

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : science et technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productive

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Contribution à l'amélioration de la qualité de fabrication en usinage discontinu par l'optimisation des paramètres de coupe.

Présenté par :

➤ TAZIR HICHEM

Encadrant : LAGRED AHMED Pr UBMA

Jury de soutenance :

CHELIA Azzeddine	Pr	UBMA	Président
LAGRED Ahmed	Pr	UBMA	Encadrant
BOURENANE Rabah	Pr	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements:

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à ALLAH, le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes profonds remerciements à mon directeur de mémoire Pr. LAGRED Ahmed pour sa patience, ses conseils et sa grande disponibilité à tout moment au cours de la réalisation de ce mémoire.

Bien sûr, j'adresse mes reconnaissances particulières à mes très chers parents pour leur soutien et aide sans faille qu'ils m'ont apporté durant tout le cycle de ma scolarité.

Je remercie également tous les enseignants et toute le personnel du Département de Génie Mécanique.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses
sacrifiées.*

*A mon père, pour son soutien, son affection et sa
confiance.*

A mes frères et toute ma famille.

A tous mes amis(ies).

Et tous ceux qui m'aiment...

Et finalement, à tous mes amis de classe.

Sommaire:

Remerciement :

Dédicace:

Liste des figures:

Liste des tableaux:

Résumé:

Introduction générale:.....1

Chapitre I: Etude bibliographique

I.1. Généralités sur la fabrication en usinage discontinue :..... 3

I.2. Le fraisage :..... 3

I.2.1. La fraiseuse :..... 4

I.2.3. La fraise :..... 6

I.2.4. Procèdes de fraisage :..... 10

I.2.5. Modes de coupe :..... 12

I.2.6. Opérations de fraisage :..... 15

I.3. L'alésage :..... 16

I.3.1. Définition :..... 16

I.3.2. Machines-outils utilisées :..... 17

I.3.3. Outils utilisés :..... 20

I.3.4. Choix d'utilisation des outils d'alésage :..... 24

I.3.5. Alésage à l'outil de forme :..... 26

I.3.6. Interruptions lors de l'alésage :..... 27

I.4. Brochage :..... 29

I.4.1. Brocheuse :..... 30

I.4.2. Fonctionnement :..... 32

I.4.3. Brochage intérieur :..... 32

I.4.4. Brochage extérieur :..... 33

I.4.5. Conditions de coupe 34

I.4.6. Lubrification :	34
I.4.7. Avantages :	35
I.4.8. Utilisation :	36

Chapitre II: La qualité de fabrication mécanique

II.1. Généralités sur la qualité de fabrication :	37
II.2. La qualité de l'état de surface :	37
II.2.1. Généralités :	37
II.2.2. Définition :	38
II.2.3. La rugosité :	39
II.3. La qualité dimensionnelle :	43
II.3.1. Tolérances dimensionnelles :	43
II.3.2. La qualité de la cote:	45
II.3.3. La qualité de l'intervalle de tolérance ISO	45
II.3.4. Tolérances linéaires :	47
II.3.5. Tolérances angulaires :	48
II.4. La qualité de forme :	49
II.4.1. La tolérance de forme (erreur de forme) :	49
II.4.1.1. Tolérance de forme Rectitude :	49
II.4.1.2. Tolérance de forme planéité :	50
II.4.1.3. Tolérance de forme circularité :	50
II.4.1.4. Tolérance de forme cylindricité :	51
II.4.1.5. Tolérance de forme Profil de ligne :	51
II.4.1.6. Tolérance de forme profil de surface :	52
II.5. La qualité d'orientation:	53
II.5.1. La tolérance d'orientation :	53
II.5.1.1. Parallélisme:	53
II.5.1.2. Perpendicularité :	54

II.6. La qualité de position :	56
II.6.1. Tolérance de position :	56
II.6.1.1. Localisation :	56
II.6.1.2. Coaxialité :	56
II.6.1.3. Symétrie :	57
II.7. La qualité de battement :	58
II.7.1. Tolérance de battement (erreur de battement) :	58
II.7.1.1. Battement simple :	58
II.7.1.2. Battement total :	60

Chapitre III: Les paramètres de coupe

III. Les paramètres de coupe :	62
III.1. Généralités :	62
III.2. Principe :	62
III.3. La vitesse de coupe : V_c [m/min].....	64
III.3.1. Calcul de la vitesse de rotation	66
III.4. La vitesse d'avance (V_f en mm/min) : (figure III.6).....	68
III.5. L'avance par dent (f_z en mm/dent) : (figure III.7).....	69
III.6. La profondeur de coupe axiale (a_p) :	70
III.7. La largeur de coupe ou profondeur de coupe radiale (a_e) :	71
III.8. Diamètre et position de la fraise :	71
III.9. L'épaisseur moyenne de copeau (h_m) :	75
III.10. La surface du copeau A (mm^2) :	77
III.11. Le volume de matière enlevée par unité de temps (Q) :	77
III.12. Effort de coupe :	78
III.13. La puissance de coupe :	80
III.14. Le temps d'usinage :	80

Chapitre IV: L'optimisation des paramètres de coupe

IV.1. Introduction :	83
IV.2. Définition :	83
IV.2.1. Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation ?	83
IV.2.2. Variables du problème :	84
IV.2.3. Espace de recherche :	84
IV.2.4. Fonction objectif :	85
IV.2.5. L'ensemble de contraintes :	85
IV.3. Classification des problèmes d'optimisation :	85
IV.3.1. Les problèmes d'optimisation continue versus les problèmes d'optimisation discrète :	85
IV.3.2. Les problèmes d'optimisation avec et sans contrainte :	86
IV.3.3. Les problèmes d'optimisation mono-objective ou multi-objective :	86
IV.3.4. Les problèmes d'optimisation déterministe ou stochastique :	86
IV. 4. Exemple d'optimisation des paramètres de coupe sur la rugosité de surface :	86

Chapitre V: ETUDE DE PRATIQUE EXPERIMENTALE

V.1. Introduction :	89
V.2. Généralité sur laminage à froid :	89
V.3. Dessin d'ensemble de guide :	90
V.4. Dessin d'ensemble de réducteur :	92
V.5. Dessin d'ensemble de l'arbre pignon :	93
V.6. La pièce arbre pignon en 3D :	94
V.7. Dessin de définition de l'arbre pignon.	95
V.8. Fonctionnement de guide et le rôle de l'arbre pignon sortant de réducteur :	96
V.9. Routage d'usinage de l'arbre pignon : matière XC48.	96
V.10. Proposition d'une gamme d'usinage d'arbre pignon :	99
Conclusion :	117
Les références bibliographiques	118

Liste des figures :

Figure I.1. Mouvements de coupe et d'avance.....	01
Figure I.2. Les axes de fraiseuse. [3].....	02
Figure I.3. Catégories des fraiseuses.[4].....	03
Figure I.4. Fraiseuse universelle.....	03
Figure.I.5.Type des fraises.....	04
Figure.I.6. Composition porte d'outil.....	05
Figure I.7. Type des fraises.....	05
Figure I.8. Type des dentures.....	06
Figure I.9. Mode de fixation.....	06
Figure I.10. Fraises de forme.....	07
Figure I.11. Fraise à queue.....	08
Figure I.12. Fraisage en bout.[8]	08
Figure I.13. Fraisage en roulant.	09
Figure I.14. Fraisage combiné avec fraise 2T en ARS (gauche) et carbures (droite). [9].....	09
Figure I.15. Fraisage en opposition.....	10
Figure I.16. Fraisage en bout En opposition.....	11
Figure I.17. Fraisage en roulant En opposition.....	11
Figure I.18. Fraisage en avalant.....	11
Figure I.19. Fraisage en bout en avalant.	12
Figure I.20. Fraisage en roulant en Avalant.	12
Figure I.21. Surfaçage	13
Figure I.22. Plans épaulés.....	13
Figure I.23. Rainure.....	13
Figure I.24. Poche.....	14
Figure I.25. Perçage.....	14
Figure I.26. Alésage à l'alésoir. [14].....	15
Figure I.27. Une aléseuse horizontale.....	16
Figure .I.28. Tête d'alésage sur cône morse.	17
Figure .I.29. Tour à commande numérique.[18].....	18
Figure .I.30. Alésoirs monoblocs.....	18
Figure .I.31. Foret aléseur trois lèvres.	19

Figure .I.32. Alésoir «creux» d'ébauche, quatre lèvres.	20
Figure .I.33. Alésoir de chaudronnerie cinq lèvres.	20
Figure .I.34. Barre d'alésage d'ébauche «Balance-Cut».....	21
Figure .I.35. Barre d'alésage pour grands diamètres (avec vis de réglage de précision).....	20
Figure .I.36. Barre d'alésage modulaire (à queue cylindrique).	23
Figure .I.37. Exemple d'alésage à la barre «Balance-Cut» à 2 plaquettes carbure.....	24
Figure .I.38. Schéma d'usinage de 2 alésages avec barre d'alésage longue.....	24
Figure .I.39. Surépaisseurs d'alésage recommandées selon les diamètres à obtenir.....	25
Figure .I.40. Sens d'évacuation des copeaux selon le type d'alésoir.....	26
Figure .I.41. Représentation des dents de la broche.	29
Figure .I.42. Machines à brocher horizontale.....	30
Figure .I.43. Machines à brocher vertical.[23].....	30
Figure .I.44. Représentation du brochage intérieure.	31
Figure .I.45. Les outils de brochage.	32
Figure .I.46. Représentation du brochage extérieur.	32
Figure .I.47. Quelques formes élaborées par brochage.	32
Figure .I.48. Lubrification en brochage.	33
Figure II.1. Analyse d'une surface.....	36
Figure II.2. Schéma de l'état de surface.....	36
Figure II.3. Rugosité moyenne Ra.....	37
Figure II.4. Hauteur maximale moyenne Rz.....	38
Figure II.5. Hauteur maximale du profil Rt.....	38
Figure II.6. La ligne moyenne.....	39
Figure II.7. La présentation de la longueur de base.....	39
Figure II.8. Ligne des moindres carrés.....	40
Figure II.9. Ligne enveloppe inférieure et supérieure.....	40
Figure II.10. Symbole graphique de l'état de surface.....	41
Figure II.11. Symbolisation.....	41
Figure II.12. Présentations de dimension d'une pièce.....	42
Figure II.13. Présentations de cote.....	42
Figure II.14. Exemple des dimensions d'une pièce.....	42
Figure II.15. Tolérance linéaire : distance entre deux surfaces planes et parallèles. [28].....	45
Figure II.16. Tolérance angulaire. [29].....	46

Figure II.17. Tolérance de forme Rectitude. [31].....	48
Figure II.18. Tolérance de forme planéité.....	48
Figure II.19. Tolérance de forme circularité.....	49
Figure II.20. Tolérance de forme circularité.....	49
Figure II.21. Tolérance de forme Profil de ligne	50
Figure II.22. Tolérance de forme profil de surface.....	50
Figure II.23. Tolérance d'orientation de parallélisme d'une surface plane par rapport à une surface plane.....	52
Figure II.24. Tolérance d'orientation de parallélisme d'une surface cylindrique par rapport à une surface cylindrique.....	52
Figure II.25. Tolérance d'orientation de perpendicularité d'une surface plane par rapport à une autre plane.....	53
Figure II.26. Tolérance d'orientation de perpendicularité d'une surface plane par rapport à une autre plane.....	54
Figure II.27. Tolérance de position localisation d'une surface plane par rapport à une surface plane.....	55
Figure II.28. Tolérance de position coaxialité d'une surface cylindrique par rapport à une surface cylindrique.....	55
Figure II.29. Tolérance de position symétrie d'un couple de surfaces planes par rapport à un autre couple de surfaces planes.....	56
Figure II.30. Tolérance de position symétrie d'un couple de surfaces planes par rapport à une surface cylindrique.....	56
Figure II.31. Tolérance de battement simple radial d'une surface cylindrique par rapport à une autre surface cylindrique.....	57
Figure II.32. Tolérance de battement simple axial d'une surface plane par rapport à une surface cylindrique.....	58
Figure II.33. Tolérance géométrique de battement total radial d'une surface cylindrique par rapport à une autre surface cylindrique.....	59
Figure III.1. Opération de fraisage.	60
Figure III.2. Paramètres de coupe.....	61
Figure III.3. Principe de choix les paramètres de coupe. [34].....	62
Figure III.4. Vitesse de coupe. [35]	63
Figure III.5. Modèle d'abaque pour trouver « N » en fonction de Vc. [36].....	65
Figure III.6. Vitesse d'avance.....	66

Figure III.7. Avance par dent et avance par tour.....	67
Figure III.8. Profondeur de coupe radiale (a_e) et Profondeur de coupe axiale (a_p).....	68
Figure III.9. Position de la fraise.....	69
Figure III.10. Engagement en coupe.....	69
Figure III.11. Épaisseur moyenne de copeau pour fraisage de profils.[41].....	73
Figure III.12. Épaisseur moyenne de copeau pour fraises à plaquettes rondes.....	73
Figure III.13. Épaisseur moyenne de copeau pour le surfacage en bout.....	74
Figure III.14. Épaisseur de copeau moyenne.	74
Figure III.15. Forces lors d'un fraisage en opposition.....	76
Figure III.16. Forces lors d'un fraisage en avalant	76
Figure III.17. Les efforts de coupe en fraisage.....	76
Figure IV.1. Processus D'optimisation Selon Asimov.....	81
Figure IV .2. Les effets moyens de R_a	85
Figure V.1. Schéma du laminage.....	88
Figure V.2. Dessin d'ensemble de guide.....	89
Figure V.2. Dessin d'ensemble réducteur.....	90
Figure V.2. Dessin d'ensemble de l'arbre pignon.....	91

Liste des tableaux :

Tableau I.1. Quelques types de fraises et leur utilisation.....	07
Tableau I.2. Comparaison entre le mode de fraisage en avalant et en opposition. [11].....	12
Tableau I.3. Interruptions lors de l'alésage. [20].....	28
Tableau II.1. Tolérances fondamentales (en μm) en fonction des intervalles de la cote nominale CN (en mm).....	44
Tableau III.1. Vitesse de coupe économique de base V_c en mètres/minute (surfacing).....	64
Tableau III.2. Les conditions de coupe pour les opérations de fraisage en bout.....	71
Tableau III.3. Les conditions de coupe pour les opérations de perçage et Alésage.....	72
Tableau IV.1. Plan d'expérience du critère de rugosité.....	84

Résumé :

Dans le présent travail nous nous intéressons à l'étude de la qualité de fabrication. L'optimisation des paramètres de coupe pour amélioration de la qualité de l'états surfaces. Comme exemple nous avons pris l'usinage discontinu.

Une étude détaillée sur l'usinage et plus particulièrement sur l'usinage discontinu a été présenté dans le chapitre I.

Nous avons introduit la théorie de la qualité de l'états des surfaces et les tolérances dimensionnelle et géométrique dans le chapitre II.

Les paramètres de coupe ont été présenté dans le chapitre III.

Une analyse sur l'optimisation des paramètres de coupe sur la rugosité des surfaces en fraisage a été exposé dans le chapitre IV.

Un procédé de fabrication d'une pièce mécanique a été présenté dans le chapitre V.

تلخيص:

تحسين معايير القطع لتحسين جودة حالة الأسطح.

على سبيل المثال أخذنا المعالجة غير المستمرة.

تم تقديم دراسة تفصيلية حول المعالجة و بشكل أكثر تحديدا المعالجة الغير مستمرة في الفصل الأول.

لقد قدمنا نظري جودة حالات الأسطح و السماحات البعدية و الهندسية في الفصل الثاني.

تم تقديم معايير القطع في الفصل الثالث.

تم الكشف عن تحليل على تحسين معايير القطع على خشونة الأسطح في الطحن في الفصل الرابع.

تم تقديم طريقة لتصنيع قطعة ميكانيكية في الفصل الخامس.

Abstract :

In the present work we are interested in the study of manufacturing quality.

Optimizing cutting parameters to improve surface quality and condition.

For an example we take discontinuous processing.

A detailed study on treatment and more specifically discontinuous treatment is presented in the first chapter.

We have presented the theories of the quality of surface states and dimensional and geometric tolerances in the second chapter.

Cut-off criteria are presented in Chapter Three.

An analysis on the improvement of cutting parameters on roughness of surfaces in grinding is revealed in Chapter Four.

A method for fabricating a mechanical part is presented in Chapter 5.

Introduction générale :

Les entreprises qui conçoivent et fabriquent des produits mécaniques font face à une importante concurrence. Pour se démarquer elles doivent proposer des produits répondant aux besoins du client en proposant des produits le moins cher et de qualité. L'usinage des matériaux occupe une place très importante dans la fabrication mécanique. Les industriels spécialisés dans ce domaine ont besoin d'améliorer leurs processus de production pour augmenter la productivité améliorer la qualité et réduire les coûts de revient.

La mise en forme par enlèvement de matière (usinage) occupe une place très importante parmi les différentes techniques de transformation de matière tant par le parc des machines mobilisés que par les outils de coupe utilisés.

Les techniques d'usinage sont donc en constante évolution, afin de maintenir leurs performances au plus haut niveau et d'être capables de répondre aux nouvelles exigences industrielles, en termes de qualité et de productivité, mais aussi d'impact sur l'environnement et la santé.

Le fraisage est l'un des plus importants procédés d'usinage, ses opérations forment une matière très riche de recherche à cause du besoin industriel croissant. La satisfaction de ce besoin ne sera réalisée qu'à l'aide d'un choix judicieux des paramètres de coupe. Toutefois, les techniciens ou opérateurs ont choisi ces paramètres à partir des abaques et tableaux réalisés par l'expérimentation. Ce qui conduit dans la plupart des cas à des résultats plus ou moins faibles. Afin d'améliorer ces résultats, il faut s'en remettre à un outil mathématique plus performant .

L'intérêt de l'optimisation des conditions de coupe réside dans l'amélioration de certains paramètres technologiques ou techno-économique d'usinage, dit critères d'optimisation (prix de revient des pièces usinées, temps de production, productivité, état de surface,...etc.), en tenant compte des limites de performance de la machine, de l'outil de coupe et de la matière usinée. Ces limites sont tirées des lois de coupe et exprimées en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe). Elles sont appelées contraintes d'optimisation et elles limitent le domaine de recherche des conditions optimales .

Notre travail est basé sur l'optimisation des paramètres de coupe en usinage discontinu pour l'amélioration de la qualité des surfaces de la pièce usinée.

CHAPITRE I :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Généralités sur la fabrication en usinage discontinu:

En mécanique industrielle, la fabrication d'une pièce mécanique à partir d'une quantité de matière livrée sous forme de produits semi-finis (tôles, barres, etc.) requiert la mise en œuvre d'un ensemble de techniques. L'une d'entre elles est l'usinage, c'est-à-dire un enlèvement de matière par un outil coupant. L'usinage d'une pièce se décompose en une succession d'opérations, définie par la gamme d'usinage établie par le bureau des méthodes à partir du dessin de définition issu du bureau d'études. L'usinage traditionnel s'effectue, en respectant les règles de la coupe des métaux, sur des machines-outils classiques ou automatisées. [1]

L'usinage discontinu c'est l'usinage qui donne des copeaux discontinus (fragmentés), c'est le fraisage, le perçage, l'alésage à l'aloisoir etc..., pour notre cas dans ce chapitre on prend le fraisage, c'est le plus utilisé dans l'industrie mécanique, pour discuter et on parle aussi sur l'alésage et le brochage.

I.2. Le fraisage:

C'est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière). En fraisage, l'enlèvement de matière sous forme de copeaux résulte de la combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe d'une part (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne de la pièce à usinée (dit mouvement d'avance). Aujourd'hui, toute fois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. L'outil de fraisage, la fraise comporte plusieurs arêtes ou dent de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux.

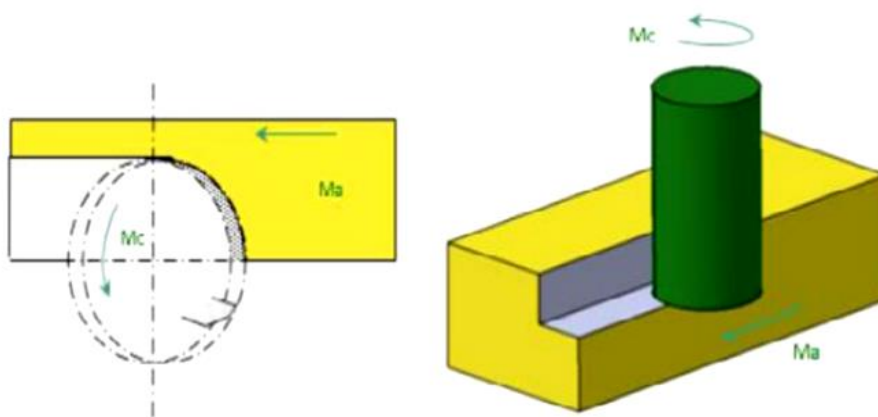


Figure I.1. Mouvements de coupe et d'avance.

I.2.1. La fraiseuse :

Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner tous types de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à l'aide d'un outil coupant nommée fraise. En dehors de cet outil qui lui a donné son nom, une fraiseuse peut également être équipée de foret, de taraud ou d'alésoir. La fraise et la pièce sont montées sur des glissières et peuvent se déplacer relativement suivant des coordonnées X, Y ou Z (on parle alors de fraiseuse trois axes). Par convention, l'axe Z est l'axe de rotation de la broche, les axes X et Y sont contenus dans un plan perpendiculaire à Z. Les axes de rotation A, B et C ont respectivement axé sur X, Y ou Z. Il existe des fraiseuses à quatre Axes ou cinq axes. [2]

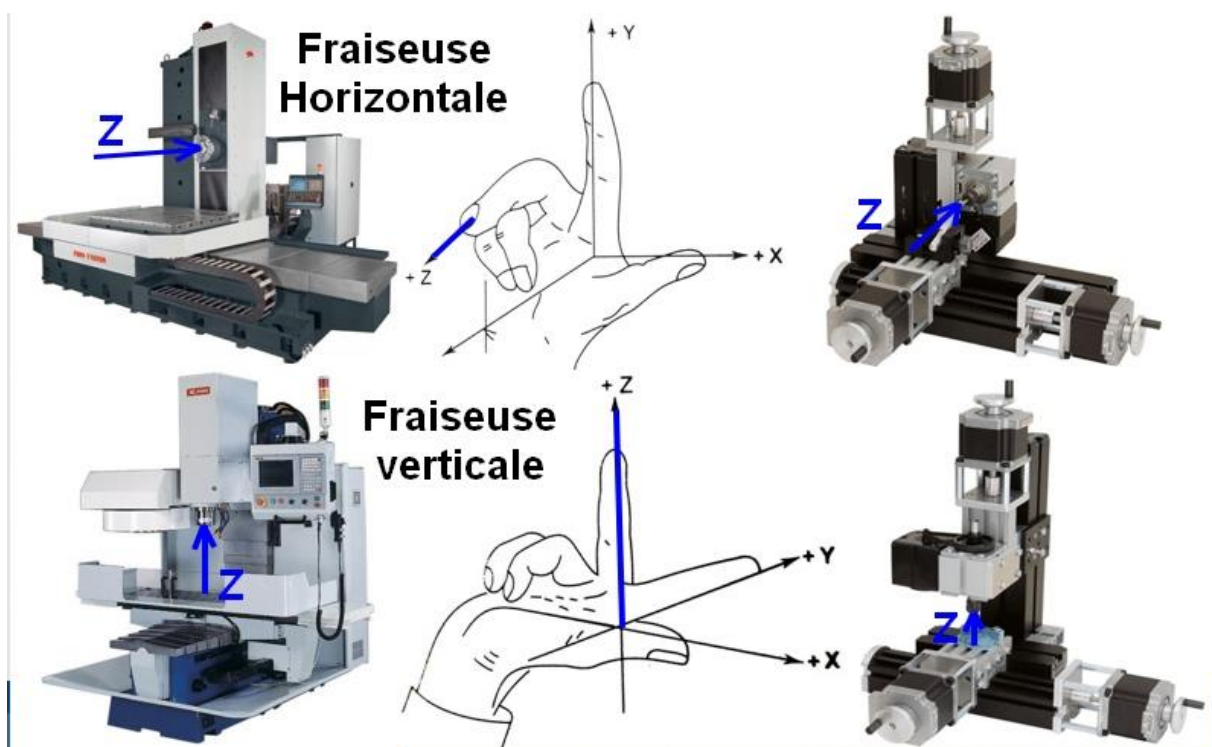


Figure I.2. Les axes de fraiseuse. [3]

Il existe des fraiseuses manuelles où les mouvements sont commandés par le "fraiseur", les fraiseuses à apprentissage qui peuvent répéter les mouvements donnés une fois par l'opérateur (enregistrement des mouvements) et les fraiseuses à commande numérique où sont enregistrés des ordres de mouvement d'outil pour usiner une pièce complexe (pilotée par un programme informatique). Elles sont équipées d'un organe de contrôle informatique lui-même relié à un réseau.

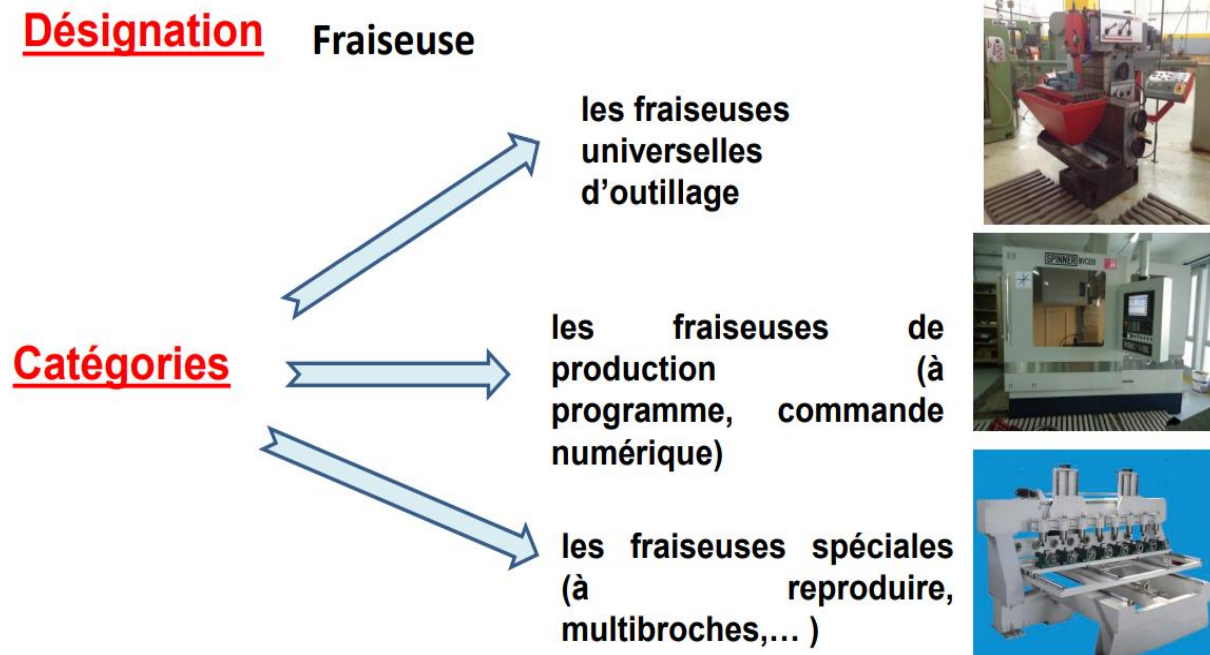


Figure I.3. Catégories des fraiseuses.[4]

La fraiseuse d'outillage (universelle) est une fraiseuse sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de la 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 qu'on l'appelle : les copeaux [5].

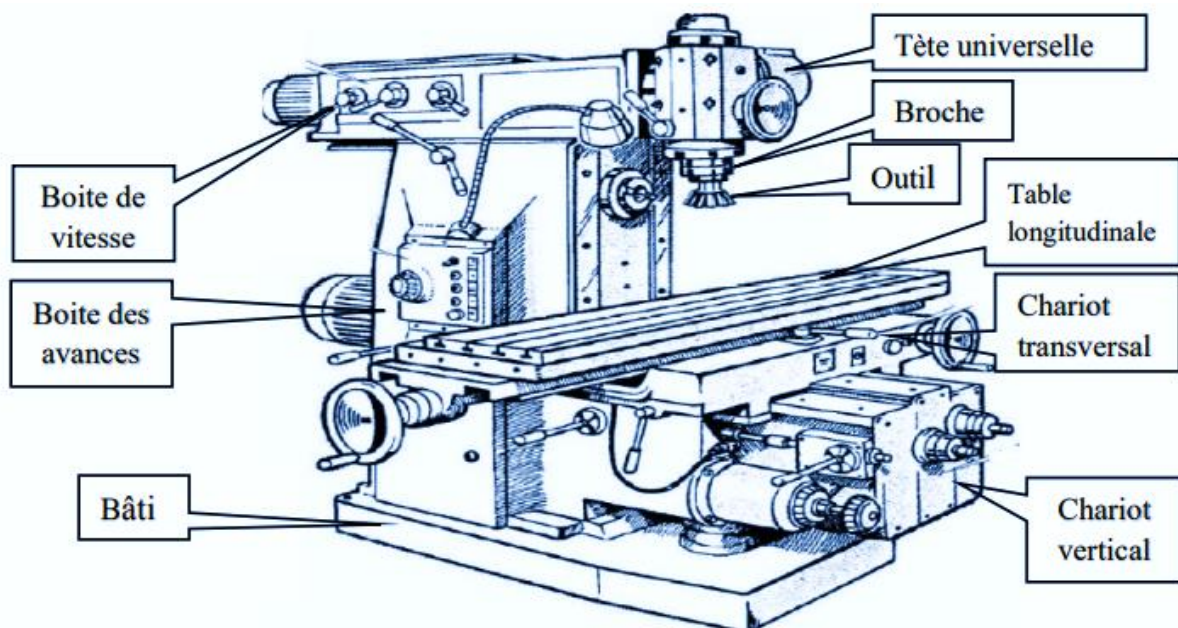


Figure I.4. Fraiseuse universelle.

I.2.3. La fraise :

La fraise munie de dents est mise en rotation et taille la matière suite à sa rotation et au mouvement relatif de la fraise par rapport à la pièce. La forme de la fraise est variable: elle peut être cylindrique, torique, conique, hémisphérique ou quelquefois de forme encore plus complexe. Les caractéristiques physiques de la fraise, sa vitesse de rotation, son avance, dépendent de la matière à usiner, de la profondeur de travail et de la coupe. On utilise principalement le carbure de tungstène recouvert de revêtements résistant à l'abrasion du copeau.

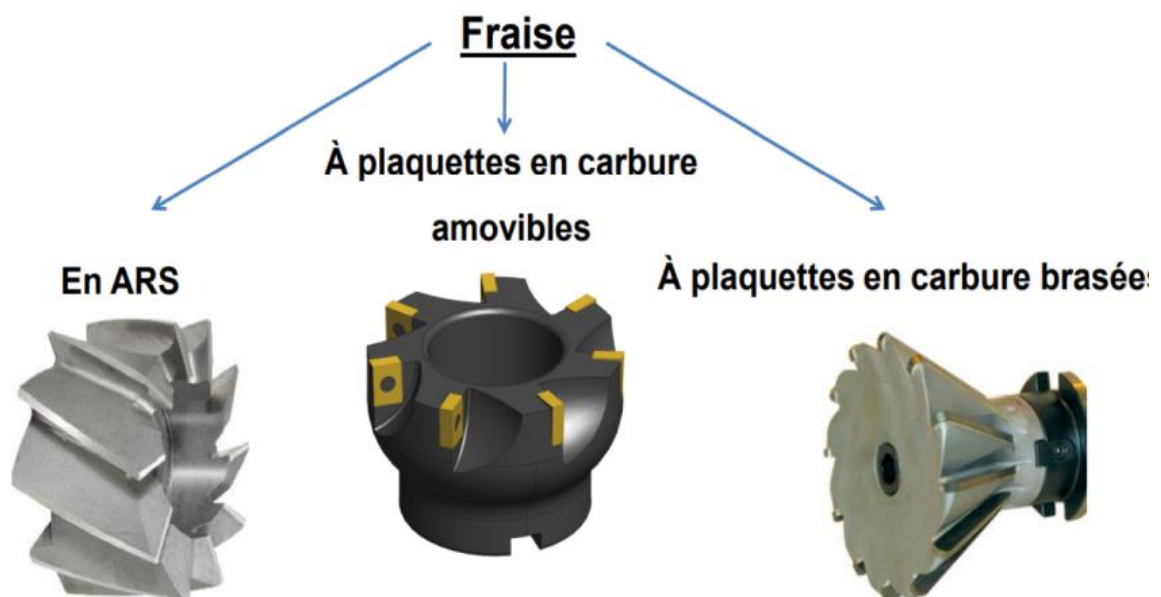


Figure.I.5.Type des fraises.

I.2.3.1. Composition porte d'outil :

La même composition, les mêmes définitions des composants et les mêmes cas d'utilisation des outils de tournage restent valables en fraisage.

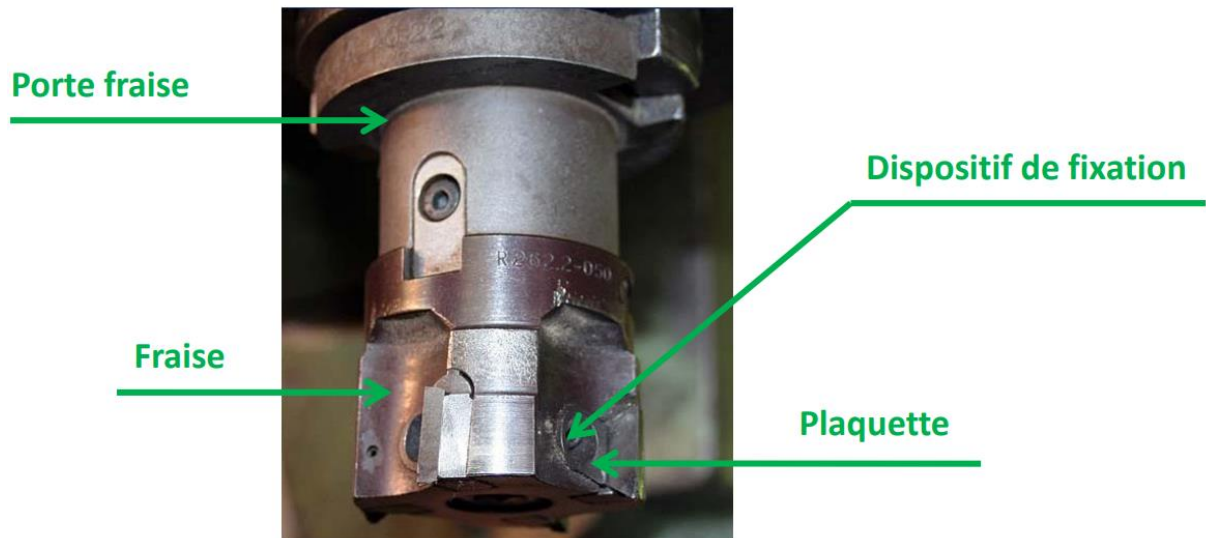


Figure.I.6. Composition porte d'outil.

I.2.3.2. Caractérisation :

La taille : suivant le nombre d'arêtes tranchantes par dent, il existe des fraises une taille, deux tailles ou trois tailles.

La forme : suivant le profil est générateur par rapport à l'axe de l'outil, il existe des fraises cylindriques, coniques et des fraises de forme.



Figure I.7. Type des fraises.

La denture : suivant le sens d'inclinaison des arêtes tranchantes par rapport à l'axe de la fraise, il existe les dentures hélicoïdales à droites ou à gauche et les dentures à double hélice alternées. Si l'arête tranchante est parallèle à l'axe de la fraise, la denture est droite.



Figure I.8. Type des dentures.

Nombre de dents : une fraise est également caractérisée par son nombre de dents.

Dimensions :

- ✓ Pour une fraise deux tailles : diamètre et hauteur taillée.
- ✓ Pour une fraise trois tailles : diamètre de l'outil, épaisseur, diamètre de l'alésage.
- ✓ Pour une fraise conique pour queue d'aronde : l'angle, le diamètre de l'outil et l'épaisseur.

Mode de fixation : à trou lisse ou taraudé, à queue cylindrique ou conique.



Figure I.9. Mode de fixation.

Le choix de type de la fraise dépend de l'opération que l'on veut réaliser comme montrée dans le tableau suivant:






Désignation	Fraises
Exécution courte (DIN 844K)	
Fraise cylindrique d'ébauche, 2 tailles, queue cylindrique lisse.	
Fraise pour rainure, 3 tailles, denture alternée.	
Fraise conique à cône renversé, 1 taille.	
Fraise à rainurer, 3 tailles, à denture alternée.	

Tableau I.1. Quelques types de fraises et leur utilisation.

