

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABBAS LAGHROUR - KHENCHELA

Faculté des Sciences et de Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtenir du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie Mécanique spécialisé

Thème :

**Amélioration de la durée de vie des engrenages en acier
faiblement allié par traitement de nitruration**

Réalisé par :

- *KOURDANI Salim*

Membres de jury :

Mamoun Fellah.	Pr	Université de Khenchela	Président
Brahim Chermime.	Pr	Université de Khenchela	Rapporteur
Ali Guessam.	MAA	Université de Khenchela	Examineur

Année universitaire : 2025-2026

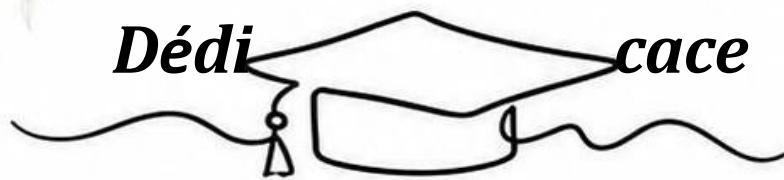
REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé la force et la patience pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant **Chermime Brahim** pour ses précieux conseils, son orientation et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation durant mon parcours universitaire.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.



وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, que Dieu les protège et leur accorde une longue vie, qui ont été la principale raison de ma réussite grâce à leur soutien et leurs prières constantes.

À mes frères et à ma seule sœur Nourcine, qui a toujours été un soutien pour moi tout au long de mon parcours académique.

Je dédie également ce travail à mon frère Hamza, absent lors de cette soutenance, mais qui a fait partie de ma réussite malgré la distance.

À mon amie Hadjer, qui m'a beaucoup soutenue durant la dernière étape de ce travail.

Et à tous mes amis sans exception, qui ont partagé ce chemin avec moi et ont été d'un grand soutien

SALIM





SOMMAIRE



SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Résumé

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I étude bibliographique et generalites

Introduction	4
I.1 Généralités sur les engrenages	5
I.1.1 Définition et rôle des engrenages	5
I.1.1.1 Définition	5
I.1.1.2 Rôle principal des engrenages	6
I.1.2 Types d'engrenages	6
I.1.2.1 Engrenages à axes parallèles (engrenages cylindriques)	6
I.1.2.2 Engrenage cylindrique à dentures droites	6
I.1.2.3 Engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales	7
I.1.2.4 Engrenages à axes concourants (engrenages coniques)	7
I.1.2.5 Système engrenage à roue et vis sans fin	7
I.1.3 Paramètres géométriques des engrenages	8
I.1.3.1 Profil en développante de cercle	9
I.1.3.2 Paramètres fondamentaux	9
I.1.3.3 Cercles caractéristiques de la denture	12
I.1.3.4 Correction de denture	13
I.1.3.5 Cinématique de l'engrènement	13
I.1.3.6 Efforts et contraintes dans les engrenages	13
I.2 Matériaux pour engrenages	14
I.2.1 Aciers faiblement alliés pour engrenages	15
I.2.2 Présentation de l'acier 40Cr (38Cr4)	15
I.2.3 Propriétés mécaniques et applications	16

I.3 Traitements thermiques	17
I.3.1 Trempe	18
I.3.1.1 Principe de la trempe	18
I.3.1.2 Types de trempe	18
I.3.1.3 Milieux de trempe	19
I.3.2 Revenu	19
I.3.2.1 Principe du revenu	21
I.3.2.2 Types de revenu	21
I.3.3 Diagrammes de transformation (TTT et CCT)	22
I.3.3.1 Diagrammes TTT	22
I.3.3.2 Diagrammes CCT	22
I.3.4 Objectifs généraux des traitements thermiques	23
I.3.5 Spécificité des traitements thermiques des engrenages	25
I.4 Nitruration ionique (plasma)	25
I.4.1 Principe de la nitruration plasma	26
I.4.1.1 Mécanisme de la nitruration plasma	26
I.4.1.2 Structure de la couche nitrurée	27
I.4.2 Avantages de la nitruration plasma	27
I.4.3 Effet de la nitruration plasma sur les dents d'engrenage	28

Chapitre II methodologie et gamme de fabrication

Introduction	31
II. Types d'engrenages	32
II.1 Généralités	32
II.2 Classification des engrenages	32
II.2.1 Engrenages droits à denture droite	32
II.2.2 Engrenages droits à denture hélicoïdale	33
II.2.3 Engrenages coniques	34
II.2.4 Engrenages roues et vis sans fin	35
II.2.4.1 Généralités	35
II.2.4.2 Formules de base	35
II.3 Géométrie des dents	36

SOMMAIRE

II.3.1 Formules de base	38
II.4 Cas des roues intérieures	39
II.5 Cas d'une crémaillère	40
II.6 Phénomène d'interférence	41
II.7 Engrenage droit à denture hélicoïdale	41
II.7.1 Différents types d'engrenages hélicoïdaux	42
II.7.1.1 Comparaison entre dentures droites et hélicoïdales	42
II.7.1.2 Définitions et caractéristiques	42
II.7.1.3 Angle d'hélice β	44
II.7.1.4 Grandeurs apparentes et réelles	44
II.8 Engrenages coniques ou à axes concourants	45
II.8.1 Généralités	45
II.8.2 Principaux types	46
II.9 Principaux paramètres	46
II.10 Qualité des engrenages	47
II.11 Trains d'engrenages	47
II.11.1 Train à un engrenage	48
II.11.2 Trains à deux engrenages	49
II.11.3 Train à deux engrenages + roue d'inversion	50
II.11.4 Cas général : trains à N engrenages	51
II.12 Cas des systèmes avec vis sans fin	51
II.13 Gamme de fabrication	53

Chapitre III Techniques Expérimentales

III.1 Introduction	55
III.2 Matériau utilisé	55
III.3 Description du matériau utilisé	57
III.4 Élaboration de l'engrenage	57
III.4.1 Usinage	57
III.4.2 Découpage de la matière première (Débitage)	58
III.5 Tournage	59

SOMMAIRE

III.5.1 Usinage au tour parallèle	59
III.5.2 Réalisation de l'alésage et de la rainure de clavette	59
III.5.3 Opération de chanfreinage	59
III.6 Fraisage des dents (taillage de l'engrenage)	60
III.6.1 Étapes de réalisation	60
III.6.2 Contrôle final des pièces	61
III.6.2.1 Mesures au pied à coulisse	61
III.6.2.2 Mesures au micromètre	62
III.6.2.3 Contrôle du module	62
III.7 Essai de dureté	63
III.8 Mesure de la dureté avant traitement thermique	63
III.9 Rugosité	64
III.9.1 Mesure de la rugosité de surface	64
III.9.2 Méthodologie de mesure	64
III.9.3 Étapes de mesure	64
III.10 Traitement thermique	66
III.10.1 Trempe	67
III.10.2 Chauffage (Austénitisation)	67
III.10.3 Refroidissement rapide	67
III.10.4 Trempe martensitique	68
III.10.5 Technologies de chauffage	68
III.10.6 Choix du temps de maintien	69
III.11 Rectification	71
III.12 Microstructure par microscopie optique	71
III.12.1 Polissage mécanique	71
III.12.2 Attaque chimique	72
III.13 Microscope optique	73
III.13.1 Caractérisation du substrat	73
a) Microstructure après trempe à l'huile	74
b) Microstructure après revenu	75
III.14 Nitruration	76

SOMMAIRE

III.14.1 Préparation mécanique et chimique	76
III.14.2 Étape de préchauffage	77
III.14.3 Étape de nitruration (température)	77
III.14.4 Étape de refroidissement	77
III.14.5. Résultats de la nitruration plasma	78
III.15 Mesure de la dureté	78
III.15.1 Éprouvette non traitée	78
III.15.2 Éprouvette traitée	78
III.15.3 Analyse des duretés	78
III.15.4 Dureté de surface	79
CONCLUSION GENERALE	81
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	84



LISTE DES FIGURES



LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Engrenage	4
Figure I.2 : Roue et pignon	5
Figure I.3 : Types d'engrenages	8
Figure I.4 : Développante de cercle	9
Figure I.5 : Paramètres géométriques	12
Figure I.6 : Caractéristiques des dents	12
Figure I.7 : Cycle thermique trempe et revenu	20
Figure I.8 : Diagramme CCT	23
Figure I.9 : Effet du revenu	24

CHAPITRE II

Figure II.1 : Engrenage droit à denture droite	33
Figure II.2 : Engrenage droit et interne	33
Figure II.3 : Engrenage hélicoïdal	34
Figure II.4 : Engrenage conique	34
Figure II.5 : Roue et vis sans fin	35
Figure II.6 : Paramètres des dents	36
Figure II.7 : Contact des dents	37
Figure II.8 : Roues internes	40
Figure II.9 : Crémaillère	40
Figure II.10 : Engrenage hélicoïdal	41
Figure II.11 : Crémaillère hélicoïdale	42
Figure II.12 : Engrenages coniques	45
Figure II.13 : Types d'engrenages coniques	46
Figure II.14 : Paramètres d'engrenages coniques	47
Figure II.15 : Représentation normalisée	48
Figure II.16 : Train à un engrenage	48
Figure II.17 : Train à deux engrenages	49
Figure II.18 : Train avec roue d'inversion	50

Figure II.19 : Train à N engrenages	51
Figure II.20 : Système vis sans fin	52

CHAPITRE III

Figure III.1 : Spectromètre utilisé	56
Figure III.2 : Dessin technique de l'engrenage	57
Figure III.3 : Machine de découpage (scie à ruban)	58
Figure III.4 : Opération de découpage	58
Figure III.5 : Tour parallèle	60
Figure III.6 : Fraiseuse universelle	61
Figure III.7 : Pied à coulisse	61
Figure III.8 : Micromètre	62
Figure III.9 : Outil de contrôle du module	62
Figure III.10 : Rugosimètre	65
Figure III.11 : Cycle de trempe et revenu	69
Figure III.12 : Four à bain de sel	70
Figure III.13 : Cycle de trempe	70
Figure III.14 : Machine de rectification	71
Figure III.15 : Polisseuse de finition	72
Figure III.16 : Polisseuse d'ébauche	72
Figure III.17 : Microscope optique	73
Figure III.18 : Microstructure acier 40Cr brut	74
Figure III.19 : Après trempe à l'huile	74
Figure III.20 : Après revenu 350°C	75
Figure III.21 : Duromètre HRC	76
Figure III.22 : Coupe nitrurée	77



LISTE DES TABLEAUX



LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Paramètres géométriques des engrenages	9
Tableau I.2 : Composition chimique 40Cr	15
Tableau I.3 : Propriétés mécaniques 40Cr	16

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Composition chimique 40Cr	56
Tableau III.2 : Rugosité avant rectification	65
Tableau III.3 : Rugosité après rectification	65



RÉSUMÉ



Abstract

This dissertation focuses on improving the service life of gears made from low-alloy 40Cr steel through the nitriding treatment process. After presenting the general characteristics and operating principles of gears, the study examines the mechanical properties of 40Cr steel and its use in power transmission systems. Nitriding, as a thermochemical surface treatment, increases surface hardness and enhances wear and fatigue resistance while preserving the core properties of the material. The results demonstrate that this treatment is an effective solution for improving gear performance, reliability, and service life.

Keywords: Gears, 40Cr steel, nitriding, surface hardness, wear, service life.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'amélioration de la durée de vie des engrenages en acier faiblement allié 40Cr par traitement de nitration. Après une présentation générale des engrenages et de leurs principales caractéristiques, l'étude s'intéresse aux propriétés mécaniques de l'acier 40Cr et à son utilisation dans les systèmes de transmission. La nitration, en tant que traitement thermochimique de surface, permet d'augmenter la dureté superficielle, d'améliorer la résistance à l'usure et à la fatigue, tout en conservant les propriétés du cœur du matériau. Les résultats montrent que ce traitement constitue une solution efficace pour améliorer les performances et la fiabilité des engrenages et prolonger leur durée de vie en service.

Mots-clés : Engrenages, acier 40Cr, nitration, dureté superficielle, usure, durée de vie.

المخلص

تتناول هذه المذكرة تحسين العمر التشغيلي للتروس المصنوعة من الفولاذ منخفض السبك Cr 04 بواسطة المعالجة الكيميائية الحرارية بالنتردة. بعد تقديم عام للتروس وخصائصها الأساسية، تركز الدراسة على الخواص الميكانيكية لفولاذ Cr 04 واستعماله في أنظمة نقل الحركة. تسمح عملية النتردة بزيادة صلادة السطح وتحسين مقاومة التآكل والإجهادات التعبية، مع الحفاظ على خصائص قلب المادة. وقد أظهرت النتائج أن هذه المعالجة تمثل حلاً فعالاً لتحسين أداء وموثوقية التروس وإطالة عمرها التشغيلي.

الكلمات المفتاحية: التروس، فولاذ Cr04، النتردة، الصلادة السطحية، التآكل، العمر التشغيلي.



INTRODUCTION GÉNÉRALE



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les engrenages constituent des éléments mécaniques essentiels dans les systèmes de transmission de puissance et de mouvement. Ils sont largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'automobile, l'aéronautique, les machines-outils et les équipements de production. Leur rôle consiste à transmettre le mouvement et le couple avec précision tout en assurant un rendement élevé et une grande fiabilité de fonctionnement.

Au cours de leur utilisation, les engrenages sont soumis à des sollicitations mécaniques importantes, notamment des contraintes de contact entre les dents, des efforts de flexion au niveau du pied de dent ainsi que des phénomènes de frottement et d'usure. Ces sollicitations peuvent provoquer une dégradation progressive des surfaces en contact, entraînant une diminution des performances mécaniques et une réduction de la durée de vie des engrenages. Pour répondre aux exigences industrielles croissantes en matière de fiabilité et de longévité, il est indispensable d'améliorer les propriétés superficielles des matériaux utilisés dans leur fabrication.

Parmi les matériaux les plus employés pour la fabrication des engrenages, les aciers faiblement alliés occupent une place importante grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques, leur ténacité et leur aptitude aux traitements thermiques et thermochimiques. L'acier 40Cr est particulièrement apprécié pour sa bonne résistance mécanique et sa capacité à subir différents traitements destinés à améliorer ses performances en service.

Les traitements thermochimiques représentent aujourd'hui l'une des solutions les plus efficaces pour renforcer les caractéristiques superficielles des pièces mécaniques. Parmi ces traitements, la nitruration est largement utilisée dans l'industrie pour augmenter la dureté superficielle, améliorer la résistance à l'usure, accroître la résistance à la fatigue et prolonger la durée de vie des composants mécaniques soumis à des conditions sévères de fonctionnement. Ce procédé consiste à enrichir la surface de l'acier en azote à une température contrôlée afin de former des composés nitrurés particulièrement durs et résistants.

Le présent mémoire, intitulé « Amélioration de la durée de vie des engrenages en acier faiblement allié par traitement de nitruration : acier 40Cr », a pour objectif d'étudier

l'influence du traitement de nitruration sur les propriétés mécaniques et structurales d'un engrenage fabriqué en acier 40Cr. L'étude vise à mettre en évidence les modifications microstructurales induites par ce traitement ainsi que leur effet sur la dureté, la rugosité de surface et la résistance à l'usure des engrenages.

Ce travail est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les engrenages, leurs différents types, leurs caractéristiques géométriques et leurs domaines d'application. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des aciers faiblement alliés ainsi qu'aux traitements thermiques et thermochimiques, avec un intérêt particulier porté au procédé de nitruration et à ses mécanismes. Le troisième chapitre présente la partie expérimentale de l'étude, comprenant la fabrication de l'engrenage, les traitements appliqués, les différentes techniques de caractérisation utilisées ainsi que l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

Les résultats de cette étude permettront d'évaluer l'efficacité du traitement de nitruration dans l'amélioration des propriétés de surface de l'acier 40Cr et son influence sur la durée de vie des engrenages destinés aux applications industrielles.



CHAPITRE I

ÉTUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

ET GENERALITES



Introduction

Ce chapitre vise à présenter les fondements théoriques relatifs aux engrenages, considérés comme des éléments mécaniques essentiels dans les systèmes de transmission de mouvement et de puissance. Ces organes jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles, en raison de leur importance directe dans la performance et la fiabilité des machines en fonctionnement.

Il aborde également l'étude des principales propriétés mécaniques des matériaux utilisés pour la fabrication des engrenages, ainsi que les facteurs influençant leur comportement en service. Dans ce contexte, les traitements thermiques constituent un moyen fondamental d'amélioration des performances mécaniques, permettant d'augmenter la dureté, d'améliorer la résistance à l'usure et d'accroître la tenue en fatigue, ce qui contribue à prolonger la durée de vie des pièces.

Parmi ces traitements, on distingue la trempe et le revenu, ainsi que les traitements thermochimiques tels que la nitruration, utilisés pour modifier les propriétés superficielles et améliorer la résistance aux sollicitations en service. Ce chapitre traite également des principales contraintes subies par les engrenages en fonctionnement, ainsi que des différents modes d'endommagement pouvant affecter leur performance (Figure I.1) .



Figure I.1. Engrenage

I.1 Généralités sur les engrenages

I.1.1 Définition et rôle des engrenages

I.1.1.1 Définition

On définit l'engrenage comme un système mécanique constitué de deux roues dentées en rotation autour d'axes fixes, ces axes restant immobiles l'un par rapport à l'autre pendant le mouvement. Le transfert du mouvement et de l'énergie mécanique d'une roue à l'autre s'effectue par l'engrènement successif des dents en contact, assurant ainsi une transmission régulière et précise du mouvement de rotation [1].

- Pignon : désigne la plus petite des deux roues dentées dans un système d'engrenage.
- Roue : désigne la plus grande des deux roues dentées dans un système d'engrenage.

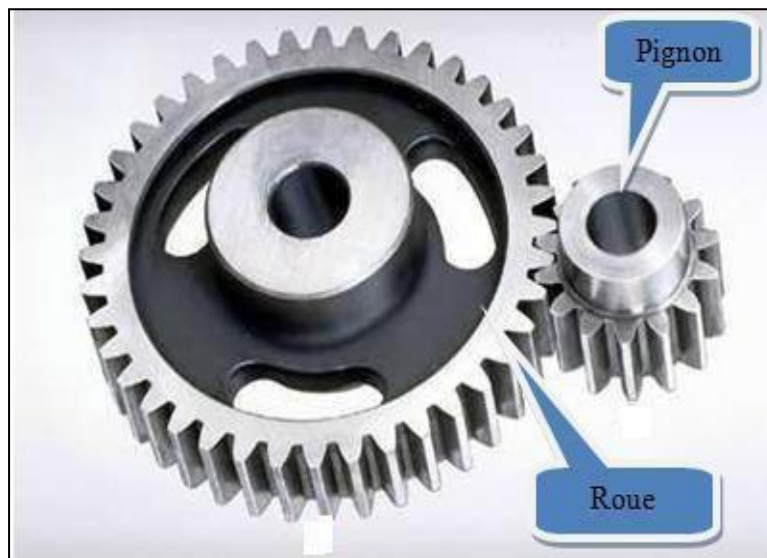


Figure I.2. Roue et pignon dans les engrenages

La transmission s'effectue par contact direct entre les dents, garantissant un rapport de vitesse constant et une synchronisation précise, contrairement aux transmissions par friction ou par courroie qui peuvent être sujettes au glissement. Historiquement, les engrenages ont évolué depuis les premières roues dentées en bois utilisées dans les moulins antiques jusqu'aux systèmes de transmission de puissance sophistiqués des machines modernes [2].

I.1.1.2 Rôle principal des engrenages

- Transmission de puissance et de mouvement : Ils permettent de transférer l'énergie mécanique d'une source motrice à un récepteur.
- Modification de la vitesse de rotation : Grâce à des rapports de dents différents, les engrenages peuvent augmenter (multiplicateur) ou réduire (réducteur) la vitesse de rotation.
- Modification du couple : Inversement à la vitesse, le couple est modifié. Un réducteur de vitesse augmente le couple, et un multiplicateur le diminue.
- Changement de direction du mouvement : Les engrenages coniques ou à vis sans fin permettent de modifier l'orientation de l'axe de rotation[3].

I.1.2 Types d'engrenages

I.1.2.1 Engrenages à axes parallèles (engrenages cylindriques)

Les engrenages à axes parallèles, également appelés engrenages cylindriques, constituent l'un des principaux systèmes de transmission du mouvement mécanique. Ce type se subdivise en plusieurs catégories selon la géométrie des dents le long de la génératrice, notamment les dentures droites et les dentures hélicoïdales. De manière générale, les engrenages sont classés en trois grandes familles : les engrenages à axes parallèles, les engrenages à axes non parallèles mais coplanaires, et les engrenages à axes non parallèles et non coplanaires. On distingue également des types courants tels que les engrenages hélicoïdaux, coniques et les engrenages à vis sans fin, chacun étant utilisé en fonction des exigences de l'application mécanique et du type de mouvement souhaité.

