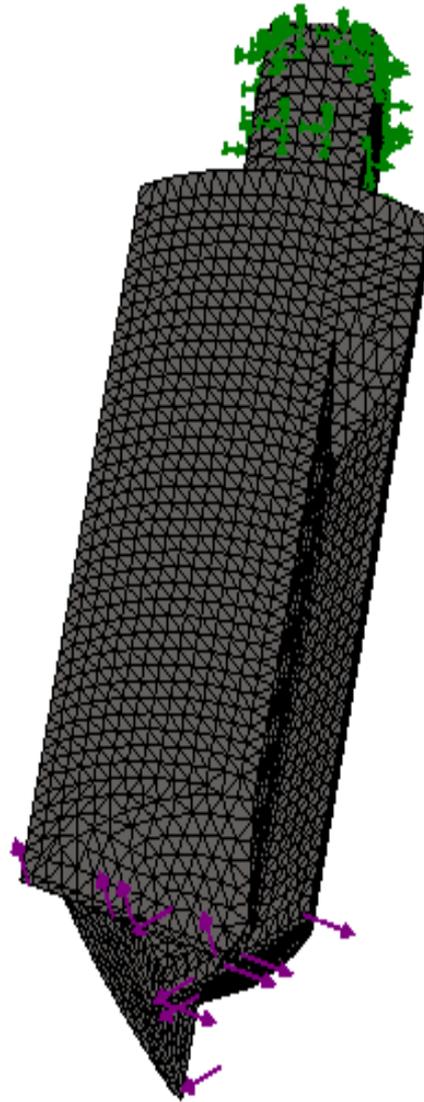


Figure III.37 Maillage du triangle de Reuleaux

Après l'exécution le logiciel nous donne la possibilité de visualiser et de quantifier quatre principaux résultats : la distribution des contraintes -la déformation -la distribution du coefficient de sécurité qui est un critère de fiabilité du calcul de résistance de notre conception

III.7.2 Distribution des contraintes

Sur la figure suivante, nous avons la distribution des contraintes. L'outil est soumis a un effort de 100 N, il est remarquable que les zones les plus sollicitées sont de l'ordre $4.569e+08 \text{ N/m}^2$, vu que la limite élasticité du matériau est de $6.204e+08 \text{ N/m}^2$, le matériau va travailler dans le domaine élastique, donc on peut dire qu'il va résister dans ces conditions.