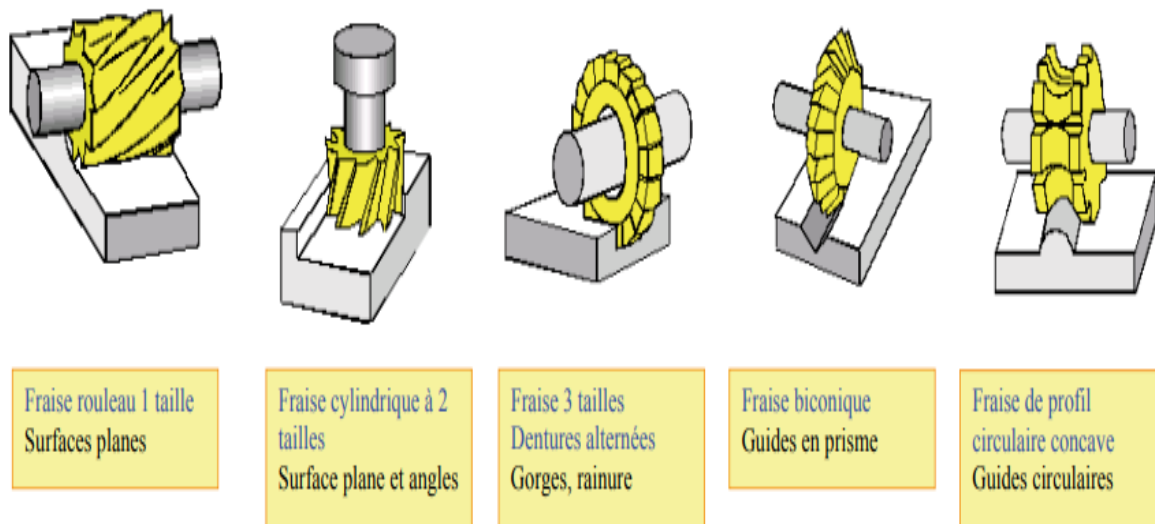


Figure I.10. Fraises de forme.

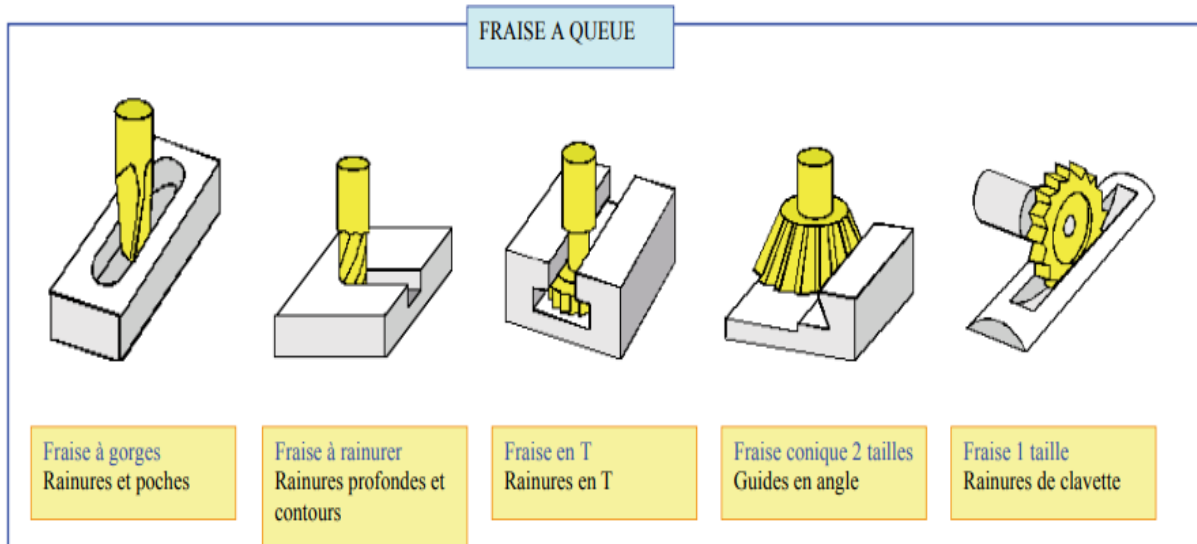


Figure I.11. Fraise à queue.

I.2.4. Procèdes de fraisage :

L'opération de fraisage peut effectuer en trois procède comme de suite:

I.2.4.1. Fraisage en bout :

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner. 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. [6]

La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure. [7]

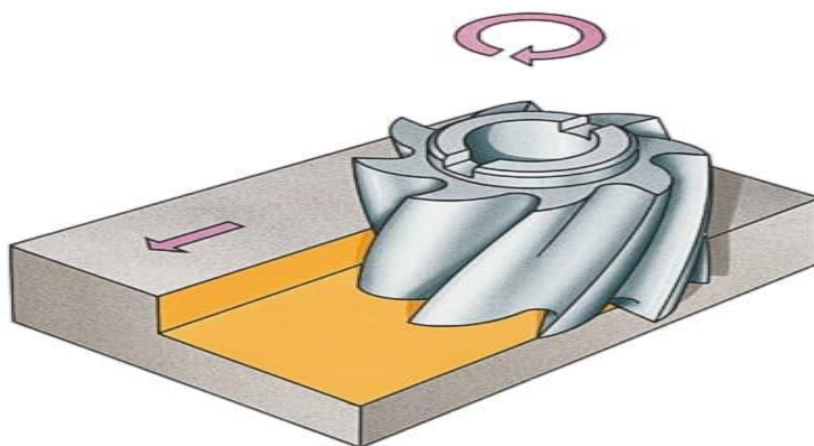


Figure I.12. Fraisage en bout. [8]

I.2.4.2. Fraisage en roulant :

L'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre. La charge de la machine en coupe est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les coupes provoquées par ce type de fraise 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.

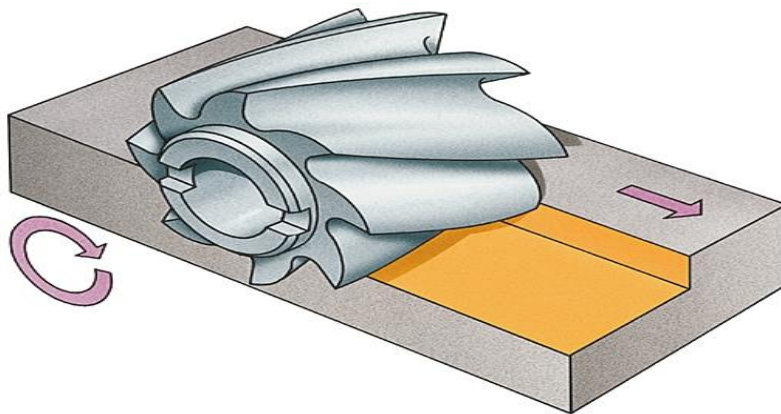


Figure I.13. Fraisage en roulant.

I.2.4.3. Fraisage combiné :

Dans ce type de fraisage, la fraise coupe avec son diamètre et sa partie frontale comme montrée dans la figure I.5:

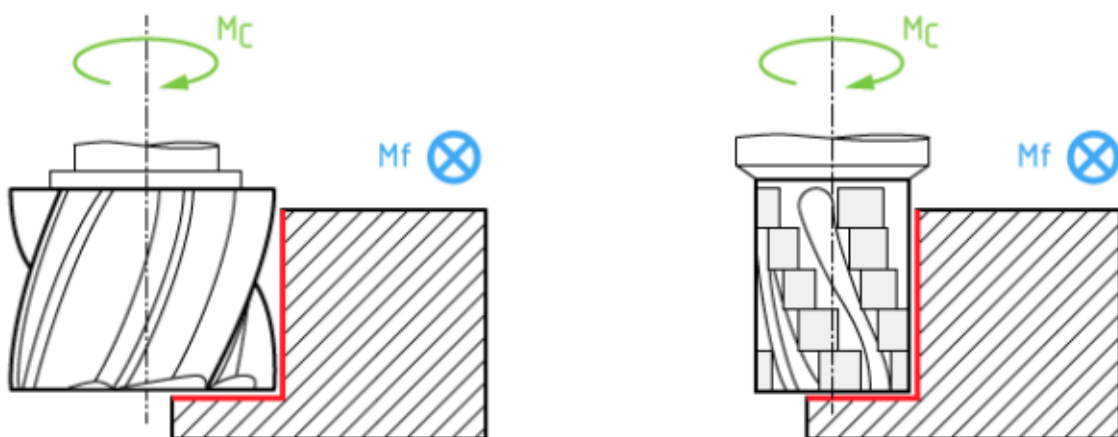


Figure I.14. Fraisage combiné avec fraise 2T en ARS (gauche) et carbures (droite). [9]

I.2.5. Modes de coupe :

La fraise effectue un mouvement de rotation tandis que la pièce avance dans sa direction. La coupe est donc ainsi définie par les paramètres impliqués. Il existe deux manières de procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe.

I.2.5.1. Fraisage en opposition :

Principe : on dit que le fraisage est en opposition (conventionnel, ou en roulant) lorsque le sens de l'avance est opposé au sens de rotation de la fraise au niveau de la coupe. [10]

Ce mode de fraisage pourrait être représenté par ce croquis.

Formation du copeau :

Au début de la coupe, le tranchant de la dent glisse sur la surface de la pièce.

Le copeau a alors une épaisseur nulle. Ensuite, la dent pénètre lentement dans la matière pour atteindre sa profondeur maximum à la fin de la coupe.

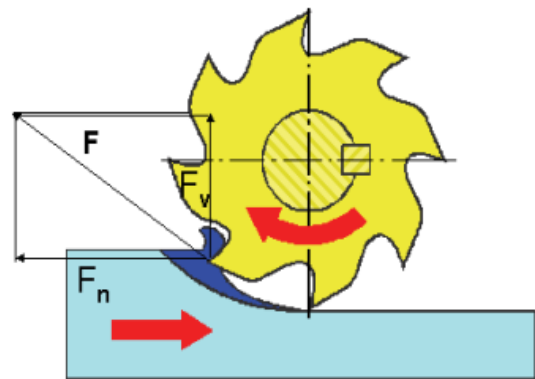


Figure I.15. Fraisage en opposition.

- **Avantage :**

Lors de l'écroutage, les dents de la fraise soulèvent les impuretés éventuelles.

Inconvénients :

1. Lorsque la fraise entre en prise avec la matière, la dent refuse de tailler à cause du copeau minimum. Il s'ensuit que l'outil frotte exagérément sur la pièce, s'use et détériore la surface usinée.

2. À la suite de cette usure, la pression devient trop importante et à chaque sortie de dent, l'outil plonge dans la matière. Il y a alors production de marques de broutage et l'état de surface n'est pas bon.

3. L'effort de coupe tend à soulever la pièce et la table sur laquelle elle est fixée. Ce qui demande un blocage de la pièce beaucoup plus conséquent.

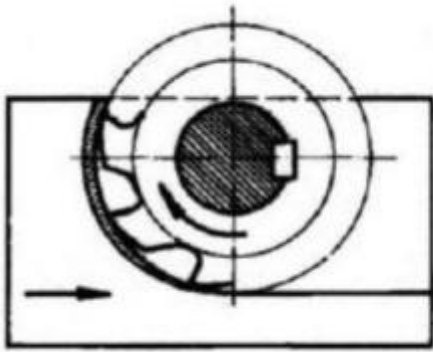


Figure I.16. Fraisage en bout
En opposition.

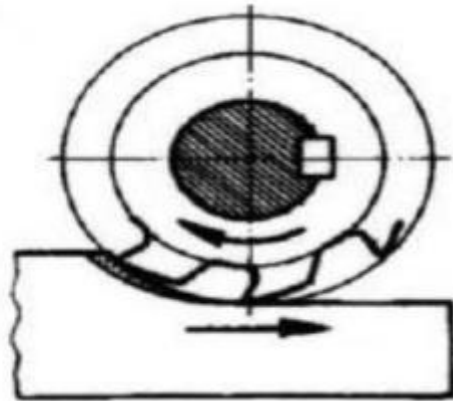


Figure I.17. Fraisage en roulant
En opposition.

I.2.5.2. Fraisage en concordance ou fraisage en avalant :

Principe :

On dit que le fraisage se fait en avalant (ou en concordance) lorsque le sens de l'avance est identique au sens de rotation de la fraise au niveau de la coupe.

Ce mode de fraisage pourrait être représenté par ce croquis.

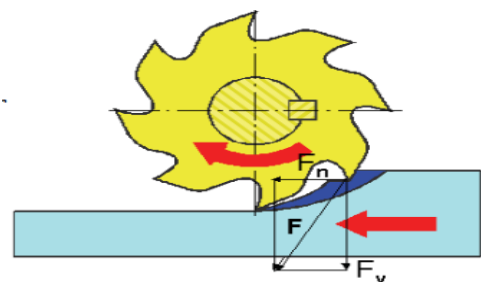


Figure I.18. Fraisage en avalant.

Au début de la coupe, le copeau est à son épaisseur maximale, pour diminuer au fur et à mesure et se terminer par une valeur nulle.

- Avantage :

L'effort de coupe applique d'avantage la pièce sur la table et celle-ci sur ses glissières.

- Inconvénients :

1. Il se produit une contrainte due aux chocs sur l'arête de coupe. Ceci implique l'utilisation d'une arête de coupe plus tenace.
2. Il importe de veiller à ce que le rapport entre le nombre de dents et la profondeur de passe soit tel qu'il n'y ait jamais une seule dent en prise.

3. Ce mode de fraisage demande un dispositif de rattrapage de jeu sur la machine.



Figure I.19. Fraisage en bout en avalant.

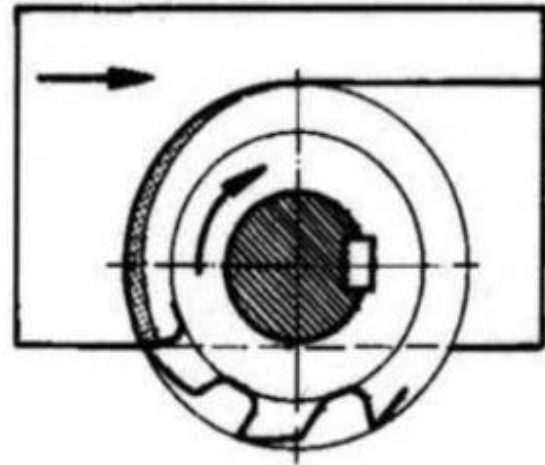


Figure I.20. Fraisage en roulant en Avalant.

I.2.5.3. Comparaison entre les deux modes :

Fraisage en avalant	Fraisage en opposition
<ul style="list-style-type: none"> • L'attaque de la dent se fait avec une épaisseur nulle, ce qui peut entraîner un refus de coupe (copeau mini) sur la surface à générer • Ce frottement entraîne une usure supplémentaire • L'attaque se fait sur une surface écrouie par la dent précédente • Les efforts de coupe sont importants (refus de coupe) • Les efforts de coupe tendent à faire sortir la pièce de la mise en position (efforts vers le haut) • Seul ce mode de travail peut être utilisé sur les fraiseuses ayant des vis sans rattrapage de jeux 	<ul style="list-style-type: none"> • L'attaque de la dent se fait avec l'épaisseur maximale (pas de copeau mini) • La sortie de la dent se fait sur la surface à générer avec une épaisseur nulle mais le copeau est déjà créé ce qui facilite la coupe • Les dents attaquent sur l'épaisseur maxi ce qui générer des chocs, il est intéressant d'avoir plusieurs dents en prise pour limiter les chocs • Si on attaque sur une surface brute de fonderie on a une usure rapide • Les efforts de coupe plaquent la pièce sur ses appuis

Tableau I.2. Comparaison entre le mode de fraisage en avalant et en opposition. [11]

I.2.6. Opérations de fraisage :

On peut effectuer plusieurs opérations par une fraiseuse selon les besoins de Production comme suite :

I.2.6.1. Surfaçage :

Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. Comme illustrée dans la figure I.10 (Surface rouge) [12].

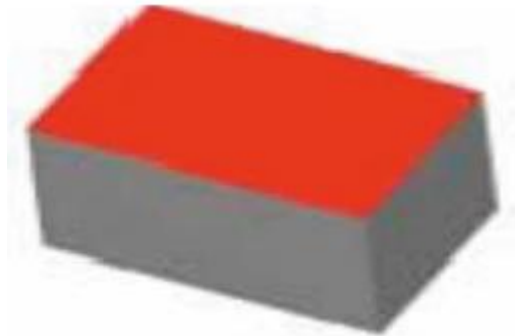


Figure I.21. Surfaçage .

I.2.6.2. Plans épaulés :

C'est l'association de 2 plans perpendiculaires (surfaces vertes) .

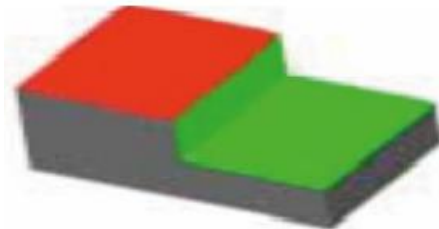


Figure I.22. Plans épaulés.

I.2.6.3. Rainure :

C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire aux deux autres plans (Surfaces vertes).



Figure I.23. Rainure.

I.2.6.4. Poche :

La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan),

C'est une forme creuse dans la pièce (surface cyan).

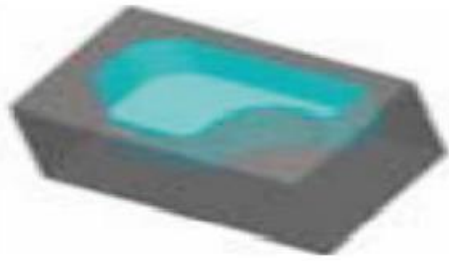


Figure I.24. Poche.

I.2.6.5. Perçage :

Ce sont des trous, débouchant (surface bleu) ou borgnes (surface jaune) .

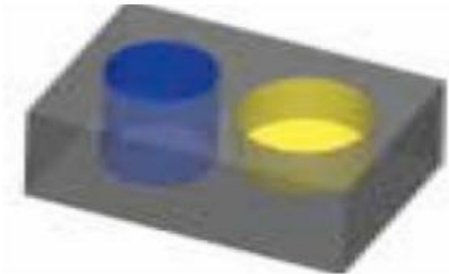


Figure I.25. Perçage.

Aux opérations déjà citées, on ajoute l'opération de :

- ✓ Surfaçage incliné.
- ✓ Rainurage en vé.
- ✓ Rainurage en Té.
- ✓ Fraisage en queue d'aronde.
- ✓ Centrage, perçage, lamage, alésage, taraudage.
- ✓ Tronçonnage.
- ✓ Etc...

I.3. L'alésage :

I.3.1. Définition :

L'alésage est un processus unitaire fréquent dans la fabrication en tant qu'étape de réduction de masse, utilisé pour agrandir et dimensionner avec précision le trou existant au moyen d'un outil de coupe à plusieurs cannelures. L'alésage enlève une quantité minimale de matière et est

souvent effectué après le perçage pour obtenir à la fois un diamètre plus précis et une finition interne plus lisse. [13]

L'alésage est un processus d'usinage dans lequel une coupe légère améliore la précision d'un trou rond et agrandit un trou existant au diamètre de l'outil au moyen d'un outil de coupe rotatif à cannelures multiples généralement aidé par des fluides de coupe. Lorsque l'alésoir est tourné et avancé axialement dans la pièce à usiner, la matière est retirée sous forme de copeaux. Les copeaux sont produits à l'intérieur de la pièce et se déplacent dans la direction opposée au mouvement axial de l'alésoir.



Figure I.26. Alésage a l'alésoir [14]

I.3.2. Machines-outils utilisées :

Le processus d'alésage peut être exécuté sur diverses machines-outils, y compris des machines à usage général ou universelles, telles que des tours (centres de tournage) ou des fraiseuses (centres d'usinage), et des machines conçues pour se spécialiser dans l'alésage comme une fonction principale, telle que les aléseuses de gabarit.[15]

I.3.2.1. Aléseuses fraiseuses :

Les dimensions entre la pièce et le foret peuvent être modifiées autour de deux axes pour couper à la fois verticalement et horizontalement dans la surface interne. L'outil de coupe est

généralement mono pointe, en acier rapide M2 et M3 ou en carbure P10 et P01. Un trou conique peut également être réalisé en faisant pivoter la tête.

Les aléseuses sont disponibles dans une grande variété de tailles et de styles. Les opérations d'alésage sur les petites pièces peuvent être réalisées sur un tour tandis que les pièces plus grandes sont usinées sur des aléseuses. Les pièces mesurent généralement de 1 à 4 mètres de diamètre, mais peuvent atteindre 20 m. Les besoins en puissance peuvent atteindre 200 chevaux (150 kW). Le refroidissement des alésages se fait à travers un passage creux à travers la barre d'alésage où le liquide de refroidissement peut circuler librement. Des disques en alliage de tungstène sont scellés dans la barre pour contrer les vibrations et les vibrations pendant le perçage. Les systèmes de contrôle peuvent être informatisés, ce qui permet une automatisation et une cohérence accrue.

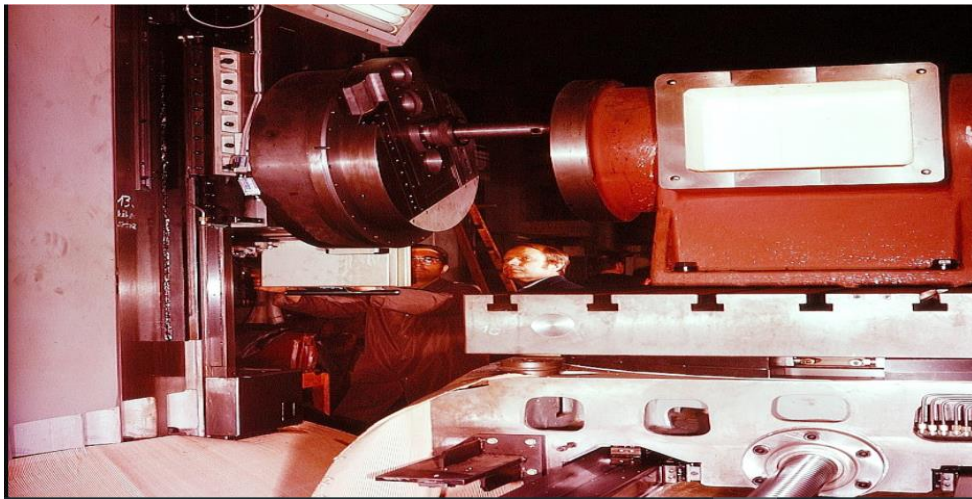


Figure I.27. Une aléseuse horizontale.

Étant donné que l'alésage est destiné à réduire les tolérances du produit sur des trous préexistants, plusieurs considérations de conception s'appliquent. Tout d'abord, les grands diamètres longueur-alésage ne sont pas préférés en raison de la déviation de l'outil de coupe. Ensuite, les trous traversant sont préférés aux trous borgnes (trous qui ne traversent pas l'épaisseur de la pièce). Les surfaces de travail internes interrompues - où l'outil de coupe et la surface ont un contact discontinu sont de préférence évitées. La barre d'alésage est le bras saillant de la machine qui supporte le ou les outils de coupe et doit être très rigide. [16]

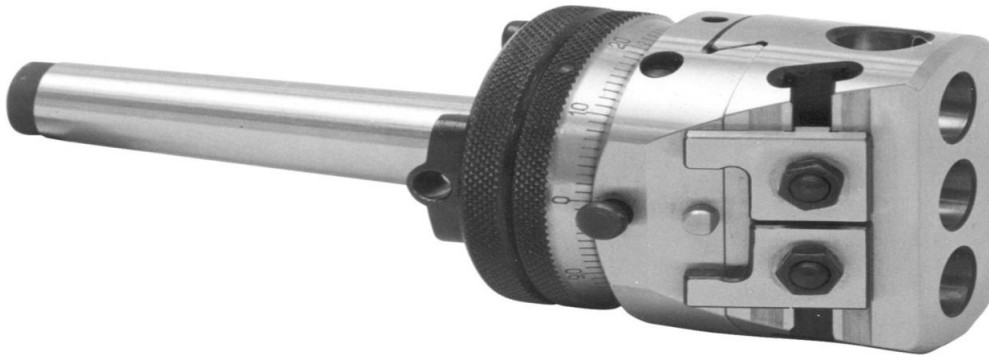


Figure .I.28. Tête d'alésage sur cône morse.

I.3.2.2. Tours :

L'alésage au tour est une opération de coupe qui utilise un outil de coupe à un seul point ou une tête d'alésage pour produire des surfaces coniques ou cylindriques en agrandissant une ouverture existante dans une pièce. Pour les trous non coniques, l'outil de coupe se déplace parallèlement à l'axe de rotation. Pour les trous coniques, l'outil de coupe se déplace selon un angle par rapport à l'axe de rotation. Des géométries allant de simples à extrêmement complexes dans une variété de diamètres peuvent être produites à l'aide d'applications d'alésage. L'alésage est l'une des opérations de tournage les plus élémentaires après le tournage et le perçage. [17]

L'alésage au tour nécessite généralement que la pièce soit maintenue dans le mandrin et tournée. Lorsque la pièce est tournée, un alésage. Barre avec un insert attaché à la pointe de la barre est introduit dans un trou existant. Lorsque l'outil de coupe engage la pièce, un copeau se forme. Selon le type d'outil utilisé, le matériau et la vitesse d'avance, le copeau peut être continu ou segmenté. La surface produite est appelée alésage.



Figure .I.29. Tour à commande numérique.[18]

I.3.3. Outils utilisés :

I.3.3.1. Outils de forme : Alésoirs, broches :

I.3.3.1.1. Alésoirs :

Ils sont utilisés essentiellement en finition sur perceuses, fraiseuses, centres d'usinage, tours, centres de tournage, alésoises, (fig.I.30.). [19]



Figure .I.30. Alésoirs Monoblocs.

Caractéristiques :

Outils de forme, monobloc avec queue ou alésage de maintien normalisés .Ils ont de trois à douze dents (arêtes de coupe) selon leurs utilisations fonctionnelles.

Utilisation :

Elle est spécifique à la conception de chaque type d'alésoir (forets-alésoirs, alésoirs d'ébauche, alésoirs de chaudronnerie, alésoirs-machine, alésoirs coniques). Ils sont utilisés pour le calibrage des trous en dimension et en forme (cylindricité et rectitude) par un faible enlèvement de matière.

Les forets alésoirs et alésoirs ébaucheurs sont utilisés pour calibrer géométriquement des trous, en forme et position.

Type d'alésoirs :

- **Alésoirs de trois à quatre dents :** Ils sont utilisés pour l'alésage de trous brut de fonderie ou de forge : calibrage particulièrement en cylindricité avec les listels hélicoïdaux.
- **Alésoirs ayant plus de quatre dents :** Ils sont utilisés pour l'alésage de trous percés : calibrage de précision, avec les listels droits (parallèles à l'axe du corps d'outil).
- **Forets-alésoirs :** Ils ont 3 ou 4 arêtes de coupe à denture hélicoïdale, hélice à droite (22°). Généralement leurs diamètres varient de 3 à 60 mm avec queue conique ou cylindrique selon les dimensions. Ils sont utilisés en pré-alésage de trous bruts de fonderie et de forge pour corriger des défauts géométriques (circularité, désaxage, rectitude,...) (fig.I.31.). Éventuellement ils sont utilisés en finition (qualité 8).

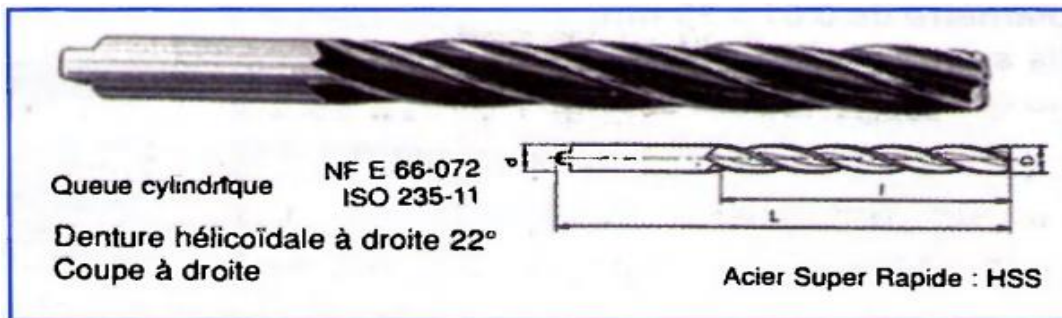


Figure .I.31. Foret alésoir trois lèbres.

- **Alésoirs d'ébauche.**



Figure .I.32. Alésoir «creux» d'ébauche, quatre lèbres.

➤ **Alésoirs de chaudronnerie.**

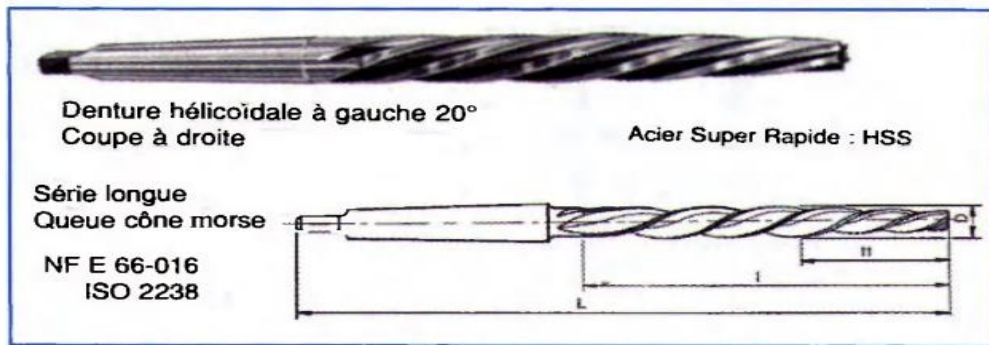


Figure .I.33. Alésoir de chaudronnerie cinq lèvres.

Autre type d'alésoirs :

- Alésoirs-machine. Alésoirs-machine à denture droite.
- Alésoirs à denture hélicoïdales.
- Alésoirs expansibles.
- Alésoirs «creux».
- Alésoirs coniques.

I.3.3.1.2. Broches :

Elles sont utilisées sur brocheuses, pour travaux de grande série, en ébauche et finition avec le même outil dans le cycle (succession de dents d'ébauche et de finition).

I.3.3.2. Outils d'enveloppe :

Ce sont les barres d'alésage, outils à aléser, fraises cylindriques deux tailles, têtes à aléser.

I.3.3.2.1. Barres d'alésage :

De conception monobloc ou modulaire courte, rallongée, antivibratoire. Elles supportent le ou les outils de coupe montés généralement en bout de barre, pour travail « en l'air » (fig.I.34, I.35.).

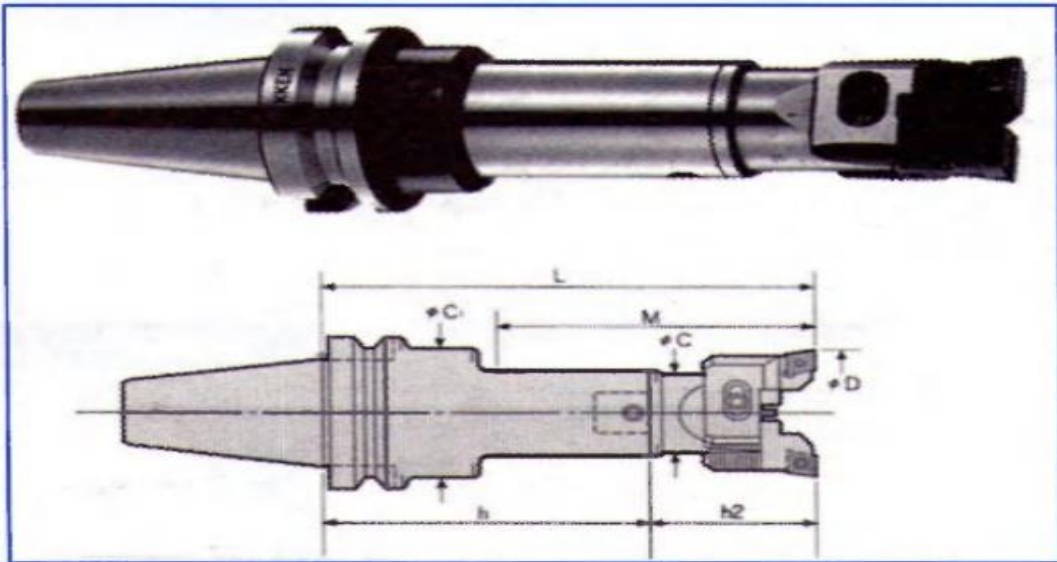


Figure .I.34. Barre d'alésage d'ébauche (Balance-Cut).

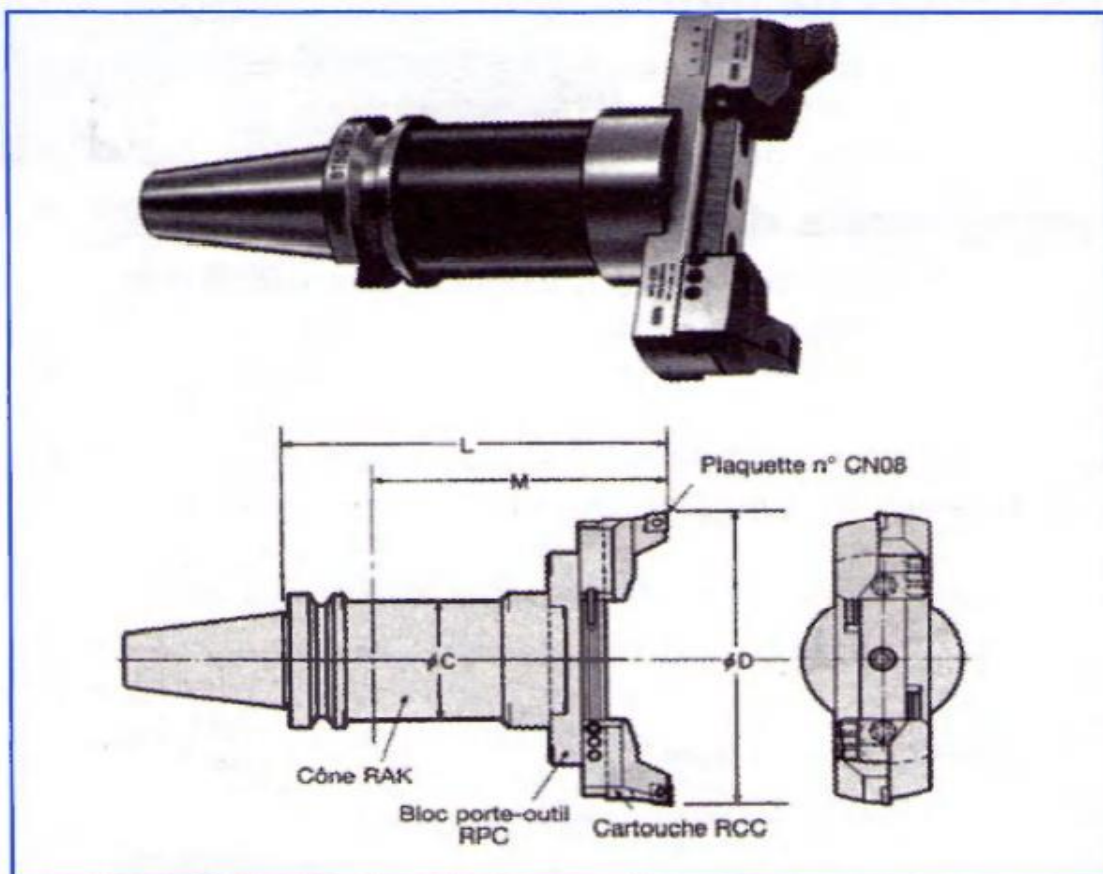


Figure .I.35. Barre d'alésage pour grands diamètres (avec vis de réglage de précision).

Utilisation :

Sur aléseuses, fraiseuses, centres d'usinage, tours, centres de tournage, avec des plages de diamètres pour chaque barre d'alésage, en ébauche et en finition.

Outil à aléser :

Ils sont utilisés sur tours et centres de tournage, en ébauche et finition de tous diamètres.

Fraises cylindriques «deux tailles» :

Elles sont utilisées sur machines à commande numérique essentiellement (fraiseuses, centres d'usinage, centres de tournage, aléseuses) en ébauche et finition de tous diamètres et de longueur limitée à celle des arêtes de coupe.

Tête à aléser :

Elles sont utilisées sur aléseuses, fraiseuses, centres d'usinage, en ébauche et finition d'alésages de faible profondeur et de grands diamètres (= 800 mm maxi), ainsi que des surfaçages concentriques.

I.3.4. Choix d'utilisation des outils d'alésage :

I.3.4.1. Alésoirs (outils de forme) :

Outils monobloc multi-arêtes de coupe utilisée pour alésage en finition de trous préalablement ébauchés (diamètres 3 à 60 mm), généralement.

Les forets-aléseurs sont à utiliser en alésage d'ébauche.

I.3.4.2. Barres d'alésage (outils d'enveloppe) :

À plaquette de coupe fixée dans une cartouche installée sur la barre support,

Capacités diamétrales : Jusqu'au diamètre 500 mm, et au-delà avec un appareillage.

À lame d'alésage : elles peuvent équiper des barres pour effectuer des alésages spécifiques (pièce unitaire,...).

I.3.4.3. Barres d'alésage courtes :

Elles travaillent «en l'air». À utiliser sur fraiseuses à CN, centres d'usinage et aléseuses pour l'alésage des pièces mécaniques en général ; conception en longueur modulaire (fig.I.36.).

Opposition aux efforts de flexion durant la coupe : choisir un diamètre maximum de barre.