I.1.2.2 L'engrenage cylindrique à dentures droites

Est l'un des types d'engrenages les plus utilisés dans les applications mécaniques, grâce à la simplicité de sa conception et à la facilité de sa fabrication. Ce type d'engrenage repose sur des surfaces primitives cylindriques parallèles et tangentes, où la transmission du mouvement s'effectue par le contact des dents suivant une ligne droite inclinée appelée angle de pression. Les dentures droites se caractérisent également par des génératrices passant par le point de concours des axes de rotation, ce qui assure une transmission régulière et précise du mouvement. En raison de ses

caractéristiques géométriques simples, ce type d'engrenage est largement utilisé comme référence pour l'étude des principes cinématiques et des normes géométriques des engrenages[4].

I.1.2.3 L'engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales

Est considéré comme l'un des types d'engrenages les plus performants pour la transmission du mouvement mécanique. Il assure un fonctionnement plus silencieux et plus fluide que les engrenages à dentures droites, grâce à l'engrènement progressif des dents. De plus, la multiplicité des points de contact pendant la rotation améliore sa capacité à transmettre les efforts et les couples, notamment à des vitesses élevées. Les dentures hélicoïdales se caractérisent par des génératrices suivant une trajectoire hélicoïdale, ce qui contribue à réduire les vibrations et le bruit tout en améliorant la qualité de l'engrènement. Ce type d'engrenage est largement utilisé dans les boîtes de vitesses, les réducteurs et les multiplicateurs de vitesse, où il garantit une transmission efficace du mouvement et de la puissance entre des arbres parallèles, avec la possibilité d'être également utilisé dans certains systèmes à axes orthogonaux.

Les engrenages sont des éléments mécaniques essentiels largement utilisés dans divers domaines industriels, allant des montres de précision aux boîtes de vitesses automobiles, en passant par les éoliennes, les machines industrielles, les systèmes robotiques et le secteur aéronautique. Ces composants jouent un rôle crucial, car leur fiabilité et leur efficacité garantissent le bon fonctionnement et la durabilité des systèmes mécaniques[5].

I.1.2.4 Engrenage à axes concourants (engrenage conique)

Les engrenages coniques se caractérisent par des roues de forme conique plutôt que cylindrique, avec des dentures pouvant être droites, inclinées ou hélicoïdales. Ils sont utilisés pour transmettre le mouvement de rotation entre des arbres concourants tout en assurant un rapport de vitesse précis et constant. Les engrenages coniques à dentures hélicoïdales, dont les dents présentent une forme en arc de cercle, sont les plus utilisés en raison de leur fonctionnement plus fluide et de leur niveau sonore réduit.

I.1.2.5 Le système engrenage à roue et vis sans fin

Est constitué d'un long cylindre étroit muni d'une denture hélicoïdale continue, semblable à un filetage de vis, qui s'engrène avec les dents de la roue correspondante par glissement progressif lors

de la rotation. Contrairement aux engrenages hélicoïdaux, la vis sans fin ne transmet pas directement le mouvement par pression entre les dents, mais la transmission s'effectue principalement par frottement et glissement entre la surface de la vis et les dents de la roue. Ce système est principalement utilisé pour transmettre le mouvement entre deux arbres orthogonaux, avec la possibilité d'obtenir de très grands rapports de réduction pouvant atteindre 1/200, ainsi qu'une propriété d'irréversibilité dans certaines applications. Il se caractérise également par un fonctionnement silencieux et sans chocs, mais le recours important au frottement et au glissement entraîne un rendement plus faible par rapport à d'autres types d'engrenages[6].

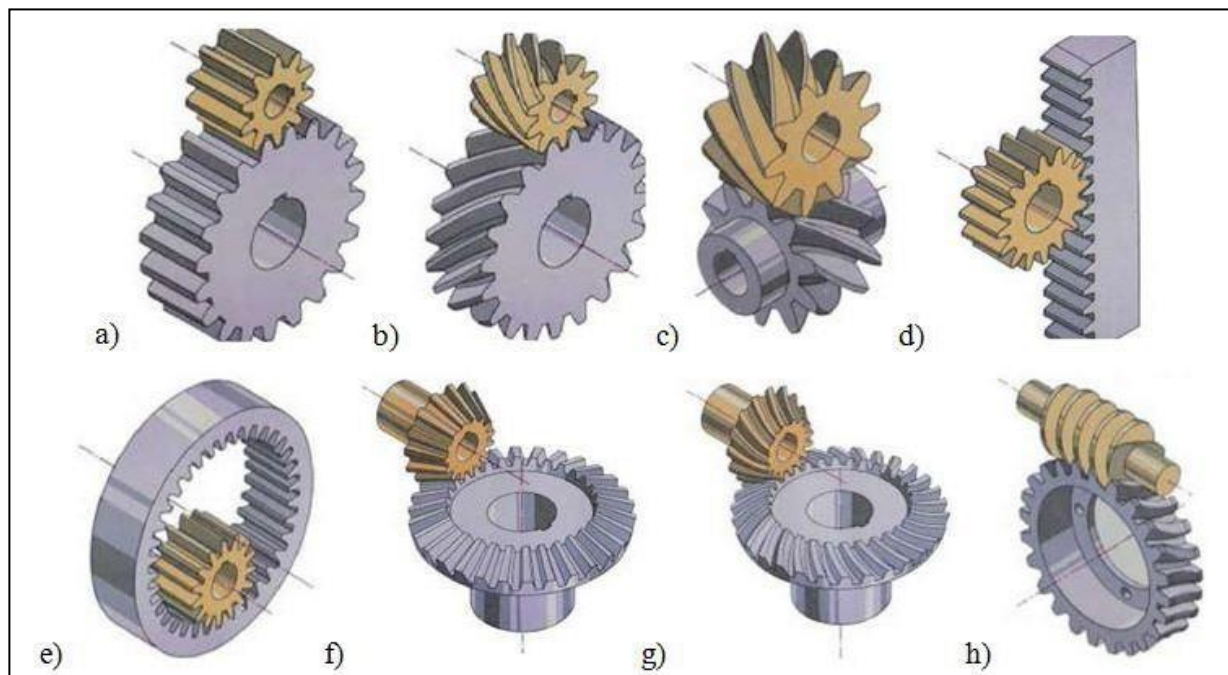


Figure I.3 . Types d'engrenages . a - engrenage droit . b - cylindrique hélicoïdal .
c - chevron cylindrique . d – crémaillère . e - cylindrique à denture interne .
f - engrenage conique . g - hélicoïdal conique . h - vis sans fin

I.1.3 Paramètres géométriques des engrenages

La conception et la fabrication des engrenages reposent sur un ensemble de paramètres géométriques précis qui définissent la forme et la taille des dents, assurant un engrènement correct et une transmission de puissance efficace. Ces paramètres sont normalisés pour garantir l'interchangeabilité et la performance[7] , [8].

I.1.3.1 Profil en développante de cercle

La quasi-totalité des engrenages modernes utilise un profil de dent basé sur la développante de cercle. Ce profil présente l'avantage de maintenir un rapport de vitesse constant entre les deux roues, même en cas de légère variation de l'entraxe. La développante de cercle est la courbe tracée par un point d'une droite qui roule sans glisser sur un cercle (appelé cercle de base).

Les propriétés clés de ce profil sont : La normale à la développante en tout point est tangente au cercle de base.

La ligne d'action (trajectoire du point de contact entre les dents) est une droite tangente aux deux cercles de base des engrenages en prise[9].

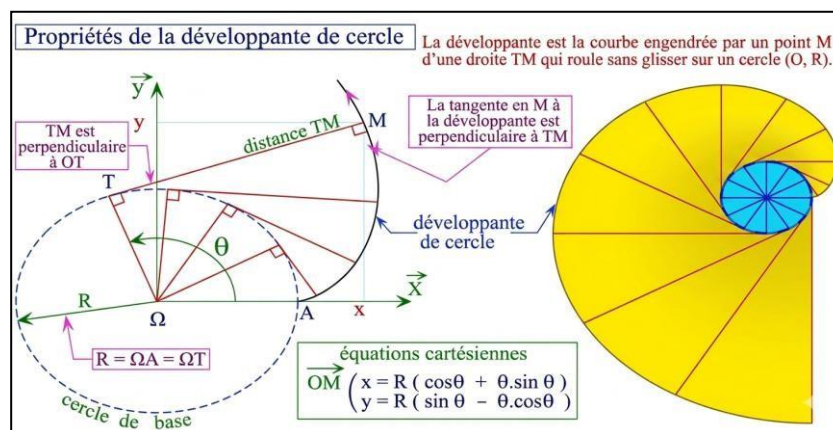


Figure I.4. schéma de développante de cercle

I.1.3.2 Paramètres fondamentaux

Tableau I.1. Caractéristiques d'engrenage cylindrique à denture droite extérieur et intérieur

	Engrenage extérieur	Engrenage intérieur
Module m	Donné par calcul de résistance des matériaux	
Nombre de dents z	Donné par le rapport $(Z_1/Z_2) = (N_2/N_1)$	
Pas au primitif p	$P = \pi \cdot m$	
Saillie h_a	$h_a = m$	
Creux h_f	$h_f = 1,25.m$	
Hauteur de la dent h	$h = h_a + h_f = 2,25.m$	
Diamètre primitif d	$d = m.z$	
Diamètre de tête d_a	$d_a = d + 2.m$	$d_a = d - 2.m$

Diamètre de pied df	$df = d - 2,5.m$	$df = d + 2,5.m$
Largeur de dent b	$b = km$ (k : coefficient de largeur de denture ($7 \leq k \leq 12$))	
Entraxe a	$a = (d_1 + d_2)/2$	$a = (d_1 - d_2)/2$

- Module métrique Le module (m)

Chaque denture possède son propre module, qui constitue le paramètre fondamental définissant les dimensions géométriques et la taille des dents. La condition nécessaire pour assurer un engrènement correct entre deux roues dentées est l'égalité du module, indépendamment du nombre de dents de chacune des roues. Le module est défini mathématiquement comme le rapport du diamètre primitif (d) au nombre de dents (Z), selon la relation suivante [10].

$$m = \frac{d}{Z}$$

(Le module est exprimé en millimètres, mm).

- Le nombre de dents

Le nombre de dents est une grandeur discrète notée par la variable standard « **Z** ». Par convention, l'indice «**1**» (Z_1) désigne l'élément moteur ou le plus petit diamètre (**le pignon**), tandis que l'indice «**2**» (Z_2) désigne l'élément récepteur ou le grand diamètre (**la roue**).

- Le diamètre de tête

Il s'agit du diamètre circonférentiel maximal limitant extérieurement la denture du pignon ou de la roue.

- Le diamètre de pied

Il s'agit du diamètre circonférentiel minimal mesuré au fond des entredents (les espaces interdentaires).

- La saillie

Définie comme la distance Radiale (saillie) comprise entre le cylindre primitif de référence et le cylindre de tête.

- Le creux

Désigne la distance radiale comprise entre le cylindre de pied et le cylindre primitif de référence.

- La hauteur totale de dent

C'est l'extension radiale globale de la dent. Elle correspond à la somme algébrique de la saillie et du creux ($h = h_a + h_f$), mesurée entre le cercle de pied et le cercle de tête.

- L'épaisseur de la dent

Longueur de l'arc de cercle primitif délimité par les deux profils conjugués (flancs) d'une même dent.

- La tête de la dent

Partie matière de la dent située géométriquement entre la surface primitive et la surface de tête.

- Le pied de la dent

Partie matière de la dent située géométriquement entre la surface de pied et la surface primitive.

- La largeur de denture

Dimension axiale correspondant à la longueur utile de la dent parallèlement à l'axe de rotation du composant.

- Le pas primitif

Longueur de l'arc de cercle primitif mesurée entre deux points homologues de deux profils de dents consécutifs ($p = \pi * m$, où m est le module).

- Entraxe

La distance entre les centres des deux engrenages en prise. Pour des engrenages cylindriques à denture droite, l'entraxe est la somme des rayons primitifs

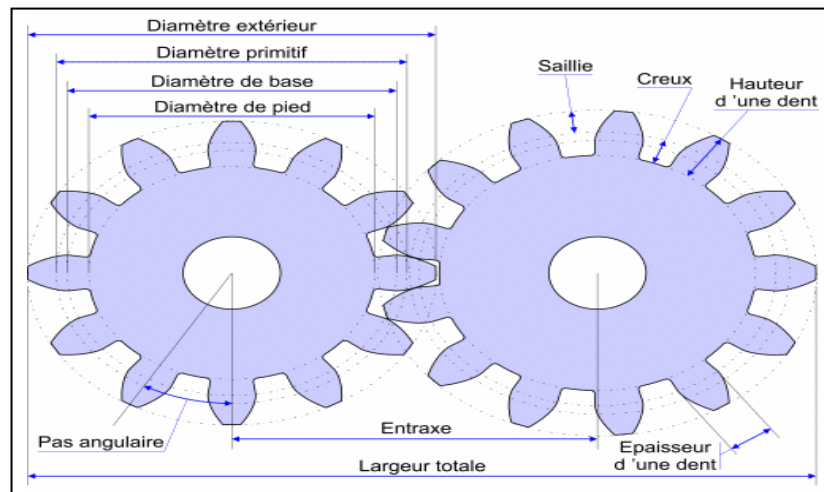


Figure I.5. Illustration des principaux paramètres géométriques d'une dent d'engrenage

I.1.3.3 Cercles caractéristiques de la denture

- **Cercle primitif (Cercle primitif)** Il représente le cercle de référence de contact, correspondant à la zone théorique où se produit un roulement sans glissement entre le pignon (élément menant) et la roue (élément menée).
- **Cercle de pied (Cercle de pied)** Il s'agit du cercle intérieur situé à la base des dents, au niveau des fonds d'entredents.
- **Cercle de tête (Cercle de tête)** Il correspond au cercle extérieur reliant les sommets des dents de la roue dentée[11].

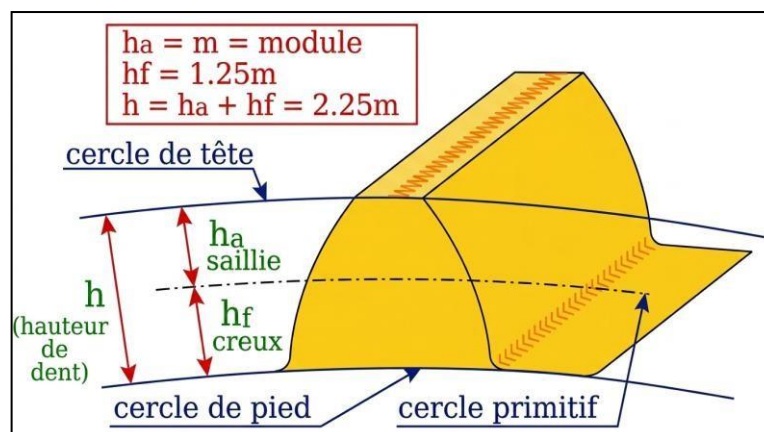


Figure I.6. caractéristiques des dents

I.1.3.4 Correction de denture

La correction de denture est une modification intentionnelle des profils de dents par un déport de l'outil de taillage. Elle est utilisée pour plusieurs raisons [12].

- **Éviter l'interférence** Empêcher le contact entre des parties non conjuguées des profils de dents, notamment lorsque le nombre de dents est faible.
- **Améliorer la résistance des dents** En augmentant l'épaisseur de la dent à sa base, on améliore sa résistance à la flexion.
- **Optimiser le glissement spécifique** Réduire le glissement relatif entre les dents pour minimiser l'usure.
- **Ajuster l'entraxe** Permettre un fonctionnement correct même avec un entraxe légèrement différent de l'entraxe théorique.

$$A = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m(Z_1 + Z_2)}{2} \dots\dots\dots \text{I. 1}$$

I.1.3.5 Cinématique de l'engrènement

L'étude cinématique des engrenages se concentre sur le mouvement relatif des dents en contact. Le principe fondamental est que la normale commune aux profils des dents au point de contact doit toujours passer par le point primitif (point de tangence des cercles primitifs). C'est la condition de Willis, essentielle pour un rapport de vitesse constant [13].

Le mouvement entre deux dents en prise est une combinaison de roulement et de glissement. Au point primitif, le mouvement est purement de roulement. À mesure que le point de contact s'éloigne du point primitif, la composante de glissement augmente. Le glissement spécifique est un paramètre important qui influence l'usure des dents. Un glissement spécifique élevé peut entraîner une usure prématurée.

I.1.3.6 Efforts et contraintes dans les engrenages

Lors de l'engrènement, les dents sont soumises à des efforts complexes qui génèrent des contraintes. Les principaux types de contraintes sont [14] .

- **Contraintes de flexion** Elles apparaissent à la base de la dent en raison de la charge transmise. La résistance à la flexion est cruciale pour éviter la rupture des dents.
- **Contraintes de contact (Hertziennes)** Elles se développent à la surface des dents au point de contact. Des contraintes de contact élevées peuvent entraîner des phénomènes de fatigue de contact (pitting) et d'usure.
- **Contraintes de cisaillement** Elles sont présentes dans le corps de la dent. La distribution de ces contraintes est influencée par la géométrie de la dent, le module, l'angle de pression, la précision de fabrication et les conditions de charge. La compréhension de ces contraintes est essentielle pour la conception d'engrenages durables et fiables.

I.2 Matériaux pour engrenages

La sélection du matériau représente une étape fondamentale dans la conception des engrenages, puisqu'elle conditionne directement leurs performances mécaniques, leur fiabilité ainsi que leur durée de service. Le matériau choisi doit être capable de supporter les différentes sollicitations mécaniques subies par les dents d'engrenage durant le fonctionnement, notamment les contraintes de flexion, les pressions de contact, les chocs et les phénomènes d'usure.

Le choix du matériau repose sur plusieurs critères essentiels, parmi lesquels figurent la résistance à la fatigue en flexion, la résistance à la fatigue de contact, la ténacité, la dureté superficielle ainsi que la résistance à l'usure. Une dureté élevée au niveau des surfaces actives des dents permet de limiter les détériorations dues au frottement et d'améliorer la durée de vie des engrenages. Le matériau doit également offrir une bonne aptitude à l'usinage afin de garantir la précision géométrique et la qualité de surface exigées.

Dans le domaine industriel, les matériaux les plus utilisés pour la fabrication des engrenages sont les aciers, les fontes et certains matériaux polymères. Cependant, les aciers demeurent les matériaux les plus employés grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et à leur aptitude aux traitements thermiques et thermochimiques. Les aciers au carbone et les aciers alliés sont largement utilisés pour les engrenages soumis à des charges importantes. Pour les applications à charges moyennes, les aciers au carbone présentent généralement une teneur en carbone comprise entre 0,35 % et 0,50 %.

Les traitements thermiques appliqués aux engrenages permettent d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques de la pièce, notamment la dureté superficielle, la résistance à l'usure et la tenue à la fatigue, tout en conservant une bonne ténacité au niveau du cœur.

I.2.1 Aciers faiblement alliés pour engrenages

Les aciers faiblement alliés constituent une catégorie majeure de matériaux pour engrenages. Ils contiennent des éléments d'alliage (Cr, Ni, Mo, Mn, V) en faibles proportions (généralement moins de 5% au total) qui améliorent leurs propriétés mécaniques, notamment la trempabilité, la résistance et la ténacité, sans augmenter excessivement le coût. Ces aciers sont souvent utilisés en combinaison avec des traitements thermiques de durcissement superficiel pour obtenir un cœur tenace et une surface dure [15].

I.2.2 Présentation de l'acier 40Cr (38Cr4)

L'acier 40Cr, également désigné comme 38Cr4 selon la norme européenne EN 10083-2, est un acier de construction allié au chrome, largement employé pour la fabrication de pièces mécaniques soumises à des contraintes élevées et nécessitant une bonne résistance à l'usure et à la fatigue. Sa composition chimique typique le classe parmi les aciers à moyenne teneur en carbone [16].

Composition chimique typique (en % massique) :

Tableau I.2. Composition chimique typique de l'acier 40Cr

Élément	% Massique
C	0.38 - 0.43
Si	0.10 - 0.40
Mn	0.50 - 0.80
P	≤0.035
S	≤0.035
Cr	0.80 - 1.10
Ni	≤0.30
Mo	≤0.10

Le chrome (Cr) est l'élément d'alliage principal. Il augmente la trempabilité de l'acier, favorise la formation de carbures qui améliorent la résistance à l'usure, et contribue à la résistance à la

corrosion. Le carbone (C) est essentiel pour la dureté après traitement thermique, tandis que le manganèse (Mn) améliore la trempabilité et la résistance[17].