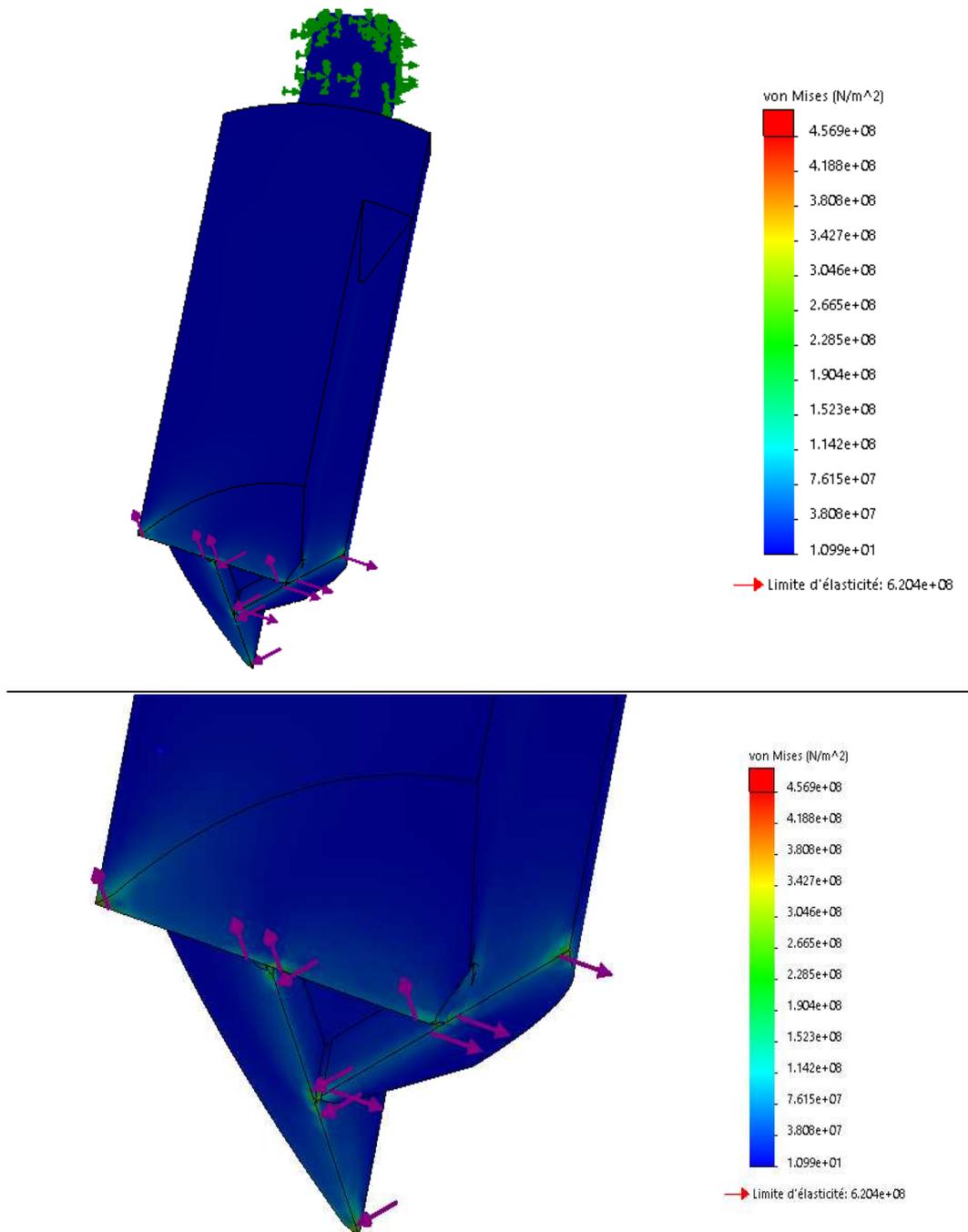


Figure III.38 Distribution des contraintes du triangle de Reuleaux

- **Déplacements :**

La figure III. 39 représente les déplacements enregistrés suivant ce cas de chargement. Cette figure montre que le champ de déplacement augmente dans la zone des trois arrêtes coupantes. Dont la valeur maximale est 0.0101 mm,