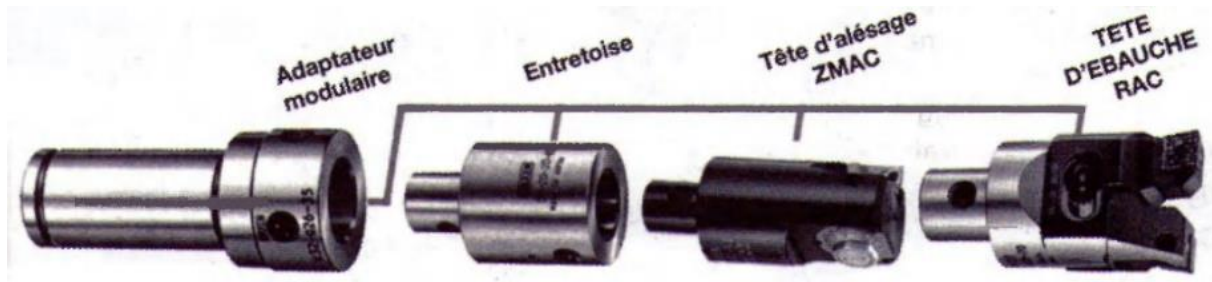


Figure .I.36. Barre d'alésage modulaire (à queue cylindrique).

I.3.4.4. Barre rallongée :

Choisir une barre anti vibratile qui absorbe les vibrations dues à la coupe. Deux outils montés en opposition sur une barre d'alésage assurent l'équilibrage des efforts de coupe (alésage d'ébauche) (fig.I.37.).

I.3.4.5. Barres d'alésage longues :

À soutenir à leur extrémité par une lunette fixe : usinage de longs alésages et d'alésages en ligne (Fig.I.38.).



Figure .I.37. Exemple d'alésage à la barre (Balance-Cut) à 2 plaquettes carbure.

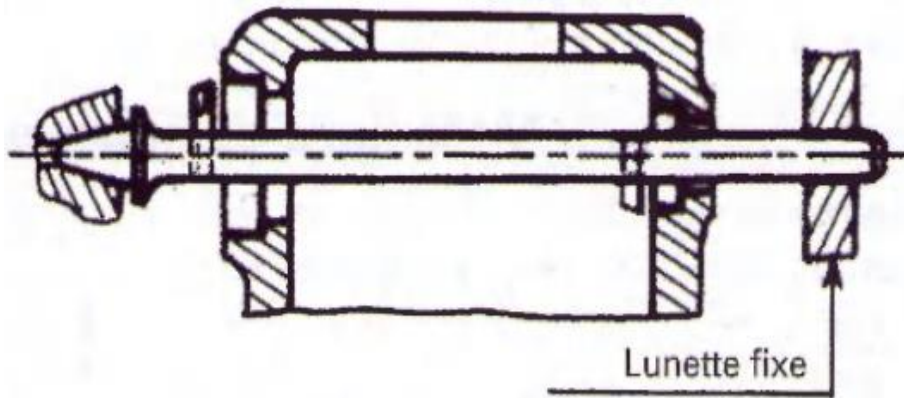


Figure .I.38. Schéma d'usinage de 2 alésages avec barre d'alésage longue.

I.3.5. Alésage à l'outil de forme :

I.3.5.1. Surépaisseur d'usinage :

Elles ne seront pas inférieures aux recommandations des fabricants : Pas de frottements des arêtes de coupe sur la surface à aléser, ce qui provoquerait une abrasion et l'usure accélérée des arêtes avec altération de l'état de surface du trou.

I.3.5.2. Mécanique de précision courante :

Surépaisseur de 0,05 à 0,60 mm pour les diamètres de 5 à 60 mm, en qualité H7 (fig.I.39.).

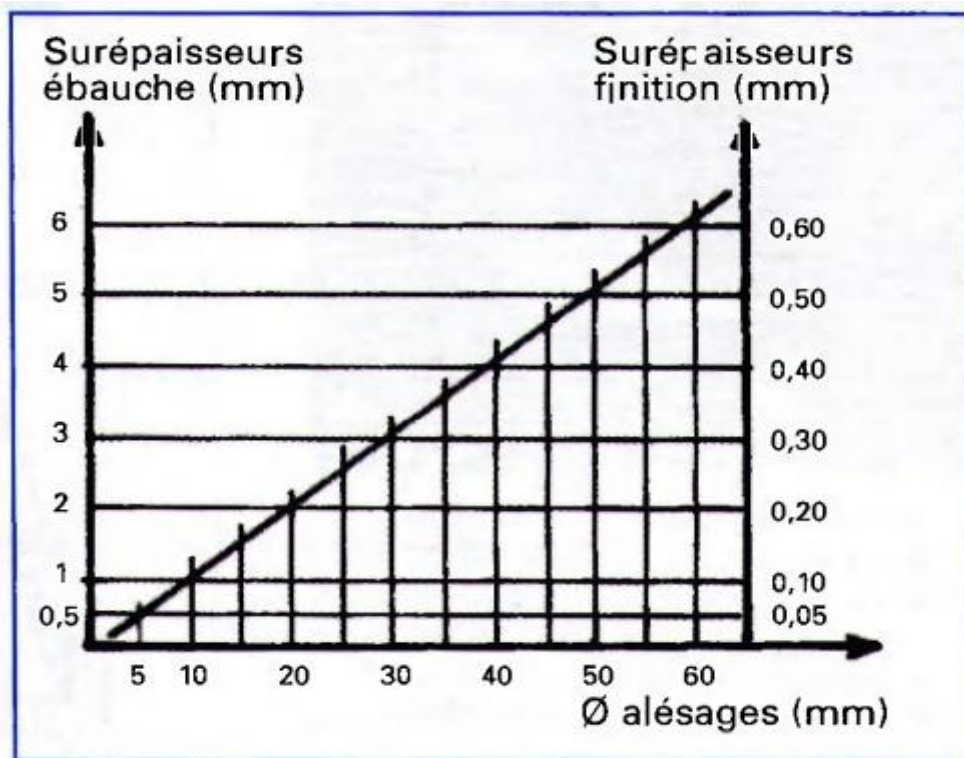


Figure .I.39. Surépaisseurs d'alésage recommandées selon les diamètres à obtenir.

I.3.5.2. Ébauche au foret-alésoir et à l'alésoir d'ébauche :

Surépaisseur de 0.50 à 6 mm pour les diamètres de 5 à 60 mm, en correction de trous bruts de forgeage et moulage.

I.3.5.3. Évacuation des copeaux :

L'angle d'hélice des listels (arêtes secondaires) dirigent sensiblement les copeaux (fig.I.40.).

- **Angle d'hélice positif** : pour l'alésage des trous borgnes, les copeaux se dégageant vers l'entrée de l'alésage.
- **Angle d'hélice négatif** : pour l'alésage des trous débouchant, les copeaux se dégageant vers le fond de l'alésage.

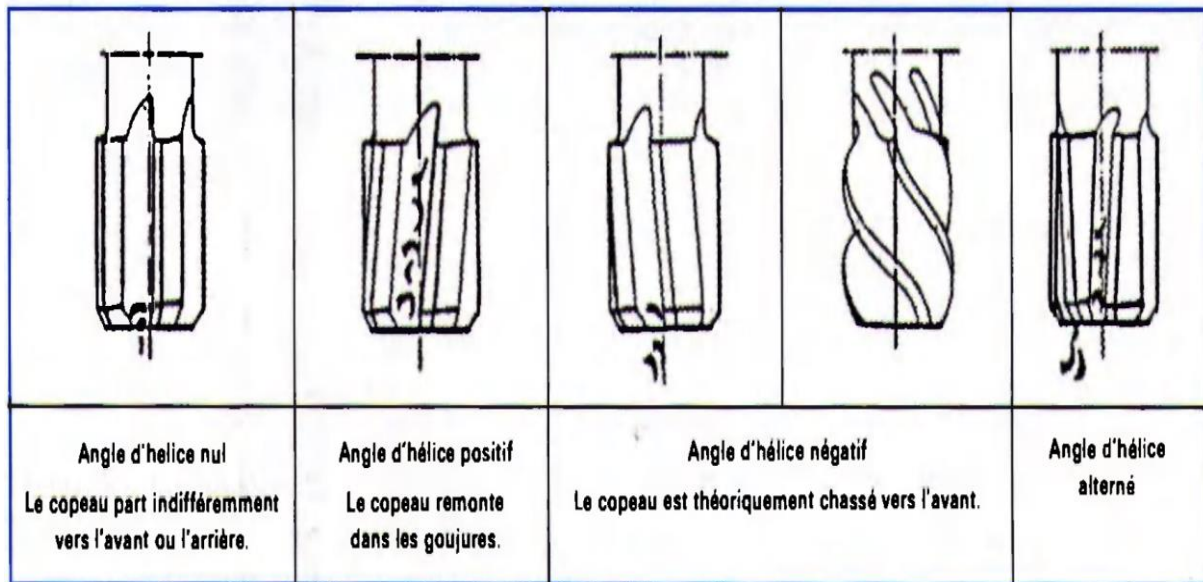


Figure .I.40. Sens d'évacuation des copeaux selon le type d'alésoir.

I.3.6. Interruptions lors de l'alésage :

Problème	Cause	Remède
Tenons cassés ou tordus	Mauvais contact entre la pince et la queue	S'assurer que la queue et la pince ne soient pas abîmées
Usure rapide de l'outil	Enlèvement de matière insuffisant	Accroître l'enlèvement de matière

Trou surdimensionné	Variation excessive de la hauteur de lèvre	Réaffûter selon les bonnes spécifications
	Jeu dans l'axe de la machine	Réparer et rectifier l'axe
	Défaut du mandrin	Remplacer le mandrin
	Queue de l'outil endommagée	Remplacer ou réaffûter la queue
	Ovalisation de l'outil	Remplacer ou rectifier l'outil
	Angle de chanfrein d'entrée asymétrique	Réaffûter selon les spécifications correctes
	Avance ou vitesse de coupe trop élevées	Ajuster les conditions de coupe selon
Trou sous dimensionné	Enlèvement de matière insuffisant	Accroître la quantité de matière enlevée
	Trop de chaleur dégagée lors de l'alésage. Le trou s'élargit et se rétrécit.	Accroître le flux d'huile
	Le diamètre de l'outil est détérioré et sous dimensionné.	Réaffûter selon les spécifications correctes .
	Avance et vitesse de coupe trop faibles	Ajuster les conditions de coupe selon le catalogue ou le Product Selector.
	Le trou de pré perçage est trop petit	Diminuer la quantité de matière enlevée
Trous ovales et coniques	Jeu dans l'axe de la machine	Réparer et rectifier l'axe
	Mauvais alignement entre l'outil et le trou	Utiliser un alésoir avec pilote
	Angle de chanfrein d'entrée asymétrique	Réaffûter selon les spécifications correctes
Mauvaise finition de trou	Enlèvement de matière excessif	Diminuer la quantité de matière enlevée

	Détérioration de l'outil	Réaffûter selon les spécifications
	Angle de coupe trop faible	Réaffûter selon les spécifications
	Huile de coupe ou émulsion trop diluée	Accroître le % de concentration
	Avance et / ou vitesse trop faible	Ajuster les conditions de coupe selon le catalogue / Product Selector
	Vitesse de coupe trop élevée	Ajuster les conditions de coupe selon le catalogue / Product Selector
L'outil se bloque et casse	Détérioration de l'outil	Réaffûter selon les spécifications
	La conicité arrière de l'outil est trop faible	Vérifier et remplacer / Modifier l'outil
	La facette est trop large	Vérifier et remplacer / Modifier l'outil
	La matière de la pièce usinée est trop serrée	Utiliser un alésoir réglable pour compenser le jeu
	Le trou de pré perçage est trop petit	Diminuer la quantité de matière à enlever

Tableau .I.3. Interruptions lors de l'alésage. [20]

I.4. Brochage :

Le brochage est un procédé d'usinage qui consiste à enlever la matière par coupe à l'aide d'un outil à dents multiples étagées qui se déplace parallèlement à la surface à usiner. L'outil utilisé est appelé broche et la machine est appelée brocheuse.

L'opération de brochage est effectuée généralement en une seule passe rectiligne dans laquelle sont incluses les opérations d'ébauche et de finition. Le temps de coupe est relativement court.

Les broches sont des outils de formes constituées d'une série de dents travaillant successivement, chaque dent à son arête de coupe décalée de la précédente d'une distance de

l'épaisseur du copeau. Le brochage permet d'effectuer tous les usinages intérieurs à cannelures, les rainures de clavettes, etc., et même les rainures hélicoïdales ainsi que des profils extérieurs.

L'ensemble des dents génère le profil fini à partir du profil brut, par le passage de la broche, au travers de la pièce (broche d'intérieur) ou devant la pièce (broche d'extérieur) suivant le mouvement de coupe rectiligne. [21]



Figure .I.41. Représentation des dents de la broche.

I.4.1. Brocheuse :

En principe il est possible d'exécuter le brochage sur toute machine permettant de faire une traction ou une poussée axiale: Presse, raboteuse, mortaiseuse, étau limeur et éventuellement sur tour. Néanmoins le travail ne sera correctement effectué que sur des machines spécialement conçues pour. Ces machines sont de deux sortes :

- machine travaillant par poussée : l'usinage est limité à la longueur de la broche et à sa section afin d'éviter la flexion,
- machine travaillant par traction : le travail par traction n'ayant pas ces inconvénients, l'outil broche peut avoir une longueur importante et offrir plus de possibilités. [22]

I.4.1.1. Machine horizontale :

Elle permet d'utiliser des broches de grande longueur et ainsi d'exécuter un travail important en une seule passe. Constituée par un long bâti (généralement en fonte) où :

- à une extrémité se trouve le dispositif d'entraînement de la broche commandé par, aujourd'hui, un vérin hydraulique plus souple et plus maniable que les anciens systèmes à vis ou à crémaillère.
- à l'autre extrémité, une table verticale permet la fixation de la pièce.

L'inconvénient d'une telle machine est son encombrement au sol.

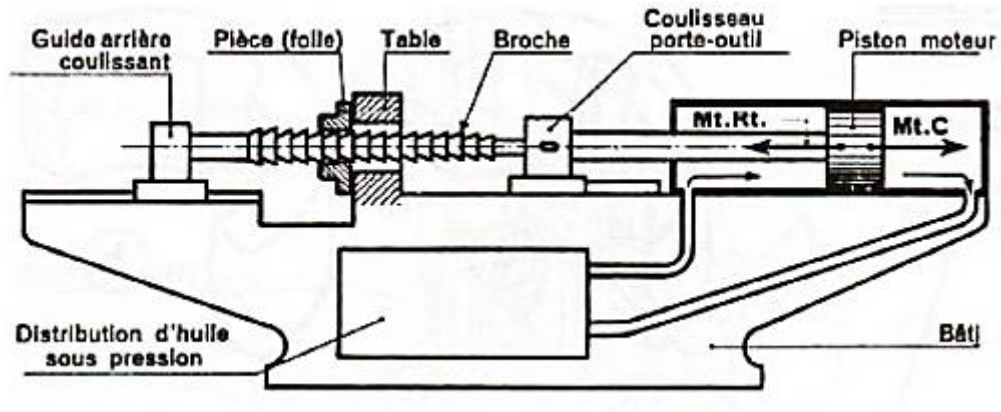


Figure .I.42. Machines à brocher horizontale.

I.4.1.2. Machine verticale :

Sur ce type de machine, qui présente la physionomie d'une mortaiseuse : gros bâti de fonte accouplé à un montant en forme de col de cygne. Le brochage s'effectue du haut vers le bas, ce qui assure une bonne lubrification (par gravité) et une simplification de la fixation de la pièce sur la table. Le coulisseau, généralement plat, permet le montage de broche pour usinage extérieur de surface assez importante. Cette machine présente un encombrement réduit et une facilité de mise en place des pièces à usiner.



Figure .I.43. Machines à brocher vertical.[23]

I.4.2. Fonctionnement :

Pour un brochage interne, la broche est d'abord introduite dans le trou. La traction (ou la poussée) de celle-ci à travers la pièce provoque un arrachement de matière au passage de chacune des dents. La quantité de matière enlevée par chaque dent de la broche varie avec le type de matière à enlever et la forme désirée. Les dents d'une broche désignée pour usiner de l'acier peuvent enlever seulement 0.05 mm, tandis que celles d'une broche désignée pour usiner du laiton pourront enlever 0.10 mm, La succession des dents enlève la totalité de la matière requise jusqu'à l'obtention de la forme désirée. L'utilisation d'un tampon permet en partie de vérifier que la forme obtenue est correcte.

Dans le cas de brochage externe, le principe d'arrachement de la matière reste le même, sauf que la broche ne pénètre pas à proprement parler dans un trou dans la pièce. Les rôles sont en quelque sorte inversés si bien que la broche "entoure" une partie de la pièce et usine l'extérieur de celle-ci.

I.4.3. Brochage intérieur :

Le brochage s'effectue par le passage de broche dans le trou d'ébauche.

L'effort de coupe plaque et maintient la pièce sur son appui perpendiculaire au mouvement de coupe.



Figure .I.44. Représentation du brochage intérieure.

Elles sont constituées de l'attelage, du guide, de la denture, de la queue Fig.I.44.

La denture des broches d'intérieur sont de type axiale :

- **Dents d'ébauche**

Les arêtes de coupe, pouvant comprendre des brise-copeaux, ébauchent la forme à obtenir.

- **Dents de demi-finition**

Elles profilent la forme désirée.

- **Dents de finition**

D'un nombre réduit à quelques dents, elles calibrent la forme au profil final.

- **Dents de réserve**

Généralement au nombre de cinq, elles sont de la forme du profil final, augmentant la durée de vie des broches, après des affûtages successifs.

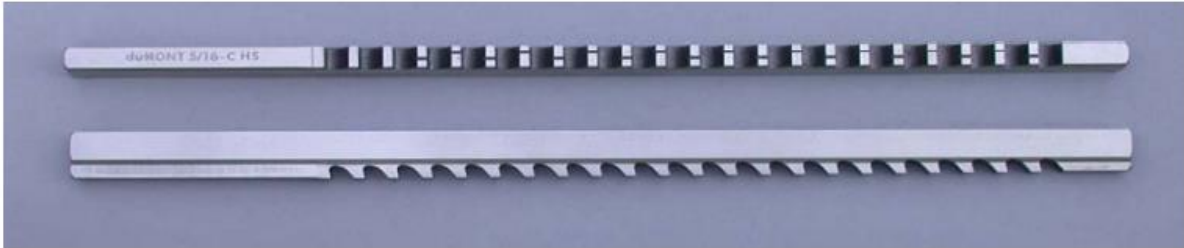


Figure .I.45. Les outils de brochage.

I.4.4. Brochage extérieur :

Le brochage s'effectue généralement à partir de l'ébauche du profil brut (moulage, etc.).

Il est simultané pour un groupe de formes associées sur une pièce.

La ou les pièces sont à maintenir efficacement pour s'opposer à la poussée latérale.



Figure .I.46. Représentation du brochage extérieur.

Grâce à ces deux types de brochage on peut élaborer un certain nombre de formes tel que :

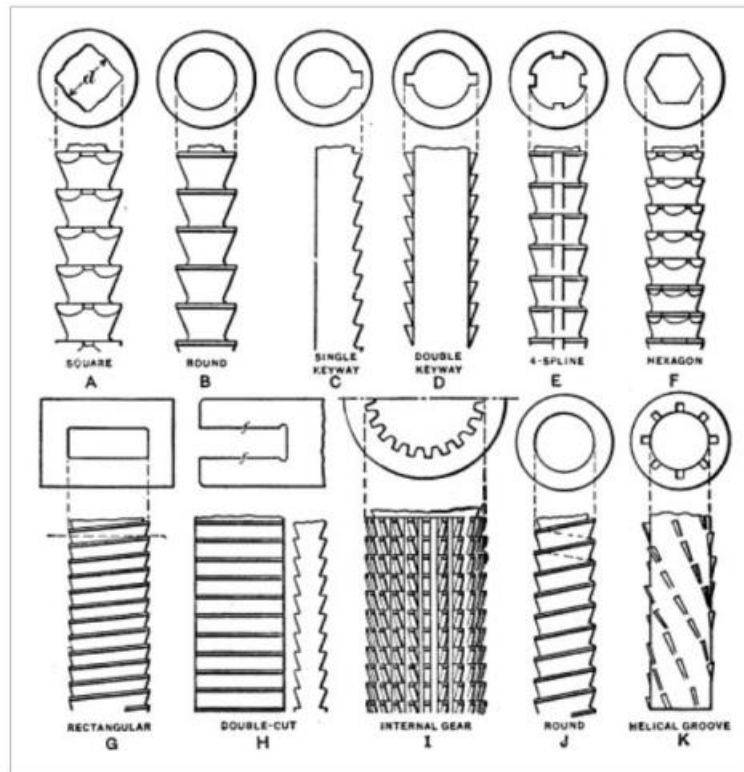


Figure I.47. Quelques formes élaborées par brochage.

I.4.5. Conditions de coupe

I.4.5.1. Vitesse de coupe

Elles sont faibles pour éviter une rupture et une usure prématurée des dents de la broche.

Le temps d'usinage est court, la forme à obtenir étant réalisée durant la course aller de la broche.

Les vitesses de retour de broche sont de 10 à 50m/min.

I.4.5.2. Épaisseur du copeau

C'est la différence dimensionnelle entre deux dents consécutives.

La progression sera constante pour l'ensemble des dents d'une broche devant effectuer essentiellement une opération de finition.

I.4.6. Lubrification :

Elle doit être aisée, avec une huile de coupe entière; visqueuse, adhérente permettant un fortement anti-usure. Elle doit assurer au maximum la protection des arêtes de coupe et l'obtention d'un état de surface de qualité.

Pour protéger les arêtes coupantes, il faut effectuer au préalable:

Un dressage de la face attaquée par les dents pour supprimer le contact arête de coupe/surface

brute.

- Un chanfrein d'entrée qui évite également un éventuel ébavurage.



Figure .I.48. Lubrification en brochage.

I.4.7. Avantages :

Si à l'origine le brochage n'était qu'une extension d'une opération de mortaisage concernant uniquement la simple réalisation de rainures de clavetage intérieur, le procédé va ensuite connaître améliorations et développements permettant d'obtenir toutes formes intérieures puis extérieures, parfois irréalisables par d'autres procédés. Le brochage présente toujours une productivité et par suite un bilan économique le plaçant en tête par rapport aux autres procédés, cela dès que l'on aborde les moyennes et grandes séries. C'est ainsi que, dans beaucoup d'unités de production, il a pris le relais dans de nombreuses opérations réalisées auparavant par fraisage. C'est un procédé qui permet d'effectuer l'ébauche et la finition en une seule opération, d'obtenir formes et dimensions précises avec de très bons états de surface, enfin il assure une parfaite reproductibilité même après un nombre considérable de pièces brochées. Pour fixer un ordre de grandeur, la part prise par les broches dans la totalité des dépenses en outils coupants affectés à l'usinage d'un groupe moteur-boîte de vitesses automobile représente environ 15 % du total. Dans ce chiffre la part prise par les broches extérieures est $\approx 55\%$, celle prise par les broches intérieures $\approx 35\%$; le reste, $\approx 10\%$, concerne les plaquettes et anneaux (ce dernier pourcentage est en augmentation suite à l'extension des nouveaux procédés de brochage au carbure, donc avec des plaquettes).

I.4.8. Utilisation :

Le brochage n'est souvent envisagé en dehors de l'industrie automobile, que pour résoudre des problèmes de rainures de clavettes ou de cannelures. Cependant il offre par rapport aux autres méthodes d'usinage de nombreux avantages.

L'opération de brochage est une opération d'un coût unitaire faible. Les frais d'outils et d'outillages sont peu élevés pour le brochage intérieur et relativement plus important pour le brochage extérieur. Cependant ils sont rapidement amortis dès que les séries atteignent quelques milliers de pièces.

CHAPITRE II :
La qualité de fabrication
mécanique

II.1. Généralités sur la qualité de fabrication :

Dans le monde de l'industrie et de la fabrication, la réalisation d'un produit ou d'une pièce mécanique est soumise à des conditions de fabrication qui sont toujours variables. Les pièces doivent aussi répondre à des exigences de qualité et des conditions fonctionnelles pour assurer le bon fonctionnement. Mais il est impossible de réaliser une pièce avec une multitude d'exemplaires tout en ayant la même valeur mesurée sur la géométrie de la pièce (longueur, diamètre, angle ...). [24]

Si on demande à un tourneur de réaliser un axe de diamètre 20 alors il serait impossible de le faire. La valeur exacte 20,000 est impossible de l'avoir ; puisque dans l'industrie de fabrication mécanique de précision la tolérance à l'erreur est généralement des centièmes, voire des millièmes dans des applications très spécifiques. Pour cela il y a toujours une différence, même quelques centièmes de millimètre, entre la pièce réalisée et le croquis théorique. Pour cela un dessin de définition est très important avant la fabrication et qui contient les valeurs limites acceptables pour les conditions fonctionnelles de la pièce à réaliser ou pièce réelle. Ces valeurs limites acceptables constituent les bornes mini et maxi de l'intervalle de tolérance.

II.2. La qualité de l'état de surface:

II.2.1. Généralités :

Parmi les nombreux facteurs dont dépend l'amplitude d'une pièce mécanique à satisfaire une ou plusieurs fonctions données figurent les caractéristiques de son état de surface.

Le terme général d'état de surface, concerne :

- D'une part, l'état géométrique de la surface réalisée dont les écarts géométriques par rapport à celle géométriquement idéale sont conventionnellement, classés sous 4 ordres,
- D'autre part, l'état physico-chimique de cette surface réalisée défini par différentes caractéristiques de la couche superficielle. [25]

La structure superficielle lors de l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération.

Cette structure est définie par les critères suivants :

- La rugosité (R): exprime les plus petites irrégularités, c'est à dire le fin réseau d'écarts micro géométriques mesurés sur la plus petite longueur d'échantillonnage.
- L'ondulation (W): est constituée d'irrégularités de plus grandes dimensions suivant de la longueur d'évaluation sur la surface de la pièce.
- La direction des traces d'usinage (L) : définit l'orientation du profil superficiel. Elle indique la direction dominante générée par la méthode d'usinage.

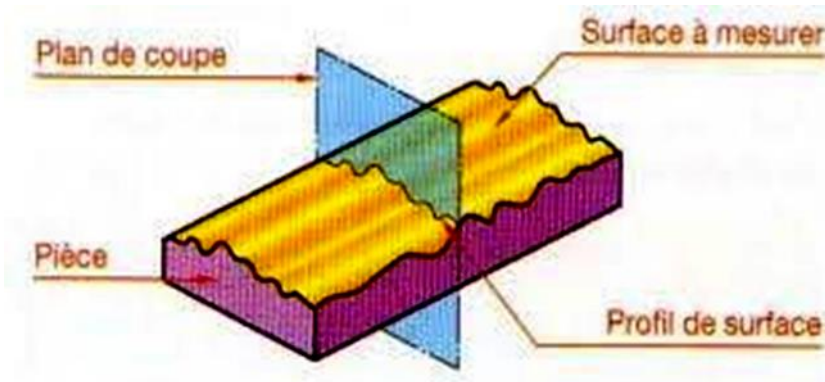


Figure II.1. Analyse d'une surface.

II.2.2. Définition :

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts par suite des erreurs systématiques d'imperfections, admissibles dans la fabrication. [26]

Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations) ou de petits défauts (défauts micro-géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité.

Ces deux types de défauts peuvent être distingués de la manière suivante, en considérant le schéma (fig.II.2), relatif à l'état de surface :

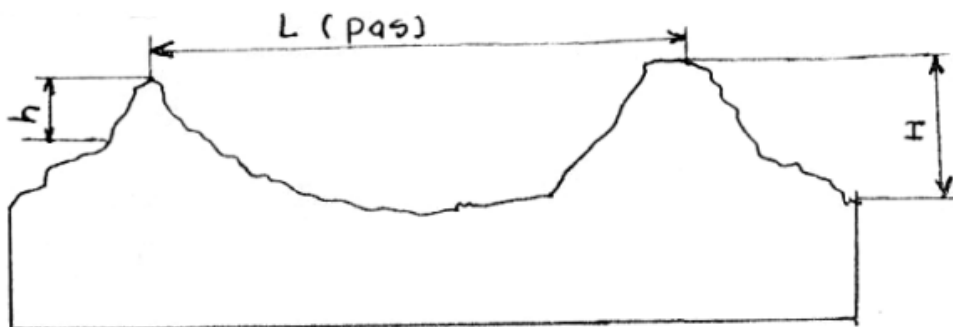


Figure II.2. Schéma de l'état de surface.

II.2.3. La rugosité :

La rugosité d'une surface usinée est représentée par l'ensemble des défauts microscopique (aspérités) dont le pas de distribution relativement est petit. Ces irrégularités peuvent être relevées comme écarts du profil effectif par rapport à la longueur de référence définie dans le domaine prospection (longueur de base).

Par rugosité il faut entendre les écarts géométriques d'ordre 3 à 5 (défauts de l'état géométrique de la surface correspondant à des ondulations courtes).

La rugosité peut être considérée dans une section longitudinale de la surface, direction du mouvement principale, et dans une section transversale, donc en direction du mouvement d'avance.

II.2.3.1. Les paramètres de la rugosité :

Il existe un grand nombre des paramètres pour la définition de la rugosité, certains sont pourtant beaucoup plus employés que d'autres :

- **Ra : rugosité moyenne du profil :**

Valeur moyenne de tous les écarts par rapport à une ligne droite, dans la longueur d'évaluation, indifféremment de la direction verticale.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |r_j|$$

Les paramètres les plus fréquents du profil R sont :

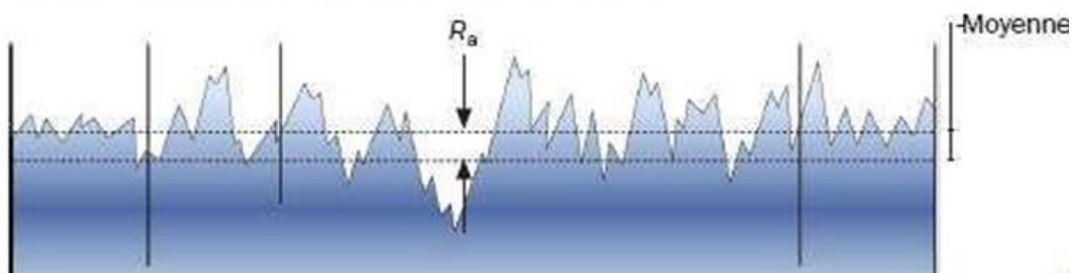


Figure II.3. Rugosité moyenne Ra.

- **Rq : Rugosité moyenne quadratique**

Moyenne quadratique des écarts de hauteur sur la longueur d'évaluation et mesurés par rapport à la ligne moyenne

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_j^2}$$

- **Rz : Hauteur maximale moyenne**

C'est la moyenne des différentes hauteurs de profil entre la hauteur de crête la plus élevée et la profondeur de creux la plus importante sur des longueurs de référence comprises dans la longueur d'évaluation.

- Il y a couramment 5 longueurs de référence
- La valeur affichant la plus grande déviation dans la longueur de référence = Rmax ou Rzmax.

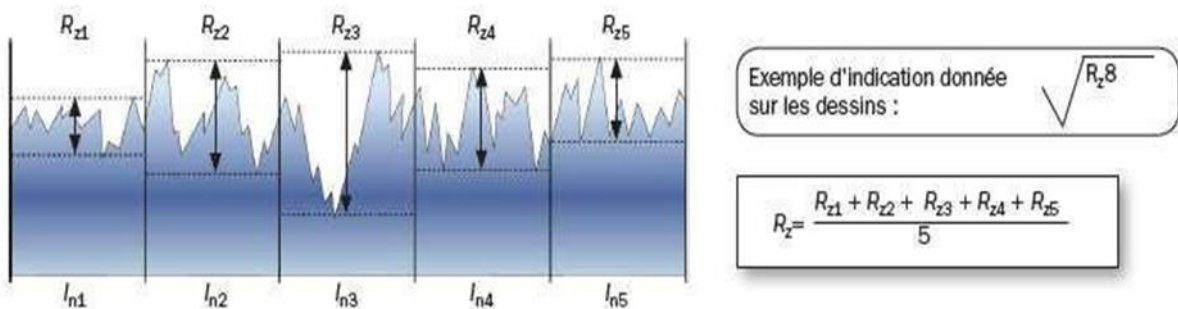


Figure II.4. Hauteur maximale moyenne Rz.

- **Rt: Hauteur maximale du profil**

C'est la somme de la hauteur de la crête la plus élevée et de la profondeur de creux la plus importante dans la longueur d'évaluation

- Une seule valeur Rt, non combiné à un Rz ou Ra est l'une des exigences les plus strictes du profil R.

$$R_t = \left| \min_{1 \leq j \leq N} r_j \right| + \left| \max_{1 \leq j \leq N} r_j \right|$$

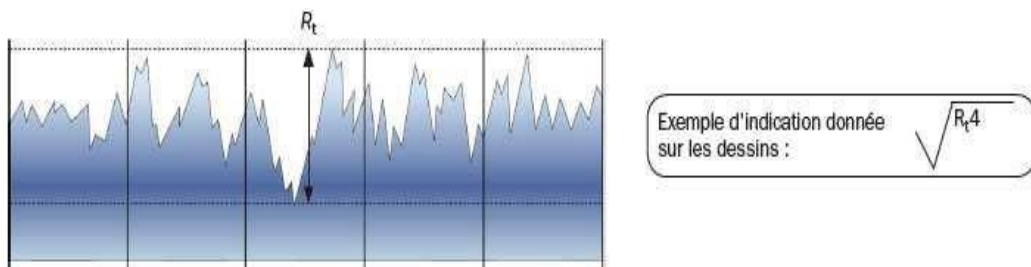


Figure II.5. Hauteur maximale du profil Rt.

II.2.3.2. Différents types de lignes :

La direction générale du profil est équivalente à la ligne des moindres carrés du profil.

➤ **Ligne moyenne :**

C'est une droite ayant la direction générale du profil et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base I, la somme des carrés des écarts à partir de cette ligne soit minimale ("ligne des moindres carrés").

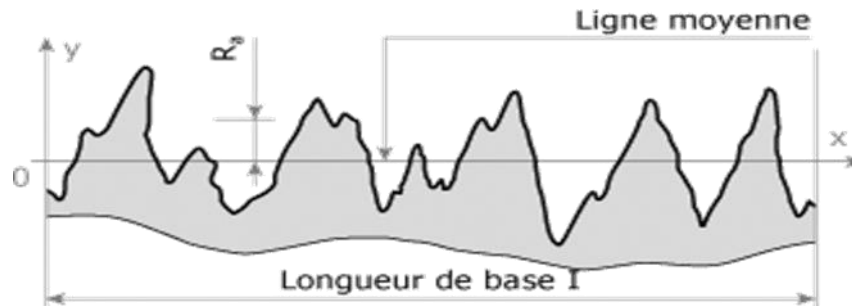


Figure II.6. La ligne moyenne.

● **Longueur de base, d'évaluation :**

- **Longueur d'évaluation :**

C'est la longueur, mesurée suivant la droite d'orientation générale, de la partie du profil utilisée pour le calcul des paramètres caractéristiques

- **Longueur de base :**

C'est une partie de la longueur d'évaluation qui sert à séparer les irrégularités du profil.

$L = n \times I$ avec n entier.

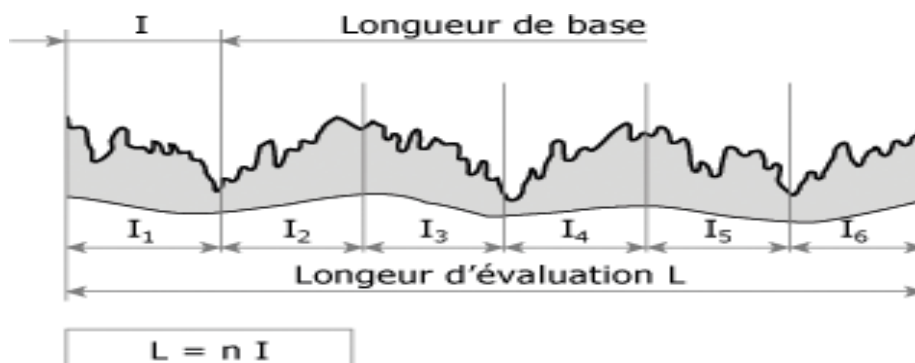


Figure II.7. La présentation de la longueur de base.

➤ **Ligne de référence :**

C'est la ligne par rapport à laquelle les paramètres du profil seront déterminés. En

Général, cette ligne n'appartient pas à la surface de référence et la ligne moyenne.

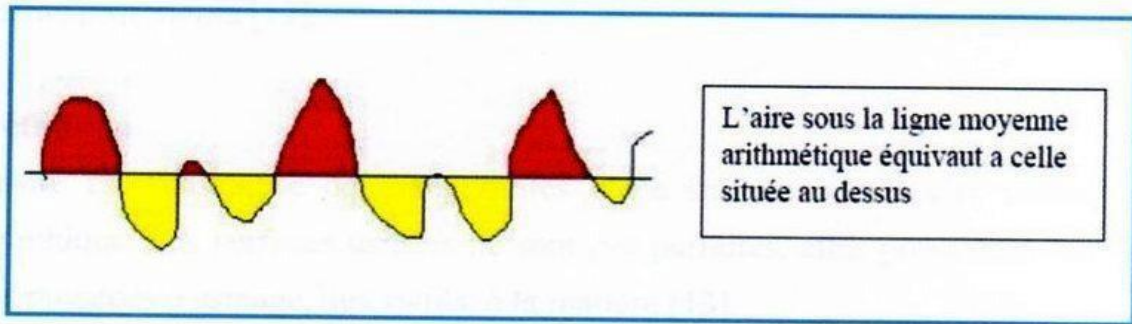


Figure II.8. Ligne des moindres carrés.