I.2.3 Propriétés mécaniques et applications

Après un traitement thermique approprié (trempe et revenu), l'acier 40Cr développe un ensemble de propriétés mécaniques équilibrées, le rendant apte à des applications exigeantes. Les propriétés typiques après trempe à l'huile et revenu à haute température sont [18] .

Tableau I.3. Propriétés mécaniques typiques de l'acier 40Cr après trempe et revenu

Propriété mécanique	Valeur typique
Résistance à la traction (Rm)	900-1100 MPa
Limite d'élasticité (Rp0.2)	700-900 MPa
Allongement à la rupture (A)	10-14%
Résilience (KV)	40-60 J
Dureté (HB)	260-320

Ces propriétés confèrent à l'acier 40Cr une excellente combinaison de résistance, de ténacité et de résistance à la fatigue, ce qui en fait un matériau de choix pour :

- **Engrenages** : Particulièrement pour les engrenages de transmission de puissance dans les boîtes de vitesses, les réducteurs et les machines industrielles.
- **Arbres et vilebrequins** Pièces soumises à des charges de torsion et de flexion élevées.
- **Bielles, axes, boulons** Composants nécessitant une haute résistance et une bonne ténacité.
- **Pièces de machines-outils** Pour leur résistance à l'usure et leur stabilité dimensionnelle.

La capacité de cet acier à être nitruré est un avantage supplémentaire, permettant d'améliorer encore sa dureté de surface et sa résistance à l'usure et à la fatigue de contact, sans compromettre la ténacité du cœur.

I.3 Traitements thermiques

Le traitement thermique est considéré comme l'un des procédés fondamentaux en science des matériaux, reposant sur l'application de cycles thermiques contrôlés à des matériaux ferreux solides, totalement ou partiellement, comprenant des phases de chauffage et de refroidissement selon des variations précises de température en fonction du temps, dans le but de contrôler la microstructure du matériau et, par conséquent, d'améliorer ses propriétés mécaniques [19].

Ces opérations visent à améliorer le comportement mécanique des matériaux métalliques et à les rendre plus adaptés aux applications industrielles, notamment à travers plusieurs transformations essentielles, telles que :

- l'augmentation de la résistance à la rupture et l'amélioration de la limite élastique, renforçant ainsi la capacité du composant mécanique à supporter les contraintes en service ;
- l'augmentation de la dureté, ce qui améliore la résistance à l'usure et à l'abrasion dans des conditions de fonctionnement sévères ;
- l'affinement des grains et l'homogénéisation de la microstructure, en particulier après des procédés de mise en forme ou de forgeage ;
- la réduction des contraintes internes dues à la déformation plastique à froid (écrouissage)[20] .

En ce qui concerne les engrenages, le traitement thermique est indispensable afin d'obtenir un compromis optimal entre une dureté superficielle élevée et une bonne ductilité au cœur. En effet, une dureté de surface élevée assure une résistance efficace à l'usure et à la fatigue, tandis qu'un cœur tenace permet d'absorber les chocs et de supporter les contraintes dynamiques en fonctionnement. Cette combinaison permet d'améliorer les performances fonctionnelles des engrenages et de prolonger leur durée de vie en service dans des conditions sévères.

I.3.1 Trempe

I.3.1.1 Principe de la trempe

La trempe est un traitement thermique qui vise à durcir l'acier en le chauffant à une température d'austénitisation, puis en le refroidissant rapidement. Le processus se déroule en plusieurs étapes [21].

- a. **Chauffage (Austénitisation)** L'acier est chauffé à une température où sa structure cristalline se transforme en austénite (phase γ , cubique à faces centrées). Pour l'acier 40Cr, cette température est 850 °C. Le maintien à cette température permet l'homogénéisation de l'austénite et la dissolution des carbures.
- b. **Refroidissement rapide** L'acier est ensuite refroidi rapidement (trempé) dans un milieu tel que l'eau, l'huile, un polymère ou l'air. La vitesse de refroidissement doit être supérieure à la vitesse critique de trempe pour éviter la transformation de l'austénite en ferrite et perlite, et favoriser la formation de martensite. La martensite est une phase sursaturée en carbone, de structure tétragonale centrée, très dure mais fragile.

L'efficacité de la trempe dépend de la trempabilité de l'acier (sa capacité à former de la martensite en profondeur) et de la sévérité du milieu de trempe. Les éléments d'alliage comme le chrome dans le 40Cr augmentent la trempabilité en décalant les courbes de transformation perlitique et bainitique vers des temps plus longs dans les diagrammes TTT et CCT

I.3.1.2 Types de trempe

Dans le traitement thermique, les procédés de trempe peuvent être classés selon la microstructure obtenue et les conditions de refroidissement appliquées. Le choix du type de trempe dépend des propriétés mécaniques recherchées pour la pièce traitée [22].

➤ Trempe martensitique

La trempe martensitique est la plus utilisée dans l'industrie. Elle consiste à refroidir rapidement l'acier austénitisé afin de supprimer les transformations diffuses (ferrite et perlite) et de favoriser la formation de la martensite.

La martensite obtenue est une structure métastable caractérisée par une très grande dureté, mais

également par une fragilité importante. Pour cette raison, les pièces trempées sont généralement soumises à un revenu afin d'améliorer leur ténacité et de réduire les contraintes internes. Ce type de trempe est largement utilisé pour les aciers à outils et les composants nécessitant une forte résistance à l'usure.

➤ **Trempe bainitique**

La trempe bainitique consiste à refroidir l'acier austénitisé jusqu'à une température intermédiaire comprise généralement entre 240 °C et 450 °C, puis à le maintenir isothermement afin de permettre la transformation de l'austénite en bainite.

Cette microstructure présente un bon compromis entre dureté, résistance mécanique et ténacité. Elle est plus homogène et plus fine que la structure martensitique non revenue, ce qui améliore la résistance à la fatigue.

➤ **Transformation des aciers austénitiques**

Les aciers à structure austénitique ne subissent pas de durcissement par trempe classique, car leur structure reste stable à température ambiante. Ils sont généralement soumis à un traitement de mise en solution, consistant à chauffer le matériau à haute température (environ 1000 °C à 1100 °C), suivi d'un refroidissement rapide, souvent dans l'eau.

Ce traitement vise principalement à homogénéiser la structure et à éviter la précipitation des carbures, sans rechercher une augmentation de dureté par formation de martensite

I.3.1.3 Milieux de trempe

Le traitement thermique de trempe nécessite l'utilisation d'un milieu de refroidissement dont le choix dépend de la trempabilité de l'acier. Les milieux les plus utilisés sont l'eau, l'huile et l'air.

Le choix du bain de trempe permet de contrôler précisément la vitesse de refroidissement des pièces chauffées.

Il convient de rappeler que la trempe n'est pas un traitement final. Elle est généralement suivie d'un ou plusieurs traitements de revenu, ayant pour objectif de réduire la fragilité du matériau, d'éliminer les contraintes internes et d'améliorer les propriétés mécaniques finales [23].

I.3.2 Revenu

Le revenu constitue une étape finale des traitements thermiques, généralement réalisée après la trempe. Son objectif principal est de corriger les défauts induits par cette dernière, notamment la

fragilité élevée de la martensite, et d'ajuster les propriétés mécaniques du matériau telles que la dureté, la résistance à l'usure et la ténacité.

Ce traitement consiste à chauffer la pièce préalablement trempée à une température inférieure à celle de l'austénitisation, mais suffisante pour provoquer des transformations microstructurales contrôlées. Ces transformations entraînent une réorganisation de la structure cristalline, permettant ainsi de réduire les contraintes internes et d'améliorer la stabilité du matériau.

Le revenu est généralement effectué dans une plage de températures est 350 °C, selon les caractéristiques mécaniques recherchées et la nature de l'acier. Après un maintien à la température choisie pendant une durée déterminée, le refroidissement s'effectue généralement à l'air libre [24].

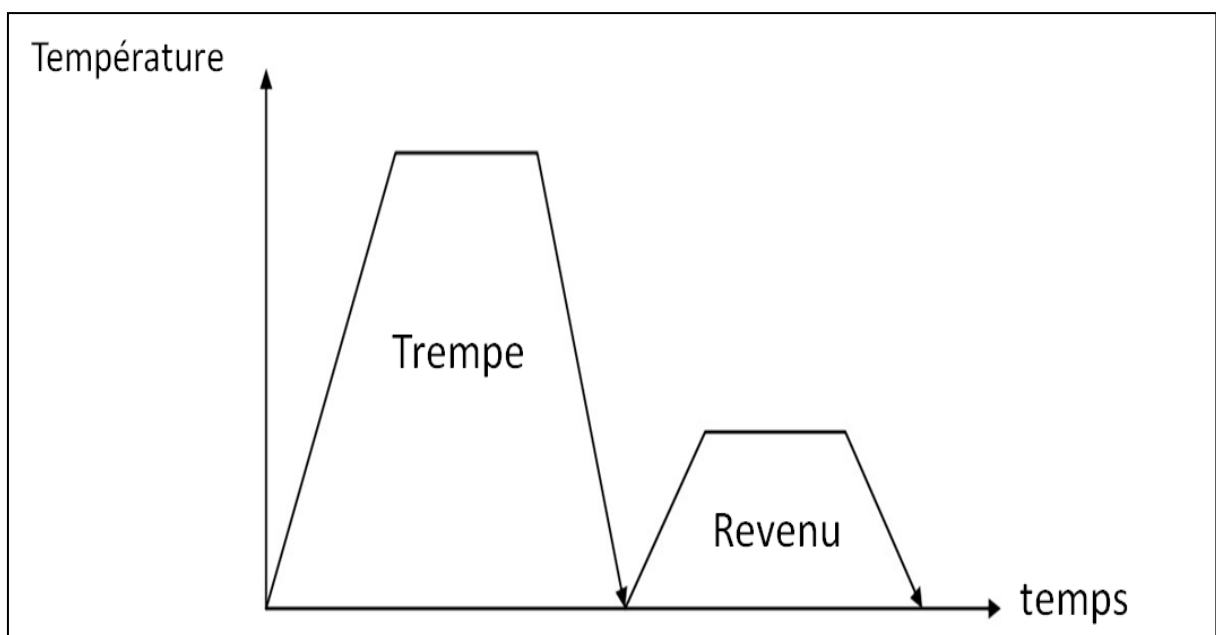


Figure I.7: Cycle thermique complet d'une trempe et revenu

I.3.2.1 Principe du revenu

Le revenu consiste à [25].

- a. **Réchauffage** L'acier trempé est réchauffé à une température inférieure à la température d'austénitisation (généralement entre 150 °C et 650 °C pour les aciers de construction). La température de revenu est un paramètre clé qui détermine le compromis entre dureté et ténacité.
- b. **Maintien** L'acier est maintenu à cette température pendant une durée donnée pour permettre la diffusion du carbone et la précipitation de carbures fins, ainsi que la transformation de la martensite tétragonale en martensite cubique (martensite revenue) et la décomposition de l'austénite résiduelle.
- c. **Refroidissement** Le refroidissement après revenu est généralement lent (à l'air) car il n'y a pas de transformation de phase critique.

Le revenu réduit la fragilité de la martensite, améliore la ténacité, la ductilité et la résistance aux chocs, tout en diminuant légèrement la dureté. La microstructure obtenue après revenu est une martensite revenue, caractérisée par une dispersion fine de carbures dans une matrice ferritique.

I.3.2.2 Types de revenu

➤ Revenu à basse température

Le revenu à basse température est réalisé autour de 250 °C. Il permet principalement de diminuer les contraintes internes générées lors de la trempe et de transformer la martensite en martensite revenue, tout en conservant une dureté élevée (environ 58 à 63 HRC). Ce procédé est couramment utilisé pour les outils de coupe et les instruments de mesure. La durée de traitement varie généralement entre 1 et 3 heures selon l'application.

➤ Revenu à température intermédiaire

Ce type de revenu s'effectue dans une gamme de 350 à 500 °C et est destiné aux pièces soumises à des sollicitations dynamiques telles que les ressorts. Il permet d'obtenir un équilibre entre résistance mécanique et ténacité, avec une microstructure constituée principalement de troostite de revenu et de martensite. La dureté obtenue se situe généralement entre 40 et 50 HRC.

Le refroidissement est réalisé à l'air libre.

➤ Revenu à haute température

Le revenu à haute température est effectué entre 500 et 680 °C. Il conduit à la formation de la sorbite de revenu, structure offrant un bon compromis entre résistance mécanique et ductilité. Ce traitement améliore significativement la résilience et le rapport résistance/ductilité de l'acier.

Il est principalement appliqué aux aciers de construction à teneur moyenne en carbone (0,3 % à 0,5 %) [26].

I.3.3 Diagrammes de transformation (TTT et CCT)

Les transformations de phase lors du chauffage et du refroidissement des aciers sont complexes et sont représentées par des diagrammes de transformation isotherme (TTT - Time-Temperature-Transformation) et de transformation en refroidissement continu (CCT - Continuous Cooling Transformation). Ces diagrammes sont cruciaux pour la conception des traitements thermiques [27].

I.3.3.1 Diagrammes TTT (Transformation - Temps - Température)

Les diagrammes TTT décrivent les transformations de l'austénite en fonction du temps à une température constante. Ils sont obtenus en trempant des échantillons à différentes températures et en les maintenant pendant des durées variables avant de les refroidir rapidement pour figer la structure. Ces diagrammes montrent les domaines de formation de la perlite, de la bainite et de la martensite.

Pour l'acier 40Cr, le diagramme TTT montre un nez perlitique décalé vers la droite par rapport à un acier non allié, ce qui indique une meilleure trempabilité. La température de début de transformation martensitique (M_s) est d'environ 300 °C.

I.3.3.2 Diagrammes CCT (Continuous – Cooling - Transformation)

Les diagrammes CCT sont plus représentatifs des traitements thermiques industriels, car ils décrivent les transformations de l'austénite lors d'un refroidissement continu à différentes vitesses.

Ils sont obtenus en refroidissant des échantillons à des vitesses contrôlées et en mesurant les températures de début et de fin de transformation.

Le diagramme CCT de l'acier 40Cr permet de déterminer la vitesse critique de trempe nécessaire pour obtenir une structure entièrement martensitique. Il montre également les domaines de formation de la ferrite, de la perlite, de la bainite et de la martensite en fonction de la vitesse de refroidissement

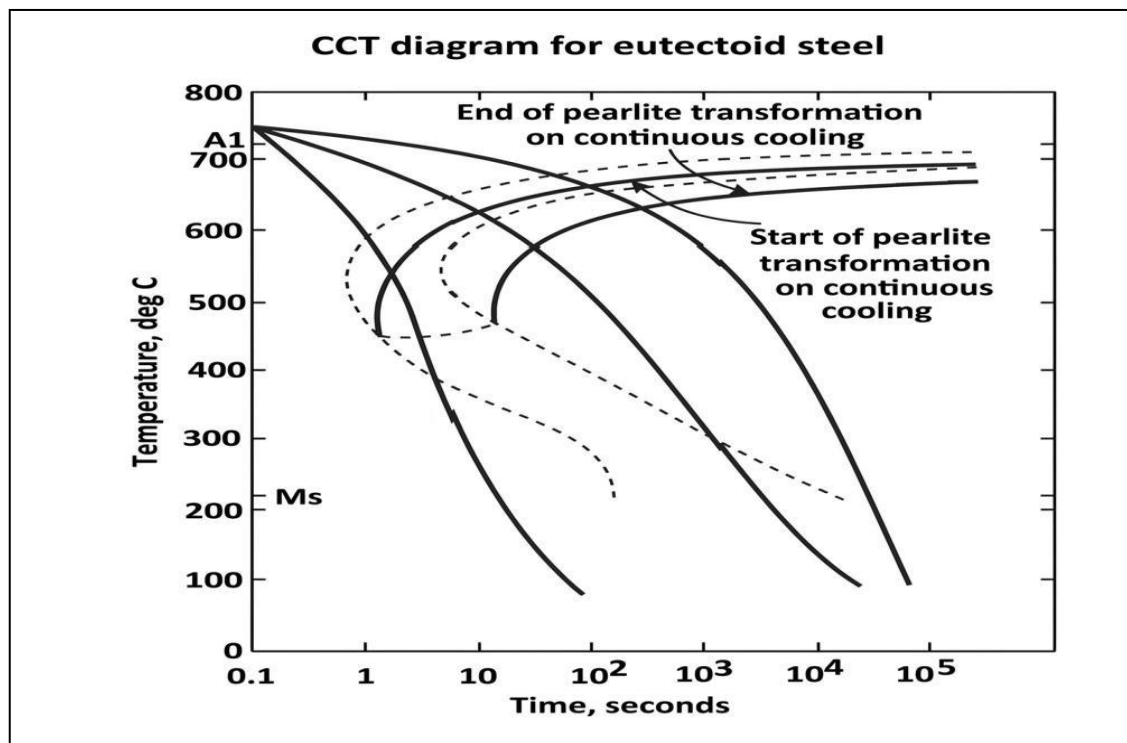


Figure I.8. Exemple de diagramme CCT (à titre illustratif)

I.3.4 Objectifs généraux des traitements thermiques

Les traitements thermiques correspondent à une succession contrôlée de cycles de chauffage et de refroidissement appliqués aux matériaux à l'état solide. Leur objectif principal est de modifier la microstructure afin d'améliorer les propriétés mécaniques et d'adapter le matériau aux exigences des applications industrielles, sans altération de sa composition chimique globale [28].

Les principaux objectifs de ces traitements sont les suivants :

- **Amélioration des propriétés mécaniques fondamentales** augmentation de la résistance à la traction (R_m), de la limite d'élasticité (R_e) et de l'allongement ($A\%$), permettant une meilleure tenue mécanique des pièces.
- **Augmentation de la dureté et de la résistance à l'usure** afin d'améliorer la résistance des composants soumis aux frottements, à l'abrasion et aux chocs.
- **Affinage et homogénéisation de la microstructure** amélioration de la taille et de la distribution des grains, notamment après des opérations de forgeage ou de moulage.
- **Réduction des contraintes résiduelles** diminution des tensions internes générées par les déformations plastiques à froid (écrouissage), susceptibles d'entraîner des déformations ou des fissurations ultérieures.

D'un point de vue métallurgique, les traitements thermiques sont principalement appliqués aux alliages métalliques, en particulier les aciers au carbone (XC) et les aciers alliés. Ils ne modifient pas la composition chimique du matériau, mais agissent uniquement sur sa microstructure. À noter que le recuit de recristallisation constitue une exception, car il permet de supprimer les effets de l'écrouissage.

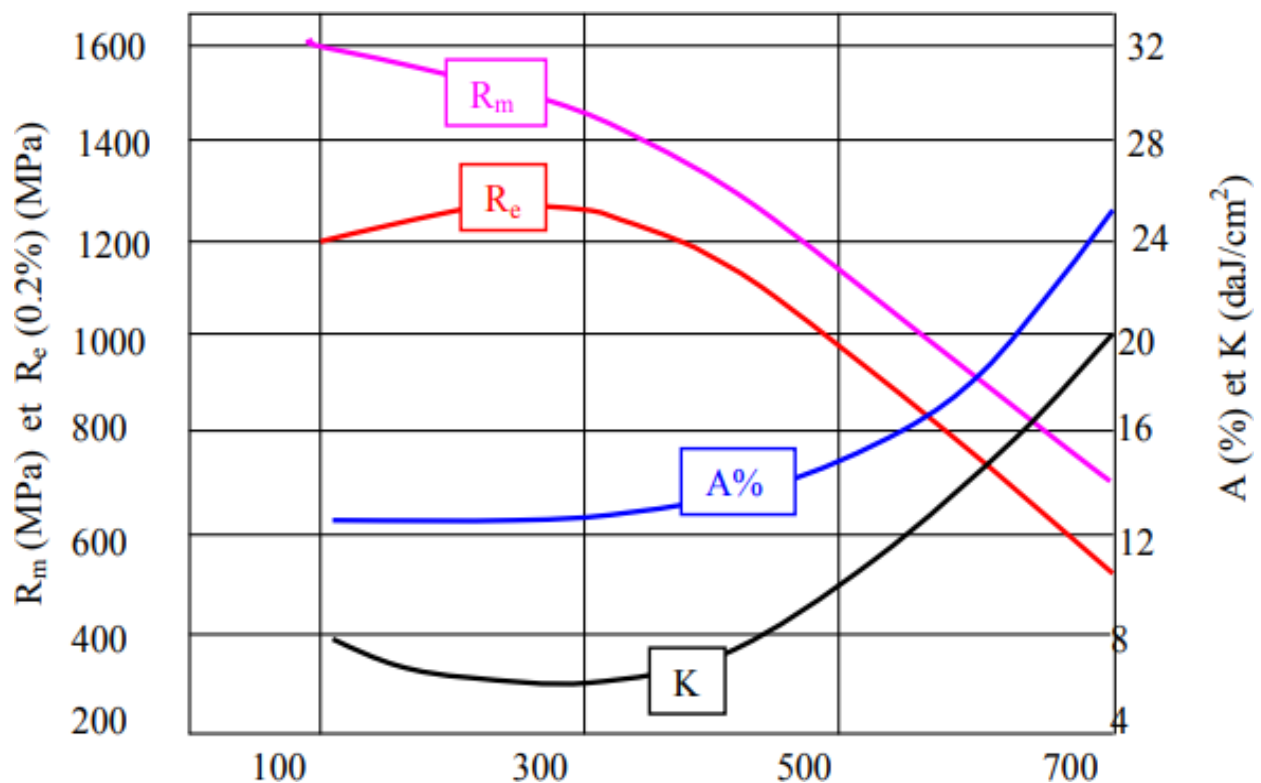


Figure I.9. Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu

I.3.5 Spécificité des traitements thermiques des engrenages

En service, les engrenages sont soumis à des sollicitations mécaniques complexes, notamment des contraintes de contact (usure, pitting) et des contraintes de flexion au niveau du pied de dent. Les traitements thermiques appliqués à ces composants visent donc une optimisation cœur-surface.