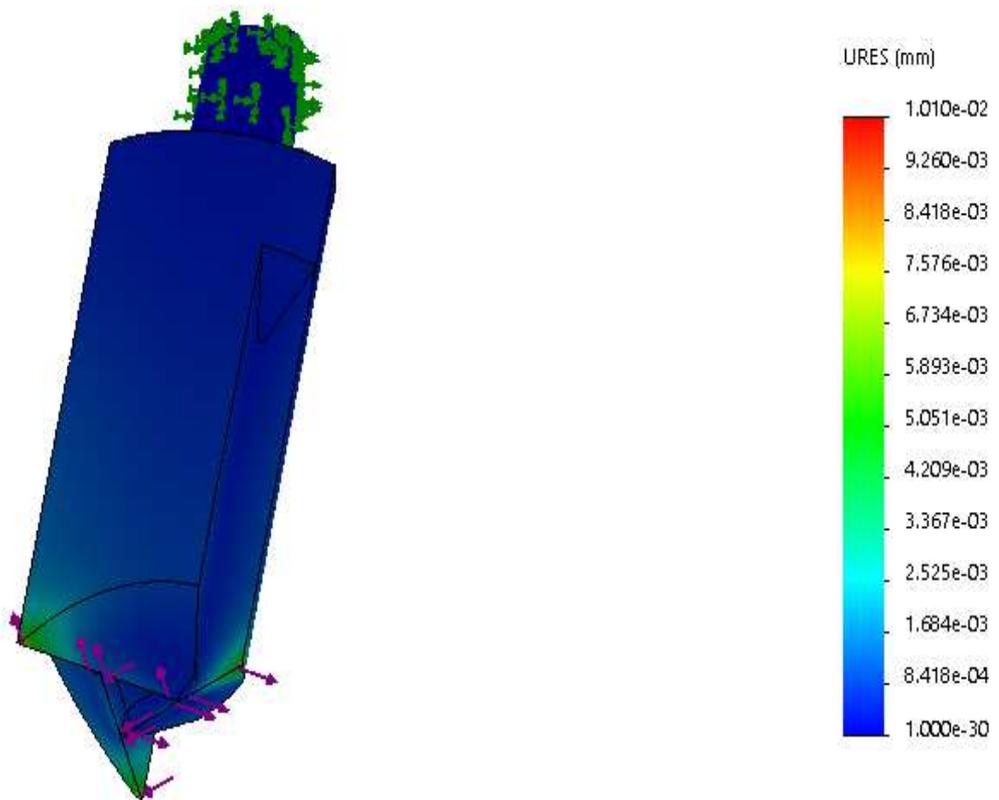


Figure III.39 déplacements

- **Déformations :**

La figure III.40 présente les déformations sur le triangle de Reuleaux

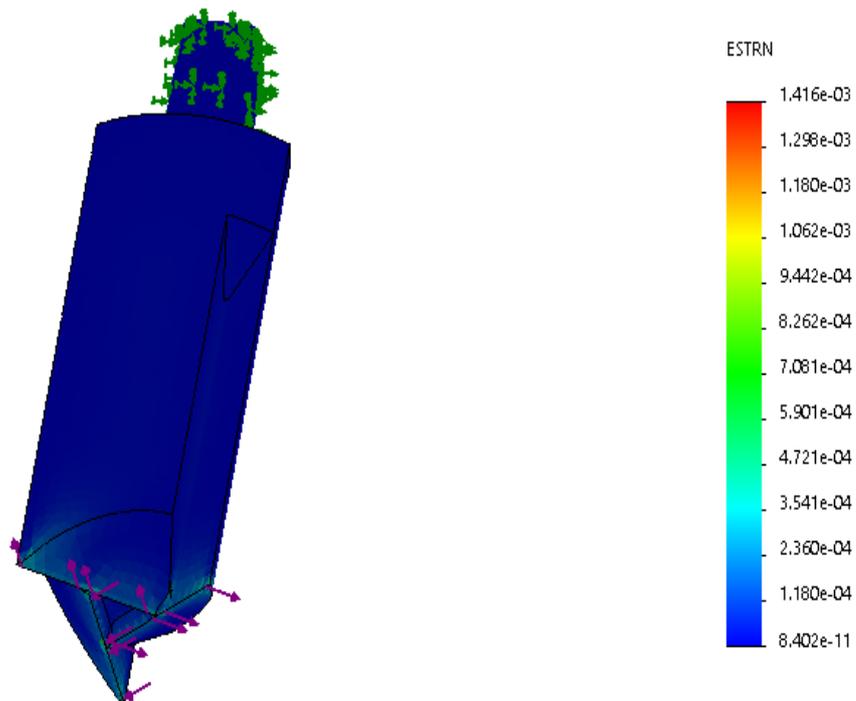
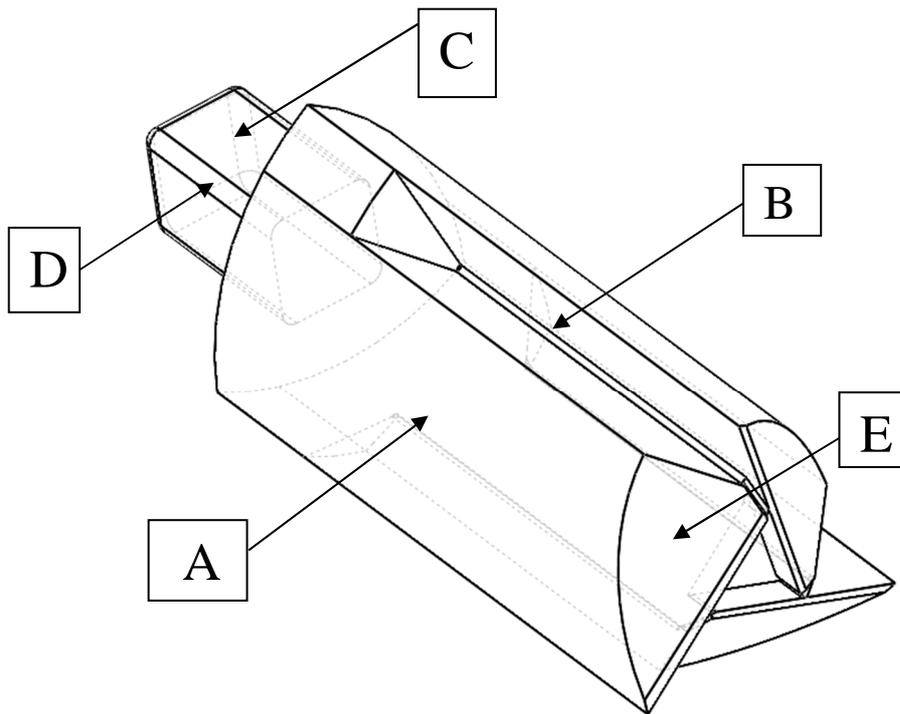
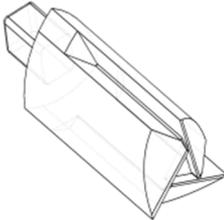
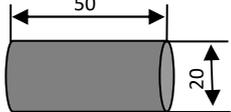
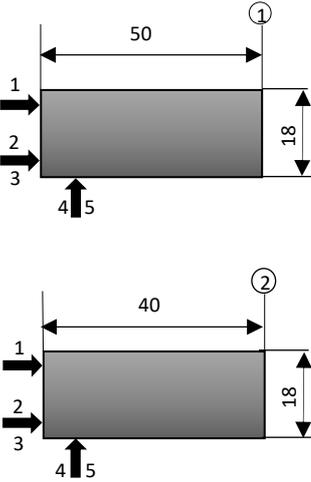