➤ **La ligne enveloppe supérieure :**

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies Locales du profil.

➤ **La ligne enveloppe inférieure :**

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus bas des creux locaux du Profil.

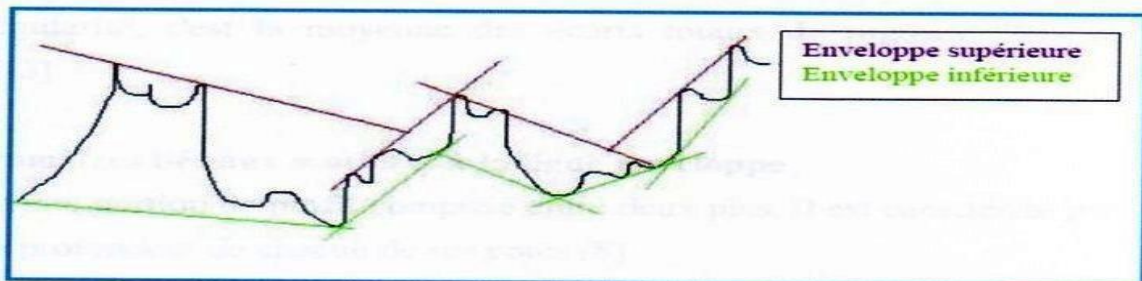


Figure II.9. Ligne enveloppe inférieure et supérieure.

II.2.3.3. Inscription normalisée d'un état de surface :

Sur les dessins de définition, les états de surface peuvent faire l'objet de spécification. Un symbole graphique est utilisé :

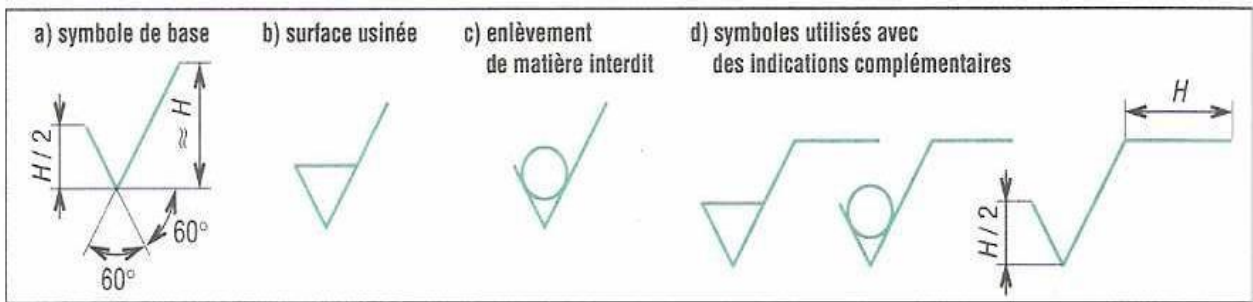


Figure II.10. Symbole graphique de l'état de surface.

Ce symbole est complété d'indications relatives au paramètre de rugosité retenu, au procédé de fabrication éventuellement,...

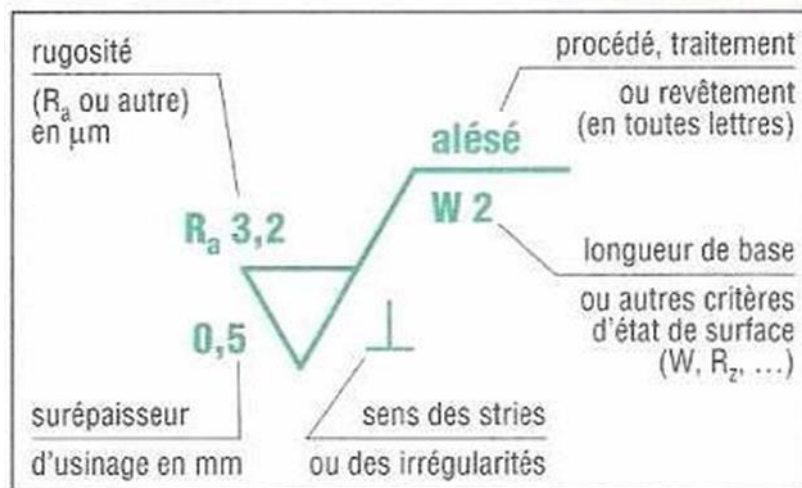


Figure II.11. Symbolisation.

II.3. La qualité dimensionnelle:

II.3.1. Tolérances dimensionnelles :

Ces tolérances font l'objet des normes [ISO 8015] et [NF E 04-561]. Elles permettent de limiter les défauts locaux et portent sur des grandeurs de type longueur ou angle. Les limites minimales et maximales des dimensions sont indiquées. Ce type de tolérancement ne s'applique qu'à une surface réelle unique ou à un couple d'éléments réels. [27]

Sur le dessin de définition de la pièce on trouve une valeur nominale de la mesure de la pièce à réaliser et les valeurs maxi et mini de la limite d'acceptation de ces mesures. Cette indication est appelée la cote de la pièce et la mesure réelle effectuée sur une pièce bien déterminée est appelée dimension.

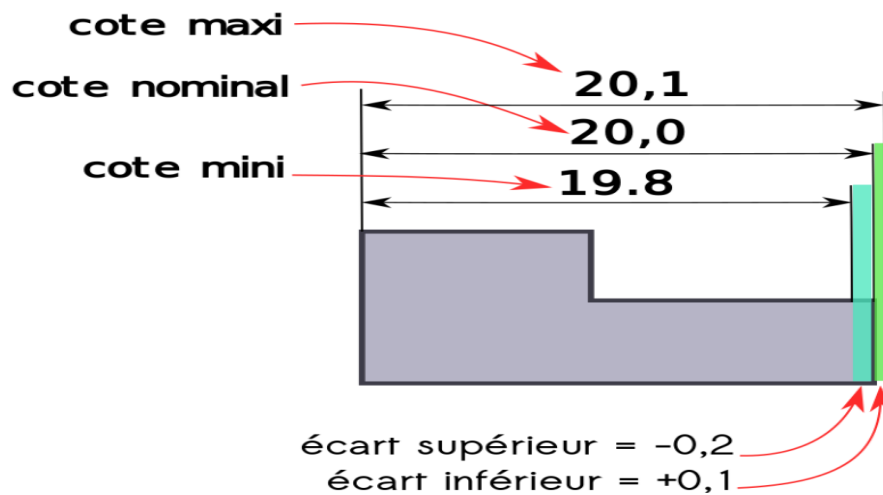


Figure II.12. Présentations de dimension d'une pièce.

Donc une cote est l'ensemble des dimensions acceptables pour une pièce à fabriquer. Elle est représentée comme suit :

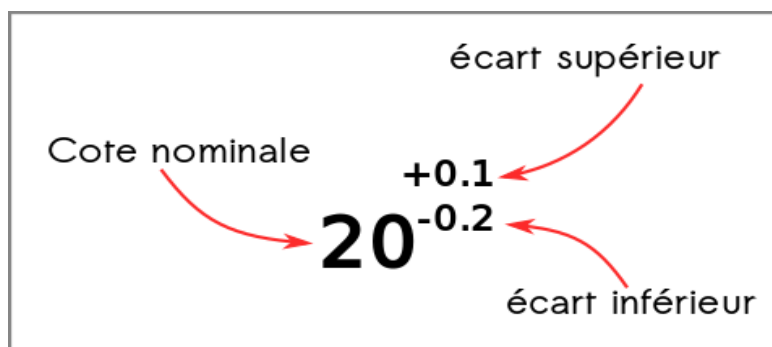


Figure II.13. Présentations de cote.

Exemple : $20_{-0,2}^{+0,1}$ est une cote. Elle est composée par « 20 » qui est la cote nominale, « 20,1 » qui est la cote maxi acceptable ou cote maxi et « 19,8 » qui est la cote mini.

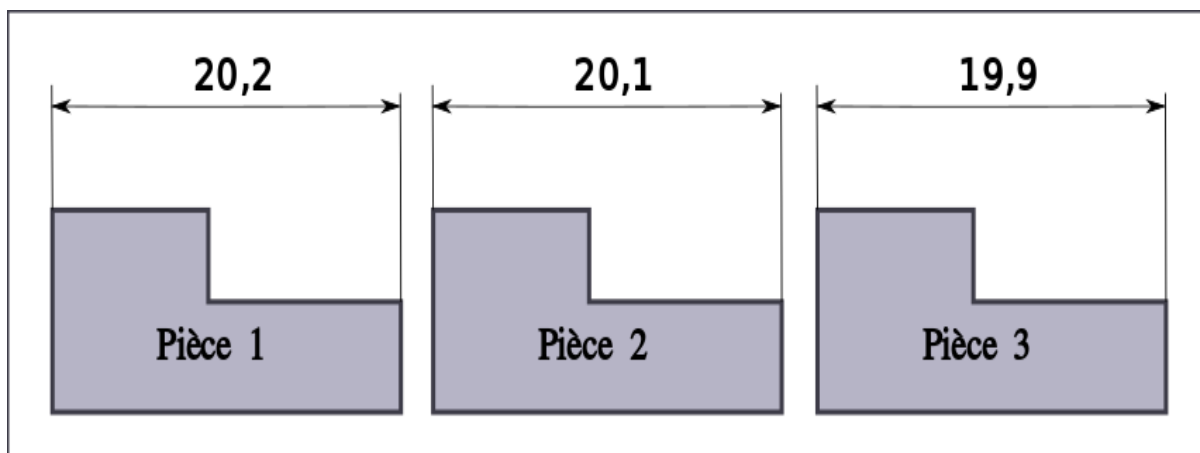


Figure II.14. Exemple des dimensions d'une pièce.

Les pièces ci-dessus possèdent des dimensions différentes. Alors qu'elles sont issues d'une même cote. La pièce 1 est hors tolérance, donc sa dimension ne respecte pas la cote alors que les pièces 2 et 3 sont conformes à la cote prescrite. La pièce 1 est à refuser dans le contrôle de qualité.

Pour des raisons pratiques, fonctionnelles et contractuelles entre le donneur d'ordre et le fabricant, il faut toujours travailler et communiquer avec les plans qui contiennent des cotes. Ceci permet de soulever toute ambiguïté qui peut parvenir de la lecture du plan. Donc un plan mécanique ou un dessin de définition sans tolérances n'a pas une valeur technique ni de valeur juridique.

II.3.2. La qualité de la cote:

La spécification des tolérances a une incidence sur les coûts de fabrication aussi. Par exemple coter une $20^{\pm 0,1}$ pièce avec n'a pas la même signification que si on $20^{\pm 0,01}$ la cote avec Dans le premier cas on a un intervalle de tolérance de largeur 0,2 mm soit donc 2/10 qui est facilement réalisable par usinage classique sur machine-outil alors que pour le deuxième cas il faut une opération supplémentaire de rectification qui permettras d'avoir la précision de 2/100. Donc une pièce plus précise est considérée comme de meilleure qualité. (À condition de ne pas tomber dans sur-coût et dans ce cas il faut considérer la qualité au meilleur prix ou efficience qui est selon Définition normalisée « ... rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées. Capacité de produire un effet positif"). Donc plus intervalle de tolérance est serré plus la pièce est considérée de qualité meilleure. Mais la qualité de la pièce ou de la cote varie en fonction de la cote nominale et en fonction de la valeur de l'intervalle de tolérance.

On considère une cote de $20 \pm 0,1$ et une $200 \pm 0,1$ cote c'est vrai que les deux cotes ont les mêmes écarts mais du point de vue pratique la cote $200 \pm 0,1$ est plus précise vue la largeur de l'intervalle de tolérance par rapport à la cote nominale. Donc on peut supposer que la cote $200 \pm 0,1$ est de meilleure qualité que $20 \pm 0,1$

II.3.3. La qualité de l'intervalle de tolérance ISO

Pour chaque dimension nominale, toute une gamme de tolérances est normalisée. La valeur de ces tolérances est symbolisée par un chiffre appelé la QUALITÉ. Il existe 18 qualités disponibles : 01-0-1-2-3 ... 15-16 qui correspondent chacune à des intervalles de tolérances

fondamentaux. Le tableau suivant donne les 18 qualités disponibles en fonction des dimensions nominales.

Qualité	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CN ≤ 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
3 < CN ≤ 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
6 < CN ≤ 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
10 < CN ≤ 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1 100
18 < CN ≤ 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1 300
30 < CN ≤ 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1 000	1 600
50 < CN ≤ 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1 200	1 900
80 < CN ≤ 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1 400	2 200
120 < CN ≤ 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1 000	1 600	2 500
180 < CN ≤ 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1 150	1 850	2 900
250 < CN ≤ 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1 300	2 100	3 200
315 < CN ≤ 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1 400	2 300	3 600
400 < CN ≤ 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1 550	2 500	4 000

Tableau II.1. Tolérances fondamentales (en μm) en fonction des intervalles de la cote nominale CN (en mm).

Les qualités 14, 15 et 16 ne sont prévues qu'au-delà de 1 mm.

Remarque :

- 1- À qualité égale, les intervalles de tolérance augmentent avec la dimension nominale.
- 2- A un indice de qualité faible correspond un faible intervalle de tolérance. Plus l'indice de qualité sera faible plus Le coût de production sera élevé car pour réaliser une cote dans un petit intervalle de tolérance il faudra une machine-outil de précision et plus de soin et de précautions seront à prendre.

3- Pour des raisons fonctionnelles, on doit parfois positionner l'intervalle de tolérance au-dessus la cote nominale ou parfois au-dessous de la cote nominale. Donc les données fournies au tableau ci-dessus ne suffisent pas à désigner avec exactitude une cote tolérance. Il manque la position de ces intervalles de tolérance par rapport à la cote nominale.

II.3.4. Tolérances linéaires :

Une tolérance linéaire limite uniquement les dimensions locales réelles (distance entre deux points) d'un élément simple.

Les tolérances dimensionnelles linéaires ne peuvent être exprimées que sur des surfaces ou entre des surfaces possédant des dimensions locales. (La tolérance linéaire est partiellement définie dans les normes pour deux figures géométrique appelées entités dimensionnelles, une surface nominale cylindrique et deux surfaces planes et parallèles). La direction des bipoints n'est pas explicitée.

Une tolérance dimensionnelle linéaire ne limite aucunement le défaut de forme. Ceci permet de respecter le principe de l'indépendance.

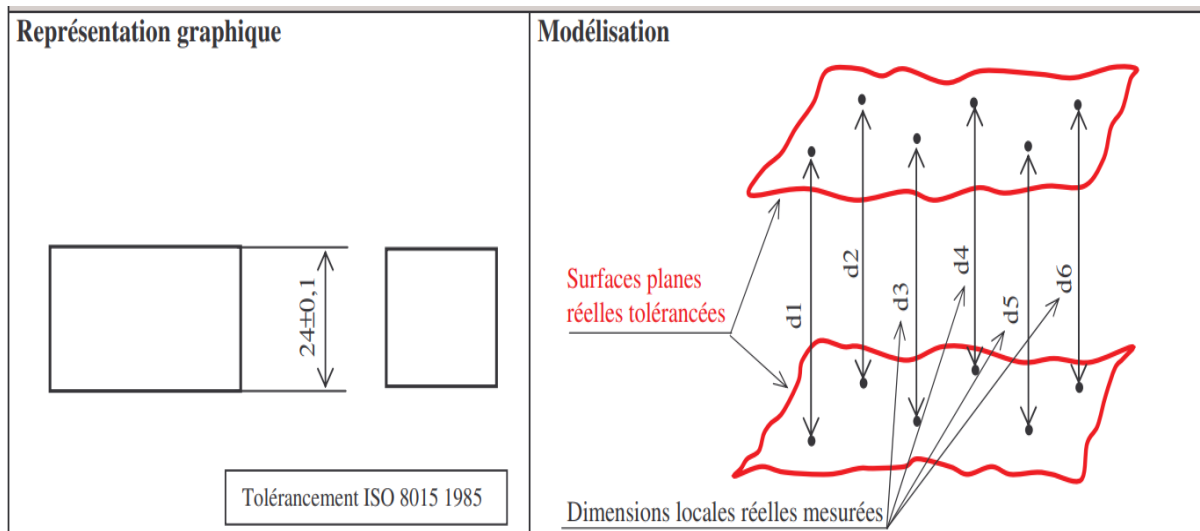


Figure II.15. Tolérance linéaire : distance entre deux surfaces planes et parallèles. [28]

Intervalle de tolérance : $IT = \text{cote Maxi} - \text{cote mini}$

Condition de conformité : chaque dimension locale réelle ou taille mesurée entre deux points (bipoint) en regard et appartenant aux surfaces réelles tolérances doit être comprise dans les limites de la tolérance.

$$23,9 \leq d_i \leq 24,1$$

II.3.5. Tolérances angulaires :

Une tolérance angulaire limite uniquement les orientations des lignes ou des éléments linéaires des surfaces.

Les tolérances dimensionnelles angulaires ne peuvent être exprimées que pour limiter l'orientation générale de deux lignes. (La tolérance angulaire est partiellement définie dans la norme pour deux droites d'un dièdre.)

L'orientation générale de la ligne dérivée de la surface réelle est l'orientation de la ligne en contact de forme géométrique parfaite. La distance entre cette ligne en contact et la ligne réelle doit être le plus faible possible.

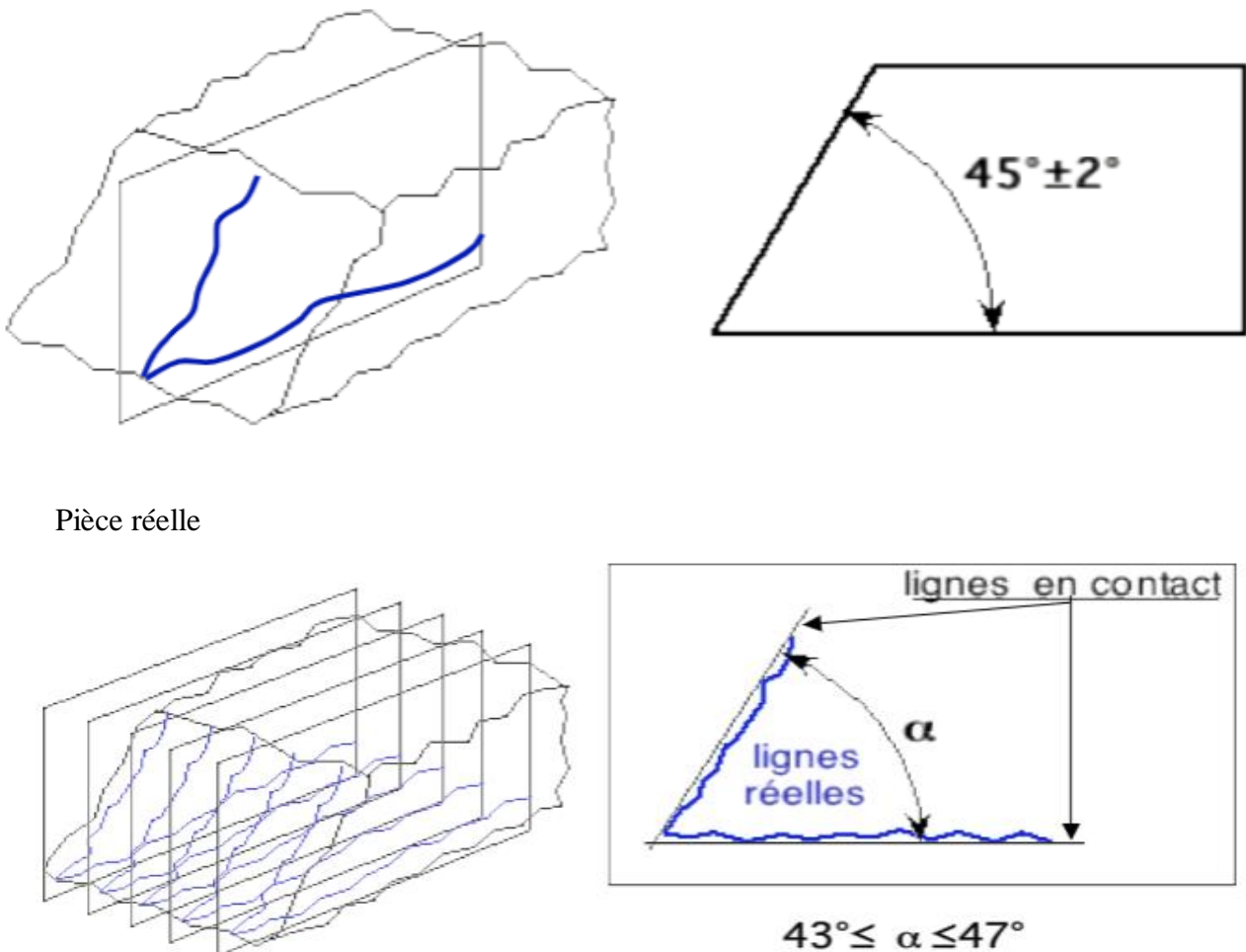


Figure II.16. Tolérance angulaire. [29]

Dans chaque plan chaque dimension locale réelle doit rester dans la tolérance dimensionnelle

II.4. La qualité de forme :

II.4.1. La tolérance de forme (erreur de forme) :

La tolérance de forme est une tolérance géométrique de base permettant de déterminer la forme de la cible (pièce). Aucune des caractéristiques de la tolérance de forme ne requiert de référence spécifiée. Les formes peuvent être déterminées indépendamment. [30]

II.4.1.1. Tolérance de forme Rectitude :

L'exigence de rectitude spécifie l'écart admissible par rapport à la droite parfaite applicable à la cible. Elle concerne les lignes et non les surfaces et représente une courbure de la ligne médiane ou de la génératrice. De ce fait, la rectitude est utilisée pour indiquer la tolérance de déformation d'objets longs.

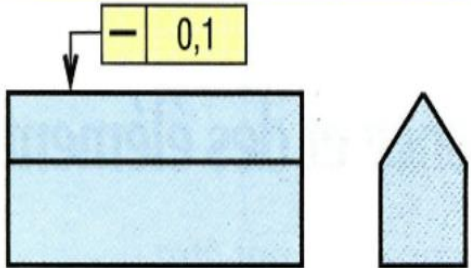
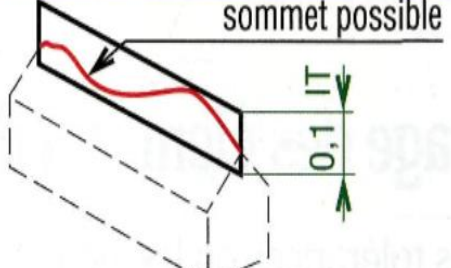
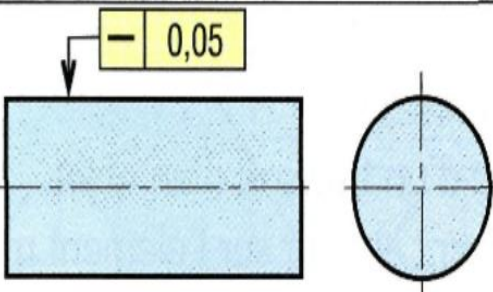
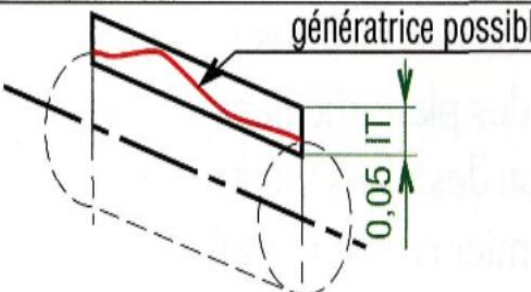
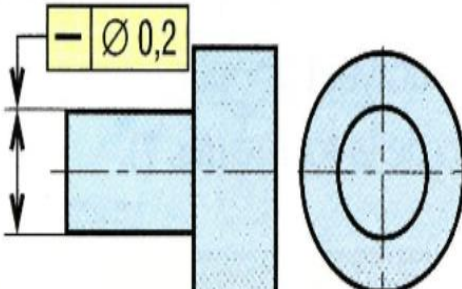
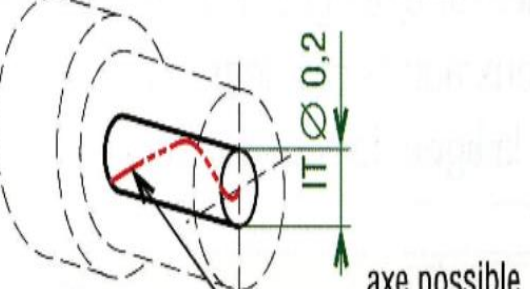
Exemple	Interprétation
	
	
	

Figure II.17. Tolérance de forme Rectitude. [31]

Observation

La ligne sommet doit rester entre deux droites parallèles (du dessin) distantes de 0.1 , parallèles ou non aux autres parties de l'objet.

II.4.1.2. Tolérance de forme planéité :

L'exigence de planéité spécifie la régularité d'une surface, ou l'écart admissible par rapport à une surface parfaitement plane applicable à la cible. Les parties la plus convexe et la plus concave doivent être comprises entre deux plans séparés verticalement.

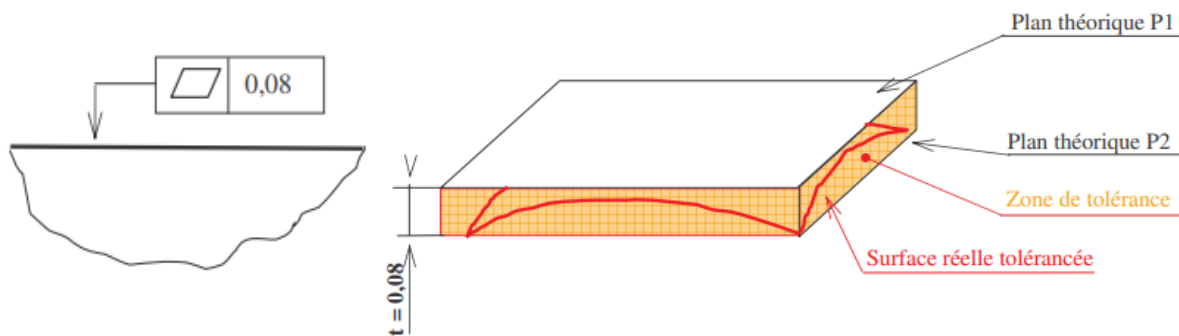


Figure II.18. Tolérance de forme planéité.

Zone de tolérance : espace compris entre deux plans P1 et P2 idéaux, parallèles, distants de $t = 0,08$. Cette zone est libre en rotation et en translation par rapport à la pièce.

Condition de conformité : la surface réelle tolérance doit être située dans la zone de tolérance.

II.4.1.3. Tolérance de forme circularité :

L'exigence de circularité spécifie l'écart admissible par rapport au cercle parfait applicable à la cible (la section circulaire d'un arbre, d'un alésage ou d'un cône).

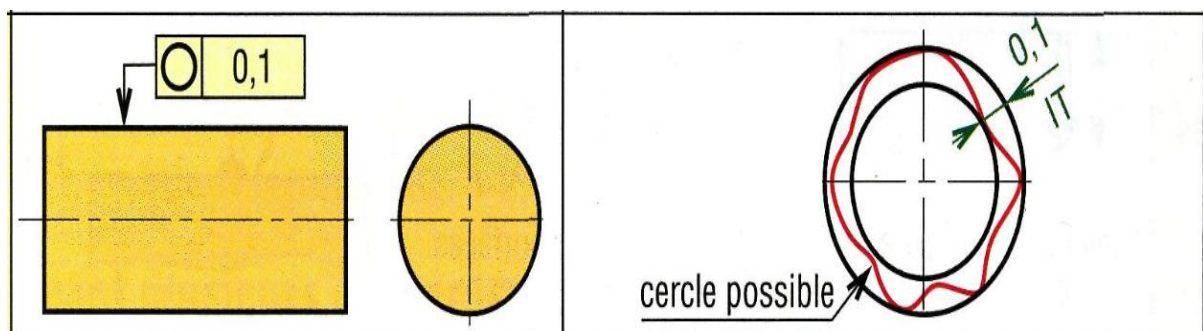


Figure II.19. Tolérance de forme circularité

Observation

Le profil de chaque section perpendiculaire à l'axe doit rester entre deux cercles concentriques distants de 0.1 centrés ou non sur l'axe du cylindre.

II.4.1.4. Tolérance de forme cylindricité :

L'exigence de cylindricité spécifie la précision de circularité et de rectitude d'un cylindre. La valeur englobe toute déformation du cylindre.

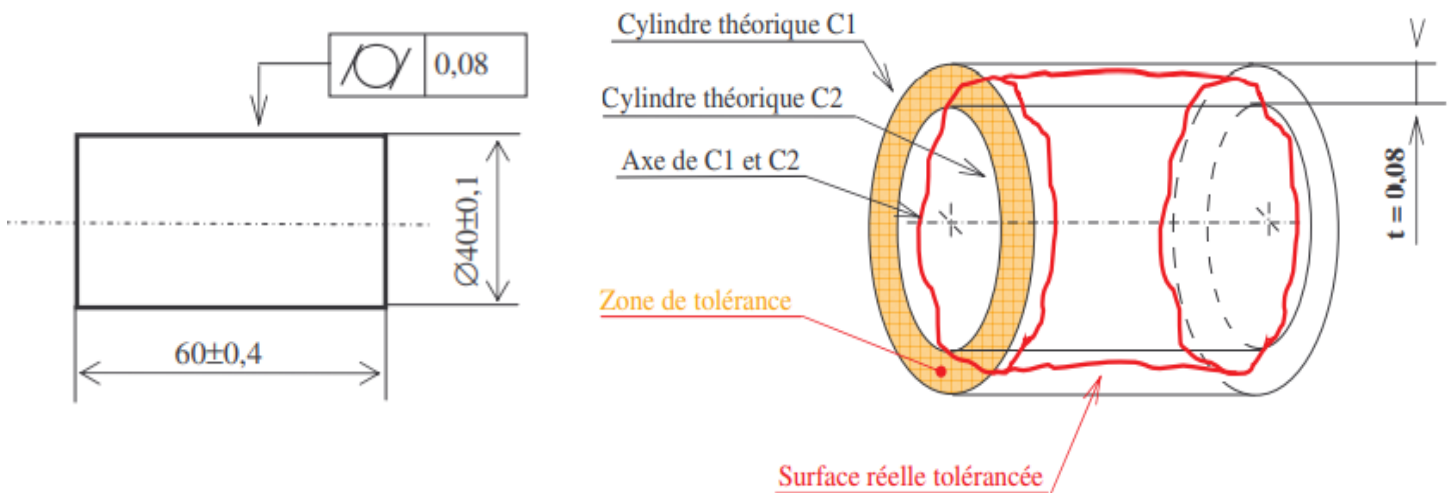


Figure II.20. Tolérance de forme cylindricité.

Zone de tolérance : espace compris entre deux cylindres C1 et C2 idéaux, coaxiaux, de rayons variables et dont la différence des rayons est de $t = 0,08$.

Cette zone est libre en rotation et en translation par rapport à la pièce.

Condition de conformité : la surface réelle tolérance doit être située dans la zone de tolérance.

II.4.1.5. Tolérance de forme Profil de ligne :

L'exigence de profil de ligne spécifie l'écart admissible entre la courbure réelle d'une pièce et son dessin de conception. La valeur indique toute distorsion du profil d'une ligne (élément ligne apparaissant sur la section d'une surface). La ligne de section coupant la courbure spécifiée doit se trouver dans la zone de tolérance.

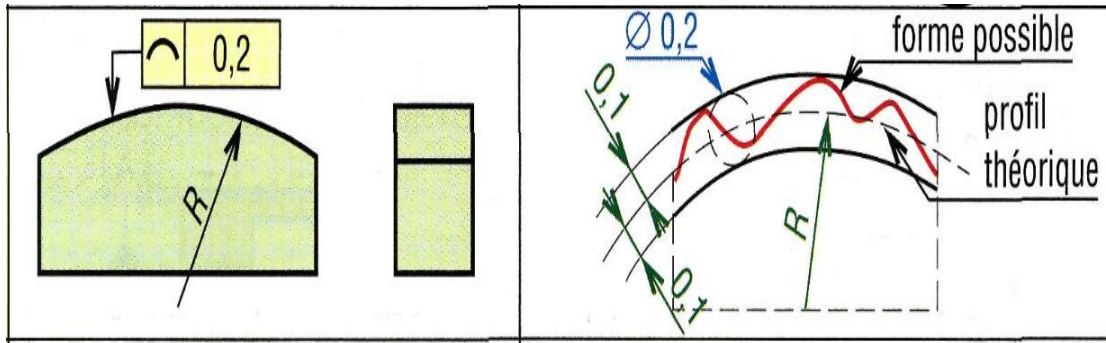


Figure II.21. Tolérance de forme Profil de ligne.

II.4.1.6. Tolérance de forme profil de surface :

L'exigence de profil de surface spécifie l'écart admissible entre la courbure (surface) réelle d'une pièce et son dessin de conception.

Contrairement à la tolérance de profil de ligne, la tolérance de profil de surface s'applique à la totalité de la courbure spécifiée.

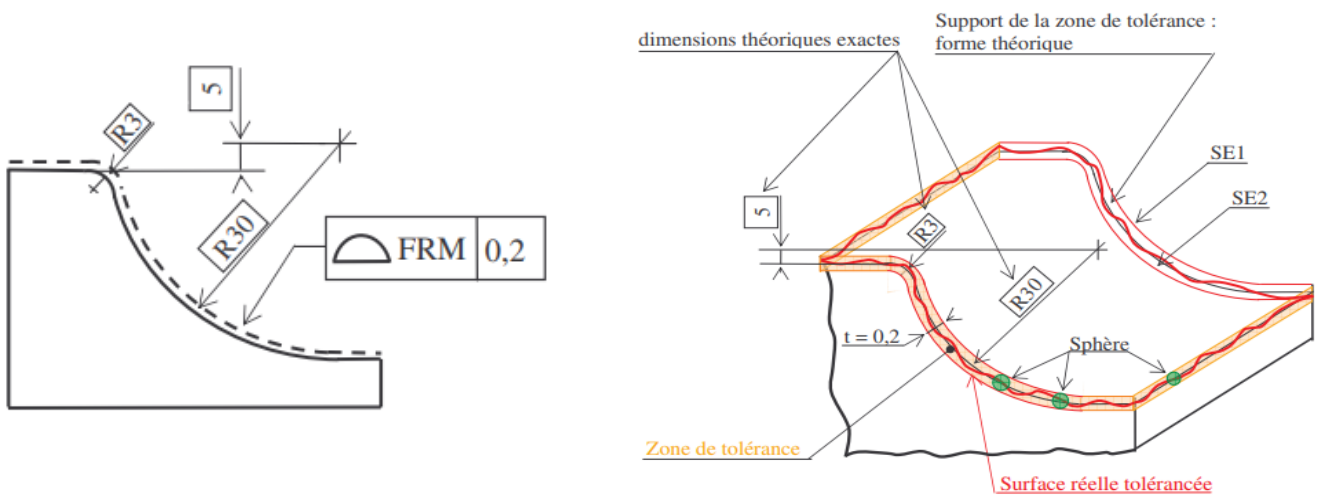


Figure II.22. Tolérance de forme profil de surface.

Observation :

Le profil de chaque ligne doit rester entre deux lignes qui enveloppent des cercles de diamètre 0,2 centrés sur le profil théorique spécifié

Zone de tolérance : espace compris entre deux surfaces enveloppes SE1 et SE2 lieux géométriques des extrémités du diamètre d'une sphère de diamètre $\varnothing 0,2$, normal à la forme théorique.

La forme théorique d'une surface est définie par son type et ses paramètres intrinsèques.

Ceux-ci sont caractérisés par les dimensions théoriques exactes définies :

- soit explicitement sur le dessin
- soit par un modèle numérique (description mathématique du modèle)

Le centre de la sphère décrit cette forme théorique de l'élément tolérance (support de la tolérance).

Cette zone de tolérance est libre en translation et en rotation par rapport à la pièce.

Condition de conformité : la surface réelle tolérance doit être située dans la zone de tolérance.

II.5. La qualité d'orientation:

II.5.1. La tolérance d'orientation :

La tolérance d'orientation détermine l'orientation de la forme par rapport à une référence. La tolérance d'orientation requiert toujours une référence spécifiée. De ce fait, les éléments de cette tolérance géométrique sont dits associés.

II.5.1.1. Parallélisme: //

Malgré une certaine similitude avec la planéité, le parallélisme requiert une référence spécifiée (ligne ou plan de référence).

L'exigence de parallélisme spécifie la précision du parallélisme entre deux lignes ou deux surfaces.

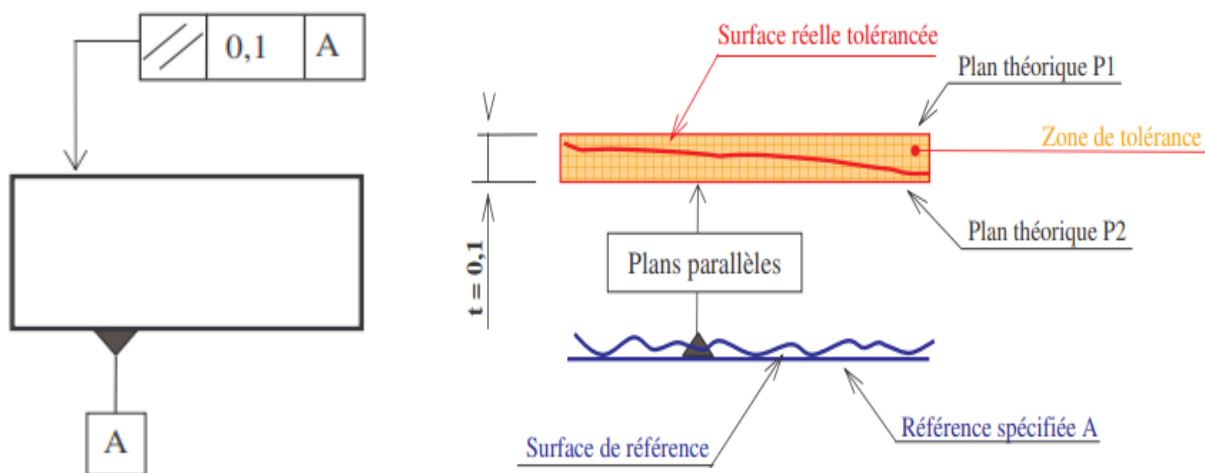


Figure II.23. Tolérance d'orientation de parallélisme d'une surface plane par rapport à une surface plane.