- **Au niveau de la surface** l'objectif est d'obtenir une dureté élevée afin de garantir une forte résistance à l'usure, à l'abrasion et à la fatigue de contact.
- **Au niveau du cœur** il est nécessaire de conserver une bonne ténacité afin d'absorber les chocs et de résister aux sollicitations dynamiques sans rupture fragile.

Ainsi, les traitements thermiques des engrenages permettent d'obtenir un compromis optimal entre dureté superficielle et résistance mécanique globale, assurant une meilleure durée de vie en service.

I.4 Nitration ionique (plasma)

La nitration est un traitement thermochimique utilisé pour améliorer les propriétés superficielles des aciers. Elle consiste à introduire des atomes d'azote dans la couche superficielle du métal afin de former des composés nitrurés à haute dureté. Cette opération est généralement réalisée dans un milieu riche en azote, tel que l'ammoniac gazeux, permettant ainsi l'obtention d'une couche superficielle résistante à l'usure, au frottement et à la corrosion.

La nitration contribue à augmenter considérablement la dureté superficielle et améliore la résistance des pièces mécaniques à la fatigue ainsi qu'à la corrosion dans différents milieux tels que l'humidité, l'eau et la vapeur. Parmi ses principaux avantages, la couche nitrurée conserve ses propriétés mécaniques à des températures élevées pouvant atteindre 500 à 550 °C, ce qui la rend plus performante que les couches cémentées qui perdent une partie de leur dureté à des températures plus faibles.

Grâce à ces caractéristiques, la nitration est largement utilisée dans la fabrication des éléments mécaniques soumis à des contraintes et à des frottements importants, tels que les engrenages, les arbres de machines de précision et les composants de moteurs de grande puissance. De plus, la nitration ionique ou par plasma représente l'une des techniques

modernes les plus développées, car elle permet un contrôle précis de la diffusion de l'azote et assure une grande qualité des couches superficielles obtenues [29].

I.4.1 Principe de la nitruration plasma

I.4.1.1 Mécanisme de la nitruration plasma

La nitruration plasma est réalisée dans une enceinte sous vide où la pièce à traiter est portée à un potentiel négatif élevé (cathode), tandis que l'enceinte elle-même sert d'anode. Un mélange gazeux, généralement composé d'azote (N_2) et d'hydrogène (H_2), est introduit à basse pression (typiquement entre 1 et 10 mbar). Sous l'effet d'une tension électrique continue ou pulsée (de l'ordre de 400 à 1000 V), une décharge lumineuse anormale (plasma) est générée autour de la pièce [30].

Le plasma est constitué d'ions, d'électrons, d'atomes neutres et de molécules excitées. Les ions positifs d'azote et d'hydrogène sont accélérés par le champ électrique vers la surface de la pièce (cathode). Ce bombardement ionique a plusieurs effets :

- Pulvérisation cathodique (Sputtering) Les ions arrachent des atomes de la surface de la pièce, ce qui nettoie et décape la surface, éliminant les couches d'oxyde passives et facilitant la diffusion de l'azote.
- Chauffage L'énergie cinétique des ions est convertie en chaleur lors de l'impact, ce qui permet de chauffer la pièce à la température de traitement (généralement entre 400 °C et 580 °C).
- Adsorption et diffusion L'azote actif généré dans le plasma est adsorbé à la surface de la pièce puis diffuse dans la matrice de l'acier.

L'azote diffusé réagit avec le fer et les éléments d'alliage (comme le chrome, le molybdène, le vanadium) pour former des nitrures très durs et stables.

I.4.1.2 Structure de la couche nitrurée

La couche nitrurée formée à la surface de l'acier est généralement constituée de deux zones principales distinctes [31].

➤ **Couche de combinaison (couche blanche)**

Il s'agit de la couche superficielle externe, très mince (de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres). Elle est principalement composée de nitrures de fer (γ' - Fe_4N et ϵ - Fe_{2-3}N). Cette couche présente une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure, mais elle peut être fragile. C'est pourquoi, dans certaines applications d'engrenages, elle est réduite ou éliminée (nitration sans couche blanche) afin d'éviter le phénomène d'écaillage.

➤ **Couche de diffusion**

Elle se situe immédiatement sous la couche de combinaison et constitue la zone la plus épaisse, pouvant atteindre plusieurs dixièmes de millimètre. Elle est formée d'une matrice d'acier (ferrite ou martensite revenue) enrichie en azote en solution solide, contenant de fines précipitations de nitrures d'éléments d'alliage, tels que les nitrures de chrome dans l'acier 40Cr. Cette couche est responsable de la dureté élevée, de la résistance à la fatigue et de la capacité à supporter des charges de contact importantes.

I.4.2 Avantages de la nitration plasma

La nitration plasma présente plusieurs avantages majeurs par rapport aux procédés conventionnels, ce qui en fait une solution privilégiée pour les engrenages à hautes performances [32].

- Contrôle précis de la structure de la couche : En ajustant les paramètres du procédé (composition du gaz, pression, tension, température et durée), il est possible de contrôler avec précision l'épaisseur et la composition de la couche de combinaison, voire de la supprimer, ainsi que le profil de dureté de la couche de diffusion.

- **Faible déformation dimensionnelle** Le traitement étant réalisé à des températures relativement basses, généralement inférieures à la température de revenu, les déformations et distorsions des pièces sont minimisées. Cela est particulièrement important pour les engrenages de précision.
- **Excellente qualité de surface** Le bombardement ionique assure un nettoyage continu de la surface, produisant une surface propre, exempte d'oxydes et de résidus, sans nécessiter de traitement de nettoyage supplémentaire.
- **Possibilité de masquage local** Il est possible de protéger certaines zones de la pièce (filetages, alésages, etc.) à l'aide de masques mécaniques simples, contrairement à la nitruration gazeuse qui nécessite des revêtements protecteurs complexes.
- **Procédé respectueux de l'environnement** Cette technologie consomme moins de gaz et ne génère pas de déchets liquides toxiques, ce qui en fait un procédé plus écologique que la nitruration en bain de sels.

1.4.3 Effet de la nitruration plasma sur les dents d'engrenages

L'application de la nitruration plasma aux engrenages en acier allié, notamment le 40Cr, améliore significativement leurs performances et leur durée de vie [33].

- **Augmentation importante de la dureté superficielle** La formation de nitrures de fer et de chrome augmente fortement la dureté de surface (souvent supérieure à 57.1 HRC ou 639.68 HV), améliorant la résistance à l'usure par abrasion, adhésion et érosion.
- **Amélioration de la résistance à la fatigue de contact (pitting)** La couche de diffusion permet de supporter des pressions de contact élevées sans dégradation de la surface.
- **Amélioration de la résistance à la fatigue en flexion** La nitruration induit des contraintes résiduelles de compression en surface et en sous-surface, retardant l'initiation et la propagation des fissures à la base des dents.
- **Préservation de la ténacité du cœur** Étant donné que le traitement est réalisé à une température inférieure à celle du revenu, les propriétés mécaniques du cœur (ténacité et ductilité) restent inchangées.

- **Amélioration du comportement tribologique** La couche nitrurée présente un faible coefficient de frottement et une bonne résistance au grippage, particulièrement en conditions de lubrification marginale.



CHAPITRE II

METHODOLOGIE ET GAMME DE FABRICATION



Introduction

Depuis plusieurs décennies, les engrenages ont connu un développement important en raison de l'évolution des exigences industrielles en matière de performance, de fiabilité et de rendement énergétique. Leur conception repose sur des principes géométriques précis permettant d'assurer un engrènement correct entre les roues dentées, de réduire les pertes par frottement et d'améliorer la durée de vie des mécanismes. Le choix du type d'engrenage dépend principalement de la disposition des arbres, des conditions de fonctionnement ainsi que des performances recherchées.

Les engrenages existent sous différentes formes telles que les engrenages cylindriques à denture droite, les engrenages hélicoïdaux, les engrenages coniques et les systèmes roue-vis sans fin. Chaque type possède ses propres caractéristiques géométriques et mécaniques lui permettant de répondre à des besoins spécifiques en matière de transmission de mouvement et de puissance.

La compréhension de la géométrie des dents, des paramètres dimensionnels et des conditions d'engrènement est indispensable pour assurer le bon fonctionnement des transmissions mécaniques. En effet, des paramètres tels que le module, le nombre de dents, le diamètre primitif, l'entraxe ou encore l'angle de pression influencent directement les performances, la précision et la résistance des engrenages aux sollicitations mécaniques.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types d'engrenages ainsi que leurs domaines d'utilisation. Nous aborderons également les principaux paramètres géométriques caractérisant les dentures, les notions fondamentales relatives à l'engrènement, les différentes configurations de transmission ainsi que les critères de qualité permettant d'évaluer les performances des engrenages dans les applications industrielles.

II Type d'engrenage

II.1 Généralités

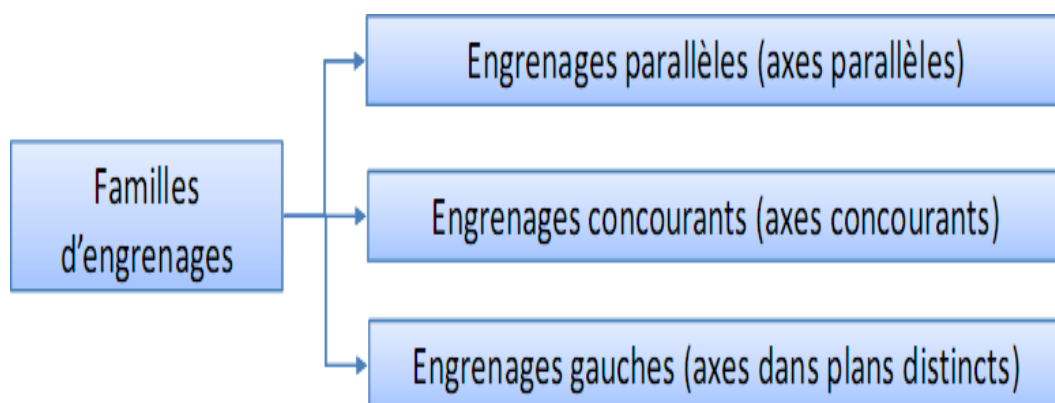
- Parmi les systèmes de transmission de mouvement et de puissance les plus utilisés, les plus résistants et les plus durables
- Ils sont normalisés ce qui permet leur interchangeabilité et réduit leur coût de fabrication;
- La roue qui a le plus petit nombre de dents est appelée « pignon » et c'est généralement elle qui reçoit la puissance du moteur, une combinaison d'engrenages est appelée « train d'engrenages » [34].

II.2 Classification des engrenages

- Les engrenages peuvent se répartir en trois familles selon la position et l'orientation relative de leurs axes , dans chacune de ces familles on retrouve différents types d'engrenages. Ces types sont présentés dans les figures qui suivent [35] .

II.2.1 Engrenages droits à denture droite

- Les arbres sont parallèles et les dents des deux engrenages sont également parallèles à l'axe de rotation des arbres
- Ce sont les plus simples et les plus économiques.



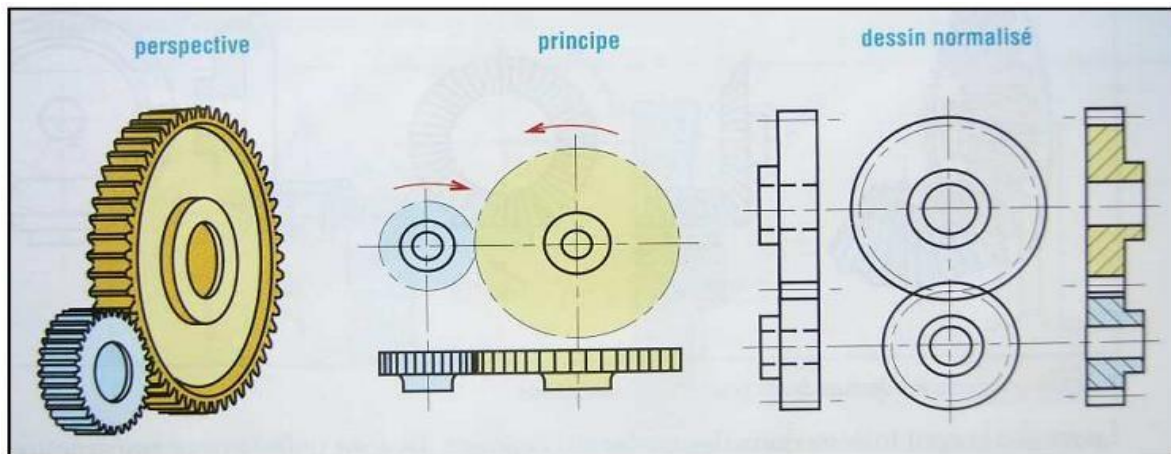


Figure II.1. Engrenage droit à denture droite

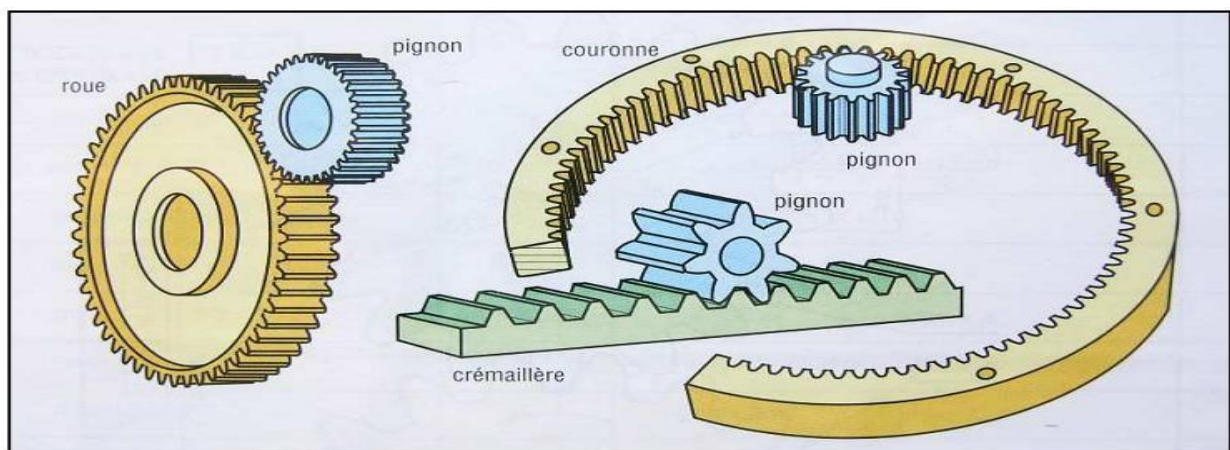


Figure II.2. Engrenages droits à denture droite et à denture interne

II.2.2 Engrenages droits à denture hélicoïdale

- Les dents des deux engrenages sont inclinés par rapport à l'axe de rotation des arbres;
- À taille égale, ils sont plus silencieux et plus performants que les précédents pour transmettre de la puissance et du couple;
- L'inclinaison des dentures engendre des efforts axiaux.

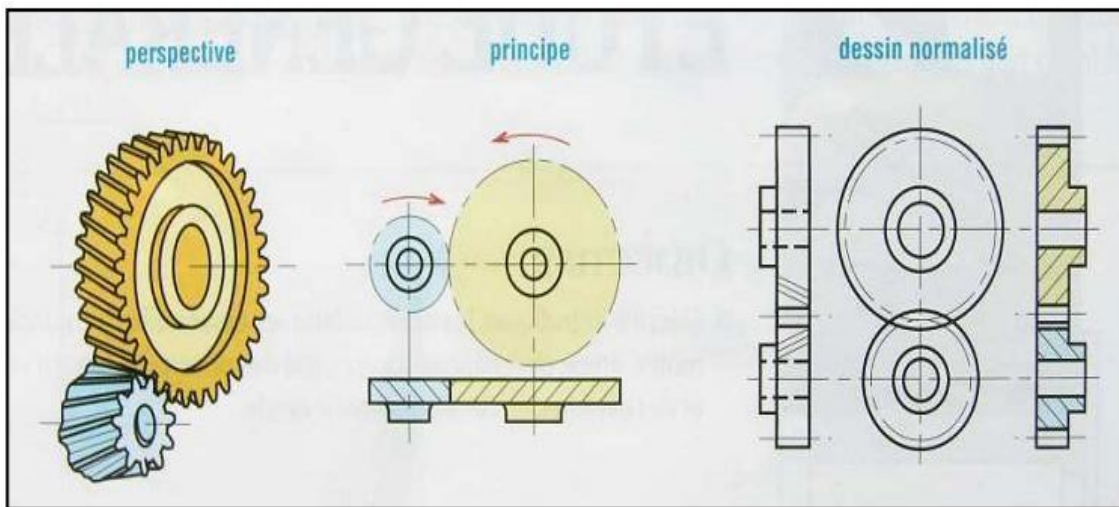


Figure II.3. Engrenage droit à denture hélicoïdale

II.2.3 Engrenages coniques

- Les dents sont taillées dans des surfaces coniques;
- Ils sont utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres concourants, perpendiculaires ou non;
- La denture peut être droite mais aussi hélicoïdale ou spirale.

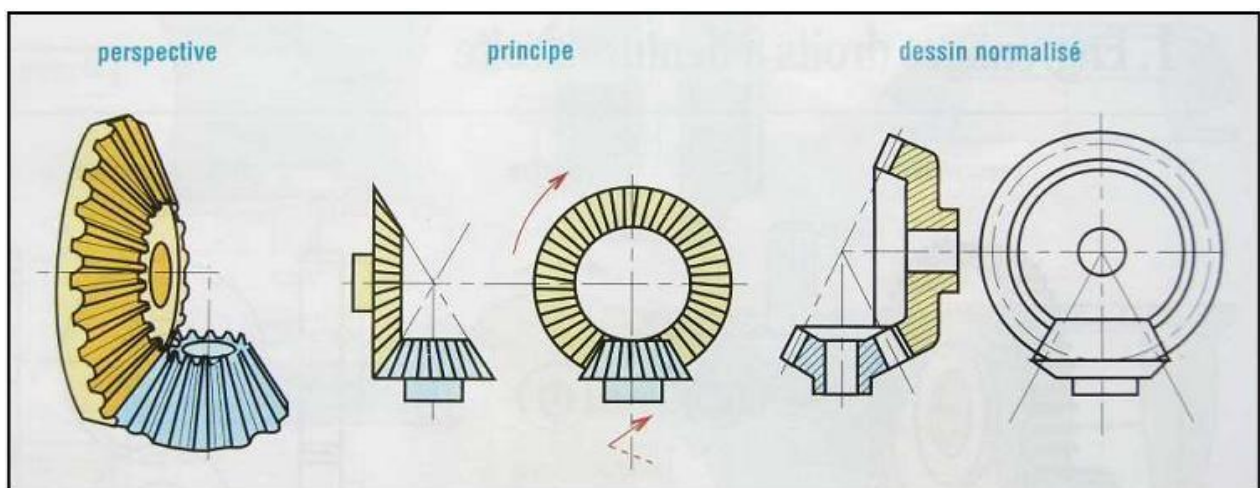


Figure II.4. Engrenage conique

II.2.4 Engrenages roues et vis sans fin

II.2.4.1 Généralités

- La transmission s'effectue entre deux arbres orthogonaux.
- Il permet de grands rapports de réduction (jusqu'à 1/200) et offrent des possibilités d'irréversibilité.
- Ils donnent l'engrènement le plus doux et silencieux mais le frottement important entraîne un rendement médiocre.