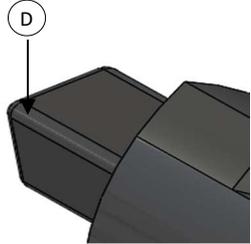
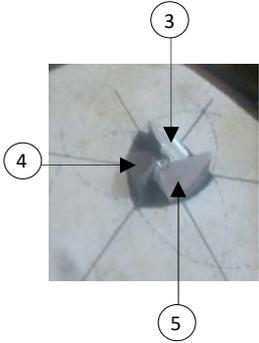
Figure III.40 Déformations

III.7.3 Gammes d'usinage du système de perçage étudié



GAMME D'USINAGE						
Ensemble : mécanisme de perçage de trous carrés. Elément : Foret de perçage		Nombre : 1 Matériau : Z 200 N : pièce			Croquis 	
N	Désignation des phases Phase opération	Machine	Appareils et Outillages	Contrôle		

<p>10</p>	<p>Contrôle du brut : Vérifier les dimensions du brut</p>			<p>Pied à coulisse</p>	<p>L : 50Ø : 20</p> 
<p>20</p>	<p>Tournage : 21 : chariotage de 1 22 : Dressage de 2 en finition</p>	<p>Tour Conventionnel</p>	<p>Outil a Dresser</p> 	<p>Pied à coulisse</p> 	
<p>30</p>	<p>Fraisage : Surface (A) Taillage de la denture suivant le rayon 18 mm en finition de toutes les surfaces</p>	<p>Fraiseuse Conventionnel</p>	<p>Fraise conique 2 tailles 10 mm</p> 	<p>Pied a coulisse</p>	

<p>40</p>	<p>Réalisation de l'entaille Surface : B</p>	<p>Fraiseuse Conventionnel</p>	<p>Fraise conique</p> 		
<p>50</p>	<p>Chanfreinage Surface D</p>	<p>Fraiseuse</p>			
<p>60</p>	<p>Affutage Surface 3, 4, 5</p>	<p>Rectifieuse</p>	<p>Meule.</p> 	<p>Rapporteur d'angle</p> 	