Référence spécifiée A : élément idéal associé à la surface de référence (tangent du côté libre de matière).

Zone de tolérance : espace compris entre deux plans P1 et P2 idéaux, parallèles, distants de $t = 0,1$ et parallèles à la référence spécifiée A. La distance de P1 et P2 par rapport à A est variable.

La zone de tolérance est libre en translation par rapport à la référence spécifiée.

Condition de conformité : la surface réelle tolérance doit être située dans la zone de tolérance.

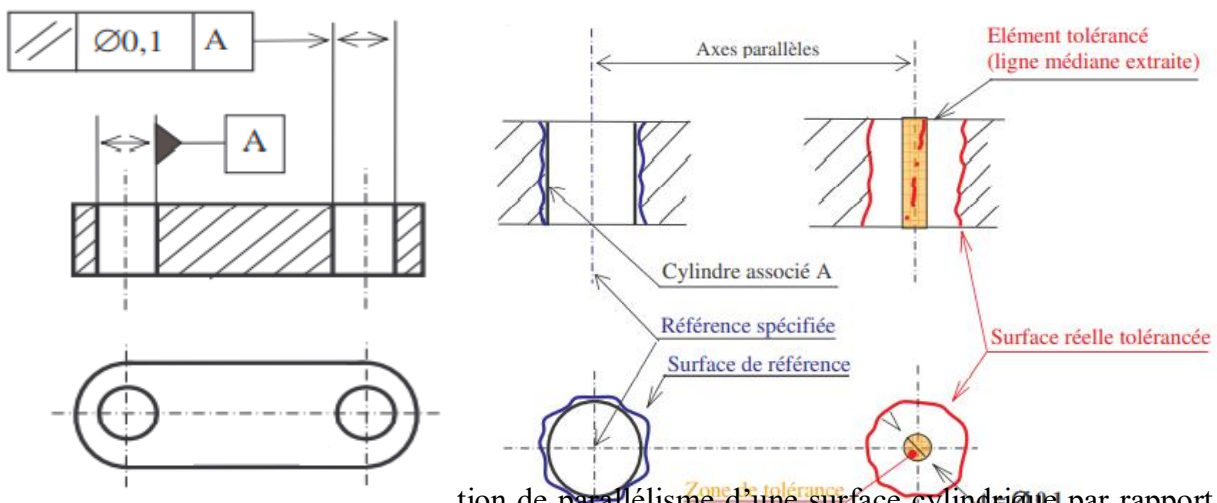


Figure 11.2.1. Tolérance d'orientation de parallélisme d'une surface cylindrique par rapport à une surface cylindrique.

Référence spécifiée : axe du cylindre idéal A associé à la surface de référence.

Zone de tolérance : cylindre idéal de diamètre $t = \varnothing 0,1$ dont l'axe est parallèle à la référence spécifiée A. La distance entre la zone de tolérance et l'axe de A est variable.

La zone de tolérance est libre en translation par rapport à la référence spécifiée et en rotation par rapport à la pièce.

Condition de conformité : la ligne médiane extraite de la surface réelle tolérance doit être située dans la zone de tolérance.

II.5.1.2. Perpendicularité : \perp

L'exigence de perpendicularité spécifie la précision de perpendicularité de la cible vis-à-vis de la référence spécifiée (plan ou ligne de référence).

L'indication de perpendicularité est donnée en millimètres et non en degrés.

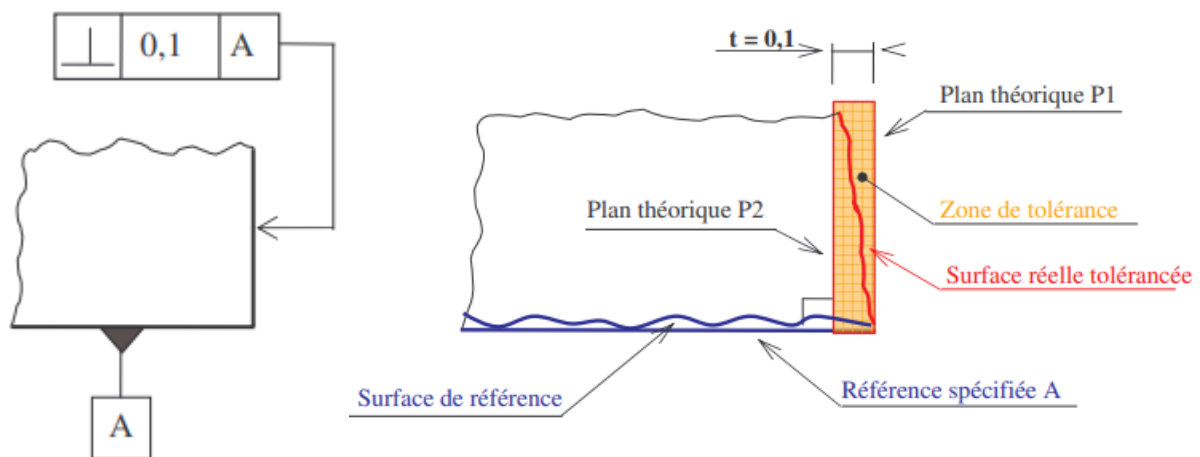


Figure II.25. Tolérance d'orientation de perpendicularité d'une surface plane par rapport à une autre plane.

Référence spécifiée A : élément idéal A associé à la surface de référence (tangent du côté libre de matière).

Zone de tolérance : espace compris entre deux plans P1 et P2 idéaux, parallèles, distants de $t = 0,1$ et perpendiculaires à la référence spécifiée A.

La zone de tolérance dispose de libertés de mouvement par rapport à la pièce (2 translations et une rotation).

Condition de conformité : la surface réelle tolérance doit être située dans la zone de tolérance.

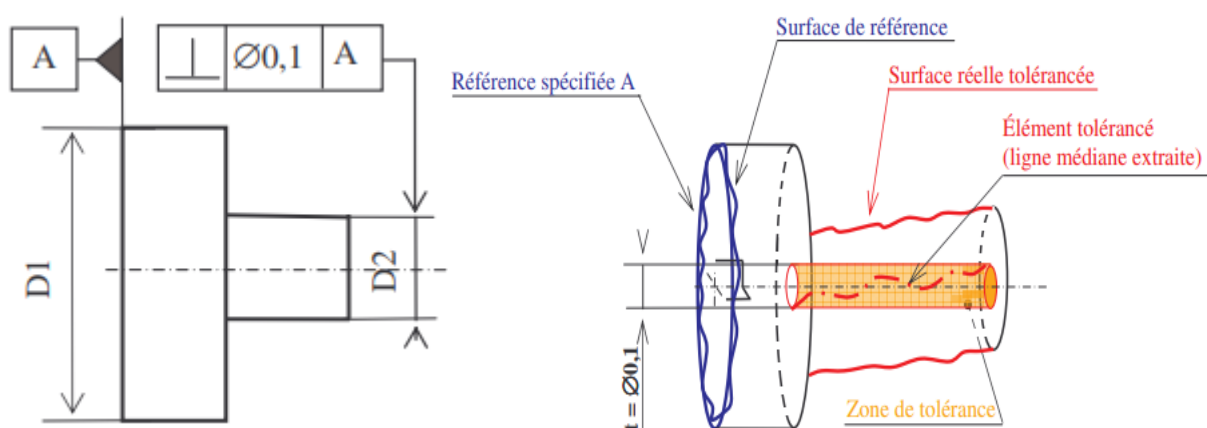


Figure II.26. Tolérance d'orientation de perpendicularité d'une surface plane par rapport à une autre plane.

Référence spécifiée A : élément idéal associé à la surface de référence (tangent du côté libre de matière).

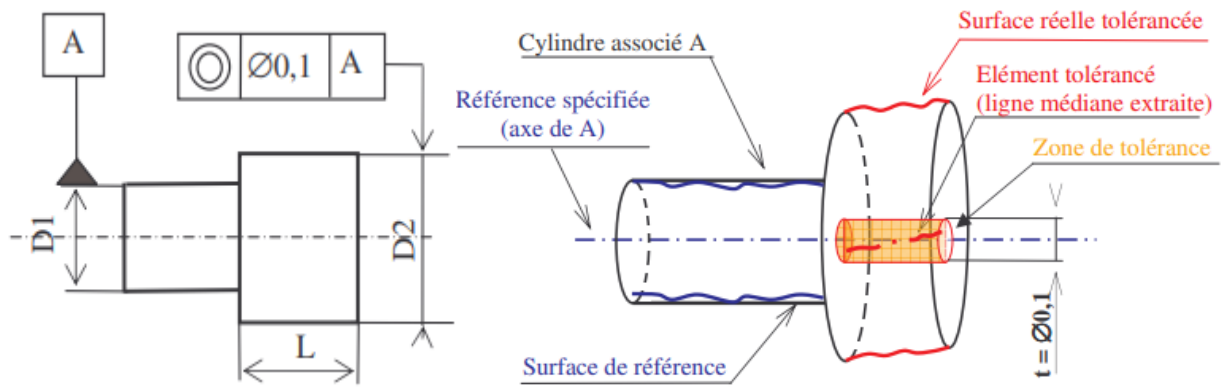


Figure II.28. Tolérance de position coaxialité d'une surface cylindrique par rapport à une surface cylindrique.

II.6.1.3. Symétrie : \equiv

L'exigence de symétrie spécifie la précision de symétrie de la cible par rapport à la référence spécifiée (plan de référence).

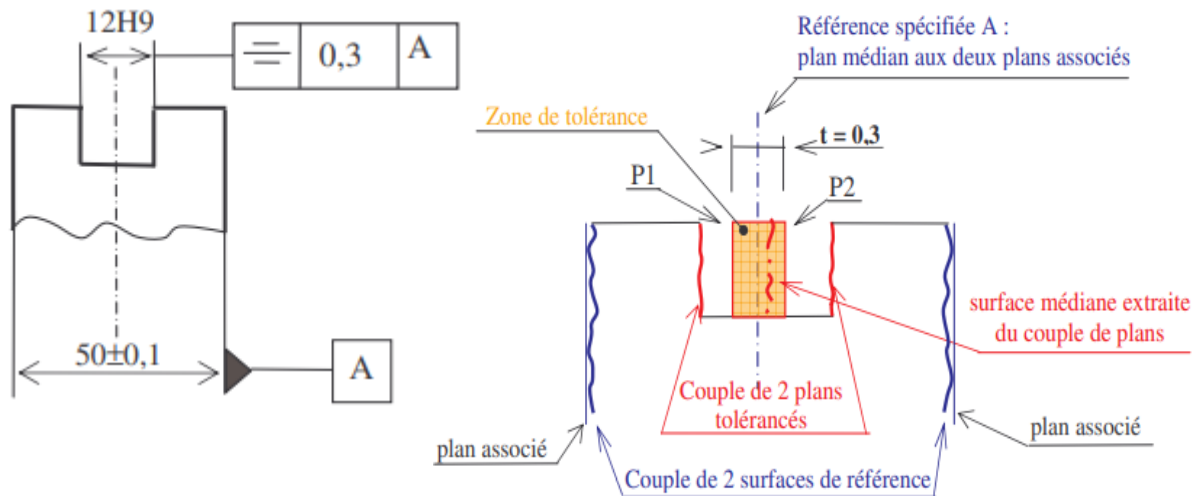


Figure II.29. Tolérance de position symétrie d'un couple de surfaces planes par rapport à un autre couple de surfaces planes.

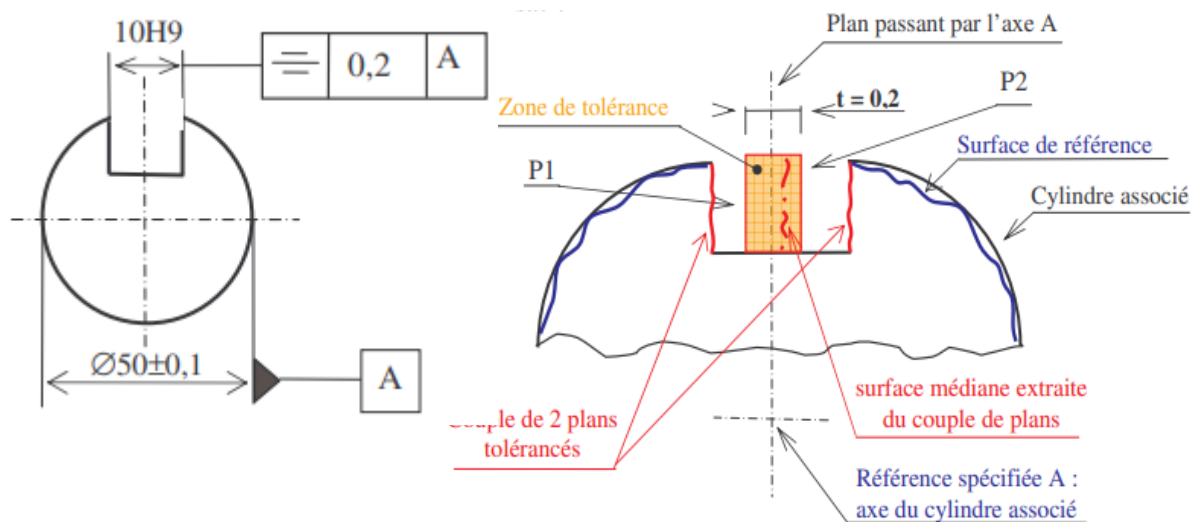


Figure II.30. Tolérance de position symétrie d'un couple de surfaces planes par rapport à une surface cylindrique.

II.7. La qualité de battement :

II.7.1. Tolérance de battement (erreur de battement) :

La tolérance de battement spécifie la variation de battement d'un élément lorsque la cible (pièce) est mise en rotation autour d'un axe (droite spécifiée). La tolérance de battement requiert toujours une référence spécifiée. De ce fait, les éléments de cette tolérance géométrique sont dits associés.

II.7.1.1. Battement simple : ↗

Le battement simple spécifie la précision de battement de toute partie d'une circonférence lorsque la pièce est mise en rotation.

Afin de respecter l'exigence de battement simple, la variation de la valeur mesurée lorsque la pièce est en rotation doit se trouver dans la plage spécifiée.

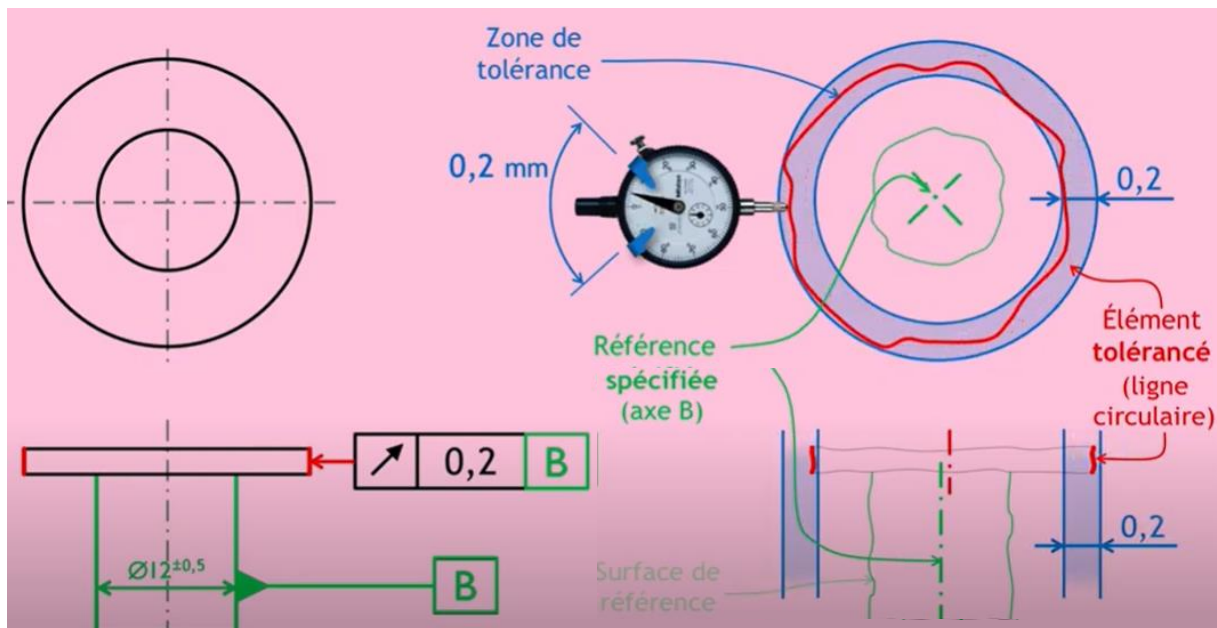


Figure II.31. Tolérance de battement simple radial d'une surface cylindrique par rapport à une autre surface cylindrique.

La surface cylindrique B est la surface de référence ce n'est cependant pas la référence spécifique, En effet le triangle est dans le prolongement de cette ligne de cote cela signifie que la référence spécifique est l'axe de la surface cylindrique vert

Cette référence spécifique va nous permettre de positionner la zone de tolérance cette zone de tolérance est un espace compris entre 2 cylindres centrée sur l'axe de références spécifiques et espacés de 0,2 mm, Les rayons de ces cylindres ne sont pas imposés seule l'écart de 0,2 mm est imposé.

La spécification de battement sera vérifiée si on arrive à trouver une zone de tolérance dans laquelle la ligne tolérance et soit totalement comprise dans les fêtes pour mesurer le défaut de battement en fait tourner la pièce sur l'axe de références spécifiques et on place un comparateur sur la surface de tolérance et les deux positions extrêmes de l'aiguille ne doivent pas dépasser l'intervalle de tolérance 0,2 mm

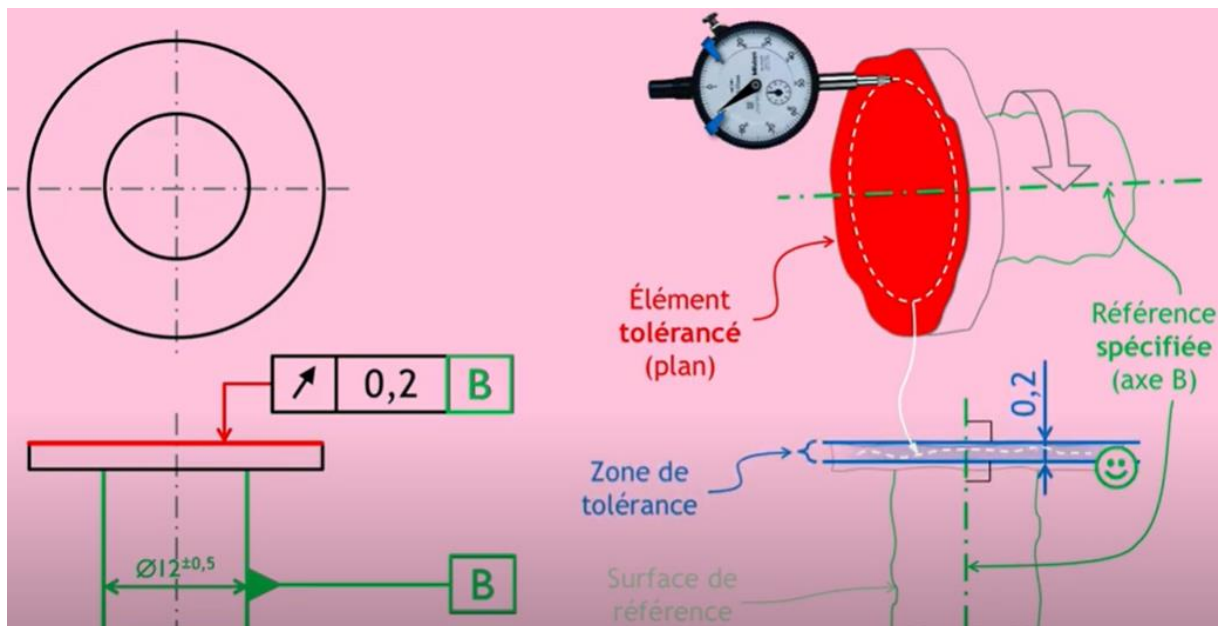


Figure II.32. Tolérance de battement simple axial d'une surface plane par rapport à une surface cylindrique.

Dans la spécification de battement axial la surface tolérance est un plan de direction axiale par rapport aux cylindres de référence la surface de référence est la référence spécifiée sans les mêmes que dans la le battement radial.

Sur le skin modèle le plan tolérance est ici en rouge dans , cette spécification de battement axial la zone de tolérance et l'espace compris entre deux plan parfait perpendiculaire à l'axe de référence espacées de 0,2 mm, cette zone de tolérance peut être positionné comme on le souhaite le long de l'axe de référence, Cette zone de tolérance ne s'applique pas à toute la surface rouge , voyons à quoi elle s'applique c'est on place un comparateur perpendiculairement au plan tolérance et qu'on fait tourner la pièce la touche du comparateur va décrire une ligne circulaire c'est cette ligne qui devra se trouver dans la zone de tolérance ceci doit être respectés pour chaque position possible du comparateur mais chacun de cette ligne peut être inscrits dans des zones de tolérance différentes les unes des autres.

C'est parce que la spécification de battements à noter avec une flèche uniquement que chacun de ces lignes et traitées de manière indépendant.

II.7.1.2. Battement total :

Le battement total spécifie la précision de battement de la totalité de la surface d'une pièce mise en rotation.

Afin de respecter l'exigence de battement total, la variation de la valeur mesurée sur la totalité de la surface du cylindre doit se trouver dans la plage spécifiée.

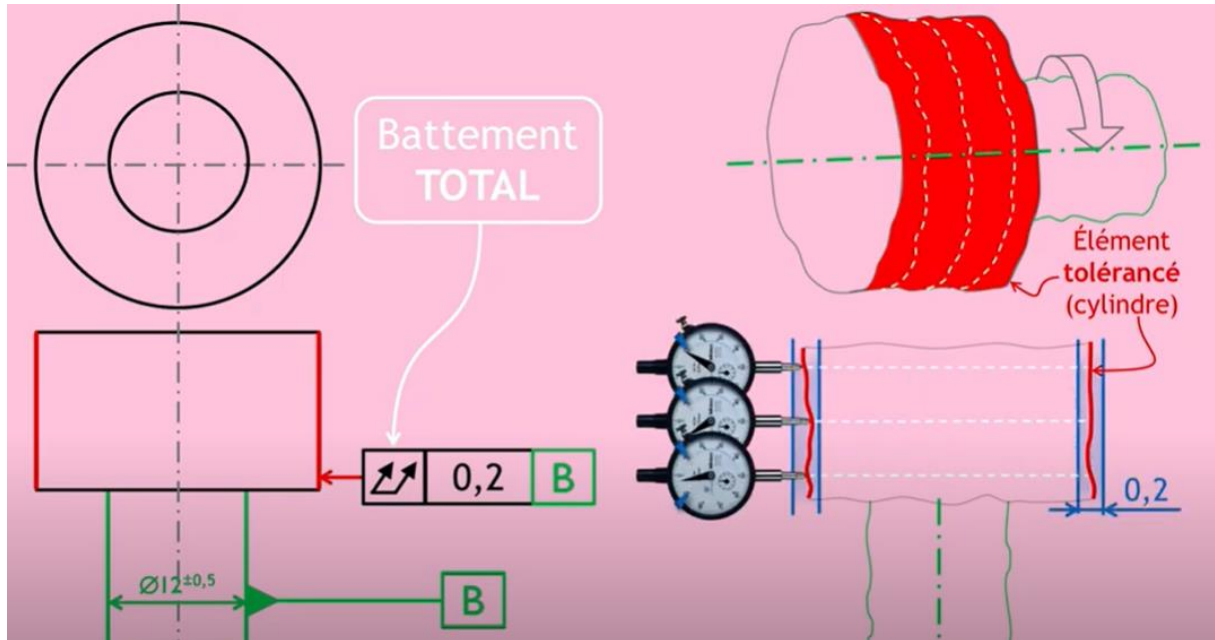


Figure II.33. Tolérance géométrique de battement total radial d'une surface cylindrique par rapport à une autre surface cylindrique.

Dans ce cas de spécification de battement total la surface tolérance est une surface cylindrique dans chaque cercle mesures doit entrer dans une seule et même zone de tolérance alors que dans le cas d'un battement simple chaque cercle devrait entrer dans des zones indépendantes.

CHAPITRE III :
Les paramètres de coupe

III. Les paramètres de coupe :

III.1. Généralités :

Les paramètres de coupe sont des grandeurs primordiales lors de l'usinage. Ces paramètres conditionnent les phénomènes physiques rencontrés lors de la coupe. Leur choix est directement lié à l'intégrité de l'outil et à la qualité géométrique de la surface usinée tout en assurant une production optimale à moindre coût.[32]

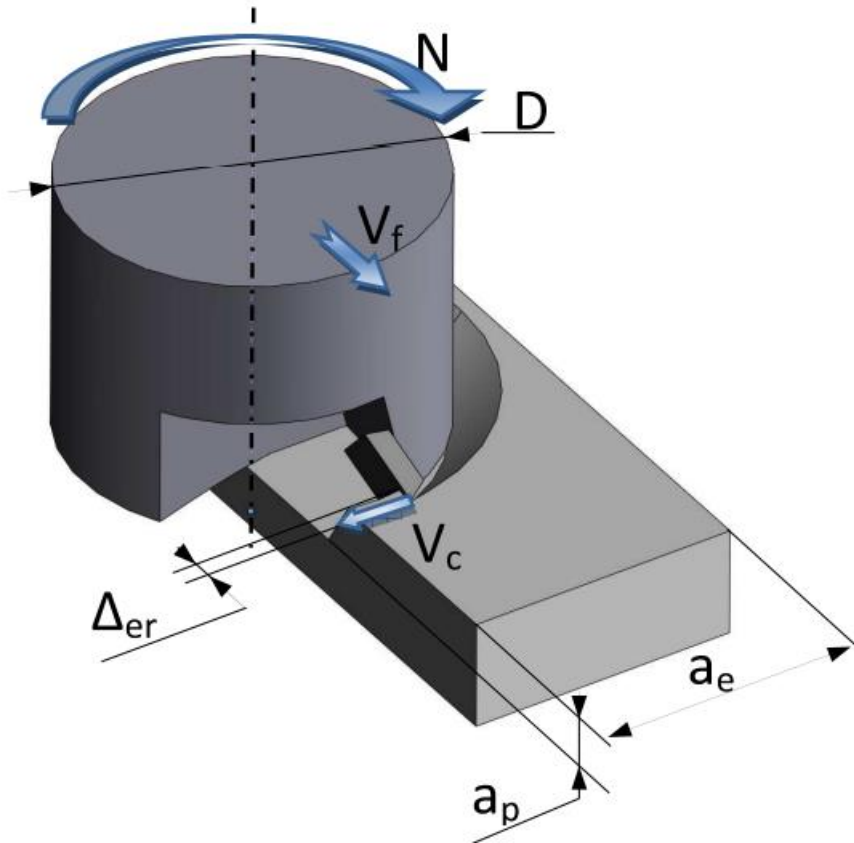


Figure III.1. Opération de fraisage.

III.2. Principe :

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante :

Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau.

L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner. Ces mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil. [33]

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de la coupe.

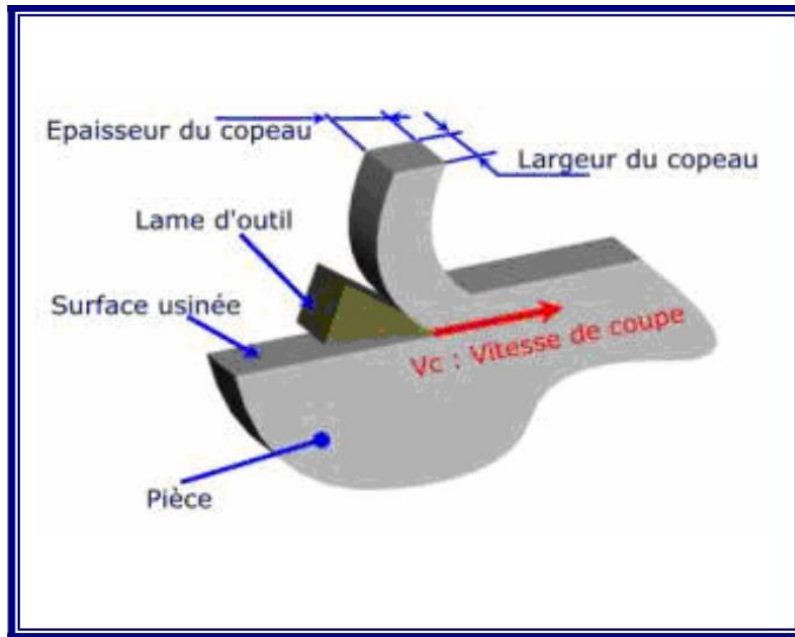


Figure III.2. Paramètres de coupe.

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, notamment :

- Le type de machine (tournage, fraisage, perçage) ;
- La puissance de la machine ;
- La matière usinée (acier, aluminium) ;
- La matière de l'outil (ARS, carbure) ;
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfacage).

L'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut

Déterminer certains paramètres spécifiques :

- La vitesse de coupe : V_c .
- La vitesse d'avance : F .
- La profondeur de passe : a_p .

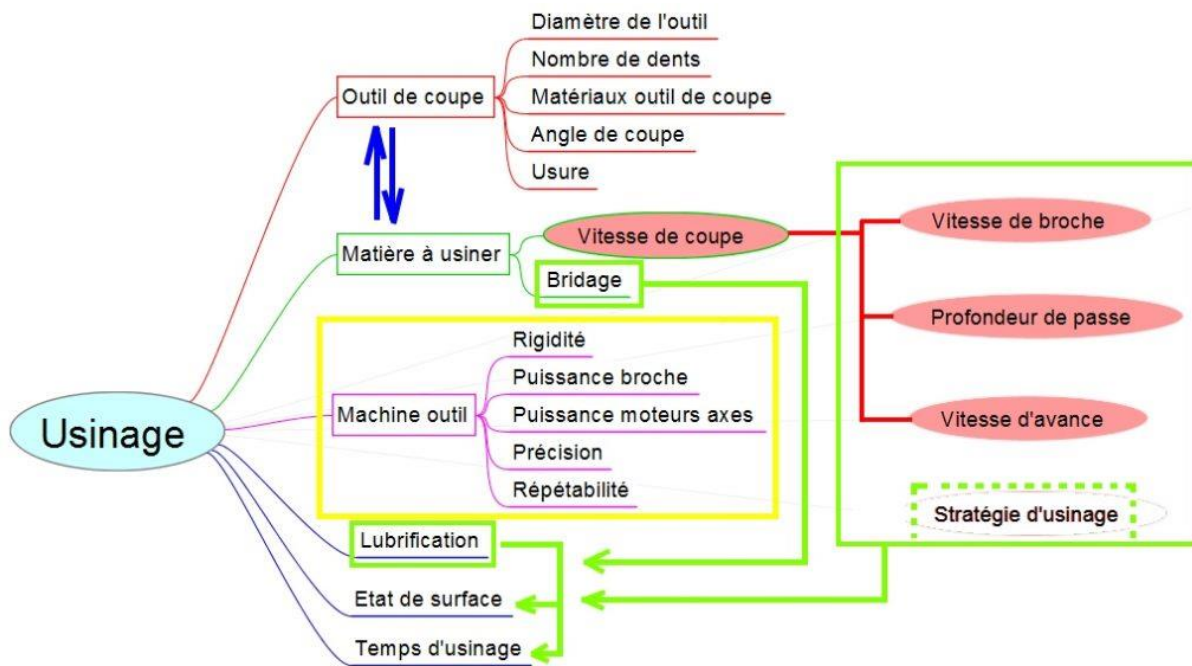


Figure III.3. Principe de choix les paramètres de coupe. [34]

III.3. La vitesse de coupe : V_c [m/min]

La vitesse de coupe ou « VC », est le chemin circonférentiel (ou périmètre) parcouru par un point extrême de l'arête tranchante d'une dent, c'est-à-dire par un point pris dans la région correspondant au plus grand diamètre de la fraise. On l'exprime en mètres par minute ou encore m/min.

C'est, en somme, la longueur du copeau en mètres pendant l'unité de temps : la minute.

Un point sur une fraise de diamètre « d » en mm parcourant un tour, effectue une distance de $\pi \times d$. en mm. Si elle tourne à « N » en tr/min, en une minute nous aurons $\pi \times d \times N =$ sa vitesse de coupe VC, en mm par min. Pour avoir des m/min : il suffit de diviser par 1000

En résumé, nous aurons

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000}$$

Dans tout problème d'usinage, il est nécessaire pour des raisons technologiques et économiques de déterminer la valeur de V_c la mieux adaptée au travail à réaliser.

Ces valeurs ont été déterminées expérimentalement par des laboratoires spécialisés dans les essais de coupe.

La vitesse de coupe est fonction de plusieurs variables dont les principales sont :

- La nature du métal constituant la pièce : aluminium, bronze, fonte, acier carbone, acier allié, etc. ;
- La durée de l'outil entre deux affûtages ;
- La nature du métal constituant l'outil : HSS, HSSC, carbure revêtu ou pas, etc. ;
- Le mode de travail de l'outil, pour un outil de rabotage travaillant dans les mêmes conditions, on choisira une valeur de V_c plus faible pour limiter les effets néfastes du choc à chaque passe.
- La lubrification ;
- La section du copeau (élément modifiable selon qu'il soit question d'un travail d'ébauche ou de finition) , ($S \text{ mm}^2 = f \text{ mm} \times a \text{ mm}$).

a : profondeur de passe ;

f : avance.

Nous devons savoir que tout comme lorsque nous nous frottons les mains énergiquement, notre outil va s'échauffer au frottement avec la pièce à usiner.

Plus la matière est dure, plus nous aurons des efforts et plus nous aurons d'échauffement.

Plus l'outil est dur et plus il va résister à cet échauffement.

Certains fabricants d'outils ont élaboré des outils avec des recouvrements qui ont comme propriété de faciliter le frottement → de diminuer les efforts → de diminuer l'échauffement.

Les paramètres de coupe dépendent de la durée de vie souhaitée pour l'arête de coupe de notre outil.

En résumé, nous ne devons pas calculer la VC mais connaître les paramètres qui nous permettent de faire le BON CHOIX dans des notices ou catalogues de fabricants d'outils.

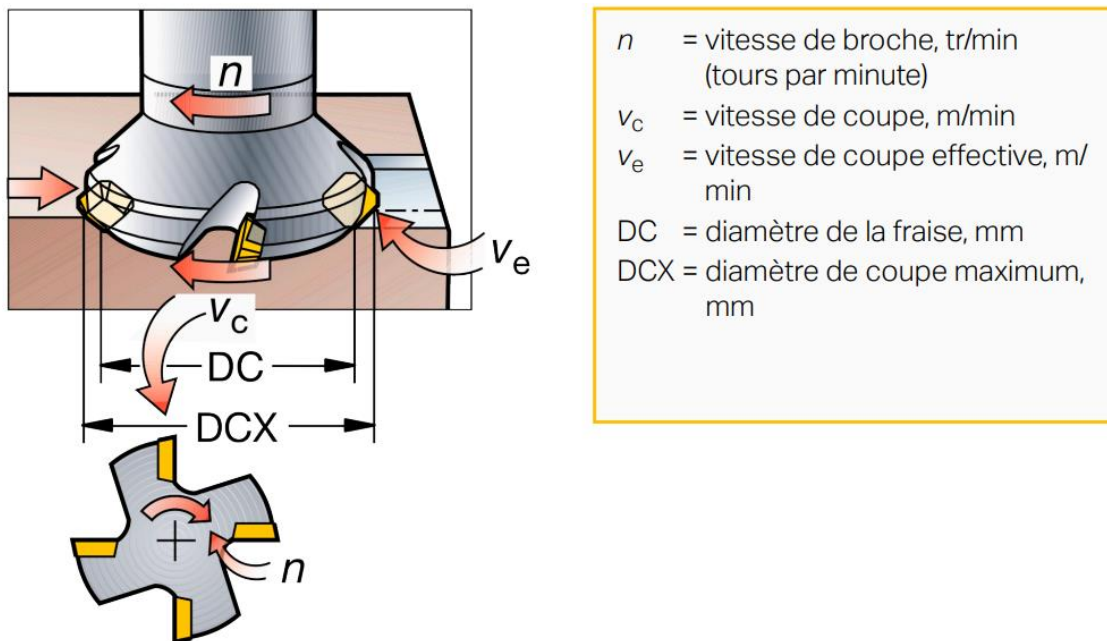
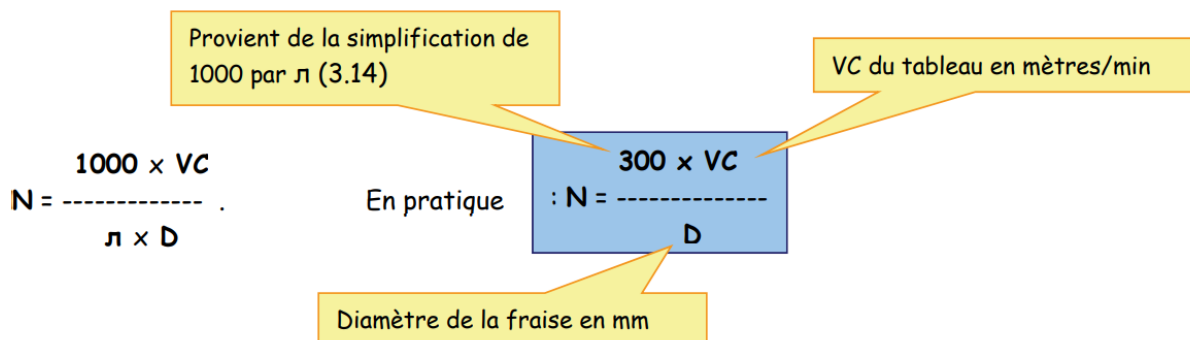


Figure III.4. Vitesse de coupe. [35]

III.3.1. Calcul de la vitesse de rotation

VC m/min est donc une donnée, il faut calculer la vitesse de rotation N min-1



Avec arrosage abondant, augmenter les vitesses ainsi obtenues de 25 %.