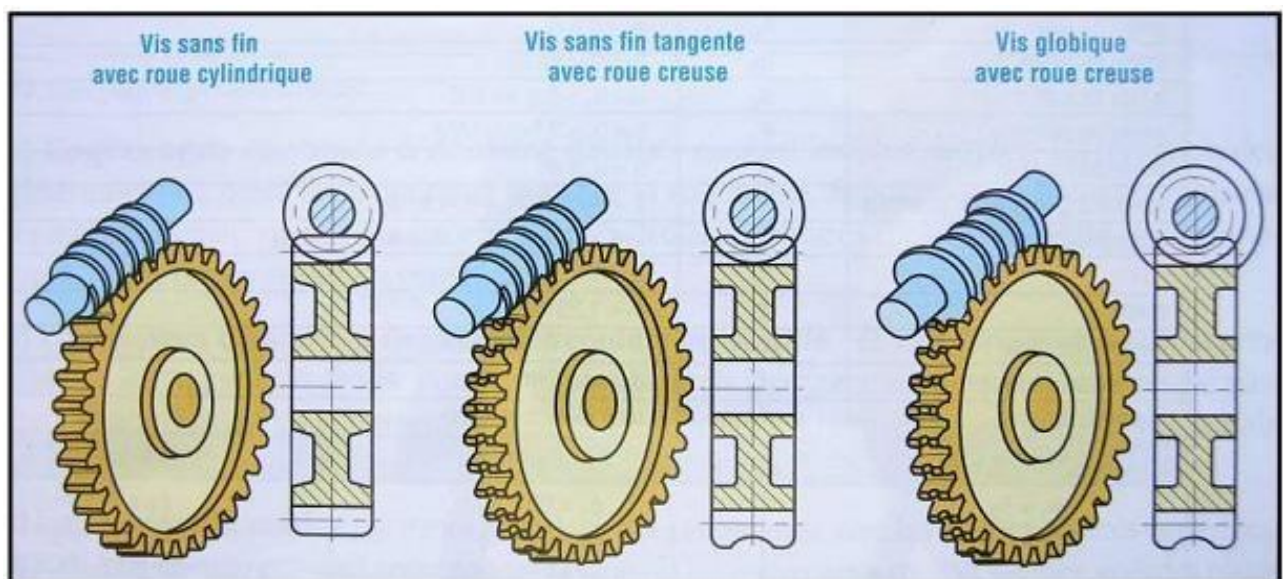


Figure II.5. Engrenage roues et vis sans fin

II.2.4.2 Formules de base

- Différence principale au niveau du calcul de l'entraxe a .

$$\frac{n_R}{n_V} = \frac{Z_V}{Z_R} = \frac{T_V}{T_R}$$

$$\frac{n_R}{n_V} \neq \frac{d_V}{d_R}$$

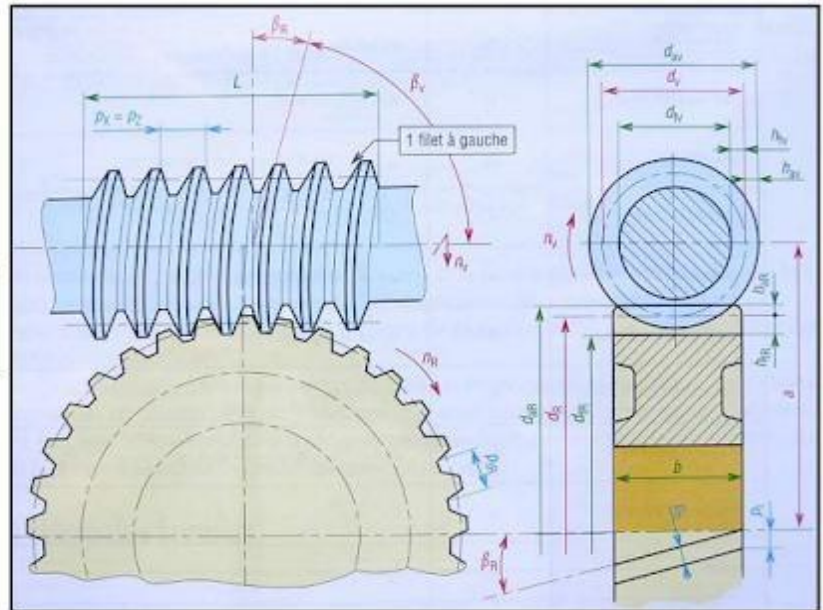
$$a = \frac{m_n}{2} \left(\frac{Z_V}{\sin \beta_R} + \frac{Z_R}{\cos \beta_R} \right) (mm)$$

 Z_v : nb. de filets de la vis

m_n : module réel (mm)

β_R : angle d'hélice de la roue

Autres paramètres comme
précédemment



II.3 Géométrie des dents

– La géométrie des engrenages est entièrement décrite par un ensemble de paramètres qui sont également utilisés pour leur normalisation [36].

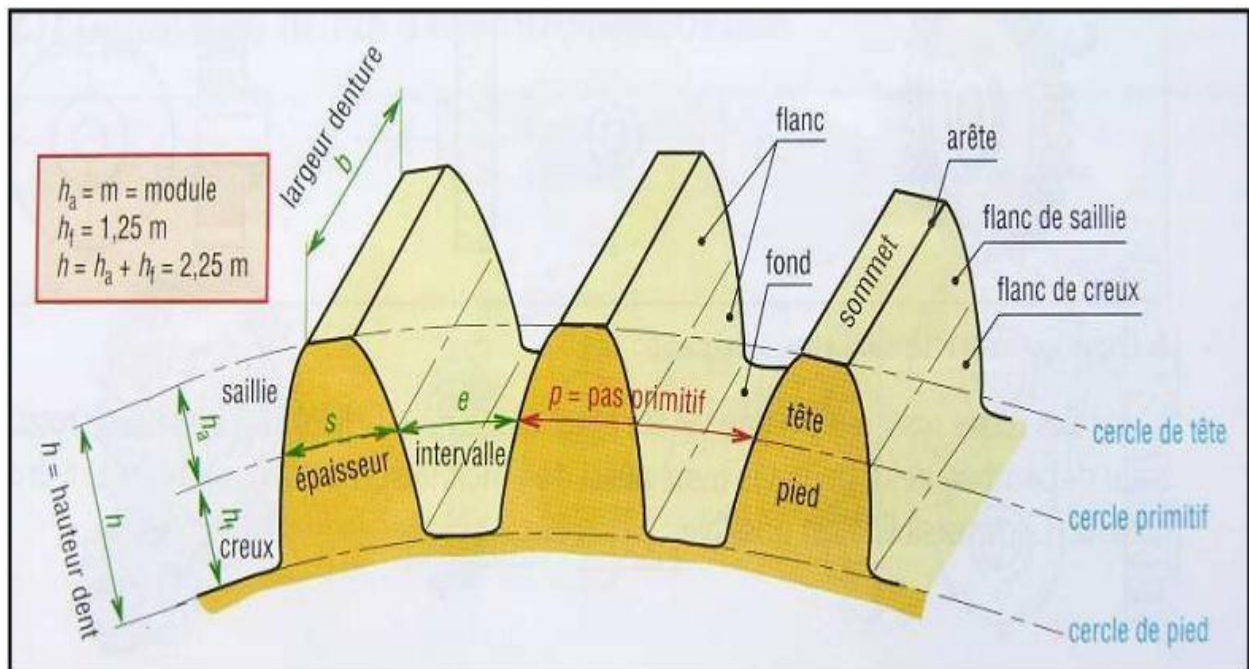


Figure II.6. Paramètres des dents

Cercle primitif : Cercle sur lequel se trouvent les points de contact des engrenages.

Cercle de base : Cercle tangent à la droite normale tangente à la droite normale aux points de contact sur les dents (appelée droite de pression).

Angle de pression α : angle de la droite de pression qui caractérise aussi la forme des dents.

Cercle de tête : Cercle correspondant au diamètre maximal de l'engrenage.

Cercle de pied : Cercle correspondant au diamètre minimal de l'engrenage.

Ces deux derniers cercles ne sont toutefois pas utilisés dans les calculs d'engrenages.

– Le cercle primitif sert de référence pour la définition des dimensions de la dent et d'autres paramètres.

Saillie h_a : Différence entre les rayons du cercle de tête et du cercle primitif.

Creux h_f : Différence entre les rayons du cercle primitif et du cercle de pied.

Hauteur h : Différence entre les rayons du cercle de tête et de pied.

C'est aussi la somme de la saillie h_a et du creux h_f

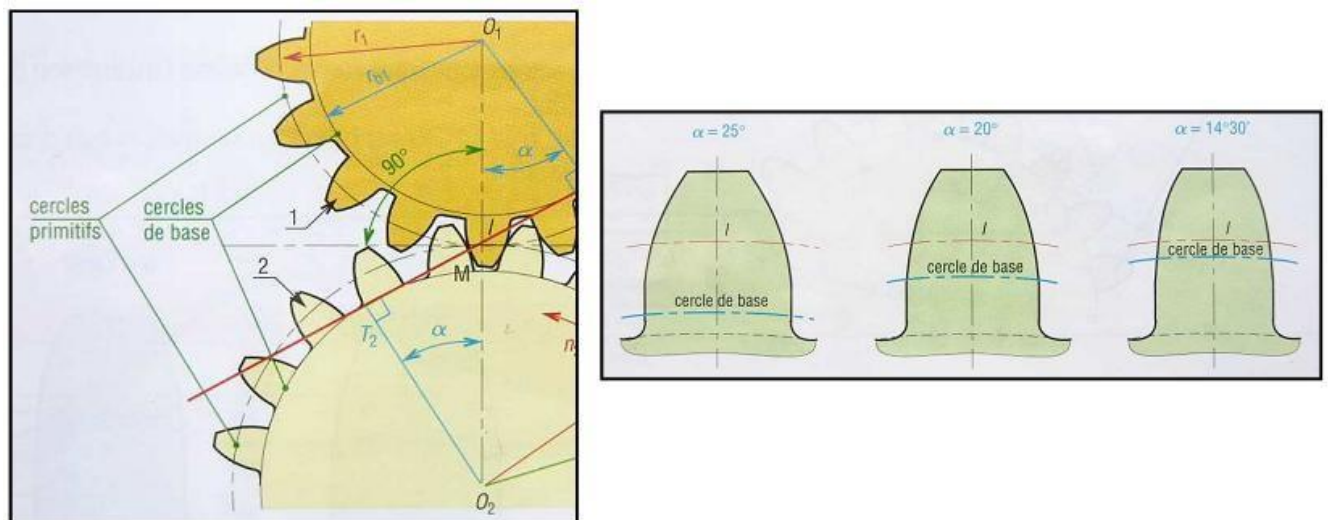


Figure II.7. Contact des dents

- Les paramètres suivants sont fréquemment utilisés dans diverse formules décrivant la géométrie des engrenages:

Pas primitif p : Longueur d'arc entre deux dents successives mesurée sur le cercle primitif.

Module m : Quotient du pas exprimé en mm par le nombre π . L'épaisseur de la dent et sa résistance dépendent du module.

– En plus des paramètres présentés précédemment, il faut aussi définir les variables suivantes

Vitesse angulaire : ω

Nb.de tours/minute : n .

Nombre de dents : Z

Rayon primitif : r

Diamètre primitif : d

Entraxe : a .

Note : à chaque variable peut être associé un indice permettant de distinguer les deux engrenages

Pignon (menant) : 1

Roue (menée) : 2.

II.3.1 Formules de base

– Formules relatives à un engrenage seul

$$m = \frac{p}{\pi} = h_a \text{ (mm)}$$

$$d = m \cdot Z \text{ (mm)}$$

Où

- m : module (mm)
- p : pas primitif (mm)
- h_a : saillie (mm)
- d : diamètre primitif (mm)
- $\pi \cdot d$: circonférence primitive (mm)
- Z : nombre de dents

$$p = \frac{\pi \cdot d}{Z} = \frac{\pi \cdot (m \cdot Z)}{Z} = \pi \cdot m \text{ (mm)}$$

:- Formules relatives au fonctionnement d'une paire d'engrenages :

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m \cdot (Z_1 + Z_2)}{2} \text{ (mm)}$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Où a : entraxe (mm)

m : module (mm)

d : diamètre primitif (mm)

Z : nombre de dents

ω : vitesse angulaire (rad/s.)

n : vitesse en tours/minutes

r : rayon primitif

T : couple transmis

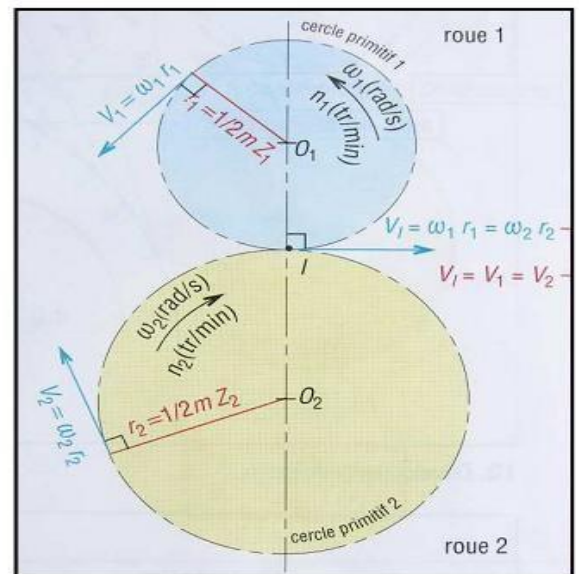
II.4 Cas des roues intérieures

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Où Z : nombre de dents
 ω : vitesse angulaire (rad/s.)
 n : vitesse en tours/minutes
 r : rayon primitif
 T : couple transmis

Fondement de la formule :

- ❖ Vitesses tangentielles égales
- ❖ Puissances $P = T \cdot \omega$ égales



– Les formules précédentes s’appliquent à l’exception de l’entraxe a [35].

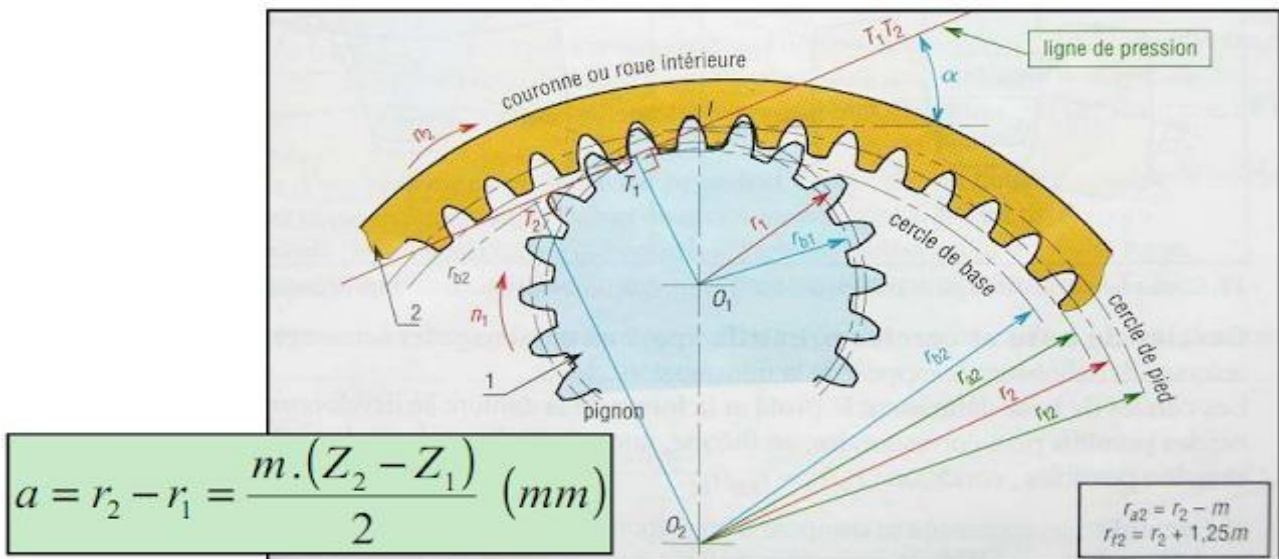


Figure II.8. Roues internes

II.5 Cas d'une crémaillère

– Les formules relatives aux paires d'engrenages ne peuvent plus s'appliquer ici [37].

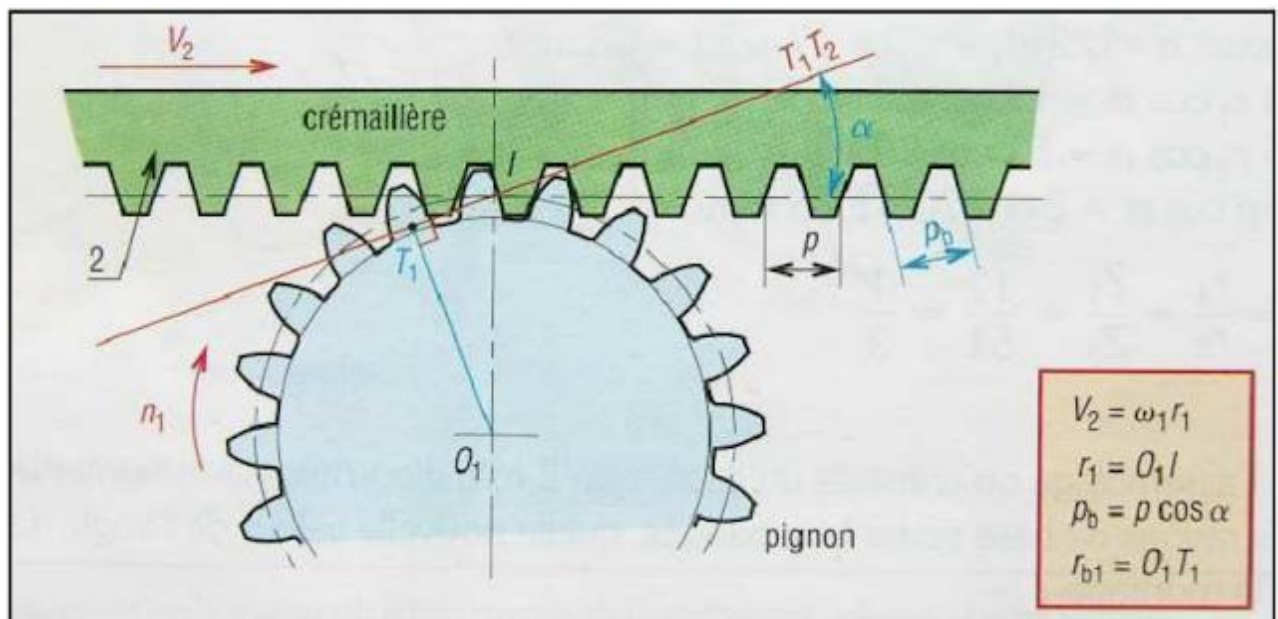
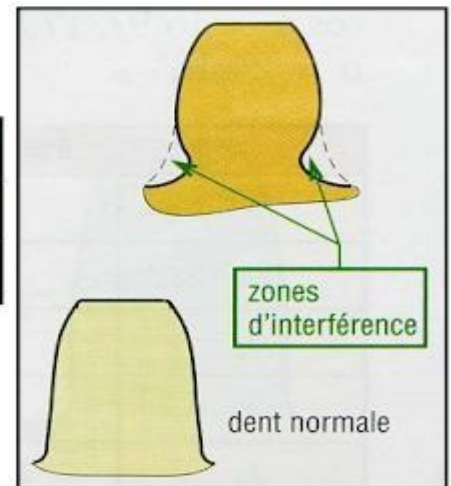


Figure II.9. Crémaillère

II.6 Phénomène d'interférence

– Selon le nombre de dents des engrenages, il peut y avoir des problèmes d'interférence au niveau du pied des dents. Pour éviter ce type de problèmes, il faut respecter le tableau suivant [37].

Nombre de dents évitant l'interférence ($\alpha = 20^\circ$)					
Z_1	13	14	15	16	17
$Z_{2\max}$	16	26	45	101	1309



Module m : Quotient du pas exprimé en mm par le nombre π . L'épaisseur de la dent et sa résistance dépendent du module.

II.7 Engrenage droit à denture hélicoïdale

Ils transmettent le mouvement entre deux arbres parallèles. L'angle d'inclinaison de la denture, l'angle d'hélice, est le même pour les deux roues, mais en sens inverse [38].