III.6 Conclusion

Le mécanisme conçu et installé sur la perceuse à colonne permet de percer des trous carrés sur divers matériaux à partir du mouvement de rotation de la broche de la perceuse. Le projet est de construction simple et de taille compacte. Les coûts d'installation et de fabrication de ce mécanisme simple sont bas par rapport aux autres modes d'obtention de trous carrés. Pour réduire les efforts de coupe le pré-perçage ou avant trou est recommandé.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude, conception et la fabrication d'un mécanisme adaptable à la perceuse à colonne ou mobile qui permet le perçage de trous de forme carrée à partir du mouvement de rotation de la broche de la perceuse. Pour atteindre cet objectif on s'est inspiré de la théorie de Reuleaux expliquée dans la partie théorique de notre projet de fin d'études.

Le projet comporte 2 parties : Une partie théorique expliquant la méthode du tracé du triangle de Reuleaux et ses caractéristiques géométriques et la deuxième partie concerne la réalisation pratique du mécanisme qui permet le perçage de trous carrés ainsi que l'outil de coupe.

Les résultats expérimentaux sont satisfaisants : Le mécanisme étudié et conçu nous a permis de percer des trous de forme carrée.

Ce mécanisme est simple de conception, pas cher et peut être adapté à tous types de perceuses et même au tour avec des modifications légères du support rigide en fonction du type de machines. La rigidité du mécanisme peut être améliorée en utilisant des supports beaucoup plus fiables et solides. La qualité de l'usinage du triangle de Reuleaux et son guidage carré peut être améliorée pour obtenir des trous carrés précis.

La partie tranchante de l'outil peut être aussi améliorée en utilisant des matériaux adéquats en vue d'augmenter la résistance à l'usure de cet outil et réduire l'effort de coupe en améliorant la géométrie de la partie active de l'outil de coupe.

La prochaine réalisation concernera la réalisation d'un jeu d'outils amovibles qui permettront de percer des trous de forme carrée de cotés normalisés différents.

A l'aide de logiciel SolidWorks on a fait une simulation numérique pour vérifier la fiabilité et le fonctionnement de l'outil réalisé.

Référence bibliographique

- [1] P.Padila, « Production Mécanique », DUNOD 1986.
- [2] M. Assas, N. Belhattab, M. Djenane, «Optimisation of Metal Working Based on Combined Criterion», Revue Morskoy Vestnik N2, Leningrad. Russia juin, 2003.
- [3] M. Assas, M. Djenane, «Optimisation des Conditions d'Usinage Basé sur un Critère Combiné», Deuxième Journées de Mécanique EMP, Alger 23 et 24 Décembre 2001
- [4] Alain Passeron, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997
- [5] A. Belloufi, « Cours Procédés de Fabrication », Master Maintenance Industrielle, Université Kasdi Merbah .2001
- [6] Jean-Pierre cordebois et coll, « Fabrication Par Usinage », DUNOD, Paris 2003
- [7] A. TOUMINE, « Usinage », INSA de LYON, Groupe conception - productive, 2007
- [8] Rocardier, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011
- [9] Alexandre Toumine, «Cours D'Usinage », Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France.
- [10] J. Vergnas, « Usinage : Technologie et Pratique », DUNOD, BORDAS, Paris 1982
- [11] J. L. Fanchon« Guide des Sciences et Technologie Industrielle » Edition Nathan Paris France.1994
- [12] R. Laheurte, « Application de la Théorie du Second Gradient a la Coupe des Matériaux », Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Décembre 2004
- [13] Denis Gelin, Michel Vincent, « Eléments de Fabrication », Les Editions Foucher, 1995
- [14] R. butin, M. pinot, « Fabrication Mécanique, Technologie Tome 3 »
- [15] Aude Ronde pierre et Sébastien Tordeux, « Introduction à l'Optimisation Numérique », 2009-2010
- [16] Alain Berro, « Optimisation Multi Objectif et Stratégies d'Evolution en Environnement Dynamique », Université des Sciences Sociales, Toulouse France, 2001.
- [17] S. Mottel, « Optimisation Non Linéaire », Université de Compiègne, 2003.
- [18] A. Belloufi, M. Assas, B Barkat, « Utilisation de la Programmation Non Linéaire pour l'Optimisation des Conditions de Coup en Tournage », JENM07, Université de Batna, 2007
- [19] Bettayeb Chouaib, Guerrah Ayoub, « Optimisation Non Linéaire des Conditions de Coupe », Mémoire , Université d'Ouargla, 2009.