Lubrification : huile soluble ou huile de coupe.

Nature du métal de la pièce	Nature du métal de l'outil			Carbure métallique
	Acier rapide			
	Ordinaire	Supérieur	Extra	
Acier dur 85kg/mm ² Rt	6 m/min	9 m/min	12 m/min	80 m/min
Acier $\frac{1}{2}$ -dur 65kg/mm ² Rt	10 m/min	13 m/min	16 m/min	120 m/min
Acier doux 45kg/mm ² Rt	16 m/min	19 m/min	22 m/min	150 m/min
Fonte mécanique	13 m/min	16 m/min	18 m/min	80 m/min
Bronze	20 m/min	26 m/min	32 m/min	200 m/min
Laiton	26 m/min	32 m/min	38 m/min	250 m/min
Alliages d'aluminium	50 m/min	65 m/min	75 m/min	400 m/min

Tableau III.1. Vitesse de coupe économique de base V_c en mètres/minute (surfacing)

Le tableau ci-contre indique la valeur des vitesses de coupe économique V_C en m/minute relatives aux conditions types d'usinage suivantes : travail à sec, avec fraise à denture taillée renforcée, largeur de coupe = 50 mm, avance par dent à 0,05 mm.

Selon le travail ou le genre d'outil :

Sur la croûte des pièces, réduire ces vitesses de $\frac{1}{2}$

Avec fraises de forme ou délicates, réduire ces vitesses de $\frac{1}{4}$

Avec fraises à outils rapportés, les augmenter de $\frac{1}{4}$

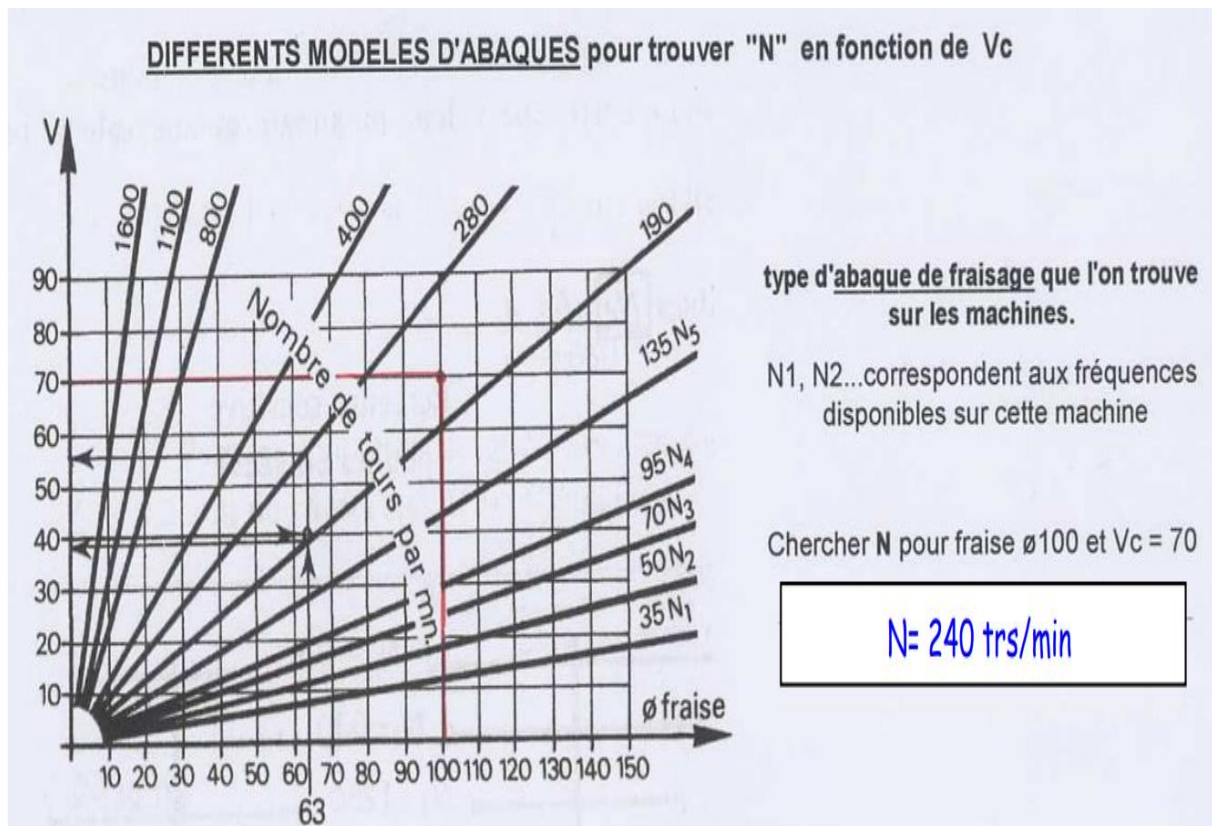


Figure III.5. Modèle d'abaque pour trouver « N » en fonction de Vc. [36]

III.4. La vitesse d'avance (Vf en mm/min) : (figure III.6)

C'est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table. [37]

L'avance instantanée radiale (Δ_{er}) (Figure III.1) varie de 0 à l'avance par dent, f . Ce paramètre correspond à la différence de déplacement radial de l'outil entre le passage pour une même position angulaire de deux arêtes de coupe successives. (Albert archive)

La vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de l'outil. Cette vitesse dépend de l'avance par dent f , du nombre de dent Z et de la fréquence de rotation N .

$$Vf = f_z \times Z \times N$$

- n vitesse de broche (tr/min)
- V_c vitesse de coupe (m/min)
- D diamètre de l'outil (m)
- V_f avance par minute (mm/min)
- f avance par tour (mm/tr)
- f_z avance par dent (mm/dent)

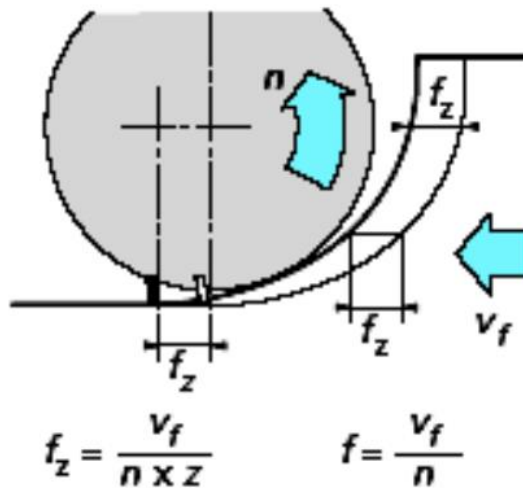


Figure III.6. Vitesse d'avance.

III.5. L'avance par dent (f_z en mm/dent) : (figure III.7)

Est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes. La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée. L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil (Z) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour.

$$f_z = \frac{V_f}{n \times Z}$$

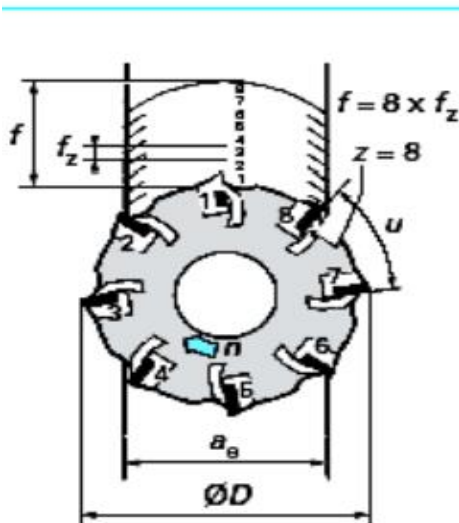


Figure III.7. Avance par dent et avance par tour.

Z	nombre d'arêtes de l'outil
f	avance par tour (mm / tr)
f_z	avance par dent (mm / dent)
a_e	largeur de coupe (mm)
u	pas de la fraise
f_z	est un facteur capital en fraisage, décisif pour le taux d'enlèvement de métal par arête, la charge par arête, la durée de vie et, dans une certaine mesure, la structure de surface.

III.6. La profondeur de coupe axiale (a_p) :

Est profondeur axiale engagée dans la matière. Correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce.

La profondeur de passe a_p dépend de la surépaisseur à usiner, ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition). Elle tend à diminuer les exigences dimensionnelles, géométriques et d'état de surface deviennent plus rigoureuses. Elle ne doit pas être cependant inférieure au copeau minimum. La valeur maximale de a_p est limitée par la rigidité de l'outil et la puissance de la machine.

La profondeur de passe associée à l'avance influence la formation du copeau car elle modifie la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière.

- **En surfacage :**

$$a_p \text{ maxi} = 0.1 \times \Phi \text{ fraise}$$

- **En contournage :**

- Ebauche (denture ravageuse) :

$$a_p \text{ maxi} = 0.6 \times \Phi \text{ fraise}$$

A condition que l'engagement latéral soit $< 0.5 \times \Phi \text{ fraise}$. [38]

- Finition (denture lisse) :

$$a_p \text{ maxi} = 1 \times \Phi \text{ fraise}$$

A condition que l'engagement latéral soit $< 0.15 \times \Phi \text{ fraise}$

- **En rainurage :**

- Ebauche (denture ravageuse) :

$$a_p \text{ maxi} = 0.6 \times \Phi \text{ fraise}$$

- Finition (denture lisse) :

$$a_p \text{ maxi} = 0.3 \times \Phi \text{ fraise}$$

Remarque :

Les valeurs données sont des valeurs MAXI pour un serrage optimum. Si le serrage est sur une faible hauteur il faut diviser les valeurs par 2

III.7. La largeur de coupe ou profondeur de coupe radiale (a_e) :

Est la largeur couverte par le diamètre de la fraise sur la pièce. Il s'agit de la largeur de la surface usinée, ou, si le diamètre de l'outil est plus petit, de la surface couverte par l'outil.

Est la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce (figure III.8.).

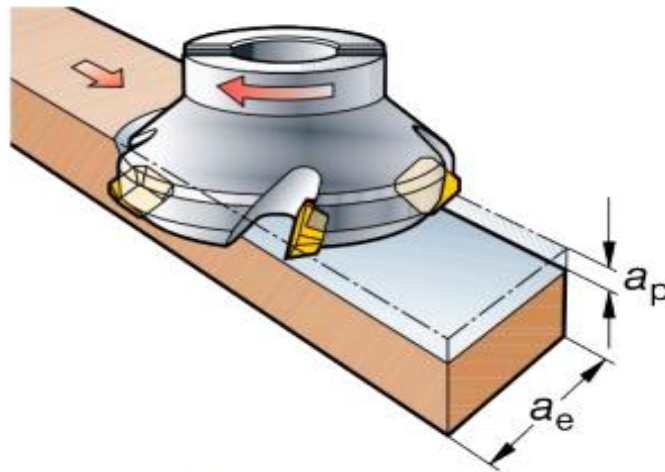


Figure III.8. Profondeur de coupe radiale (a_e) et Profondeur de coupe axiale (a_p).

III.8. Diamètre et position de la fraise :

Le choix du diamètre de la fraise se fait, en général, en fonction de la largeur de la pièce et de la puissance de la machine.

La position de la fraise par rapport à l'engagement sur la pièce et le contact des dents sont des paramètres essentiels pour la réussite de l'opération.

- Le diamètre de fraise doit être supérieur de 20 à 40% à la largeur de coupe.
- Règle des 2/3 (ex. fraise de 150 mm)
 - 2/3 en coupe (100 mm)
 - 1/3 hors de coupe (50 mm).
- En décalant la fraise par rapport au centre, on obtient une direction des forces de coupe plus régulière et favorable.

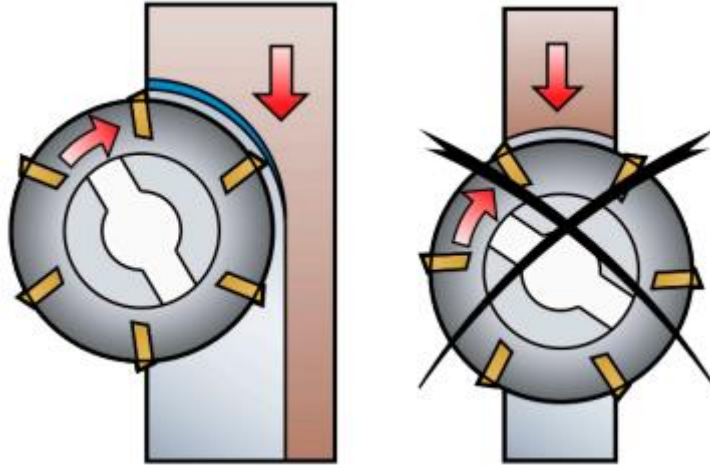
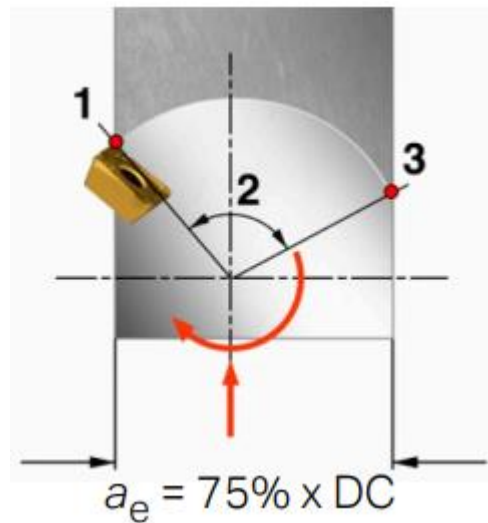


Figure III.9. Position de la fraise.

Dans le sens radial, les arêtes de coupe s'engagent dans la matière en trois phases :

1. Entrée en coupe
2. Arc d'engagement en coupe
3. Sortie de coupe

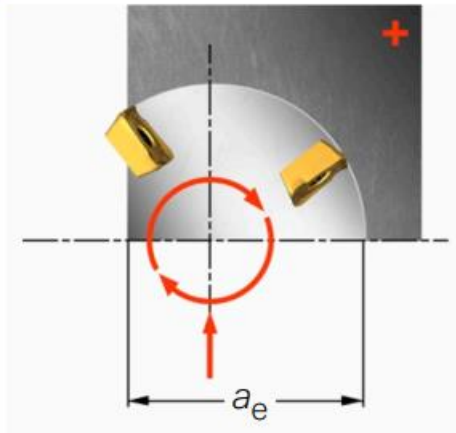


DC = Diamètre de la fraise

a_e = Engagement en coupe

$$a_e = 75\% \times DC$$

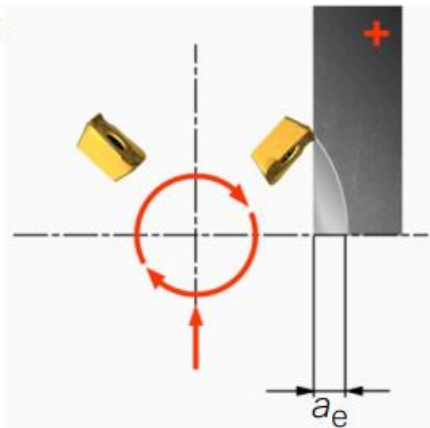
Figure III.10. Engagement en coupe.



L'axe de la fraise est situé à l'intérieur de la largeur de

La pièce, $a_e > 75\%$ de DC.

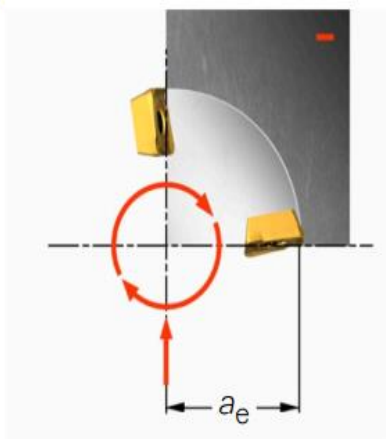
- Conditions de coupe les plus favorables et Utilisation optimale du diamètre de la fraise.
- L'impact initial de l'entrée en coupe est Transmis le long des arêtes de coupe et S'éloigne de la pointe sensible.
- Les plaquettes sortent de coupe progressivement.



L'axe de la fraise est situé en dehors de la largeur

De la pièce, $a_e < 25\%$ de DC.


- L'angle d'attaque est positif
- L'impact en entrée est supporté par le bord Extérieur des plaquettes et la charge est Progressivement absorbée par l'outil.




L'axe de la fraise est situé sur le bord de la pièce,

$a_e = 50\%$ de DC.

- Déconseillé.
- L'impact et la charge sont très élevés en entrée Sur l'arête.

 = Position de fraise recommandée.

 = Position de fraise déconseillée.

Fraisage en bout (surfaçage)													
		Fraises ARS						Plaquettes Carbure					
		Ebauche			Finition			Ebauche			Finition		
Matières	Rr MPa	γ	V60 m/min	a max mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)	γ	V60 m/min	a max mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)
Acier S235	500	20°	29	2	0.11	40	>0.06	20°	100	2	0.2	120	>0.07
Acier INOX	500	20°	18	2	0.08	22	>0.05	15°	72	2	0.15	92	>0.07
Acier 35CD4	1100	12°	20	2	0.06	25	>0.04	12°	80	2	0.12	90	>0.07
PVC	60	20°	200	4	0.2	300	>0.50	20°	800	4	0.30	1000	>0.07
Nylon PA6	80	20°	100	2	0.15	200	>0.20	20°	400	2	0.35	500	>0.07
Plexi PMMA	78	0°	60	2	0.15	80	>0.20						
Laiton UZ30	400		72	1	0.09	95	>0.07		130	2	0.5	180	>0.16
Bronze UE12P	200		23	1	0.07	31	>0.06		60	2	0.2	82	>0.16
Dural AU4G	280	20°	150	1	0.07	190	>0.06	20°	500	3	0.1	800	>0.08

Tableau III.2. Les conditions de coupe pour les opérations de fraisage en bout.

Perçage, Alésage													
		Forets et alésoirs A.R.S.									Tarauds A.R.S.		
		Perçage						Alésage					
Matières	Rr MPa	γ	V60 m/min	angle pointe	angle hélice	$\phi < 10$ f mm/tr	$\phi > 10$ f mm/tr	V60 m/min	a mm	$\phi < 20$ f mm/tr	V60 m/min	Lubrifiant	
Acier S235	500	25°	25	135°	30°	0.025 ϕ	>0.05	12.5	>0.20	0.3	12	Huile de coupe	
Acier INOX	500	25°	20	120°	30°	0.02 ϕ	>0.04	8	>0.20	0.15	6	Huile soluble	
Acier 35CD4	1100	25°	22	120°	30°	0.012 ϕ	>0.03	9	>0.20	0.17	10	Huile de coupe	
PVC	60		60	135°	30°	0.02 ϕ		non	non	non	15	Air comprimé	
Nylon PA6	80	0°	30	100°	30°	0.02 ϕ		non	non	non	15	Air comprimé	
Plexi PMMA	78	0°	40	140°	30°	0.02 ϕ		non	non	non	10	Air comprimé	
Laiton UZ30	400	18°	45	120°	15°	0.03 ϕ	>0.03	30	>0.20	0.4	13	à sec	
Bronze UE12P	200	10°	20	120°	30°	0.037 ϕ	>0.03	12	>0.20	0.9	7	Huile de coupe	
Dural AU4G	280	35°	65	140°	30°	0.032 ϕ	>0.06	30	>0.20	0.4	18	Pétrole	

Tableau III.3. Les conditions de coupe pour les opérations de perçage et Alésage.

III.9. L'épaisseur moyenne de copeau (hm) :

Dans le cas des opérations de tournage continu, l'épaisseur de copeau reste inchangée. En fraisage, toutefois, l'épaisseur des copeaux change continuellement à mesure que l'arête de coupe rentre et ressort de la matière usiner. [39]

Afin de simplifier la compréhension de l'épaisseur de copeau en fraisage, des chercheurs en usinage ont élaboré il y a environ 40 ans le concept d'épaisseur moyenne de copeau. La formule de ce concept crée mathématiquement un copeau théorique d'une épaisseur moyenne constante. Le modèle d'épaisseur moyenne de copeau a permis de mieux comprendre et contrôler le processus de fraisage.

L'épaisseur moyenne de copeau (hm) d'un outil de coupe varie en fonction de la charge physique et se définit à partir de l'avance par dent et de l'arc de contact programmés. Cette épaisseur évolue tout au long du processus de coupe, nous utilisons donc le terme d'épaisseur moyenne de copeau (hm). [40]

Pour déterminer l'épaisseur moyenne de copeau, il convient de tenir compte de l'engagement radial de la fraise dans la matière à usiner, de la géométrie et de l'angle de l'arête de coupe, ainsi que de l'avance. En modifiant l'avance, le fraiseur peut agir sur l'épaisseur de copeau.

Le degré d'engagement radial de la fraise dans la matière à usiner peut aller d'un faible pourcentage de son diamètre à 100 % de celui-ci dans une opération de rainurage. Un faible engagement radial produit des copeaux plus fins. À mesure que l'engagement radial augmente, l'épaisseur du copeau atteint son maximum à 50 % du diamètre de fraise. Au-dessus de 50 %, les copeaux recommencent à s'affiner.

La préparation de l'arête de coupe influe également sur l'épaisseur de copeau. En règle générale, l'épaisseur de copeau doit au minimum être égale au rayon de l'arête de coupe.

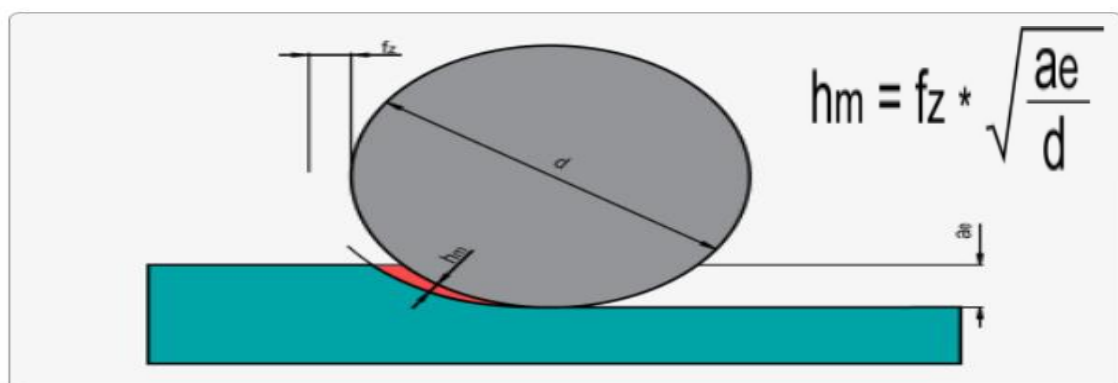


Figure III.11. Épaisseur moyenne de copeau pour fraisage de profils.[41]

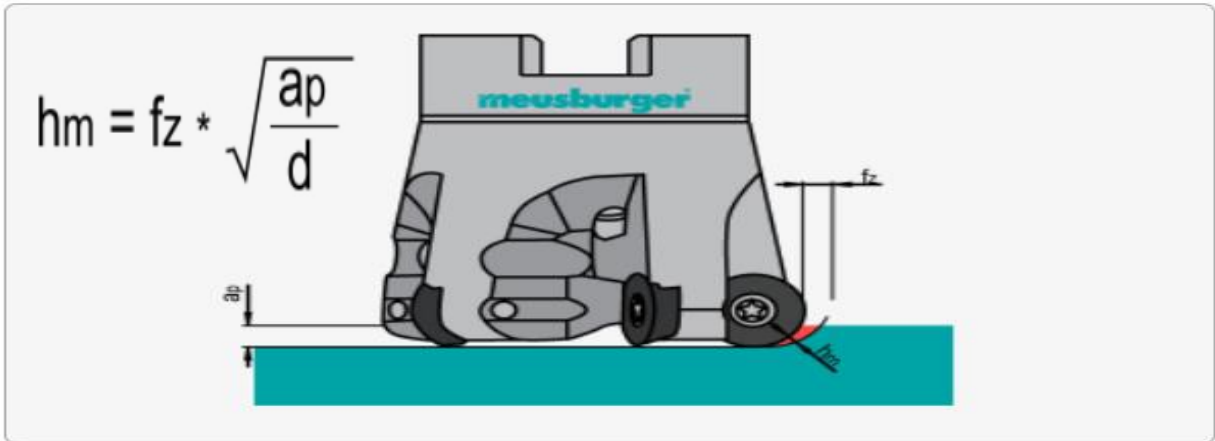


Figure III.12. Épaisseur moyenne de copeau pour fraises à plaquettes rondes.

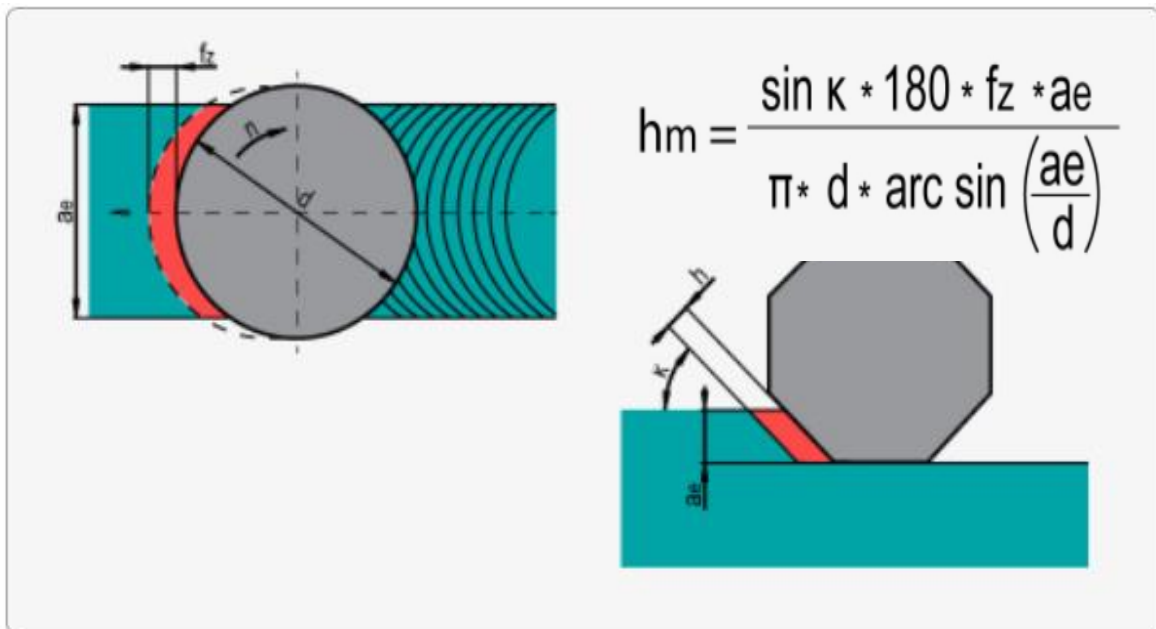


Figure III.13. Épaisseur moyenne de copeau pour le surfacage en bout.

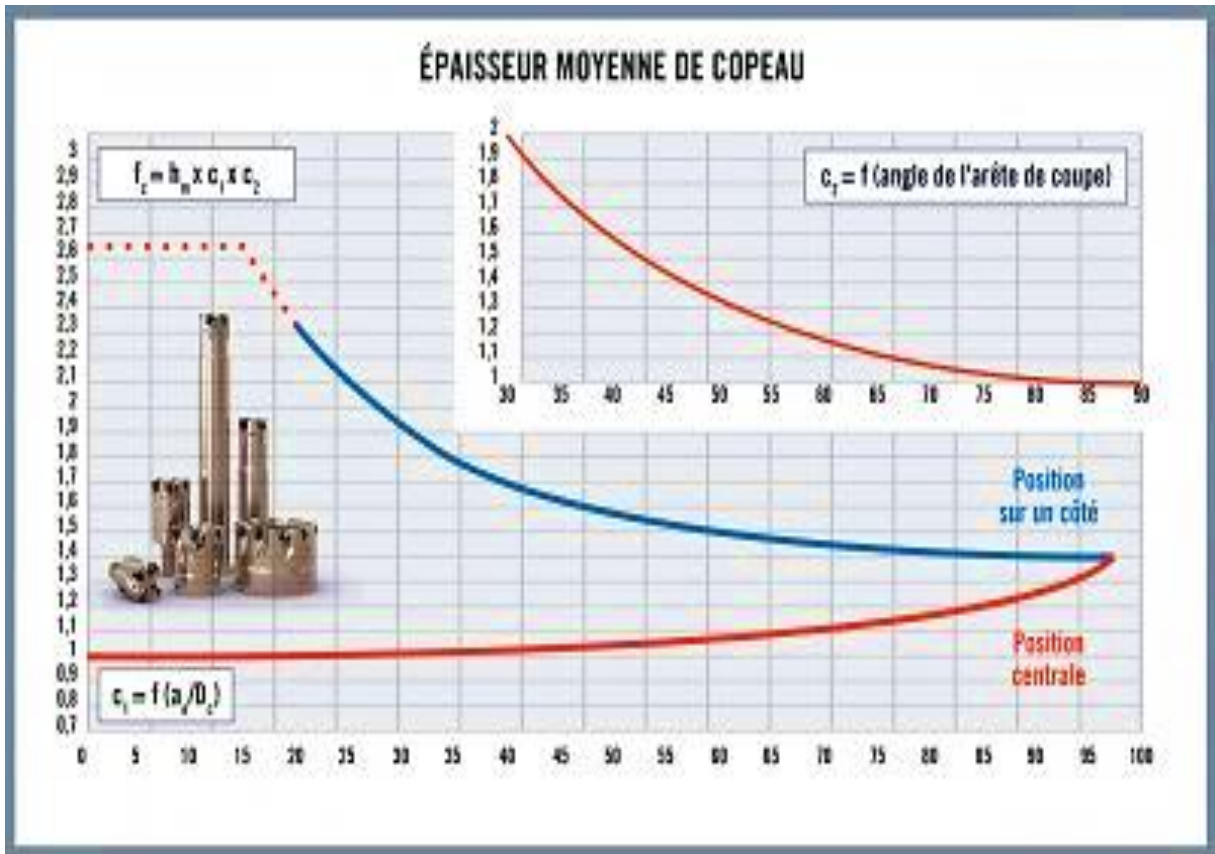


Figure III.14. Épaisseur de copeau moyenne.

III.10. La surface du copeau A (mm²) :

C'est la surface de matière enlevée à chaque passage de dent, ce qui correspond à la largeur de coupe multipliée par l'avance par dent : [42]

$$A = a_p \cdot f_z$$

Avec

$$f_z = \frac{f}{z}$$

III.11. Le volume de matière enlevée par unité de temps (Q) :

Le volume de matière enlevée, également appelé le taux d'enlèvement de matière, est la mesure de la quantité de matière retirée d'une pièce sur une période donnée. Chaque magasin a pour objectif de créer plus de pièces dans un délai plus court ou de maximiser les revenus tout en minimisant les dépenses. L'un des premiers endroits où ces machinistes se tournent est le (Q), qui comprend la profondeur de coupe radiale (a_e), la profondeur de coupe axiale (a_p) et l'avance par minute (V_f). Si vous souhaitez augmenter l'efficacité de votre magasin, augmenter votre Q, même de manière minimale, peut générer de gros gains. [43]

$$Q = a_e \times a_p \times v_f$$

La stratégie de profondeur de coupe des machinistes est directement liée au taux d'enlèvement de matière. L'utilisation de la combinaison appropriée de (ae) et de (ap) peut augmenter les taux de (Q) , réduire les minutes de temps de cycle et ouvrir la porte à une plus grande production. L'utilisation de la bonne approche pour votre outil peut également prolonger la durée de vie de l'outil et réduire l'usure normale de l'outil. En combinant le débit idéal avec votre (ap) et votre (ae) pour fonctionner à l'endroit idéal de votre outil, vous pouvez générer des dividendes immédiats et à long terme pour les ateliers d'usinage.

III.12. Effort de coupe :

L'étude et l'approximation des efforts de coupe sont nécessaires pour choisir les outils et dimensionner le porte-pièce ; leurs directions permettent de déterminer le sens de déplacement des outils afin que les appuis du montage s'opposent à ces efforts. [44]

La direction de la résultante des forces est variable en intensité et en orientation puisque les dents de la fraise tournent.

On peut faire une approximation du point d'application de cette force à la moitié du segment d'enlèvement de copeau.

Les forces varient suivant l'épaisseur du copeau, le choc d'engagement, la pression spécifique de coupe, etc. et génèrent des vibrations.

Cependant l'étude des efforts permet de réaliser un bridage efficace. [45]

La situation des efforts pour une dent en prise est identique à celle du tournage. L'effort tangentiel de coupe s'exprime de la même façon. La valeur du coefficient K_c dépend également de l'épaisseur du copeau. Ce paramètre étant variable, comme le montre la figure, la démarche de recherche de ce coefficient nécessite de déterminer une épaisseur moyenne de copeau, h_m

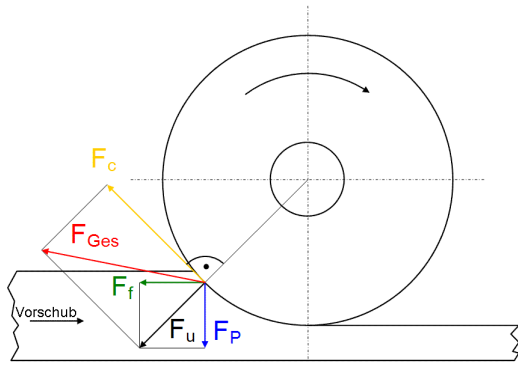


Figure III.15. Forces lors d'un fraisage

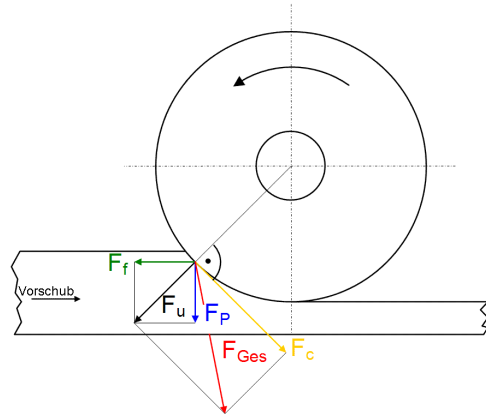


Figure III.16. Forces lors d'un fraisage

en opposition.

en avalant.

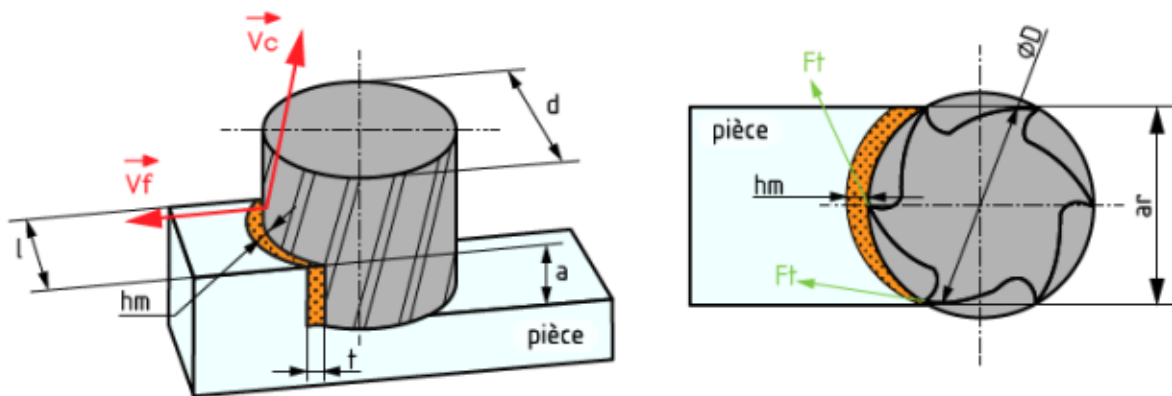


Figure III.17. Les efforts de coupe en fraisage.

L'effort de coupe F_t exercé par la pièce sur l'outil admet trois composantes :

F_c : effort tangentiel de coupe dû au mouvement de coupe.

F_f : effort tangentiel d'avancement dû au mouvement d'avance.

F_p : effort radial dû à la profondeur de passe.

La composante la plus importante est F_c .