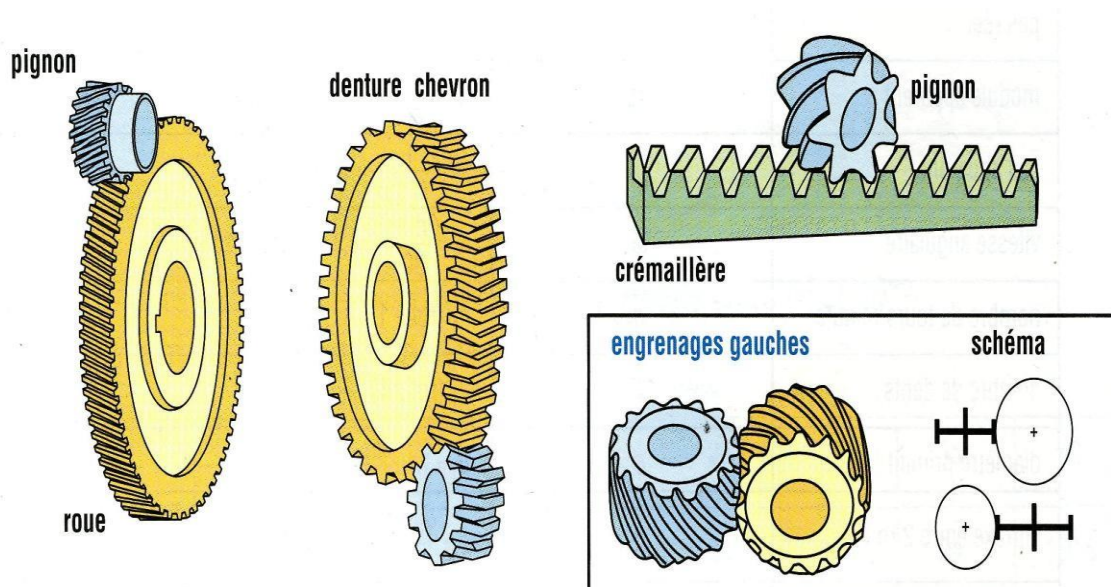


Figure II.10. Engrenage droit à denture hélicoïdale

II.7.1 Différents types d'engrenages hélicoïdaux

II.7.1.1 Comparaison entre dentures droites et dentures hélicoïdales

Avantages de la denture hélicoïdale : transmission plus souple, plus progressive et moins bruyante ; conduite plus grande : 2, 3 ou 4 couples de dents toujours en prise ; transmission d'efforts importants à vitesses élevées ; réalisation facile d'un entraxe imposé en faisant varier l'angle d'hélice. Inconvénients : efforts supplémentaires dus à l'angle d'hélice (force axiale sur les paliers et augmentation des couples de flexion) et rendement un peu moins bon. L'utilisation est impossible sous forme de baladeur ; ces engrenages doivent toujours rester en prise.

II.7.1.2. Définitions et caractéristiques

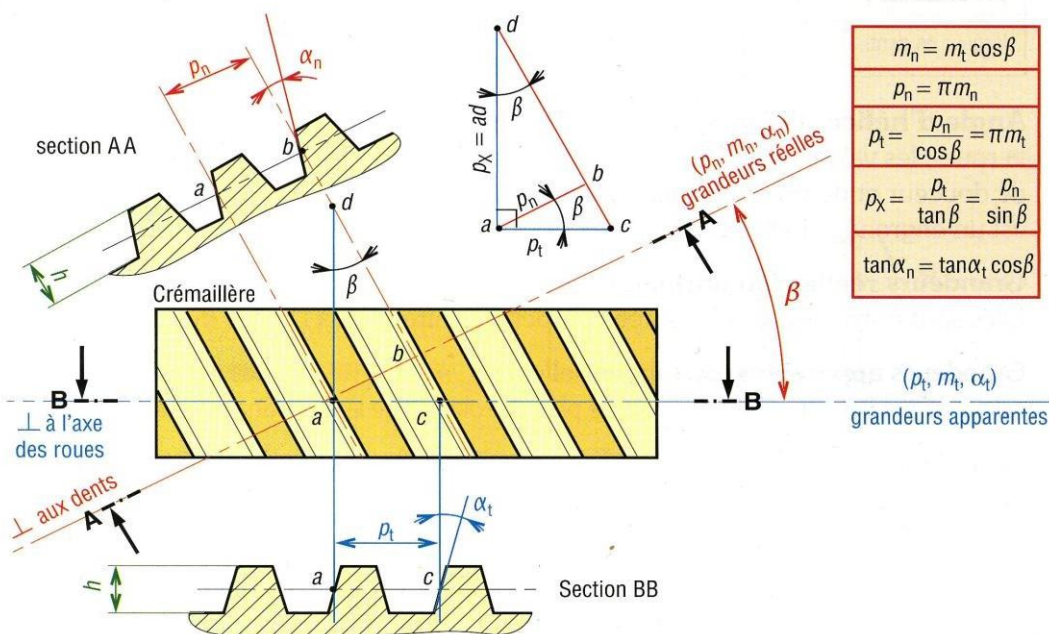


Figure II.11. Caractéristiques d'une crémaillère hélicoïdale

Définition des principales caractéristiques à partir d'une crémaillère hélicoïdale.

Principales caractéristiques des engrenages droits à denture hélicoïdale		
caractéristiques	symboles ISO	observations et formules usuelles
angle d'hélice	β	valeurs usuelles : $15^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$
sens de hélice		si la roue 1 a une hélice à droite, alors la roue 2 a une hélice à gauche
module réel	m_n	m_n est à choisir dans la série des modules normalisés
pas réel	p_n	$p_n = \pi \cdot m_n$
module apparent	m_t	$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}$ (augmente avec β)
pas apparent	p_t	$p_t = \frac{p_n}{\cos \beta} = \pi \cdot m_t$
vitesse angulaire	ω	$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \approx 0,1n$ (unités rad/s)
nombre de tours/minute	n	n_1 (roue 1) n_2 (roue 2)
nombre de dents	Z	Z_1 (roue 1) Z_2 (roue 2)
diamètre primitif	d	$d_1 = m_t Z_1$ et $d_2 = m_t Z_2$
entraxe entre 2 roues	a	$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m_t(Z_1 + Z_2)}{2} = \frac{m_n(Z_1 + Z_2)}{2 \cos \beta}$
saillie	h_a	$h_a = m_n$
creux	h_f	$h_f = 1,25 m_n$
hauteur de dent	h	$h = h_a + h_f = 2,25 m_n$
diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2 m_n$
diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2,5 m_n$
diamètre de base	d_b	$d_b = d \cos \alpha_t$
angle de pression réel	α_n	valeur la plus usuelle : $\alpha = 20^\circ$
angle de pression apparent	α_t	$\tan \alpha_n = \tan \alpha_t \cdot \cos \beta$
pas de base réel	p_{bn}	$p_{bn} = p_n \cdot \cos \alpha_n$
pas de base apparent	p_{bt}	$p_{bt} = p_t \cdot \cos \alpha_t$
pas axial	p_x	$p_x = \frac{p_t}{\tan \beta} = \frac{p_n}{\sin \beta} = \frac{p_z}{Z}$
pas de l'hélice primitive	p_z	$p_z = \frac{\pi \cdot d}{\tan \beta} = Z \cdot p_x$
largeur de dent	b	$b > 2 \frac{\pi \cdot m_n}{\sin \beta} = 2 p_x$

II.7.1.3. Angle d'hélice β

Il mesure l'inclinaison de la denture, ou de l'hélice, par rapport à l'axe de la roue ; les valeurs usuelles se situent entre 15 et 30°. De grandes valeurs de β amènent plus de douceur et de progressivité mais aussi des efforts axiaux plus grands. Un engrenage droit est un engrenage hélicoïdal avec $\beta = 0^\circ$.

Grandeurs réelles (ou normales)

p_n , m_n et α_n ($=20^\circ$). Elles sont normalisées et mesurées perpendiculairement à l'hélice (fig. 9).

II.7.1.4. Grandeurs apparentes (ou tangentielles)

p_t , m_t et α_t ne sont pas normalisées et dépendent de la valeur de β . Elles sont mesurées dans le plan de rotation de la roue (analogie avec une denture droite).

Entraxe a

il dépend de l'angle β . En faisant varier β on peut obtenir n'importe quel entraxe désiré, ce qui est particulièrement intéressant pour les trains d'engrenages.

$$a = \frac{m_t (Z_1 + Z_2)}{2} = \frac{m_n (Z_1 + Z_2)}{2 \cos \beta}$$

Largeur b

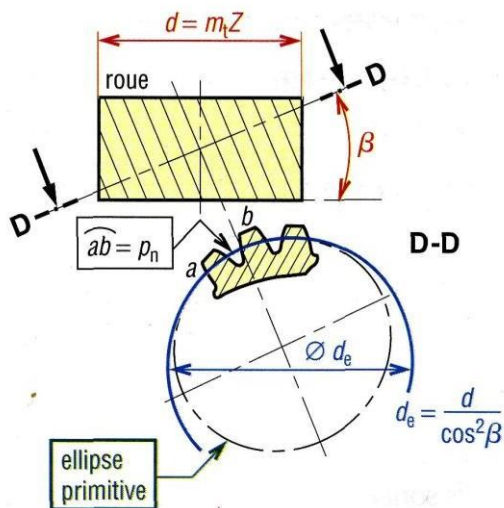
pour des raisons de continuité et de progressivité la largeur b de la roue doit être supérieure au pas axial p_x ($b \geq 1,2 p_x$ est nécessaire, valeurs usuelles : $b \geq 2 p_x$).

Nombre fictif ou virtuel de dents

Ce nombre est utilisé dans certains calculs de résistance de la dent.

Ellipse primitive

Elle est obtenue en coupant le cylindre primitif par un plan perpendiculaire à une hélice. La denture se comporte comme s'il existait un cercle primitif fictif de diamètre $d_e = d/\cos^2 \beta$.



Nombre fictif de dent Z_e

nombre de dents correspondant au diamètre fictif précédent (d_e).

$$d_e = m_n Z_e = m_t Z / \cos^2 \beta = m_n Z / (\cos \beta)^3$$

$$\text{et } Z_e = Z / (\cos \beta)^3$$

II.8 Engrenages coniques ou à axes concourants

II.8.1 Généralités

- Permet de transmettre le mouvement entre deux arbres dont les axes sont concourants.
- Les surfaces primitives ne sont plus des cylindres mais des cônes qui sont tangents sur une ligne de contact MM' et avec un sommet commun correspondant au point S [37].

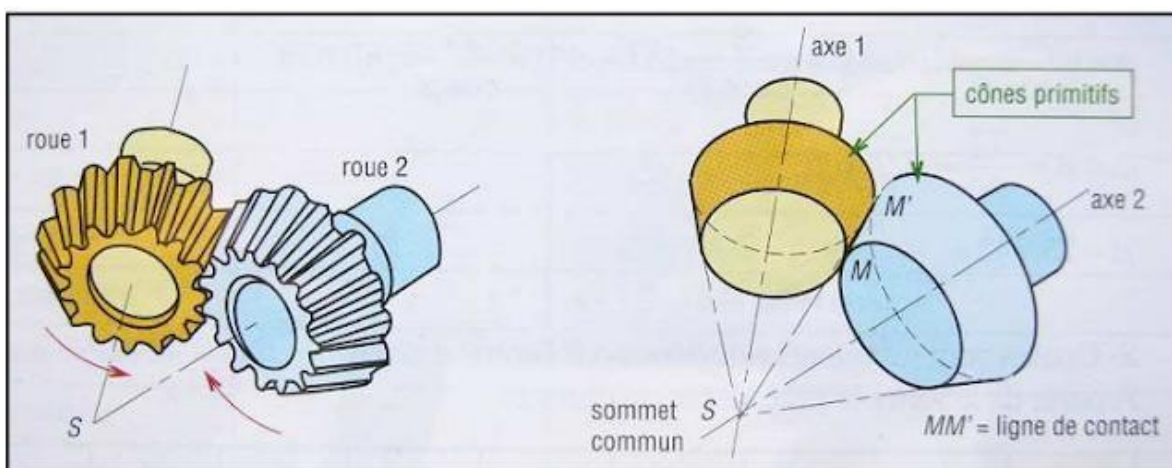


Figure II.12. Engrenages coniques ou à axes concourants

II.8.2 Principaux types

- À denture droite : idem aux engrenages cylindriques.
- À denture hélicoïdale ou spirale : plus progressif et moins de bruit, angle typique de 35° .
- Engrenages hypoïdes : variante complexe des précédents, axes des roues orthogonaux mais non concourants, frottement élevé.



Figure II.13. Types d'engrenages coniques à axes concourants

II.9 Principaux paramètres

- Les équations vues pour les engrenages cylindriques droits s'appliquent de la même manière.
- On parle ici de cônes plutôt que de cylindres ou de cercles et quelques angles supplémentaires sont définis pour caractériser la relation entre les axes des deux roues [39].

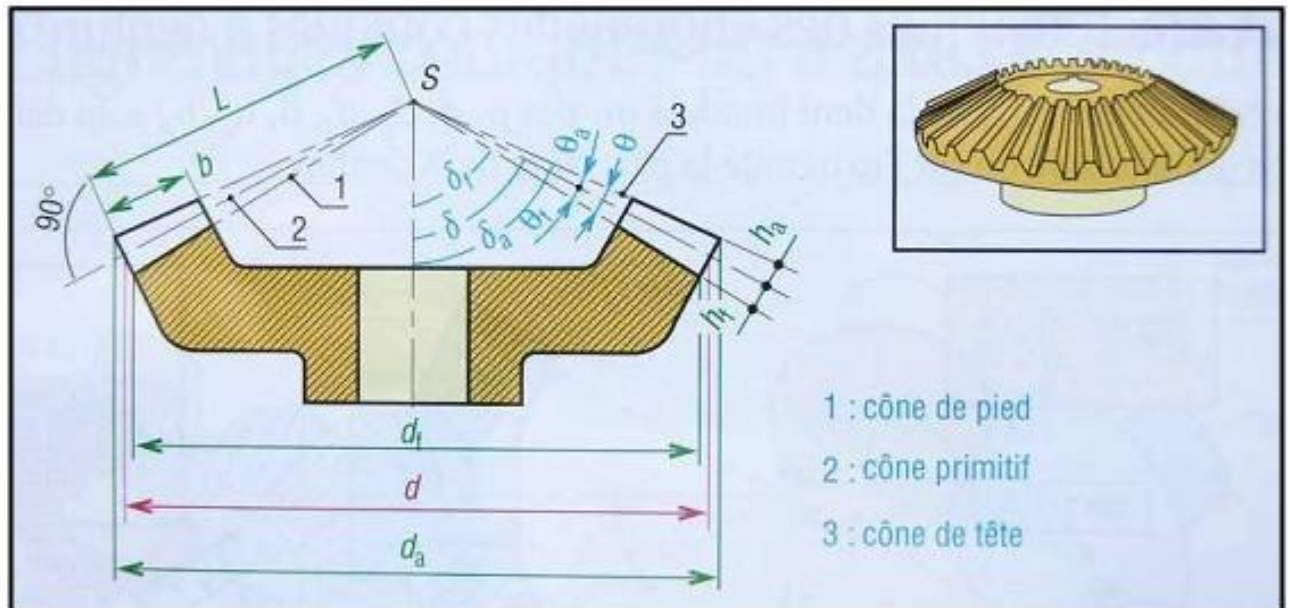


Figure II.14. Paramètres d'engrenages coniques

II.10 Qualité des engrenages

Classes de précision

– Classe 1 à 4 : Précision exceptionnelle et grandes vitesses ($V > 30$ m/s).

Engrenages étalons, turbines. – Classe 5 et 6 : Denture rectifiée ou rasée, vitesses élevées ($V < 20$ m/s).

Appareil de mesure, turbine, automobiles, machine outils.

– Classe 7 : Denture taillée et rectifiée, bonne qualité en mécanique – Classe 7 : Denture aillée et rectifiée, bonne qualité en mécanique générale, vitesses ($V < 10$ m/s). Manutention, machines outils, automobiles, machines de bureau.

– Classe 8 et 9 : Qualité courante pour roues trempées non rectifiées, vitesses ($V < 7$ m/s).

– Classe 10 : Procédés usuels de fabrication, incluant engrenages en plastique.

– Classe 11 et 12 : Engrenages lents ($V < 2$ m/s) et/ou à gros modules [40].

II.11 Trains d'engrenages

Schématisations

– Représentation normalisée des engrenages usuels [41].

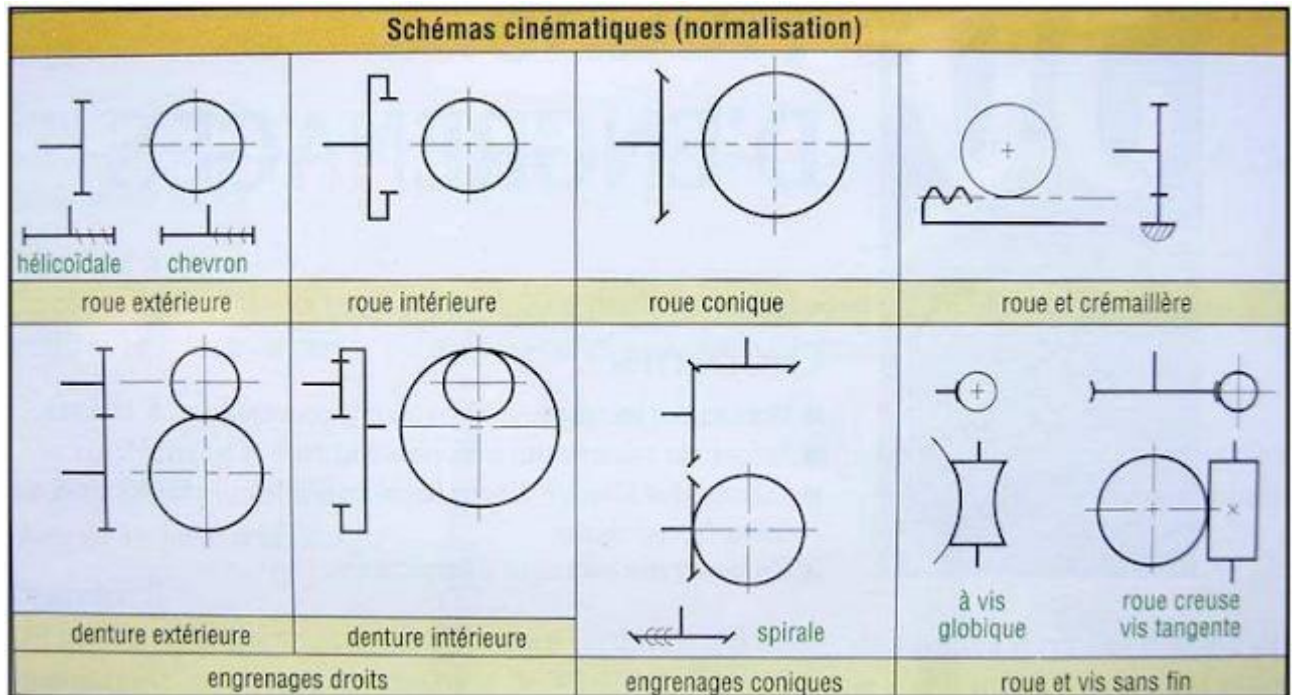


Figure II.15. Représentation normalisée des engrenages usuels

II.11.1 Trains à un engrenage

- Les formules de réduction vues précédemment s'appliquent.
- Un signe négatif indique un changement de sens de rotation entre l'entrée et la sortie.
- L'indice 1 correspond à l'engrenage d'entrée (pignon)

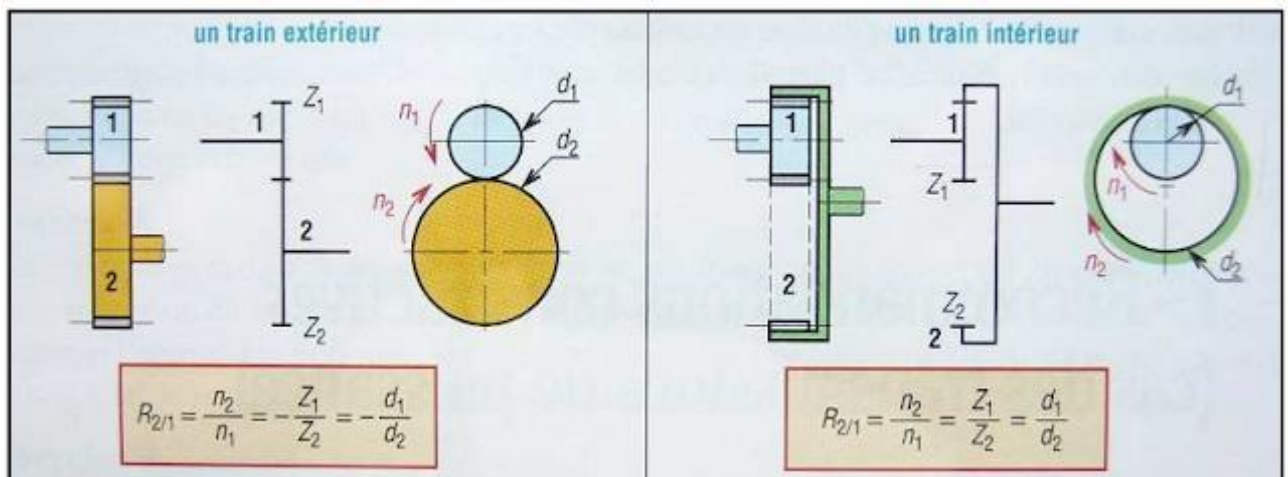


Figure II.16. Train à un engrenage

II.11.2 Trains à deux engrenages

– Il y a alors deux couples de roues en série.