- [20] M. Brahim, K. Haddoch, « Optimisation Non Linéaire des Paramètres de Coupe en Tournage », 1er Congrès International de Mécanique-Constantine, Université Tiaret, 2002.
- [21] J. D. Puerta Velasquez, « Étude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V ». Thèse de doctorat, de l'Université de Metz.
- [22] Alexandre Mondelin, « Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées Application Au cas du tournage finition de l'acier inoxydable 15-5PH ». Thèse de l'université de Lyon.
- [23] W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu, Modeling the surface roughness and cutting force for turning, J. Mater. Proc. Tech. 108 (2001) 286-293.
- [24] 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 et Manufacture 2004 (44) : 1555 – 1565.].
- [25] K. Ueda, K. Manabe, J. Okida ; A survey and recent investigations on computational mechanics in cutting ; Ind Cirp International Workshop on Modeling of Machining operations ; 1999 ; pp.39-55.
- [26] Sandvik Coromant ; « Perçage » ; Techniques de l'ingénieur ; 2001 ; pp. BM 7 088-1, BM 7 088-20.
- [27] [www.optimachines.com /centres de frissage et d'usinage](http://www.optimachines.com/centres%20de%20frisage%20et%20d%20usinage)
- [28] [robert.cireddu.free.fr/prod/les modes de generation .htm](http://robert.cireddu.free.fr/prod/les%20modes%20de%20generation%20.htm).
- [29] K. Tönshoff, A. Mohlfeld, T. Leyendecker, H.G. Fuß, G. Erkens, R. Wenke, T. Cselle, M. Schwenck ; Wear mechanisms of (Ti -Al)N coatings in dry drilling ; Surface and Coatings Technology ; 1997 ; pp . 603-609.
- [30] S.G. Harris, E.D. Doyle, A.C. Vlasveld, P.J. Dolder ; Dry cutting performance of partially filtered arc deposited titanium aluminium nitride coatings with various metal nitride base coatings ; Surface and Coatings Technology ; 2001 ; pp. 305-311.
- [31] F. Klocke and G. Eisenblätter ; Dry Cutting ; CIRP Annals - Manufacturing Technolog ; Volume 46 ; Issue 2 ; 1997 ; Pages 519-526.
- [32] M. Lahres and G. Jörgensen ; Properties and dry cutting performance of diamond coated tools ; Surface and Coatings Technology ; Volume 96 ; Issues 2-3 ; 25 November 1997 ; Pages 198-204
- [33] R. Heinemanna ; S. Hindujaa ; G. Barrowa ; G. Petuella ; Effect of MQL on the tool Tools & Manufacture ; 46 (2006) ; pp. 1–6.
- [34] A. R. Machado and J. Wallbank ; The effect of extremely low lubricant volumes in machining ; Wear ; Volume 210 ; Issues 1-2 ; September 1997 ; Pages 76-82.