Cet effort s'exprime par la relation :

$$F_c = K_c \cdot a \cdot f$$

\swarrow \nwarrow \swarrow \nwarrow
 daN daN/mm² mm mm/tr

K_c : pression spécifique de coupe fonction de l'épaisseur du copeau (h) et du matériau usiné.

a : valeur de la profondeur de passe.

f : valeur de l'avance.

III.13. La puissance de coupe :

On distingue généralement deux puissances :

- La puissance de coupe (P_c) qui dépend principalement de la vitesse de coupe (V_c) et de l'effort tangentiel de coupe (F_c).
- La puissance au moteur (P_m), absorbée par la machine. Elle est fonction du rendement η de la chaîne cinématique : $P_m = P_c/\eta$. Elle varie également en fonction de l'angle de coupe et de la direction de l'arête.

En fraisage, la puissance nécessaire à la coupe est sensiblement proportionnelle au débit de matière enlevée :

$$P = K * Q$$

Avec K un coefficient déterminé expérimentalement (donné dans le tableau) et le débit de copeau Q exprimé en mm^3/min .

Suivant les données disponibles pour le calcul du débit, on a plusieurs expressions pour calculer la puissance :

$$P = K * l * p * f * z * N$$

$$P = (K * l * p * f * z * v * 10^3)/(\pi * d)$$

$$P = K * l * p * A$$

l La représente la largeur de coupe, Z le nombre de dents, N est la fréquence de rotation [tour/min] et $A = f.z.N$ la vitesse d'avance [mm/tour/min] de la fraise.

III.14. Le temps d'usinage :

Le temps d'usinage est un terme utilisé pour décrire le temps qu'une machine passe réellement à couper, fraiser ou modifier d'une autre manière une pièce à usiner. Cela fait partie de ce qu'on appelle le temps de cycle de la machine, c'est-à-dire le temps total nécessaire pour charger et décharger un morceau de matériau, ainsi que le temps nécessaire pour couper réellement ce matériau. Le temps d'usinage peut être calculé automatiquement sur de nombreuses machines à commande numérique, ou à commande numérique, afin d'améliorer l'efficacité de la fabrication et le coût par coupe. [46]

Le temps de traitement est un autre terme qui est synonyme de temps d'usinage. Ce calcul ne mesure que les cas où le trépan ou l'instrument de coupe d'une machine effectue des coupes ou enlève de toute autre manière des matières dans une pièce. Si, par exemple, une planche doit être coupée sur une scie circulaire à table, le temps d'usinage correspond aux cas collectifs dans lesquels la lame enlève réellement du matériau; cela signifie que la lame est en mouvement et coupe activement le matériau à traiter. De nombreuses machines, telles que les tours à commande numérique, présenteront un temps de fonctionnement supplémentaire, ce qui est le cas dans lequel la machine est active et le matériau se trouve sur la surface de travail, mais aucune coupe ni aucun matériau ne sont enlevés. Un exemple d'un tel exemple serait lorsque le trépan est déplacé vers un nouvel emplacement par rapport au matériau en vue d'une nouvelle coupe.

Une entreprise peut essayer de calculer le temps d'usinage de différentes machines d'un atelier pour déterminer où la productivité a ralenti et comment l'améliorer. Par exemple, une machine dont le temps d'usinage est lent peut être mise à niveau ou remplacée par un outil plus efficace, capable de réaliser le même travail en moins de temps. Certains types de machines peuvent combiner des fonctions pour éliminer le chargement et le déchargement, améliorant ainsi l'efficacité du processus d'usinage. Les entreprises peuvent également utiliser ce calcul pour déterminer le coût global du produit fini; cela peut faire partie d'une formule qui inclut le coût des matières premières, le temps d'usinage, les coûts d'emballage, les coûts de transport, etc.

Une autre raison importante pour déterminer le temps passé à usiner est d'éviter d'endommager les machines elles-mêmes et de savoir quand une maintenance peut être nécessaire. Un fabricant peut recommander un programme de maintenance basé sur le temps d'utilisation de la machine. Il peut également être nécessaire de remplacer les bits après une certaine utilisation.

L'expression du modèle de temps d'usinage unitaire :

$$T_u = T_{cr} + T_{cf} + \frac{R}{v_t} + t_L + \frac{t_s}{N_L} + \frac{t_{cr} \times t_e}{t_{or}} + \frac{t_{cf} \times t_e}{t_{of}}$$

Comme nous modélisons une opération de fraisage en bout, il faut étendre encore l'expression du modèle. Nous allons donc ajouter la largeur de passe radiale afin d'avoir un modèle général convenable pour le fraisage en bout :

$$t_o = \frac{k}{V_c^\alpha f^\beta a_p^r w^\lambda}$$

k, α, β, r et λ .Sont des constantes. Il y a deux équations en réalité, une pour l' ébauche et une Pour la finition, soit t_{or} et t_{of} :

$$t_{or} = \frac{k}{V_{Cr}^{\alpha} f_r^{\beta} a_{pr}^r w_r^{\lambda}}$$

$$t_{of} = \frac{k}{V_{Cf}^{\alpha} f_f^{\beta} a_{pf}^r w_f^{\lambda}}$$

Les temps de coupe se calculent ainsi :

$$t_{cr} = \frac{LWH - (W - w_f)L a_p - HLw_f}{w_r a_{pr} v_{fr}}$$

$$t_{cf} = \frac{WL}{D_f v_{ff}}$$

$$T_u = \frac{LWH - (W - w_f)L a_p - HLw_f}{w_r a_{pr} v_{fr}} + \frac{WL}{D_f v_{ff}} + \frac{R}{v_t} + t_L + \frac{t_s}{N_L} + \frac{LWH - (W - w_f)L a_p - HLw_f}{w_r a_{pr} v_{fr}} \\ \times \frac{t_e}{\left(\frac{k}{V_{Cr}^{\alpha} f_r^{\beta} a_{pr}^r w_r^{\lambda}} \right)} + \frac{WL}{D_f v_{ff}} \times \frac{t_e}{\left(\frac{k}{V_{Cf}^{\alpha} f_f^{\beta} a_{pf}^r w_f^{\lambda}} \right)}$$

t_e : Durée de vie d'un outil avant aiguisage (Taylor) (min)

t_{cr}, t_{cf} : Temps de coupe, ébauche et finition (min/unité)

t_e : Temps pour changer un outil émoussé (min)

t_L : Temps pour charger et enlever une pièce (min)

t_s : Temps de mise en course pour l'opération (min)

T_u : Temps d'usinage unitaire (min)

v_{fr}, v_{ff} : Vitesse d'avance (en unité de temps) (mm/min)

H : Hauteur du volume à usiner (mm)

L : Longueur du volume à usiner (mm)

R : Distance à parcourir en avance rapide, par opération (mm)

v_t : Vitesse d'avance rapide (mm/min)

w_r, w_f Largeur de la passe (mm)

W : Largeur du volume à usiner (mm)

N_L : Nombre de pièces par lot (entier). [47]

CHAPITRE IV:
L'optimisation des paramètres
de coupe

IV.1. Introduction:

L'optimisation est la discipline permettant de déterminer analytiquement ou numériquement la meilleure solution à un problème, au sens d'un certain critère. Elle est fondamentale dans la résolution de nombreux problèmes liés à l'industrie, à l'économie ou à la science de la physique, en vue d'obtenir un gain d'effort ou de temps.

La qualité de la solution obtenue dépend généralement du modèle utilisé pour représenter le problème réel et de la méthode de résolution adoptée. Le développement des modèles théoriques et des techniques traitant des problèmes d'optimisation a connu une accélération spectaculaire.

IV.2. Definition:

L'optimisation c'est l'art de comprendre un problème réel, de pouvoir le transformer en un modèle mathématique que l'on peut étudier afin d'en extraire les propriétés structurelles et de caractériser les solutions du problème. Enfin, c'est l'art d'exploiter cette caractérisation afin de déterminer des algorithmes qui les calculent mais aussi de mettre en évidence les limites sur l'efficience et l'efficacité de ces algorithmes.

IV.2.1. Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation ?

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum donc) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

Ce besoin d'optimisation vient de la nécessité de l'ingénieur de fournir à l'utilisateur un système qui réponde au mieux au cahier des charges. Ce système devra être calibré de manière à:

- Occuper le volume minimum nécessaire à son bon fonctionnement (coût des matières premières).
- Consommer le minimum d'énergie (coût de fonctionnement),
- Répondre à la demande de l'utilisateur (cahier des charges).

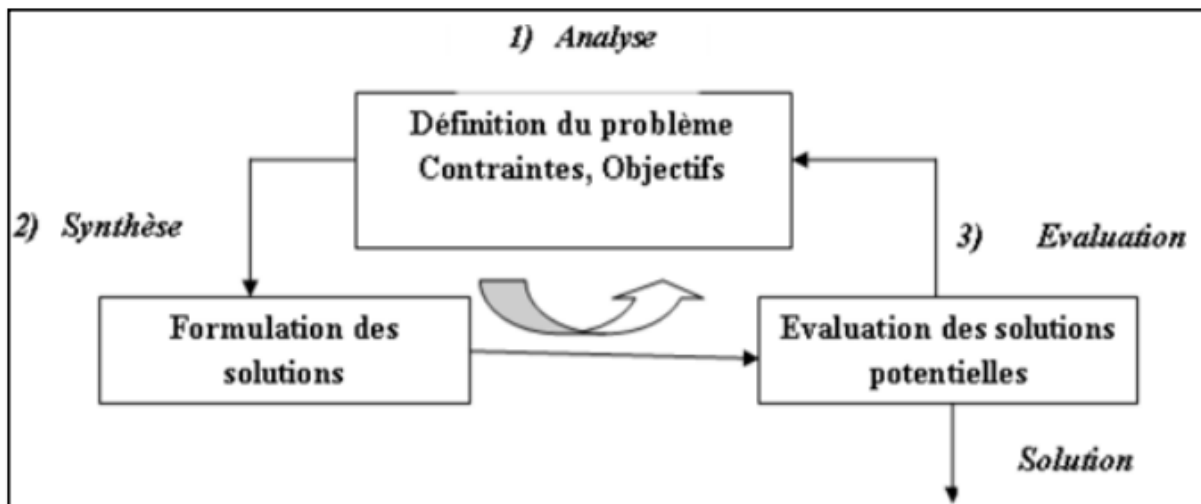


Figure IV.1. Processus D'optimisation Selon Asimow.

La figure IV.1, présente les trois étapes du processus d'optimisation : analyse, synthèse et évaluation. Tout d'abord, il convient d'analyser le problème et d'opérer un certain nombre de choix préalables :

- Variable du problème quels sont les paramètres intéressants à faire varier?
- Espace de recherche dans quelles limites faire varier ces paramètres?
- Fonction objectives quels sont les objectifs à atteindre?
- Méthode d'optimisation quelle méthode choisir?

Une fois effectuée ces différents choix, la méthode choisie synthétise des solutions potentielles qui sont évaluées, puis éliminées jusqu'à obtention d'une solution acceptable. Si nécessaire, le problème peut être redéfini à partir des solutions déjà obtenues.

IV.2.2. Variables du problème :

Les variables peuvent être de natures diverses. Par exemple, pour une opération d'usinage il peut s'agir de la matière à usiner, les conditions de coupe, etc. C'est à l'utilisateur de définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres afin d'augmenter les degrés de liberté de l'algorithme.

IV.2.3. Espace de recherche :

Dans certains algorithmes d'optimisation, tels que les stratégies d'Evolution, l'espace de recherche est infini : seule la population initiale est confinée dans un espace fini. Mais dans le cas des algorithmes de type Monte Carlo et génétique, il est généralement nécessaire de définir un espace de recherche fini. Cette limitation de l'espace de recherche n'est généralement pas

problématique. En effet, ne serait-ce que pour des raisons technologiques ou informatique (taille de la fenêtre de modélisation), les intervalles de définition des variables sont en général limités. De plus, la plupart du temps on a au moins une idée des ordres de grandeur des variables du problème.

IV.2.4. Fonction objectif :

Les grandeurs à optimiser peuvent être par exemple une consommation, un rendement, un profit, un temps de production, un coût, une durée de vie d'un outil, etc....

Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles à partir des grandeurs à optimiser.

IV.2.5. L'ensemble de contraintes :

Définit des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité et permettent en général de limiter l'espace de recherche.

La séparation entre les fonctions objectives et les contraintes peuvent paraître artificielles car nous pourrions considérer qu'une contrainte est un objectif à atteindre. Mais elle se justifie de deux manières différentes : d'une part, les contraintes sont appliquées sur l'espace de recherche alors que les objectifs définissent l'espace de solutions ; D'autre part, dans de nombreuses méthodes les contraintes et les objectifs sont traités par des procédures différentes.

IV.3. Classification des problèmes d'optimisation:

Face à la résolution d'un problème d'optimisation, il est important de bien identifier à quelle catégorie ce problème appartient. En effet, les algorithmes développés sont conçus pour résoudre un type de problème donné et sont peu efficaces pour un type différent. La classification des problèmes d'optimisation change d'un auteur à l'autre. Par exemple, on distingue : [48]

IV.3.1. Les problèmes d'optimisation continue versus les problèmes d'optimisation discrète :

Dans certains cas, les variables de décision sont discrètes, le plus souvent sous la forme d'entiers ou de binaires. Le problème d'optimisation est dit discret. Au contraire, dans les problèmes d'optimisation continue, les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur, ce sont des réels.

Les problèmes d'optimisation continue sont généralement plus simples à résoudre. Un problème d'optimisations mêlant variables continues et variables discrètes est dit mixte.

IV.3.2. Les problèmes d'optimisation avec et sans contrainte :

Il est important de bien distinguer les problèmes où des contraintes existent sur les variables de décision. Ces contraintes peuvent être simplement des bornes et aller jusqu'à un ensemble d'équations de type égalité et de type inégalité. Il est parfois possible d'éliminer une contrainte égalité par substitution dans la fonction objective. Naturellement, les problèmes avec contraintes sont plus compliqués à résoudre et utilisent des algorithmes dédiés.

IV.3.3. Les problèmes d'optimisation mono-objective ou multi-objective :

Les problèmes mono-objectifs sont définis par une unique fonction objective. Les problèmes multi-objectifs existent quand un compromis est à rechercher entre plusieurs objectifs contradictoires. Il est éventuellement possible (mais pas nécessairement efficace) de reformuler un problème multi-objectif avec une seule fonction objectif sous forme d'une combinaison des différents objectifs ou en transformant des objectifs sous forme de contraintes.

IV.3.4. Les problèmes d'optimisation déterministe ou stochastique :

Les problèmes d'optimisation déterministe considèrent que les données sont connues parfaitement, alors que dans les problèmes d'optimisation stochastique, ce n'est pas le cas ; par exemple une approche stochastique peut être pertinente dans le cas où les variables d'un problème sont les ventes futures d'un produit. Dans ce cas, l'incertitude peut être introduite dans le modèle.

IV.4. Exemple d'optimisation des paramètres de coupe sur la rugosité de surface:

Par exemple d'optimisation des paramètres de coupe nous avons pris le travail de Fatima Khettabi de référence [42] qui est l'amélioration de la qualité de surface en optimisant les paramètres de coupe par la méthodologie de surface de réponse en fraisage à sec.

Les essais sont réalisés sur l'acier C45, en utilisant des outils de coupe en carbure métallique P25. L'objectif est d'optimiser les paramètres de coupe ainsi que l'analyse de la rugosité de surface (R_a), en utilisant la méthode de surface de réponse, qui a permis de présenter les modèles mathématiques de la rugosité. L'effet des interactions sur le critère de rugosité a été étudié à l'aide d'un traitement statistique basé sur l'analyse de la variance (ANOVA). Les résultats expérimentaux obtenus dans le tableau suivant :

	N° Essai	Vc (m/mn)	fz (mm/dent)	ap (mm)	Ra (μm)
Ebauchage	1	100	0,3	3	0,31
	2	100	0,3	4	2,43
	3	100	0,4	3	0,65
	4	150	0,3	3	0,82
Finition	5	180	0,1	0,25	0,43
	6	180	0,1	0,5	0,26
	7	180	0,15	0,5	0,36
	8	200	0,1	0,5	0,33

Tableau IV .1. Plan d'expérience du critère de rugosité.

La relation entre les conditions de coupe et les paramètres technologiques d'usinage obtenue par la méthode de surface de réponse est donnée par l'équation suivante :

$$Y = f(Vc, fz, ap)$$

Y est la réponse désirée et f, la fonction de réponse.

L'approximation de Y est proposée à l'aide d'un modèle mathématique non linéaire, qui convient pour l'étude des effets des interactions des paramètres de régime de coupe sur les caractéristiques d'usinabilité. Dans le présent travail, le modèle mathématique linéaire avec interaction basée sur MSR est donné par l'équation :

$$a_1 Y = a_0 + a_1 Vc + a_2 fz + a_3 ap + \dots \times ap$$

Y est la réponse désirée de la rugosité de surface(Ra) et a0, a1, a2, a3, a12 et a13, a23, sont les coefficients de régression à déterminer pour chaque réponse.

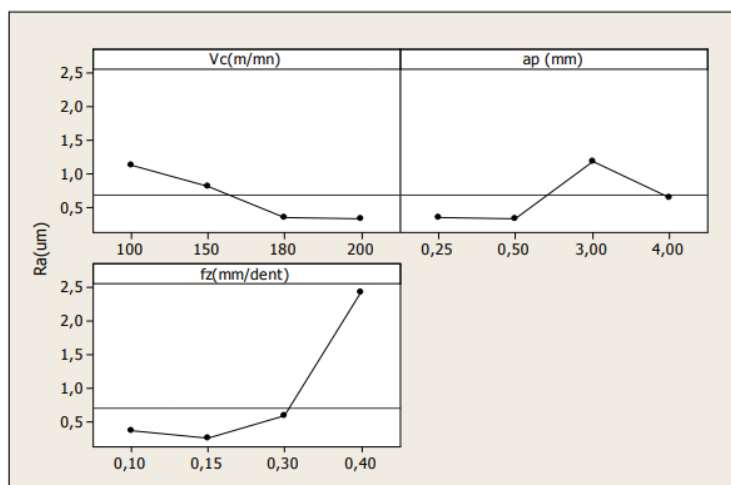


Figure IV.2. Les effets moyens de Ra.

Cette optimisation déduit que la meilleure rugosité de surface des pièces usinées en acier non allié C45 est obtenue lorsque la vitesse de coupe est de 180 m/min, l'avance par dent est de 0,10 mm/dent et la profondeur de passe est de 0,25 mm.

Commentaire :

Après cette expérience, nous avons remarqué que les meilleures rugosités de surface ont été obtenues pour les faibles valeurs d'avance et les valeurs de vitesse de coupe élevées et La profondeur de coupe n'a pas d'effet significatif sur les critères de rugosité et en comparant les valeurs expérimentales et D'après les prédictions du critère de rugosité, nous remarquons Ils sont très corrélés . L'optimisation par la méthode de surface de réponse (MSR) permet de déterminer les conditions de coupe acceptables par rapport aux critères de rugosité.

L'optimisation par MSR des conditions de coupe les mieux adaptées pour une rugosité de surface $R_a = 0,36 \mu\text{m}$, nous a donné : $V_c = 180 \text{ m/min}$, $f_z = 0,10 \text{ mm/dent}$ et $a_p = 0,25 \text{ mm}$.

Mais dans cette expérience la température n'a pas été abordée, ce qui est un facteur très important affectant les propriétés physiques de la pièce, il aurait été préférable que la température soit ajoutée à cette expérience pour obtenir les meilleures conditions de coupe, et aussi étude des contraintes résiduelles en fonction des conditions de coupe.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

Etude des influences des paramètres de coupe sur les rugosités en fraisage avec micro-lubrification et micro-pulvérisation localisée.

L'application des autres méthodes d'optimisation telle que (La logique floue et les algorithmes génétiques etc.).

Etude de l'influence des paramètres de coupe sur l'usinabilité des aciers.

CHAPITRE V :
ETUDE DE PRATIQUE
EXPERIMENTALE

V.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons une proposition d'amélioration d'une gamme d'usinage de la pièce arbre pignon , qui ont été fabriqués dans l'atelier mécanique de l'entreprise « Sider El Hajjar » , à la demande de l'unité de laminage à froid . Cette pièce mécanique fonctionne dans un réducteur de guide des feuilles (des tôles métalliques) de laminage à froid .

V.2. Généralité sur laminage à froid :

Le laminage à froid consiste à faire passer une feuille ou de la poudre d' un ou de plusieurs éléments entre deux rouleaux compresseurs. C'est une technique qui est largement utilisée dans l'industrie, car elle permet de fabriquer des matériaux à grande échelle. Les déformations introduites dans les matériaux par le laminage à froid peuvent améliorer leurs propriétés mécaniques telles qu'une meilleure résistance à la traction. [49]

Le laminage à froid augmente la résistance et la dureté de l'acier et diminue sa ductilité (c'est-à-dire sa capacité à se déformer plastiquement de façon durable sans se casser), et il est donc nécessaire de le soumettre à un procédé appelé recuit. C'est pourquoi le laminage à froid, c'est essentiellement le laminage à chaud qui a subi un procédé de formage supplémentaire.

Il est clair que le laminage répété cause des cristallites ultrafines et une augmentation de la résistance. Les mécanismes responsables de ces effets sont la déformation de cisaillement sévère en dessous de la surface et la création de nouvelles interfaces (Figure.V.1).

Le laminage à froid a aussi été récemment utilisé pour la synthèse d'hydrures métalliques. En effet, ont produit du Mg_2Ni et du nickel sans la formation de $MgNiH$ avec le laminage à froid suivi d'un traitement thermique à partir de feuilles de Mg et de Ni. D'autres alliages à base de Mg ont aussi été synthétisés avec cette méthode pour le stockage de l'hydrogène. Le laminage à froid répété peut aussi produire des composés nanocristallins et ultimement des composés amorphes. Il pourrait même être utilisé pour synthétiser des nano composites et des électrodes négatives pour les batteries Ni-MH.

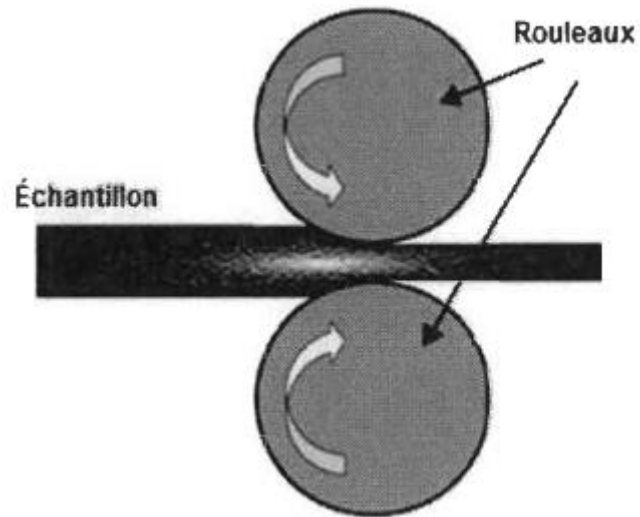


Figure.V.1. Schéma du laminage.

V.3. Dessin d'ensemble de guide :

Dans la page suivante le dessin d'ensemble de guide des tôles.

V.4. Dessin d'ensemble de réducteur :

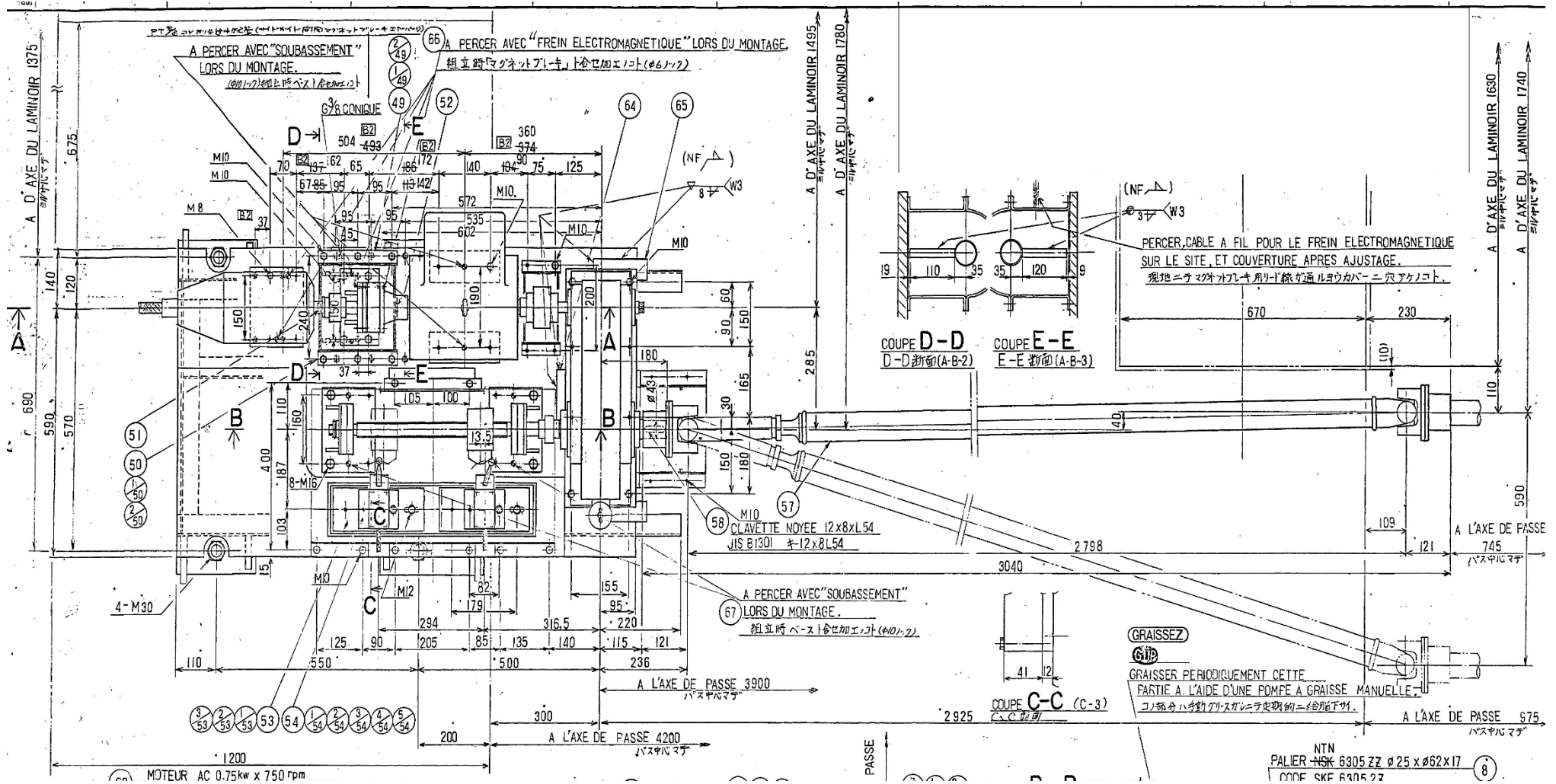


Figure.V.3. Dessin d'ensemble de réducteur.

V.5. Dessin d'ensemble de l'arbre pignon :

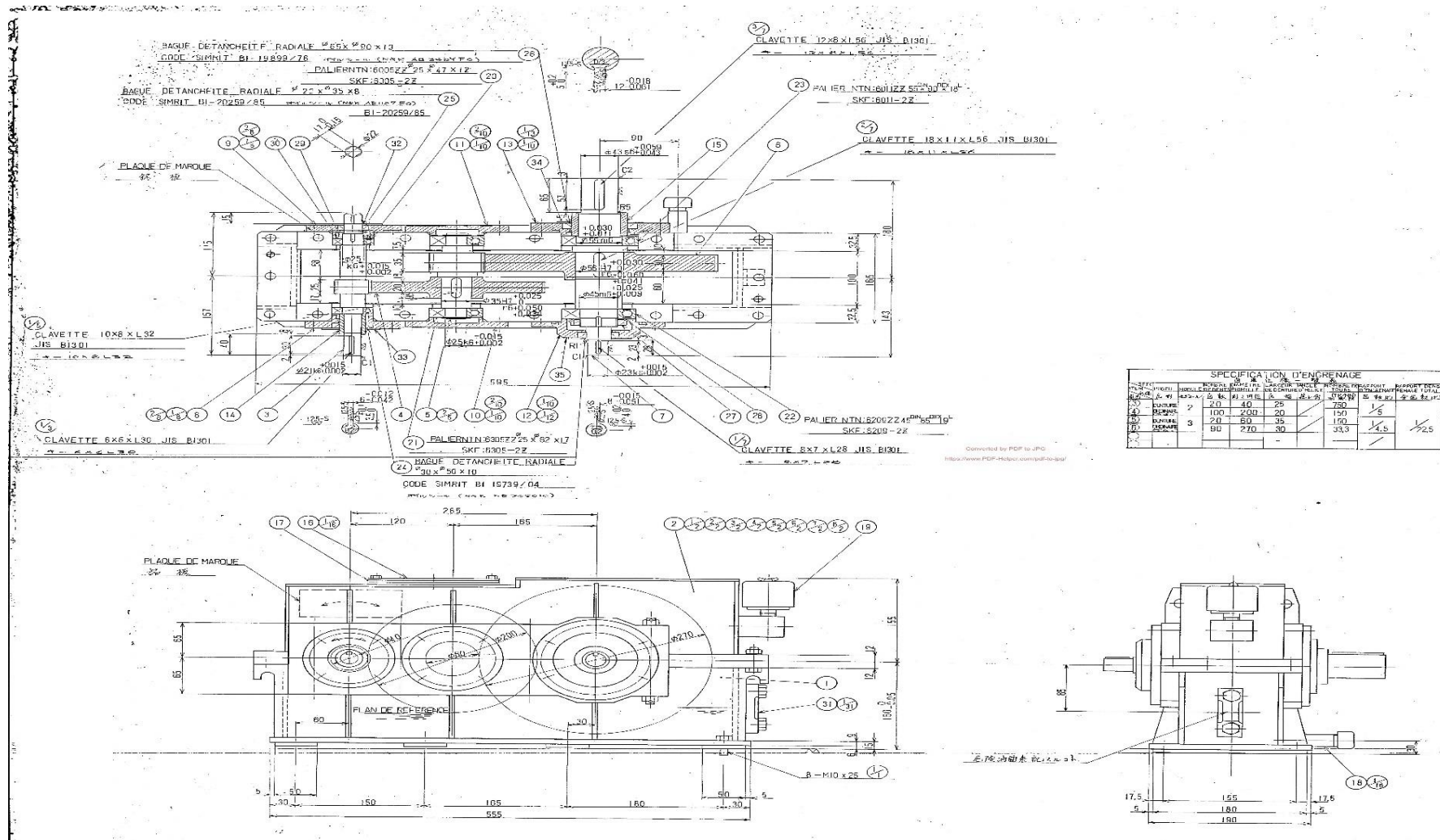


Figure.V.4. Dessin d'ensemble de l'arbre pignon.

V.6. La pièce arbre pignon en 3D

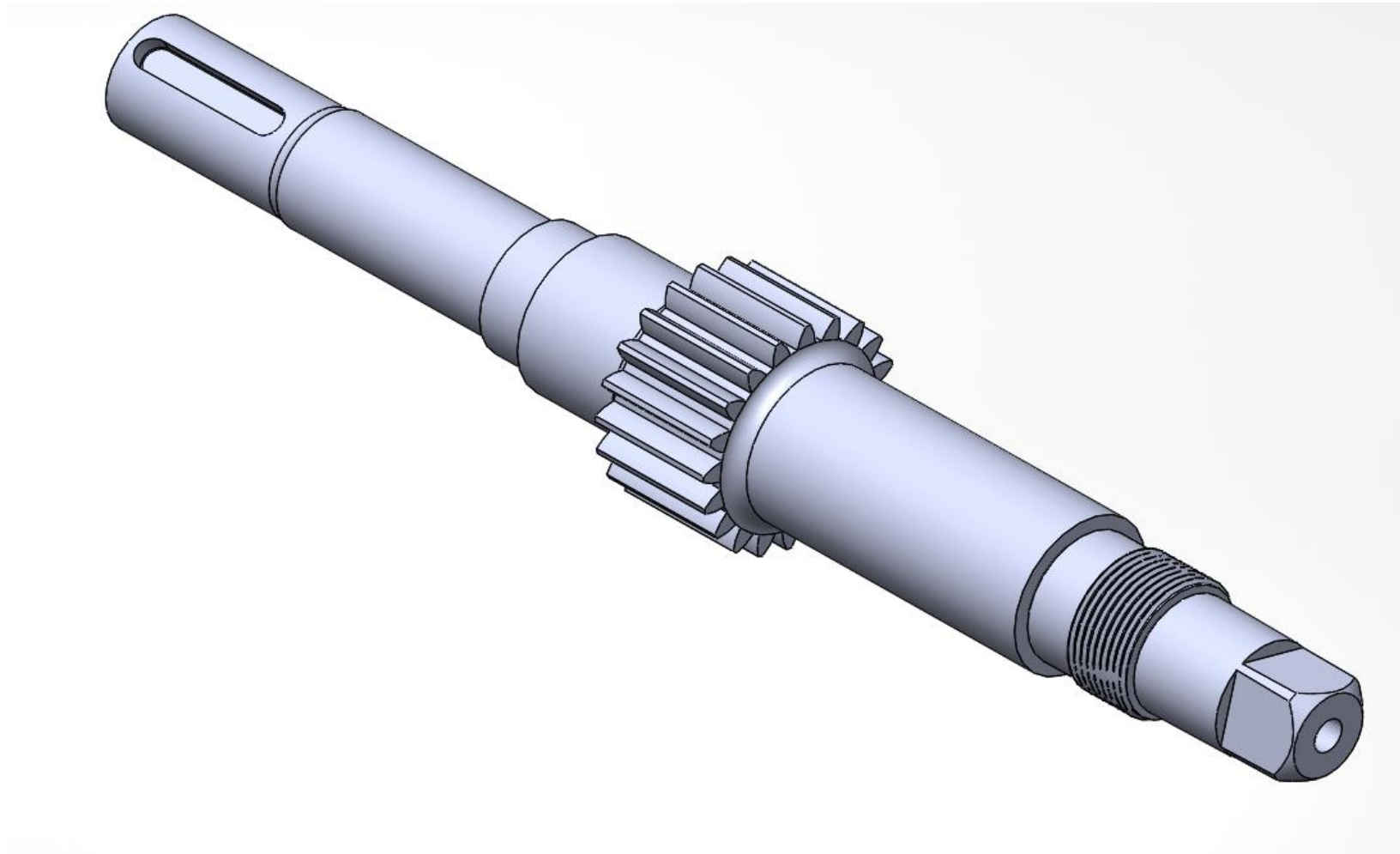


Figure.V.5. La pièce arbre pignon en 3D

V.7. Dessin de définition de l'arbre pignon :

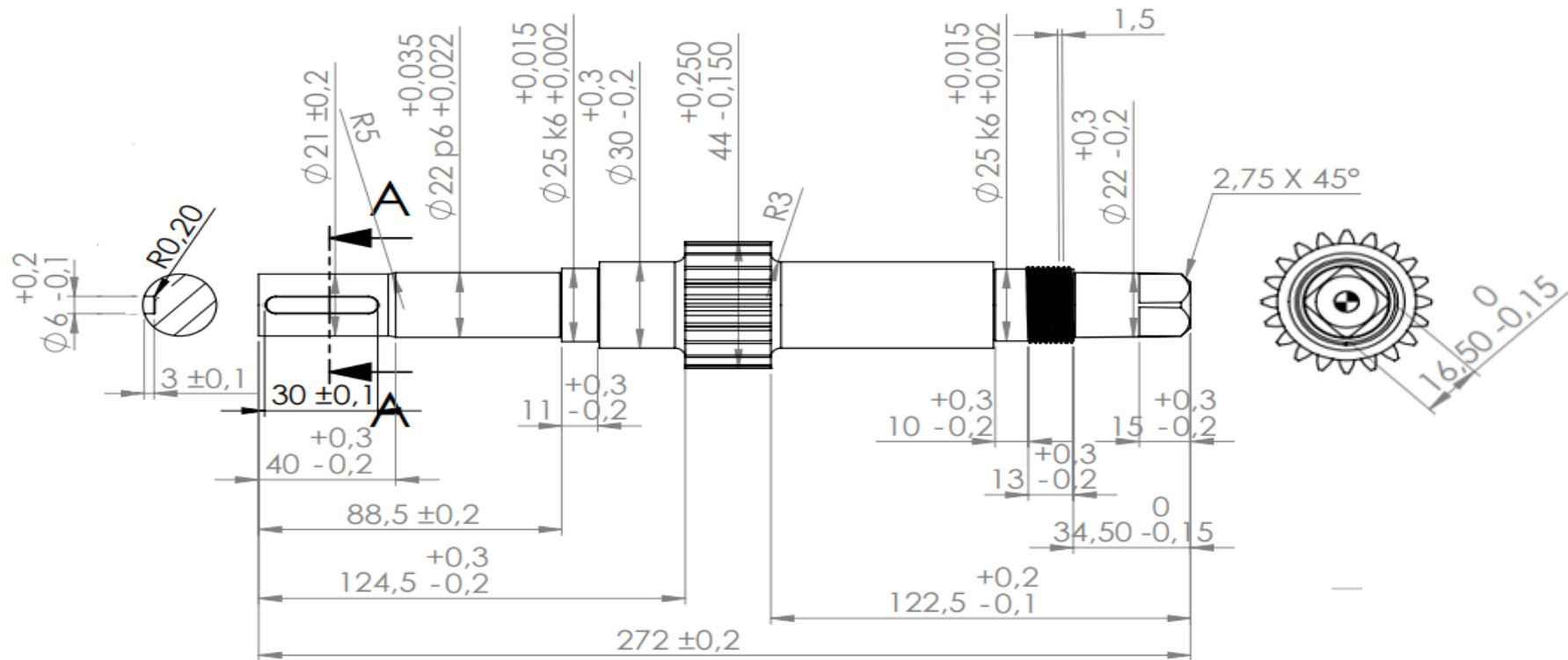


Figure .V.6. Dessin de définition de l'arbre pignon.