Le rapport de transmission (réduction) est égal au produit des rapports de transmission de chacun des deux couples de roues. □ L'indice 1 correspond toujours à l'engrenage d'entrée (pignon) tandis que les autres indiquent « le chemin » vers la sortie.

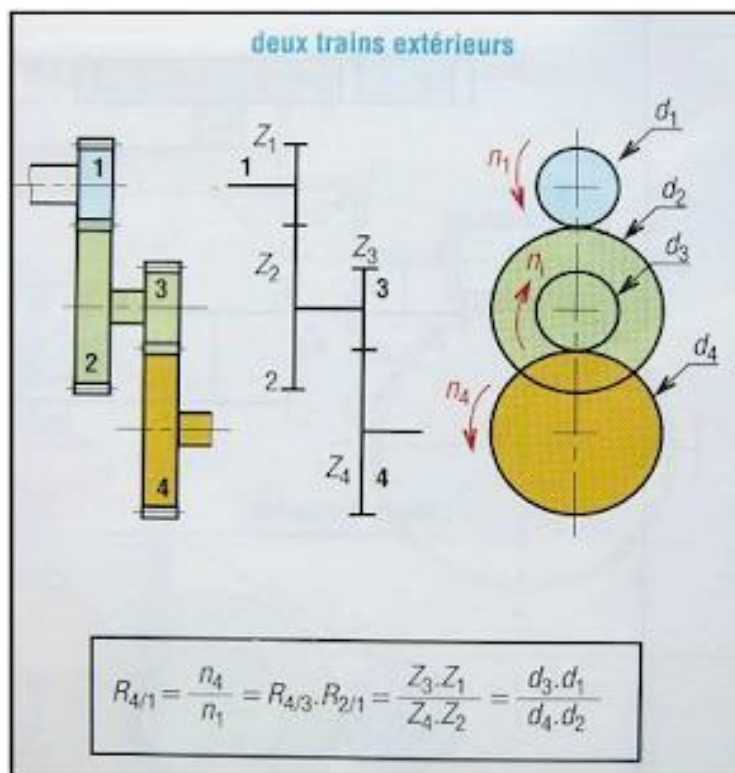


Figure II.17. Train à deux engrenages

II.11.3 Trains à deux engrenages plus roue d'inversion

– On intercale une cinquième roue dans une des deux paires.

La roue modifie le sens de rotation final sans modifier le rapport de la transmission.

Le nombre de dents de la roue.

Le nombre de dents de la roue d'inversion n'a aucune importance. La roue d'inversion aurait pu être intercalée entre les roues 1 et 2 avec le même résultat.

La roue 5 n'apparaît pas dans les équations du rapport de transmission.

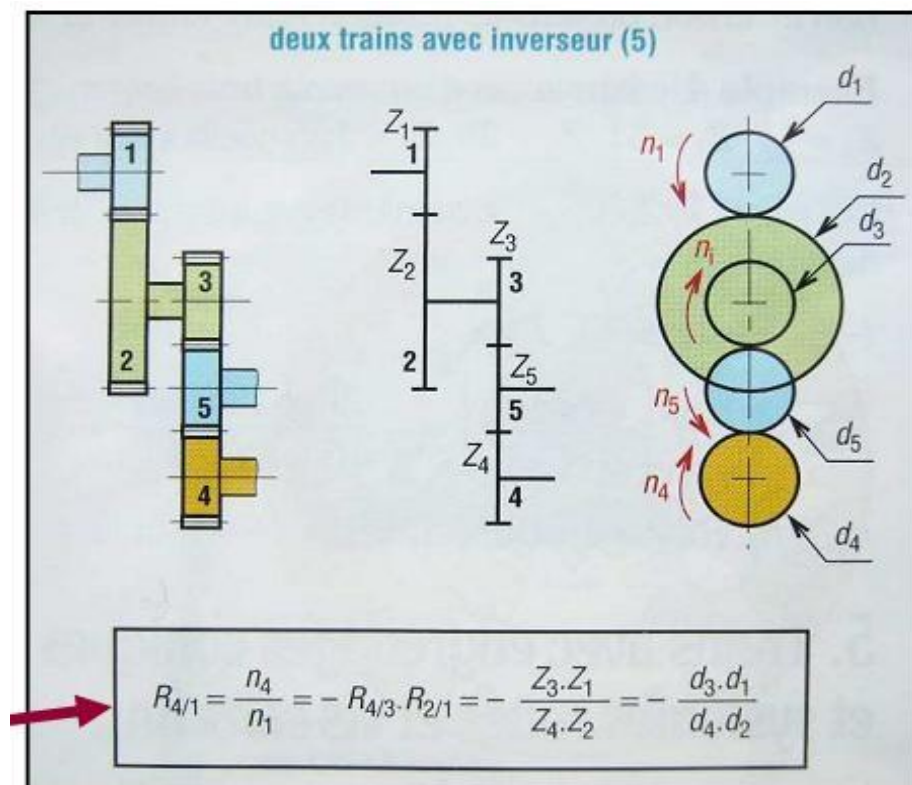


Figure II.18. Train à deux engrenages et plus roue d'inversion

II.11.4 Cas général : trains à N engrenages

- On généralise les équations précédentes.

$$R_{S/E} = \frac{n_S}{n_E} = (-1)^y \frac{\text{produit } Z_{\text{roues menantes}}}{\text{produit } Z_{\text{roues menées}}}$$

$$R_{S/E} = \frac{n_S}{n_E} = (-1)^y \frac{Z_1 \cdot Z_3 \dots Z_{N-1}}{Z_2 \cdot Z_4 \dots Z_N}$$

$$R_{S/E} = \frac{n_S}{n_E} = (-1)^y R_{2/1} \cdot R_{4/3} \dots R_{N/N-1}$$

Note : Le terme $(-1)^y$ tient compte de la présence d'inverseurs avec y = nombre de contacts entre engrenages

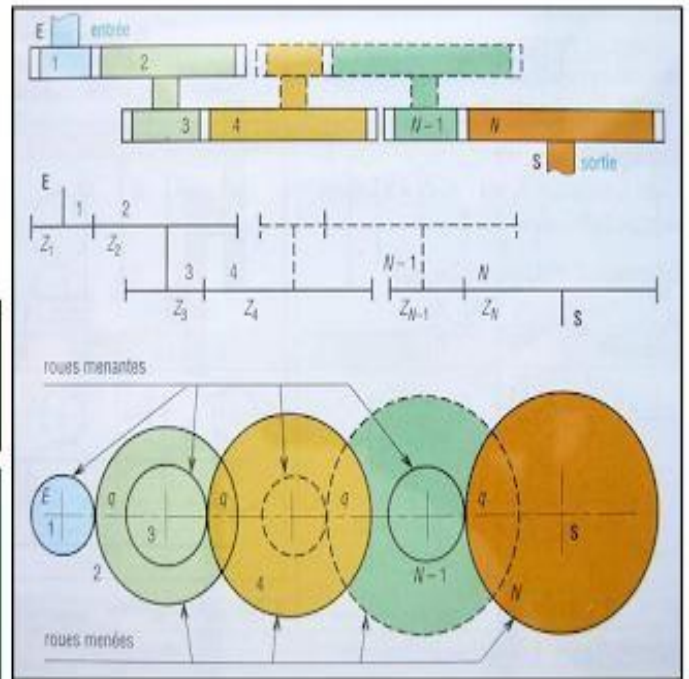


Figure II.19. Train à N engrenages

II.12 Cas des systèmes avec vis sans fin

- La formule générale précédente demeure applicable en supprimant le terme $(-1)^y$.
- On doit respecter les spécificités indiquées précédemment pour les vis sans fin[42].

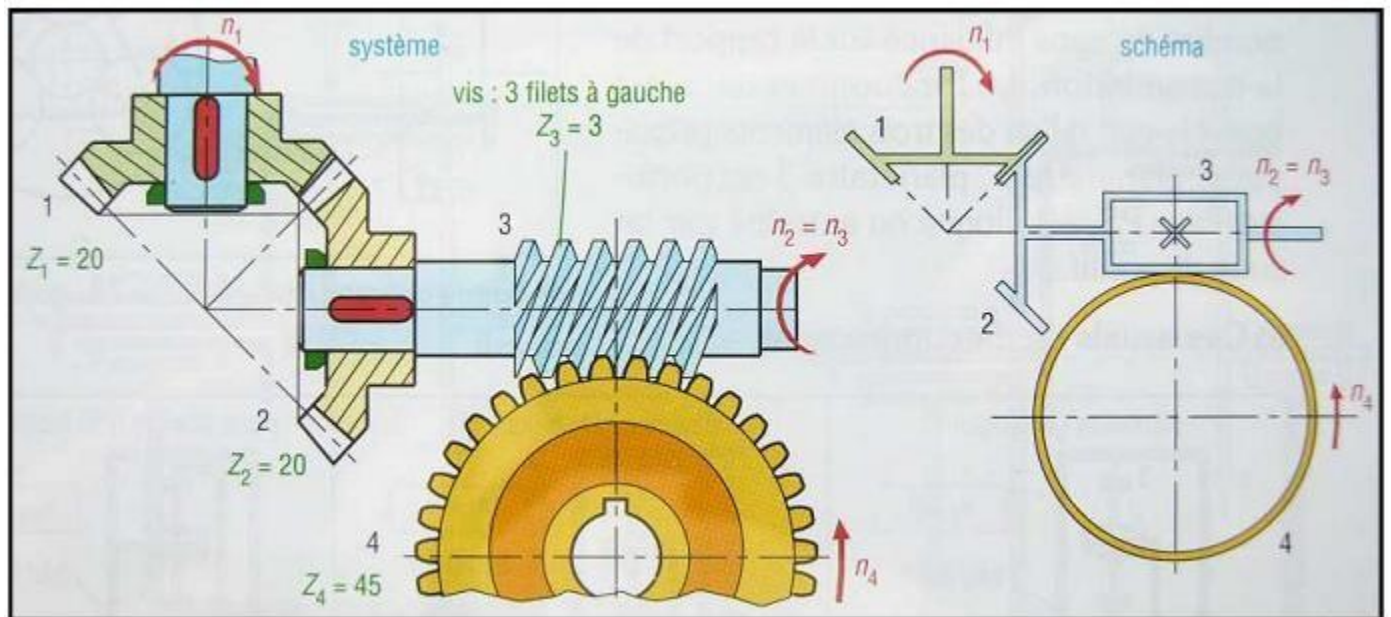
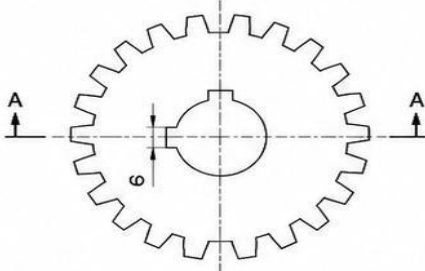


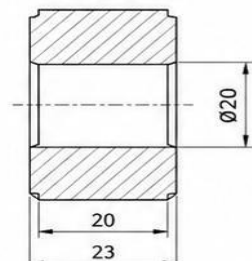
Figure II.20 . Systèmes avec vis sans fin

II.13 La Gamme De Fabrication

GAMME D'USINAGE								
Gamme d'usinage Phase 100		Pièce : Engrenage cylindrique à denture droite			Date : 2026			
		Programme : Petite série			Nom : Salim kordouni			
		Matière : Acier 40Cr			Brut : Rond laminé			
Désignation : Atelier de contrôle					Machine : Selon opération			
N°	Opérations	Machines	Outils	Paramètres de coupe				
				Vc (m/min)	n (tr/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Tt (min)
111	Contrôle du brut	Atelier de contrôle	Pied à coulisse, micromètre	-	-	-	-	-
120	Débitage de l'ébauche	Scie mécanique	Lame de scie	-	-	-	-	-
130	Dressage face 1	Tour parallèle	Outil à dresser	120	600	0,20	2	1,0
140	Dressage face 2 (épaisseur 20 mm)	Tour parallèle	Outil à dresser	120	600	0,20	2	1,0
150	Tournage du diamètre extérieur Ø64	Tour parallèle	Outil à charioter	150	750	0,25	1,5	1,5
160	Perçage du trou central	Perceuse	Foret à centrer	25	400	0,15	-	1,0
170	Alésage à Ø20	Tour / Aléseuse	Barre d'alésage	90	700	0,20	0,5	1,0
180	Rainure de clavette (largeur 6 mm)	Fraiseuse	Fraise 2 tailles Ø6	30	600	0,08	6	1,5
190	Taillage des dents Z=30 ; m=2	Tailleuse d'engrenages	Fraise module m=2	-	-	-	-	3,0
200	Contrôle dimensionnel	Atelier de contrôle	Pied à coulisse, tampons, comparateur	-	-	-	-	-
210	Trempe	Four de traitement thermique	-	-	-	-	-	-
220	Revenu	Four de revenu	-	-	-	-	-	-
230	Nitruration plasma	Installation de nitruration plasma	-	-	-	-	-	-
240	Contrôle final (dimensions et dureté)	Atelier de contrôle	Duromètre, pied à coulisse	-	-	-	-	-



COUPE A-A



Z = 30
m = 2
De = 64 mm
Dp = 60 mm
Da = 55 mm
Épaisseur = 20 mm
Rainure de clavette = 6 mm
Matiere : Acier 40Cr

OBSERVATIONS :



CHAPITRE III

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES



Techniques Expérimentales

III.1. Introduction

Cette étude appliquée a été réalisée au sein de l'Etablissement des Constructions Mécaniques de Khenchela (ECMK). Elle a pour objectif d'améliorer la durée de vie des engrenages fabriqués en acier faiblement allié grâce à l'application du traitement thermique et thermochimique de nitruration. Cette étude repose sur l'analyse des propriétés structurales et mécaniques de l'acier avant et après le traitement thermique. Dans un premier temps, nous présenterons la nuance d'acier utilisée pour la fabrication des engrenages ainsi que ses principales propriétés physiques, mécaniques et chimiques. Nous exposerons également les différentes étapes de fabrication et les opérations d'usinage mécanique mises en œuvre pour la réalisation des engrenages. Ensuite, nous aborderons le traitement de nitruration appliqué aux pièces étudiées, en mettant en évidence son influence sur la dureté superficielle, la résistance à l'usure et l'amélioration des performances mécaniques des engrenages. Enfin, nous présenterons les différentes techniques d'analyse et de caractérisation structurale et mécanique utilisées, ainsi que les méthodes de préparation des échantillons et les équipements employés au cours de cette étude.

III.2. Matériau utilisé

Les engrenages étudiés dans ce travail sont fabriqués à partir d'un acier faiblement allié de type 40Cr, largement utilisé dans le domaine mécanique grâce à ses bonnes propriétés mécaniques ainsi qu'à sa grande aptitude aux traitements thermochimiques, notamment le traitement de nitruration.

Ce type d'acier contient des teneurs en carbone et en chrome, contribuant à l'amélioration de la dureté, de la résistance à l'usure ainsi qu'à l'augmentation de la ténacité après l'application d'un traitement approprié.

La composition chimique de l'acier utilisé a été déterminée à l'aide d'un spectromètre, et le tableau suivant présente les principaux éléments chimiques constituant l'acier 40Cr.

Tableau III.1. Composition chimique typique de l'acier 40Cr

Elément	% Massique
C	0.38 - 0.43
Si	0.10 - 0.40
Mn	0.50 - 0.80
P	≤ 0.035
S	≤ 0.035
Cr	0.80 - 1.10
Ni	≤ 0.30
Mo	≤ 0.10

**Figure III.1.** Le spectromètre utilisé (ECMK-Khenchela)

III.3. Description du matériau utilisé

L'acier 40Cr est considéré comme l'un des aciers faiblement alliés les plus utilisés dans le domaine industriel, notamment pour la fabrication des engrenages et des pièces mécaniques soumises à des charges et des contraintes élevées. Cet acier se distingue par de bonnes propriétés mécaniques, principalement une dureté élevée ainsi qu'une bonne résistance à l'usure et au frottement après l'application des traitements appropriés.

Cet acier est principalement composé de carbone et de chrome. Ces deux éléments contribuent à l'amélioration de sa résistance mécanique et de sa capacité à supporter des conditions de service sévères, tout en augmentant son aptitude aux traitements thermochimiques, tels que la nitruration.

Grâce à sa bonne ténacité et à sa résistance à l'usure, l'acier 40Cr constitue un choix approprié pour la fabrication des engrenages utilisés dans les applications industrielles nécessitant une grande efficacité et une longue durée de vie en service.

III.4. Élaboration de l'engrenage

III.4.1. Usinage

Une barre cylindrique de diamètre 70 mm et de longueur 30 mm a été utilisée comme matière première pour l'opération de fabrication. Cette barre brute a ensuite subi plusieurs opérations d'usinage mécanique afin d'obtenir un engrenage droit muni d'une rainure, conformément au plan de définition présenté dans la figure III.

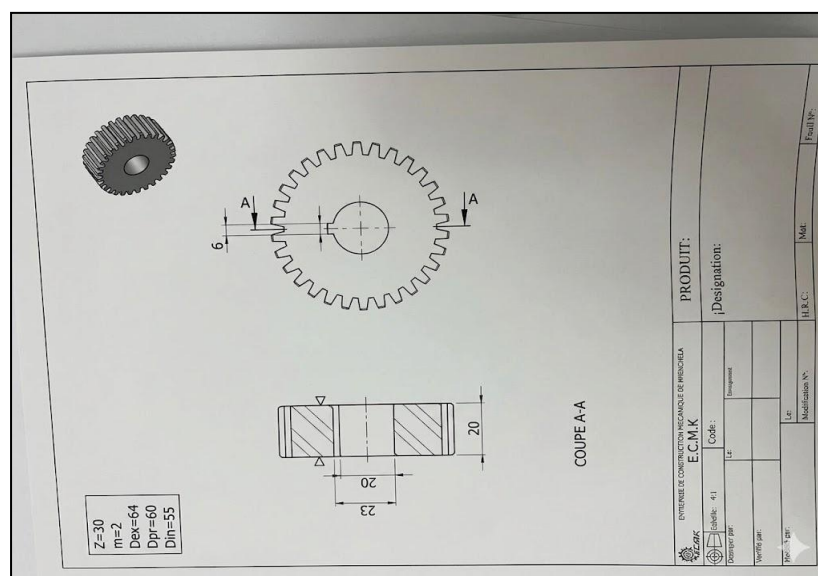


Figure III.2. Dessin technique de l'engrenage droit

III.4.2. Découpage de la matière première (Débitage)

L'opération de découpage de la matière première a été réalisée par sciage à l'aide d'une scie à ruban fabriquée en acier rapide, afin d'obtenir une pièce brute destinée aux opérations d'usinage ultérieures.

Matière première utilisée

La matière première utilisée est une barre cylindrique en acier faiblement allié 40Cr.

Dimensions de la pièce brute

- Diamètre : 70 mm
- Longueur : 30 mm



Figure III.3. Machine de découpage des barres métalliques par scie à ruban horizontale



Figure III.4. l'opération de découpage(scies à ruban)

III.5. Tournage

III.5.1. Usinage au tour parallèle

La première opération d'usinage a été réalisée à l'aide d'un tour parallèle conventionnel, où un dressage de face a été effectué afin d'obtenir une surface plane et prête pour les opérations suivantes.

Machine utilisée : tour parallèle conventionnel (Tour parallèle).

Tournage extérieur

La pièce a ensuite subi une opération de tournage extérieur au moyen du tour, permettant de réduire le diamètre extérieur de 70 mm à 64 mm, conformément aux dimensions définies sur le plan de conception.