- [35] A. S. Varadarajan, P. K. Philip and B. Ramamoorthy; Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry and wet turning; International Journal of Machine Tools and Manufacture; Volume 42; Issue 2; January 2002; Pages 193-200.
- [36] Jinsoo Kim, Sangkee Min , David A. Dornfeld; Optimisation and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts; International Journal of Machine Tools & Manufacture; 2001; pp. 923–936.
- [37] Y.C. Chen, Y.S. Liao; Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy; Journal of Materials Processing Technology; 2003; pp. 269–273.
- [38] J.L. Cantero,, M.M. Tardíob, J.A. Canteli, M. Marcos, M.H. Miguelez ; Dry drilling of alloy Ti–6Al–4V; International Journal of Machine Tools & Manufacture; 2005; pp.1246–1255.
- [39] H.L. Coldwell, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, N.M. Renevier, D.G. Teer; The use of soft/lubricating coatings when dry drilling BS L168 aluminium alloy; Surface and Coatings Technology; 2004; pp.716–726.
- [40] N. Guibert, H. Paris, J. Rech, Influence of the chisel edge geometry on the vibratory drilling behaviour, 5^o International Congress HSM, Metz -14/15 et 16 Mars 2006
- [41] en 2020
- [42] <https://www.etudes.ru/fr/etudes/wheel-inventing/> consulté en 2020
- [43] Claude Parisel, Novembre 2012. Pour tout commentaire, question ou permission sur l'utilisation de ce document, s'adresser à: cparisel@vieotron.ca.
- www.claudeparisel.com Percer un trou carré ?
- [44]R. G. SPARBER APRIL 17, 2012 “MAKING SQUARE HOLES “VERSION 4
- [45] www.juggling.ch > gisin > MathZero > perceuse4
- [46] Scott G Smith (1998) review on “Drilling square hole-The mathematics teacher” vol 86, no7, pp 579-584
- [47] Gray, A. "Reuleaux Polygons." §7.8 in Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 176-177, 1997
- [48] Neil Sclater, Nicholas P. Chironis. (2013). "Mechanisms and Mechanical Devices Source book". McGraw-Hill 10 10, which Chu, 2007. : 53-57 nci 1-755 68: 171-191.

- [49] Yutaka Nishiyama. (2009). "From Oldhams Coupling to Air Conditioners", Osaka Keidai Ronshu, 77-84.
- [50] A. Molinari, A. Moufki, D. Dudzinski, Etude du Comportement aux grandes vitesses de déformation de l'acier 42CrMo4, Contract report, CREAS Ascometal, 1997.
- [51]. H.Chr. Seherr-Thoss, F. Schmelz, E. Aucktor. (2006). "Universal joints and driveshafts", Springer, Verla Heidelberg 60(3): mini-dissertation.
- [52] A.chevalier/ C.Neuvéglise/ H.Ribérol. «Travaux pratiques Technologie Dessin». Paris : Delagrave. (1981).

Résumé

La conception mécanique d'un outil qui réalise des trous carrés est basée sur la géométrie du triangle de Reuleaux. L'objectif principal est d'étudier comment le mouvement circulaire peut être converti en un mouvement carré par des liaisons purement mécaniques.

Cette application consiste à construire un mécanisme spécial qui permet le perçage de trous carrés ; cela nécessite un guide de forme carré dans lequel se déplacera le triangle de Reuleaux le long des côtés du guide carré. Ce mouvement est possible en utilisant de joints de cardan. Au centre du triangle de Reuleaux est fixé rigidement l'outil de coupe à trois arêtes coupantes. Les trois arêtes de l'outil de coupe coïncident strictement avec les trois sommets du triangle.

L'importance pratique de cette conception est que l'extrémité motrice animée d'un mouvement de rotation peut être installée sur une perceuse à colonne standard ; l'autre extrémité se déplacera à l'intérieur du carré fixe grâce aux joints de cardan et on obtiendra un mouvement de forme carré ce qui permettra d'obtenir un trou de perçage de forme carré.

Mots clés : perçage carré, triangle de Reuleaux.

Abstract

The mechanical design of a tool that makes square holes is based on the geometry of Reuleaux's triangle. The main objective is to study how the circular motion can be converted into a square motion by purely mechanical links.

This application consists in constructing a special mechanism that allows the drilling of square holes; this requires a square guide in which the Reuleaux triangle will move along the sides of the square guide. This movement is possible using cardan joints. In the center of the Reuleaux triangle is rigidly fixed the cutting tool with three cutting edges. The three cutting edges of the cutting tool strictly coincide with the three vertices of the triangle.

The practical importance of this design is that the driving end with a rotating movement can be installed on a standard drill press; the other end will move inside the fixed square thanks to the cardan joints and a square-shaped movement will be obtained, which will result in a square-shaped drill hole.

Keywords : Reuleaux triangle, square drilling

Chapitre I
Généralité sur
l'usinage

*Chapitre II généralité
sur le perçage*

*Chapitre III partie
pratique*

Conclusion Générale

Annexe

Liste de figure

Liste des Tableaux

Bibliographie

Table des matières

Nomenclature
Et symbole

Dédicace

Remerciement

Introduction

Générale