V.6. Fonctionnement de guide et le rôle de l'arbre pignon sortant de réducteur :

La fonction de ce guide est dirigée et guider les tôles (les feuilles) de laminage à froid afin de ne pas décaler sur son chemin pour améliorer les conditions de travail , ce qui conduit à son tour à l'amélioration des produits (les tôles) .

Après le réducteur transmis le couple et la vitesse fournis par le moteur de l'arbre entrant à l'arbre sortant, cet arbre lier à son deux cotés avec deux systèmes. A la coté de mes plats lier avec système de fin de course qui consiste de vis sans fin et creux, alors que la vis tourne dans sens droite ou gauche le creux fait translation à la vis vers l'avant et arrière lorsque toucher le bras de fin de cours il s'arrête. A autre côté de l'arbre est lier avec un cardon par une clavette le cardon transmet le mouvement à une vis san fin de côté droite et dans l'autre côté gauche avec deux creux qui liée avec les plateaux de guide lorsque le cardon tourne au sens droite les plateaux ils se déplacent simultanément dans des directions opposées , et c'est ce qui les ouvre et ferme ensemble , et avec cela les tôles est fixée et libérée donc est guidé.

V.7. Routage d'usinage de l'arbre pignon : matière XC48.

- **Phase 10 : débitage** sur la machine scie mécanique (EBS360).

Montage par deux vés avec butée

- couper rond diamètre $\varnothing 70 (\pm 1)$ mm ; longueur $L=580 (\pm 2)$ mm.

NB : (01) longueur pour (02) pièce.

- **Phase 20 : contrôle :** règle.
- **Phase 30 : dressage / centrage** sur la machine dresseuse centreuse (FZWD) .

- dresser et centrer les (02) faces ; $L=561 \begin{pmatrix} +0.5 \\ -0.3 \end{pmatrix}$ mm.

- (02) trous de centres $\varnothing 6 \begin{pmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$ mm ; $L=14 (\pm 0.2)$ mm.

- **Phase 40 : contrôle :** Pied à coulisse , jauge de profondeur.
- **Phase 50 : tournage** sur la machine tour à commande numérique (16D20).

Montages mixtes .

- charioté au $\varnothing 44 \begin{pmatrix} +0.25 \\ -0.15 \end{pmatrix}$ mm; $L=433 \begin{pmatrix} +0.5 \\ -0.3 \end{pmatrix}$ mm.

- charioté au $\varnothing 30 \left(\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix} \right)$ mm ; L=128 $\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.5 \end{smallmatrix} \right)$ mm; R=3mm.

- charioté au $\varnothing 30 (\pm 0.5)$ mm à L=153(± 0.2) mm ; b=255 $\left(\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix} \right)$ mm; avec (02) rayons ;

R=3 mm.

- à L=275.5 (± 0.3) mm ; réaliser une gorge $\varnothing 20 (\pm 0.5)$ mm; b=10 $\left(\begin{smallmatrix} 0.2 \\ -0.1 \end{smallmatrix} \right)$ mm.

- tourner la pièce.

- Charioté au $\varnothing 30 \left(\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix} \right)$ mm ; L=128 $\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.5 \end{smallmatrix} \right)$ mm avec rayon ; R=3 mm.

- **Phase 60 : contrôle :** Pied à coulisse.
- **Phase 70 : taillage** sur la machine à tailler les engrenages à commande numérique (PE500) t=3h30'.

- réaliser le taillage à dentures droites normales .

NB : taillage sur les (02) cotés.

- Angle de pression : $\alpha=20^\circ$.
- Module : m=2 mm.
- Nbr des dents : z=20.
- Diamètre de tête : Da= $\varnothing 44$ mm.
- Diamètre de primitif : Dp= $\varnothing 40$ mm.
- Diamètre de pied : Df= $\varnothing 35$ mm.
- Hauteur de la dent : h=4.5 $\left(\begin{smallmatrix} +0.1 \\ -0.1 \end{smallmatrix} \right)$ mm.
- Largeur de la dent : B=25 $\left(\begin{smallmatrix} +0.2 \\ -0.1 \end{smallmatrix} \right)$ mm.

- **Phase 80 : contrôle :** comparateur, Pied coulisse, Palmer à plateau.
- **Phase 90 :** partager la pièce en deux parties sur la machine tour parallèle à commande numérique (16D20).

Montage mixte avec deux lunettes.

- couper la pièce en (02) partie ; à $L=280.5 \begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix}$ mm.

- **Phase 100 : contrôle** : Pied à coulisse.
- **Phase 110 : tournage** sur la machine tour à commande numérique (16D20) .

Montage en l'air.

- Dresser la face (A) respectant $L=122.5 \begin{pmatrix} +0.2 \\ -0.1 \end{pmatrix}$ mm ; $\varnothing 30 \begin{pmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$ mm.
- Réaliser (01) trou de centre $\varnothing 6 \begin{pmatrix} 0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$ mm ; $L=14 (\pm 0.1)$ mm.
- Charioté au $\varnothing 25 \begin{pmatrix} -0.2 \\ -0.1 \end{pmatrix}$ mm ; $L=57.5(\pm 0.2)$ mm; gorge de Deg/M.
- Charioté au $\varnothing 22 \begin{pmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$ mm; $L=34.5 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.15 \end{pmatrix}$ mm ; gorge de Deg/M +
ch=2.75×45°.
- À $L=34.5 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.15 \end{pmatrix}$ mm ; réaliser le filetage M25×1.5 ; $L=13 \begin{pmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$; Pas=0.92.

Tourner la pièce sur la face (B).

- Charioté au; $L=124.5 \begin{pmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$; $\varnothing 30$).
- Charioté au $\varnothing 25.5 (\pm 0.3)$; à $L=99.5 \begin{pmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$; gorge de Deg/Meule .
- Charioté au $\varnothing 22.5(\pm 0.2)$; $L=88.5 (\pm 0.2)$; gorge de Deg/M ;

Charioté au $\varnothing 21(\pm 0.2)$; $L=40 \begin{pmatrix} 0.3 \\ -0.2 \end{pmatrix}$, + R=5 .

- **Phase 120 : contrôle.** Jauge de contrôle du filetage, pied coulisse .
- **Phase 130 : fraisage** sur la machine Fraiseuse universelle (MU5).

Brider la pièce par plateaux diviseur et contre pointe.

- À $L=2 / \varnothing 21(\pm 0.2)$; réaliser une rainure de clavette ; $b=6 \begin{pmatrix} +0.2 \\ -0.1 \end{pmatrix}$; $L=30 (\pm 0.1)$

Pro F= 3 $\left(\begin{matrix} +0.3 \\ -0.2 \end{matrix} \right)$.

- Réaliser le carrée $16.5 \begin{matrix} 0 \\ -0.15 \end{matrix} \times 16.5 \begin{matrix} 0 \\ -0.15 \end{matrix}$; L=15 $\left(\begin{matrix} +0.3 \\ -0.2 \end{matrix} \right)$.

• **Phase 140 : contrôle** : Micromètre , Pied à coulisse.

• **Phase 150 : rectification** sue la machine Rectifieuses cylindriques (3y133) .

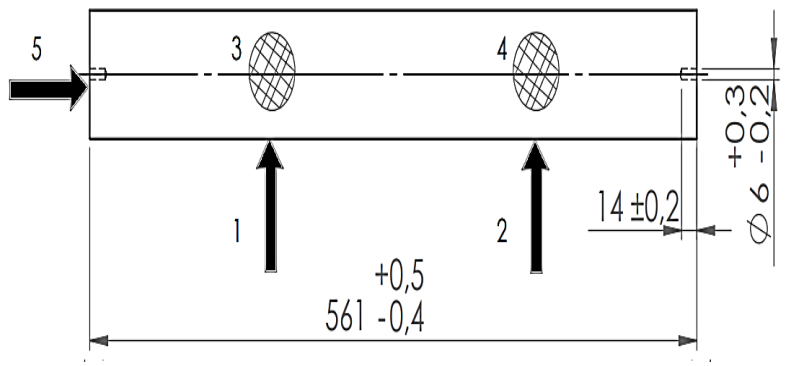
- Rectifier (02) $\varnothing 25K6 \left(\begin{matrix} +0.015 \\ +0.002 \end{matrix} \right)$; L₁=11 $\left(\begin{matrix} +0.3 \\ -0.2 \end{matrix} \right)$; L₂=10 $\left(\begin{matrix} +0.3 \\ -0.2 \end{matrix} \right)$.

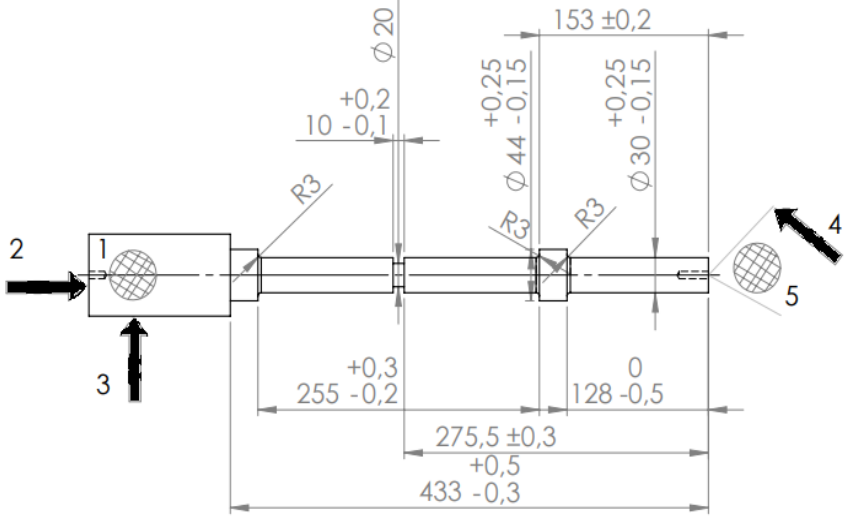
- Rectifier $\varnothing 22P6 \left(\begin{matrix} +0.035 \\ +0.022 \end{matrix} \right)$; L=48.5(±0.2).

• **Phase 160 : contrôle** : Micromètre.

V.8. Proposition d'une gamme d'usinage d'arbre pignon :

Etabli par : TAZIR Hichem			Année 2022 Département : génie mécanique Spécialité : fabrication mécanique et productique						
Elément : Arbre pignon Nombre d'éléments : 02 Matière : XC48			Feuille d'analyse de fabrication						
N° de phase	Désignation des phases sous-phases et opérations	Machine utilisée	Appareillages Outils-coupants Vérification	V _c (mm/min)	N (tr/min)	A (mm)	F _n (mm/tr) F _z (mm/dent)	V _f (mm/min)	Croquis phase
10	Débitage Couper Ronde Ø =70(±1) mm ; L=580(±2) mm.	Scie mécanique EBS360	Lame en acier dur trempé	25	150		0.2	30	
20	Contrôle	Poste de contrôle	Règle	/	/	/	/	/	

30 31 311 312 32 321 322	Centrage dressage Montage mixte Dresser et centrer première face L=561 ^(+0,5) _{-0,3} mm Ø6 ^(+0,3) _{-0,2} mm L=14(±0,2) mm Tourner la pièce Dresser et centrer la même	Dresseuse centreuse (FZWD)	Fraise à surfacier Ø80 , z=8 Foret à center Ø5.5	80 30	318 955	1 0.1	0.2 	508 191	 <p>The drawing shows a shaft with a total length of 561 mm, with a tolerance of +0,5 mm and -0,4 mm. The diameter is 6 mm, with a tolerance of +0,3 mm and -0,2 mm. There are two cross-hatched sections, labeled 3 and 4, each with a length of 14 mm and a tolerance of ±0,2 mm. The distance between the centers of these two sections is 561 mm. A dimension of 561 mm is also shown with a tolerance of +0,5 mm and -0,4 mm. A dimension of 14 mm is shown with a tolerance of ±0,2 mm. A dimension of 6 mm is shown with a tolerance of +0,3 mm and -0,2 mm. A dimension of 5 mm is shown at the left end. Arrows 1 and 2 point to the cross-hatched sections, and arrow 5 points to the left end. A dashed line indicates the centerline of the shaft.</p>

40	Contrôle	Poste de contrôle	Pied coulisse	/	/	/	/	/	
50 51 511 512	Tournage Montage mixte Chariotage 1 $\text{Ø } 44^{(+0,25)}_{(-0,15)}\text{mm}$ $L=433^{(+0,5)}_{(-0,3)}$ mm Chariotage 2 $\text{Ø } 30^{(+0,3)}_{(-0,2)}\text{mm}$ $L=128^{(0)}_{(-0,5)}$ mm ,R=3	Tour à commande numérique 16D20	Outil à charioter en carbure p25	180	1302	2	0.1	130	

513	Chariotage 3 à L=153(±0.2) mm Ø30(±0.5)mm B= 255($\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$) mm , R= 3			180	1909	2	0.1	190	
514	Gorge à L=275.5(±0.3) mm Ø20(±0.5) mm B= 10($\begin{smallmatrix} 0.2 \\ -0.1 \end{smallmatrix}$) mm		Outil à tronçonner Ø10	80	850	1	0.1	85	

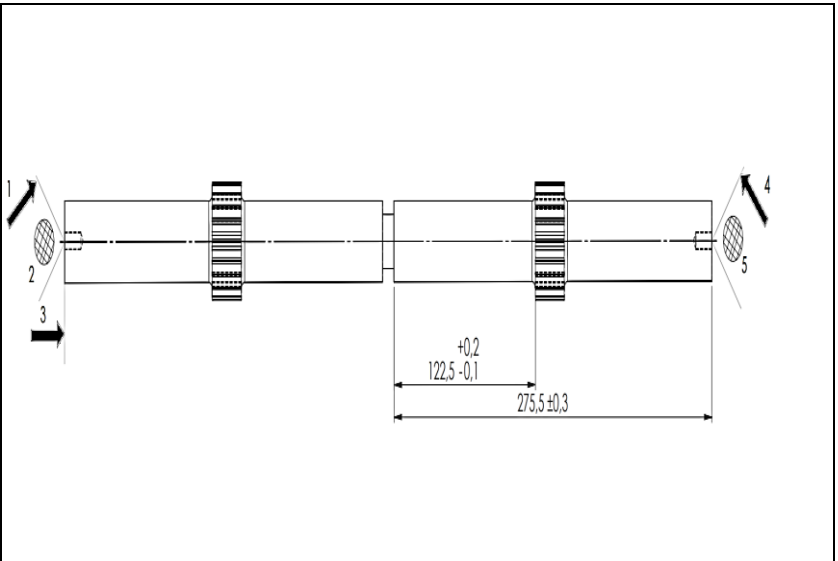
<p>52</p> <p>521</p>	<p>Tourner la pièce</p> <p>Montage mixte</p> <p>Charioter</p> <p>$\text{Ø}30\left(\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix}\right)$ mm</p> <p>à $L=128\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.5 \end{smallmatrix}\right)$ mm,</p> <p>R= 3</p> <p>(Voir croquis)</p>	<p>Tour à commande numérique</p> <p>16D20</p>	<p>Outil à charioter en carbure p25</p>	<p>180</p>	<p>1909</p>	<p>2</p>	<p>0.1</p>	<p>109</p>	
<p>60</p>	<p>Contrôle</p>	<p>Poste de contrôle</p>	<p>Pied coulisse</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	<p>/</p>

Etabli par : TAZIR Hichem	Année 2022 Département : génie mécanique Spécialité : fabrication mécanique et productique
-------------------------------------	---

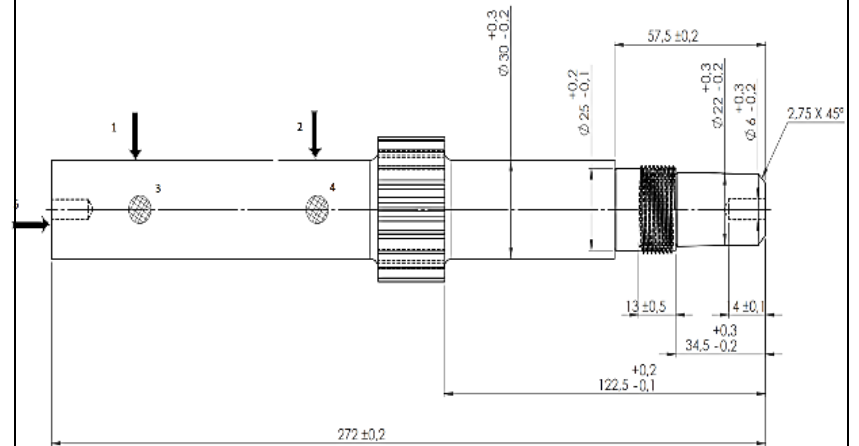
Elément : Arbre Pignon Nombre d'éléments : 02 Matière : XC48	Feuille d'analyse de fabrication
---	---

N° de phase	Désignation des phases sous-phases et opérations	Machine utilisée	Appareillages Outils-coupants Vérifications	V _c (mm/min)	N (tr/min)	A (mm)	F _n (mm/tr)	V _f (mm/min)	Croquis phase	
70	Taillage Réaliser un taillage à denture droite normal (Sur 2 cotes) Angle de pression $\alpha = 20^\circ$ Module $m=2\text{mm}$ N° de dents $Z=20$ \varnothing Têtes $d_a = \varnothing 44\text{mm}$	Machine à tailler les engrenages à commande numérique (PE500)	Fraise mère de $\varnothing 100\text{mm}$ et $m=2\text{mm}$ et $Z=120$ ARS	25	Nf=80	1.5 (mm/passe)	0.18			

	<p>Ø Primitif Dp = Ø 40 mm Ø de pied Df = Ø35 mm Hauteur de la dent h = 4.5 $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.1 \end{matrix}$ mm Largeur de la dent B = 25 $\begin{matrix} +0.2 \\ -0.1 \end{matrix}$ mm</p>								
80	Contrôle	Poste de contrôle	Comparateur Pied coulisse Palmer à plateau	/	/	/	/	/	

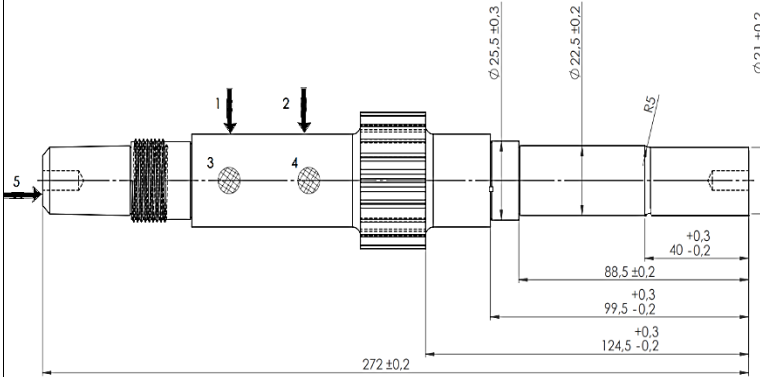
<p>90</p> <p>91</p> <p>911</p>	<p>Couper la pièce en 2 partie égales</p> <p>Montage entre pointe avec deux lunettes fixe</p> <p>Couper la pièce</p> <p>$AL = 280.5^{(+1)}_{(-1)}$ mm</p> <p>(Voir croquis)</p>	<p>Tour à commande numérique (16D20)</p>	<p>Outil à tronçonner</p>	<p>180</p>	<p>2860</p>	<p>1</p>	<p>0.1</p>	<p>286</p>	
<p>100</p>	<p>Contrôle</p>	<p>Poste de contrôle</p>	<p>Pied coulisse</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	<p>/</p>	

110	Tournage								
111	Montage en l'air								
1111	Dressage (Face A)		Outil à dresser à charioter en carbure p25	180	1909	1	0.2	381	
	L= 122.5 ^(+0.2) _{-0.1} mm Ø 30 ^(+0.3) _{-0.2} mm 1 Trou de centrage	Tour à commande numérique 16D20							
1112	L=14(±0.1) mm. Ø 6 ^(0.3) _{-0.2} mm (Voir croquis)		Foret à center Ø5.5	30	955	/	0.1	95.5	
1113	Chariotage Ø 25 ^(-0.2) _{-0.1} mm L= 57.5(±0.2) mm Gorge de Dégagement		Outil à dresser à charioter en carbure P25	180	2604	1	0.1	260	
1114	Chariotage De Ø22 ^(0.3) _{-0.2} mm								



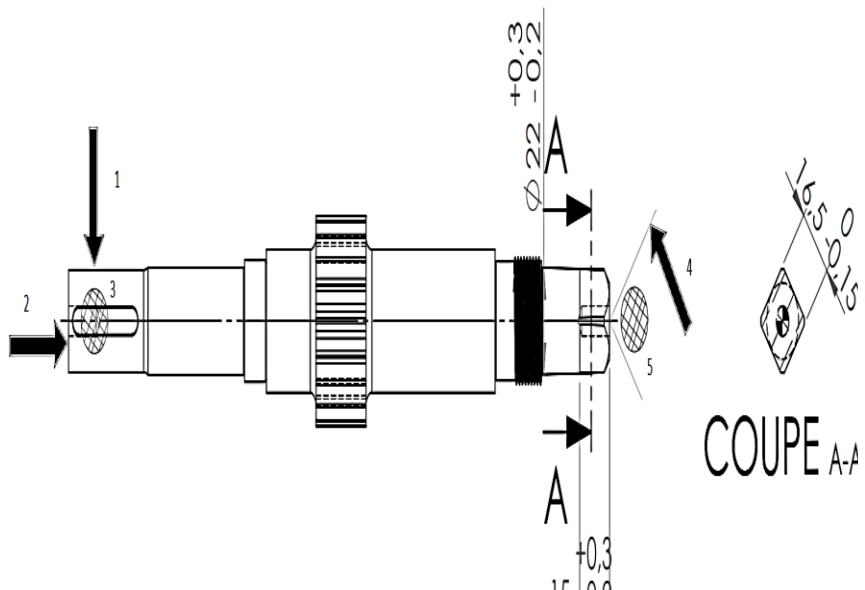
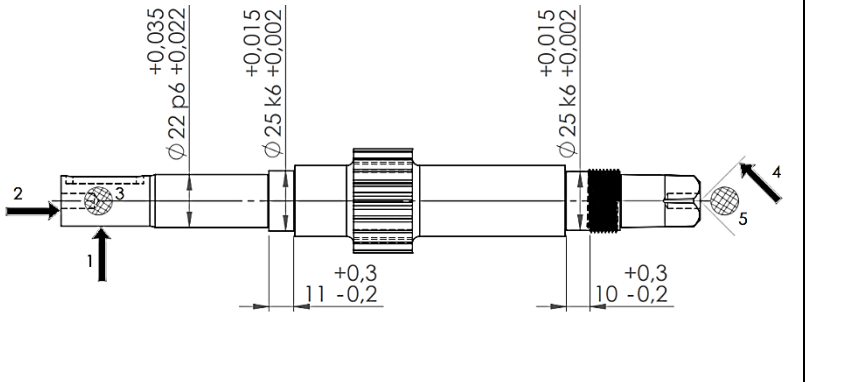
<p>1115</p> <p>1116</p>	<p>$L = 34.5 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.15 \end{smallmatrix} \right)$ mm</p> <p>Gorge Deg /M</p> <p>Chanfrein</p> <p>2.75 x 45°</p> <p>Filetage</p> <p>$L = 34.5 \left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.15 \end{smallmatrix} \right)$ mm</p> <p>M25 x 1.5</p> <p>$L = 13 \left(\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix} \right)$;</p> <p>Proof = 0.92</p>		<p>Outil à chanfreiner</p> <p>Outil à fileter</p>	<p>22</p> <p>180</p>	<p>280</p> <p>1909</p>	<p>0.2</p> <p>1</p>	<p>0.1</p> <p>0.2</p>	<p>28</p> <p>380</p>	
---------------------------------------	---	--	---	----------------------	------------------------	---------------------	-----------------------	----------------------	--

112	Tourner la pièce		Outil à dresser à charioter en carbure p25	180	2604	1	0.1	260	
1121	Dressage L=124.5 ^(+0.3) _(-0.2) mm Ø30 ^(+0.3) _(-0.2) mm								
1122	Chariotage Ø 25.5(±0.3) mm L= 99 .5 ^(+0.3) _(-0.2) mm Gorge Deg								

1123	<p>Chariotage $\text{Ø}22.5(\pm 0.2)$ mm L=88.5(± 0.2) mm Gorge Deg</p>			180	2545	0.2	0.1	254.5	
1124	<p>Chariotage $\text{Ø} 21(\pm 0.2)$ mm L= 40($\begin{smallmatrix} 0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$) mm Gorge Deg R = 5</p>			180	2720	0.2	0.1	272	 <p>The drawing shows a shaft assembly with the following dimensions and features: - Total length: 272 ± 0.2 mm - Diameter 1: $\text{Ø}25.5 \pm 0.3$ mm - Diameter 2: $\text{Ø}22.5 \pm 0.2$ mm - Diameter 3: $\text{Ø}21 \pm 0.2$ mm - Lengths from the right end: - 40$\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$ mm - 88.5 ± 0.2 mm - 99.5$\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$ mm - 124.5$\begin{smallmatrix} +0.3 \\ -0.2 \end{smallmatrix}$ mm - Callouts 1, 2, 3, 4, and 5 indicate specific features or inspection points on the shaft.</p>

120	Contrôle	Poste de contrôle	Jauge de filetage , pied coulisse	/	/	/	/	/	/	/
-----	----------	-------------------	-----------------------------------	---	---	---	---	---	---	---

Etabli par : TAZIR Hichem			Année 2022 Département : génie mécanique Spécialité : fabrication mécanique et productive						
Elément : Pignon Nombre d'éléments : 02 Matière : XC48			Feuille d'analyse de fabrication						
N° de phase	Désignation des phases sous-phases et opérations	Machine utilisée	Appareillages Outils-coupants Vérification	V _c (mm/min)	N (tr/min)	A (mm)	F _n (mm/tr) F _z (mm/dent)	V _f (mm/min)	Croquis phase
130 131 1311	Fraisage Bridage A L= 2 mm Ø21(±0.2) mm Rainurage « De clavette » L =30(±0.1) mm B = 6 ^(+0.2) _(-0.1) Prof = 3(±0.1)	Fraiseuse universel -le MU5	Fraise 3 tailles Ø5.5 à rainurer	45	2600	1	0.02	156	

1312	Réalisation Carrée à $L=15\begin{matrix} +0.3 \\ -0.2 \end{matrix}$ m m $16.5\begin{matrix} 0 \\ -0.15 \end{matrix}$ x $16.5\begin{matrix} 0 \\ -0.15 \end{matrix}$	Fraiseuse universel -le MU5	Fraises en bout 2 tailles de Ø30	80	850	0.5	0.02	34	
140	Contrôle	Poste de contrôle	Micromètre Pied à coulisse	/	/	/	/	/	
150 151 1511 1512	Rectification Montage mixte Rectifier (02) $\text{Ø}25\text{K}6\begin{matrix} +0.015 \\ +0.002 \end{matrix}$ $L_1=11\begin{matrix} +0.3 \\ -0.2 \end{matrix}$ mm $L_2=10\begin{matrix} +0.3 \\ -0.2 \end{matrix}$ mm	Rectifieuses cylindriques 3y133	Meule cylindrique	2445	36690	0.01	0.1		

1513	(Voir croquis) Rectifier Ø22P6 L= 48.5 ^(+0.035) _{+0.022} mm.								
160	Contrôle	Poste de contrôle	Micromètre	/	/	/	/	/	

Conclusion :

L'objectif principal de cette recherche a été de montrer l'influence des paramètres de coupe sur la qualité des surfaces usinés en usinage discontinu et comment optimiser ces paramètres pour choisir un choix optimal de meilleur régime de coupe qui donne meilleure rugosité.

Dans le chapitre I nous avons présenté une étude sur l'usinage discontinu comme le fraisage , le brochage et l'alésage. Et nous avons appris les procédures les plus importantes de fabrication discontinu et leur rôle dans la fabrication des pièces comme le fraisage , brochage et l'alésage.

A travers le chapitre II nous avons résumé l'état de la surface et ses types, la tolérance dimensionnelle et géométrique.

Le chapitre III, représente les paramètres de coupe et leurs influences sur l'états de surface.

Dans le chapitre IV, nous montrons comment optimiser les paramètres de coupe pour obtenir une meilleure qualité de rugosité et d'après un exemple que nous avons pris, nous avons déduit la conclure suivante :

- Les meilleures rugosités de surface ont été obtenues pour les faibles valeurs des avances et de grandes valeurs des vitesses de coupe;
- La profondeur de passe n'a pas un effet considérable sur les critères de rugosité;
- L'optimisation par la méthode de surface de réponse (MSR) permet de déterminer les conditions de coupe acceptables par rapport aux critères de rugosité.

Dans le chapitre V nous avons présenté une proposition d'amélioration d'une gamme de fabrication d'un arbre pignon .

Les références bibliographiques

- [1] H. Aouici, S. Benlahmidi, cours fraisage 2ème Année, GM&P, Fraisage, 2010
- [2] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fraiseuse>
- [3] <http://www.makerslide-machines.xyz/fr/2018/03/14/fr-les-axes-dune-fraiseuse-cnc/>
- [4] GARA Souhir Cours interactif : Le Fraisage Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul Année universitaire 2015/2016 page 4 , 6 , 8 , 9 , 10,11,12,13 , 32
- [5] R.Butin, M. Pinot, Fabrication Mécanique Technologie, Tome 3, Foucher, Paris, 1998
- [6] ALIA Riadh GUEMAZ Slimane Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Énergie Pendant le Fraisage Mémoire « PFE » université kasdi merbah Ouargla 07/06/2015 page 6
- [7] G. P. Homme, Commande Numérique des Machines-Outils, Technique de L'ingénieur, Traité Génie Mécanique, B 7130, pp.3, 1997
- [8] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/fraisage/53380>
- [9] Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU). (2005, 2 23). Récupéré sur analyse-fabrication.univ-lille.fr:
https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/001_MOG_web.html
- [10] Brigitte Remacle, Bld Reyers 80, 1030-Bruxelles Formation ifpm. (2015, 9). Usinage tournage fraisage. Récupéré sur ifpm formation:
<https://www.ifpm.be/servlet/Repository/usinage.pdf?ID=9793&saveFile=true&saveFile=true>
- [11] TP N° 2 Fraisage (Présentation). (s.d.). Récupéré sur University of BATNA 2:
http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bahloul_elhachemi/files/tp_ndeg_2_fraisage.pdf
- [12] A. Toumine, Cours de Fabrication, Usinage par Enlèvement de Copeaux, Éléments de Cours Usinage v1.1, 2007
- [13] Dr Devi Kalla, Dr Janet Twomey et Dr Michael Overcash. Reaming process. Inventaire du cycle de vie des processus unitaires , Reaming Process Summary

From : <https://www.summaryplanet.com/engineering/Reaming-Process.html>

[14] Company, Sandvik Coromant;. (S.d.). Alésage à l'alésoir. Récupéré sur Sandvik Coromant.

[15] Edited by OlliverWithDoubleL Boring (manufacturing) at 00:51, 6 May 2022

Retrieved from :

[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Boring_\(manufacturing\)&oldid=1086406533](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Boring_(manufacturing)&oldid=1086406533)

[16] Kalpakjian, Schmid (2001), Ingénierie et technologie de fabrication , Upper Saddle River, NJ, États-Unis : Prentice Hall

[17] Todd, Robert H.; Allen, Dell K. (1994), Guide de référence des processus de fabrication, New York, NY, États-Unis : Industrial Press

[18] FMO France machines-outils. (S.d.). L'expo permanente. Récupéré sur usinenouvelle: <https://www.usinenouvelle.com/expo/tour-a-charioter-et-fileter-a-comma-p176968.html>

[19] Georges Paquet 2000 Guide de l'usinage. paris: Delagrave. Page 10 –18.

[20] dormer company. (S.d.). Technicalhandbookfr. Récupéré sur lecollectionneur : <http://www.lecollectionneur.ch/documentation-technique-pdf/technicalhandbookfr.pdf>

[21] El hachemi BAHLOUL Techniques de Fabrication Conventionnelles et Avancées Polycopié de cours UNIVERSITE BATNA 2 Année universitaire 2017/2018 page 36,37,38,39

[22] Contributeurs: Badmood, Crestian, Eunostos, Fiery, GLONGUET, Gz260, Nerijp, Phe, Romanc19s, Skiff, 3 modifications anonymes

<http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=74524360>

[23] Nawarath A. Olayiwolé okeniyi conception et réalisation d'une presse a broché manuelle Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de Conception université d'Abomey Calavi école polytechnique d'Abomey Calavi 29 janvier 2018 page 12 . 14. 15

[24] ConcepTEC.net. (2020, janvier 30). Tolérances dimensionnelles usuelles ISO pour les arbres et les alésages. Récupéré sur ConcepTEC.net: <https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/conception/machines-et-composants/to1%C3%A9rances-dimensionnelles-usuelles-iso-pour-les-arbres-et-les-al%C3%A9sages>

- [25] Benaouda dalila , kouari bouchra influence de la géométrie de l'outil sur l'états de surface mémoire « PFE » université Saad Dahlab de blida 1 , 2019 pages 29 , 32|-36 , 43
- [26] Bensaada S. états de surface Projet Université de Biskra 07 Novembre 2019. Pages 97
- [27] Bassam Kataya. Modélisation des tolérances géométriques des mécanismes pour leur intégration en conception assistée par ordinateur. « Thèse » Université de Savoie,19 décembre 2002. Pages 14 , 15 .
- [28] g.percebois modif jm gaumel tolérancement GPS (geometrical Product spécification) Document lycée louis vincent metz 11/11/11 Pages 8 .
- [29] Pierre BOURDET sept. 96 - fev. 2005 Tolérancement géométrique .
- [30] KEYENCE. (S.d.). Principes fondamentaux des tolérances. Récupéré sur KEYENCE: <https://www.keyence.fr/ss/products/measure-sys/gd-and-t/basic/>
- [31] http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Tolerances_Geometriques.htm
- [32] Gaëtan Albert identification et modélisation du torseur des actions de coupe en fraisage thèse université bordeaux 1 13/12/2010 pages 20 , 21
- [33] Cours Optimisation des conditions de coupes. (S.d.). Pages 7, 12 Récupéré sur fac.umc.edu.dz:
<https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/optimisation%20des%20condition%20de%20coupe.pdf>
- [34] lossendiere. (2018, février 24). Les paramètres de coupe. Récupéré sur makerslide machines: <https://www.makerslide-machines.xyz/fr/2018/02/24/fr-les-parametres-de-coupe/>
- [35] Company, Sandvik Coromant;. (S.d.). Cours fraisage . Pages 2-6 Récupéré sur Sandvik Coromant.
- [36] Les paramètres de coupe. (s.d.). Récupéré sur [prof-mpk.fr](http://www.prof-mpk.fr): http://www.prof-mpk.fr/Centres_interet/CI%2011%20La%20coupe%20des%20matériaux/Cours/1%20Les%20parametres%20de%20coupe/Parametre%20de%20coupe%20Prof.pdf
- [37] Florea florian cours de Fabrication des pièces d'usinage simples en fraisage « OFPPT » Maroc pages 45 , 46

- [38] Les conditions de coupes /09/2014/ Pages 10 , 11 Récupéré sur Kera-industry : <http://kera-industry.com/wp-content/uploads/2014/09/Les-conditions-de-coupes.pdf>
- [39] Évolution des modèles d'épaisseur de copeau pour le fraisage industrie-mag Juillet 2016
- [40] Teun Van Asten Stratégies d'ébauche pour des parcours optimisés Janvier 2014
- [41] <https://schnittdaten.meusburger.com/epaisseur-moyenne-de-copeau/>
- [42] Fatiha KHETTABI contribution à l'étude des influences des paramètres de coupe discontinue sur les vibrations du système usinant et sur l'état de surface thèse université Badji Mokhtar – Annaba 2017 pages 10 ,
- [43] Fifth Métal Industrial Co., Ltd optimiser les taux d'enlèvement de matière Nov. 20, 2018
- [44] Robert.cireddu efforts et puissance de coupe Récupéré sur Robert.cireddu Récupéré sur : <http://robert.cireddu.free.fr/Ressources/Prod/Efforts%20et%20puissance%20de%20coupe/index.htm>
- [45] Fraisage : Effort de coupe Récupéré sur https://fr.wikiversity.org/wiki/Fraisage/Effort_de_coupe
- [46] <https://www.netinbag.com/fr/manufacturing/what-is-machining-time.html>
- [47] Boudra abderrezak Azizou sonia Etude des effets des conditions de coupe en fraisage sur la qualité de la surface des matériaux composites mémoire master université Abderrahmane mira Bejaia 02/06/2018 pages 34 , 35 .
- [48] Dirion, J.-L. (2015, novembre 01). Optimisation numérique avec ou sans contraintes . Récupéré sur Dépôt nte IMT Mines Albi : https://scenari5.minesalbi.fr/Optimisation/fr/co/OIntro_Classification.html
- [49] manuel tousignant l'effet du laminage à froid sur les propriétés de sorption de l'hydrogène du l'anis mémoire université du Québec JUIN 20.