III.5.2. Réalisation de l'alésage et de la rainure de clavette

Après l'opération de tournage, un alésage intérieur de diamètre 20 mm a été réalisé, suivi de l'usinage d'une rainure de clavette de dimensions 6×4 mm, afin d'assurer une fixation correcte et sécurisée de l'engrenage sur l'arbre.

Au cours de l'opération d'alésage, un mélange d'eau et d'huile a été utilisé comme fluide de refroidissement et de lubrification, dans le but de réduire la chaleur générée par le frottement, de protéger l'outil de coupe ainsi que la pièce usinée contre une élévation excessive de température, et d'améliorer la qualité d'usinage en obtenant un meilleur état de surface.

III.5.3. Opération de chanfreinage

Une opération de chanfreinage a été réalisée sur les arêtes de l'engrenage afin d'éliminer les arêtes vives, d'améliorer l'état de surface, ainsi que de faciliter les opérations de montage et d'utilisation.

Fin de l'opération

Cette étape a permis d'obtenir une surface plane et propre sur l'une des faces de la pièce.



Figure III.5. Le tour parallèle (ECMK-Khenchela).

III.6. Fraisage des dents (taillage de l'engrenage)

L'opération de taillage des dents a été réalisée à l'aide d'une fraiseuse universelle équipée d'un diviseur, afin d'assurer une répartition régulière et précise des dents de l'engrenage.

Machine utilisée

Fraiseuse universelle munie d'un appareil diviseur.

Outil utilisé

Fraise module $m=2$

III.6.1. Étapes de réalisation

- Réglage du diviseur selon les calculs correspondant au nombre de dents $Z=30$, afin d'assurer une division régulière et précise.
- Réalisation de l'opération de taillage des dents à l'aide de la fraise appropriée. Les relations et calculs utilisés pour le réglage et le dimensionnement sont présentés dans les figures I, II et III ci-dessous.
- Contrôle et vérification des dimensions ainsi que de la géométrie des dents après l'usinage.



Figure III.6. La fraiseuse horizontale (ECMK-Khenchela).

Remarque

Cette étape constitue l'une des opérations les plus sensibles du processus de fabrication, car la précision de la géométrie des dents influence directement la qualité de l'engrènement ainsi que les performances de fonctionnement de l'engrenage.

III.6.2. Contrôle final des pièce

Le contrôle final a été réalisé à l'aide du pied à coulisse, du micromètre ainsi que par la vérification du module de l'engrenage.

III.6.2.1. Mesures au pied à coulisse

Cet instrument permet de contrôler rapidement les dimensions générales de la pièce : diamètre extérieur, longueur totale, largeurs et profondeurs. L'objectif est de vérifier la conformité des dimensions par rapport au plan et aux tolérances spécifiées.



Figure III.7. pied à coulisse

III.6.2.2. Mesures au micromètre

Le micromètre offre une précision plus élevée (jusqu'à 0,01 mm). Il est utilisé pour mesurer les zones critiques telles que les diamètres fonctionnels et l'épaisseur des dents. Ces mesures garantissent la précision nécessaire au bon fonctionnement mécanique.



Figure III.8. micrometre

III.6.2.3. Contrôle du module

Pour l'engrenage (module $m = 2$ mm), la vérification porte sur le pas, l'épaisseur de dent et le diamètre primitif ($d = m \times Z$). Ce contrôle assure que le taillage est correct et que l'engrenage transmettra le mouvement sans jeu excessif ni défaut d'engrènement



Figure III.9. outil de controle du module (engrenage)

III.7. Essai de dureté

L'essai de dureté sert à caractériser la résistance à la déformation plastique d'un matériau non fragile à l'aide d'un essai simple et rapide. La dureté est définie comme la résistance opposée par l'éprouvette à la pénétration d'un corps plus dur. Comme la géométrie de l'écoulement plastique lors d'un essai de dureté est complexe, essai de dureté n'est pas considéré comme une analyse du comportement mécanique d'un matériau au même titre que l'essai de traction. L'essai de dureté ne fournit qu'une seule valeur .

En revanche, l'essai est très simple à réaliser, n'utilise pas de machine coûteuse et n'exige pas l'usinage d'une éprouvette, puisqu'une surface plane de quelques mm² suffit. En résumé, c'est un essai bon marché et souvent employé pour des essais comparatifs de séries d'éprouvettes et pour examiner les effets des divers traitements thermiques, thermomécaniques ou thermochimiques.

III.8. Mesure de la dureté avant traitement thermique

À cette étape, les propriétés mécaniques initiales de la pièce fabriquée en acier 40Cr ont été évaluées par la mesure de la dureté selon la méthode Brinell. Cette opération a pour objectif de déterminer l'état mécanique de la pièce avant tout traitement thermique ultérieur.

L'essai a été réalisé à l'aide d'un duromètre Brinell .

Nombre de dureté Brinell (HB) Le nombre de dureté Brinell (HB) est obtenu en rapportant la charge PPP appliquée sur un pénétrateur à bille à la surface de l'empreinte laissée par celle-ci sur le matériau.

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{S} \quad \dots \dots \dots \text{III. 1}$$

HB : nombre de dureté Brinell (Brinell Hardness Number)

P : charge appliquée (force d'essai), exprimée en newtons (N) ou en kilogramme-force (kgf)

D : diamètre de la bille utilisée comme pénétrateur

d : diamètre de l'empreinte laissée sur la surface de l'échantillon après l'essai

S : surface de l'empreinte

π : constante mathématique ($\approx 3,1416$)

III.9. Rugosité

III.9.1. Mesure de la rugosité de surface

Après l'élaboration de la gamme technologique des opérations d'usinage (Gamme d'usinage), une étape d'évaluation de la qualité de surface a été réalisée à travers la mesure de la rugosité superficielle à l'aide d'un rugosimètre. Cette étape a pour objectif d'étudier l'influence des opérations mécaniques ainsi que du traitement thermique sur l'état de surface de la pièce fabriquée.

III.9.2. Méthodologie de mesure

La démarche expérimentale adoptée repose sur une comparaison entre plusieurs états de la pièce afin de suivre l'évolution de la rugosité de surface au cours des différentes étapes de fabrication. Les cas étudiés sont les suivants :

- Pièce brute avant rectification (Pièce brute avant traitement thermique et avant rectification)
- Pièce traitée thermiquement avant rectification
- Pièce brute après rectification
- Pièce traitée thermiquement après rectification

Les valeurs de rugosité ont été déterminées à partir des deux paramètres suivants :

- **Ra** : rugosité moyenne de surface (Rugosité moyenne)
- **Rz** : hauteur maximale des irrégularités de surface (Hauteur maximale des irrégularités)

III.9.3. Étapes de mesure

Les mesures ont été effectuées selon les étapes suivantes :

1. Fixation de la pièce sur la table de mesure afin d'assurer sa stabilité durant l'essai.
2. Réglage du rugosimètre en fonction de la longueur d'évaluation appropriée (Cut-off) et de la nature de la surface à analyser.
3. Réalisation de trois mesures pour chaque état étudié afin d'obtenir une valeur moyenne plus précise et plus fiable.

Enregistrement des valeurs de **Ra** et **Rz** pour chaque cas, dans le but d'effectuer une étude comparative entre les différentes étapes d'usinage et de traitement thermique.

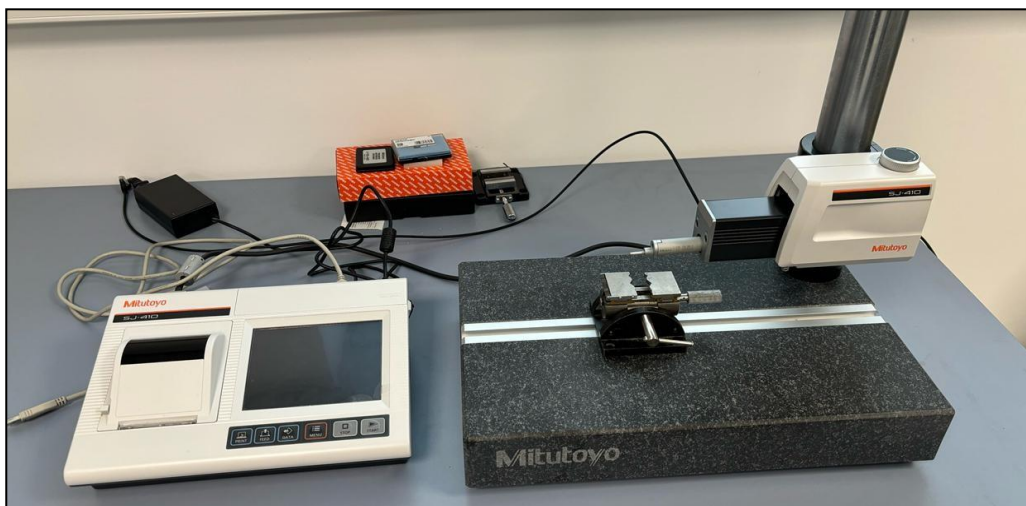


Figure III.10. rugosimètre

Comparaison des paramètres de rugosité de surface (R_a et R_z) avant et après rectification pour la matière brute et la matière traitée

Tableau III.2. Résultats de mesure de la rugosité de surface avant rectification

Avant rectification	Quantité arithmétique moyenne de déviation d'ensemble R_a	Valeur moyenne de taille d'ondulation R_z	Numéro de code luxuriant
Matière brut	1.047	9.463	Δ_6
Matière traité	3.964	6.334	Δ_5

Tableau III.3. Résultats de mesure de la rugosité de surface après rectification

Après rectification	Quantité arithmétique moyenne de déviation d'ensemble R_a	Valeur moyenne de taille d'ondulation R_z	Numéro de code luxuriant
Matière brut	0.555	3.758	Δ_8
Matière traité	0.637	4.326	Δ_8

Analyse des résultats de rugosité :

Les résultats des mesures de rugosité de surface (R_a et R_z) avant et après l'opération de rectification montrent que cette dernière a eu une influence significative sur la qualité de l'état de surface. Après rectification, les valeurs de rugosité ont diminué par rapport à l'état initial,

ce qui traduit une amélioration de la finition de surface et une réduction des irrégularités générées lors des opérations d'usinage et des traitements thermiques.

Pour la matière brute, la valeur de R_a a diminué de $1,047\text{ }\mu\text{m}$ à $0,555\text{ }\mu\text{m}$, tandis que la valeur de R_z est passée de $9,463\text{ }\mu\text{m}$ à $3,758\text{ }\mu\text{m}$ après rectification. Cette diminution témoigne d'une amélioration notable de la qualité de surface. Concernant la matière traitée, la valeur de R_z a diminué de $6,334\text{ }\mu\text{m}$ à $4,326\text{ }\mu\text{m}$ après rectification, alors que la valeur de R_a est restée relativement faible, ce qui confirme l'efficacité de cette opération dans l'obtention d'une surface plus régulière.

D'une manière générale, la rectification a permis d'obtenir une surface plus lisse et plus homogène, améliorant ainsi les caractéristiques fonctionnelles de la pièce mécanique, notamment sa résistance à l'usure et son comportement en service.

III.10. Traitement thermique

Le traitement thermique est considéré comme l'un des procédés fondamentaux en science des matériaux, reposant sur l'application de cycles thermiques contrôlés à des matériaux ferreux solides, totalement ou partiellement, comprenant des phases de chauffage et de refroidissement selon des variations précises de température en fonction du temps, dans le but de contrôler la microstructure du matériau et, par conséquent, d'améliorer ses propriétés mécaniques.

Ces opérations visent à améliorer le comportement mécanique des matériaux métalliques et à les rendre plus adaptés aux applications industrielles, notamment à travers plusieurs transformations essentielles, telles que:

- l'augmentation de la résistance à la rupture et l'amélioration de la limite élastique, renforçant ainsi la capacité du composant mécanique à supporter les contraintes en service ;

- l'augmentation de la dureté, ce qui améliore la résistance à l'usure et à l'abrasion dans des conditions de fonctionnement sévères ;

l'affinement des grains et l'homogénéisation de la microstructure, en particulier après des procédés de mise en forme ou de forgeage ;

la réduction des contraintes internes dues à la déformation plastique à froid (écrouissage) .

En service, les engrenages sont soumis à des sollicitations mécaniques complexes, notamment des contraintes de contact (usure, pitting) et des contraintes de flexion au niveau du pied de dent. Les traitements thermiques appliqués à ces composants visent donc une optimisation cœur-surface.

Au niveau de la surface l'objectif est d'obtenir une dureté élevée afin de garantir une forte résistance à l'usure, à l'abrasion et à la fatigue de contact.

Au niveau du cœur il est nécessaire de conserver une bonne ténacité afin d'absorber les chocs et de résister aux sollicitations dynamiques sans rupture fragile.

Ainsi, les traitements thermiques des engrenages permettent d'obtenir un compromis optimal entre dureté superficielle et résistance mécanique globale, assurant une meilleure durée de vie en service.

III.10.1. Trempe

La trempe est un traitement thermique qui vise à durcir l'acier en le chauffant à une température d'austénitisation, puis en le refroidissant rapidement. Le processus se déroule en plusieurs étapes

III.10.2. Chauffage (Austénitisation)

L'engrenage qui est fabriqué en acier 40Cr est chauffé à une température où sa structure cristalline se transforme en austénite (phase γ , cubique à faces centrées), cette température est 850°C. Le maintien à cette température permet l'homogénéisation de l'austénite et la dissolution des carbures.

III.10.3. Refroidissement rapide

l'engrenage est ensuite refroidi rapidement (trempé) dans un milieu tel que l'huile. La vitesse de refroidissement doit être supérieure à la vitesse critique de trempe pour éviter la transformation de l'austénite en ferrite et perlite, et favoriser la formation de martensite. La martensite est une phase sursaturée en carbone, de structure tétragonale centrée, très dure mais fragile.

L'efficacité de la trempe dépend de la trempabilité de l'acier (sa capacité à former de la martensite en profondeur) et de la sévérité du milieu de trempe. Les éléments d'alliage comme le chrome dans le 40Cr augmentent la trempabilité en décalant les courbes de transformation perlitique et bainitique vers des temps plus longs dans les diagrammes TTT et CCT.

Dans le traitement thermique, les procédés de trempe peuvent être classés selon la microstructure obtenue et les conditions de refroidissement appliquées. Le choix du type de trempe dépend des propriétés mécaniques recherchées pour la pièce traitée.

III.10.4. Trempe martensitique

La trempe martensitique est la plus utilisée dans l'industrie. Elle consiste à refroidir rapidement l'acier austénitisé afin de supprimer les transformations diffuses (ferrite et perlite) et de favoriser la formation de la martensite.

La martensite obtenue est une structure métastable caractérisée par une très grande dureté, mais également par une fragilité importante. Pour cette raison, les pièces trempées sont généralement soumises à un revenu afin d'améliorer leur ténacité et de réduire les contraintes internes. Ce type de trempe est largement utilisé pour les aciers à outils et les composants nécessitant une forte résistance à l'usure.

III.10.5. Technologies de chauffage

Les opérations de trempe sont réalisées à l'aide de différentes techniques de chauffage, telles que les fours à atmosphère contrôlée, les fours sous vide ainsi que les bains de sels. Le choix de la technique de chauffage appropriée dépend de la nature des pièces à traiter, de leurs dimensions géométriques, ainsi que de leurs propriétés thermiques, notamment la conductivité.

Le schéma général du cycle de traitement par trempe est généralement représenté sous forme de diagramme illustrant les différentes étapes du procédé.

Il est également important de souligner que le traitement de trempe est généralement suivi d'un ou de plusieurs traitements de revenu. Ces traitements ont pour objectif de réduire la fragilité du matériau, d'éliminer les contraintes internes et d'ajuster la dureté finale afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées.

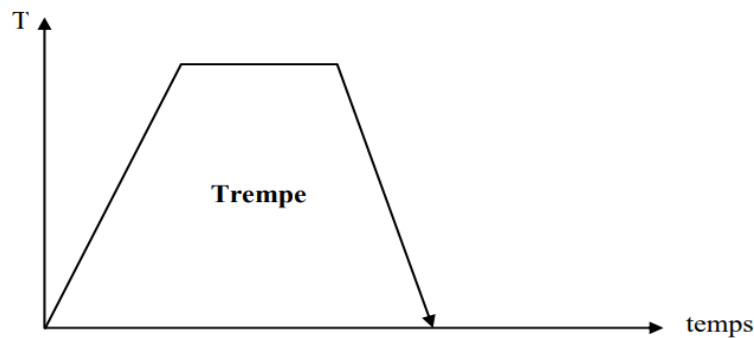


Figure III.11. Cycle thermique lors d'une trempe

III.10.6. Choix de temps de maintien

En permettant l'achèvement des transformations de phase, un contrôle inadéquat du temps de maintien, qu'il soit insuffisant ou excessif, peut entraîner des effets indésirables tels que la croissance des grains et la décarburation des couches superficielles des pièces.

La durée totale du chauffage (t_t) dépend principalement de deux paramètres:

- du temps d'échauffement à cœur ($t_{éc}$), correspondant au temps nécessaire pour atteindre la température de trempe. Ce temps dépend de la forme et des dimensions des pièces, de la nuance du matériau ainsi que du type de four utilisé ;
- du temps de maintien isotherme (t_{mi}), qui dépend de la composition chimique et de l'état initial du matériau.

Ainsi, la durée totale du chauffage est donnée par la relation suivante:

la durée totale du chauffage t_t = temps d'échauffement à cœur $t_{éc}$ + temps de maintien isotherme



Figure III.12. four à bain de sel (ECMK-Khenchela)

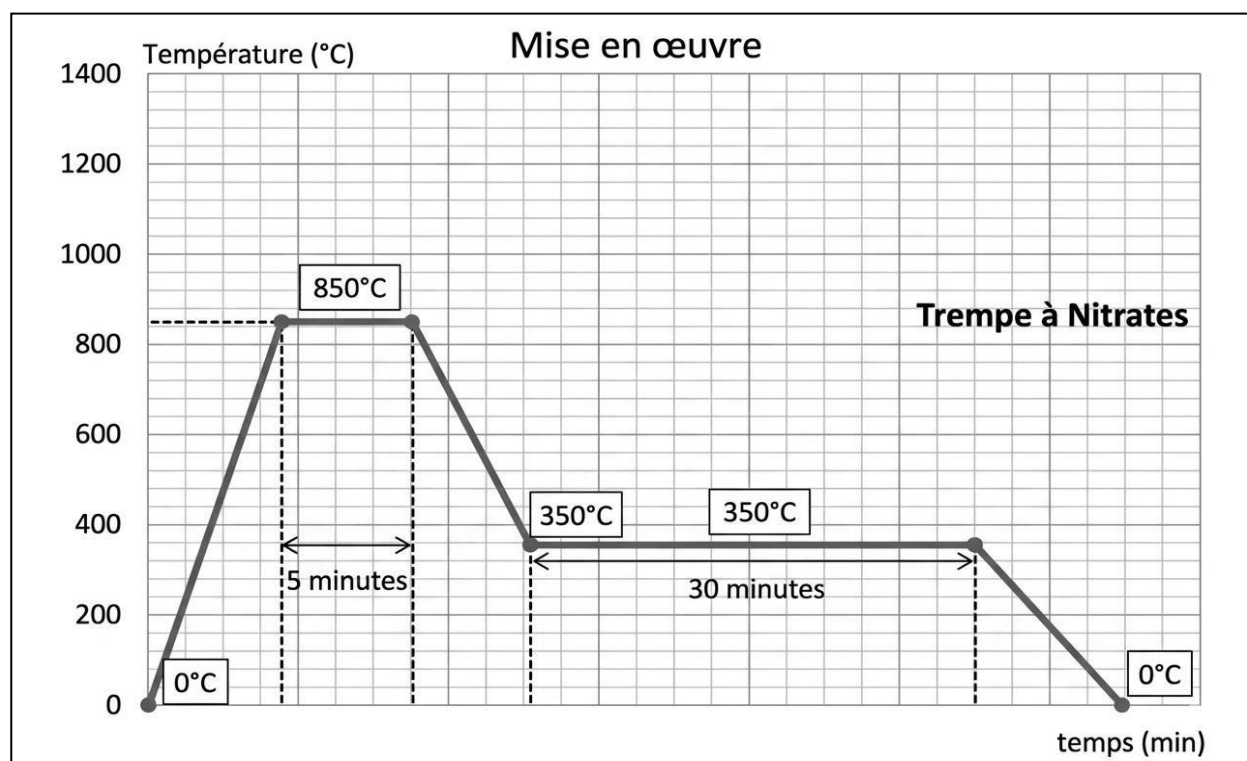


Figure III.13. Cycle de trempe.

III.11. Rectification

Après la réalisation du traitement thermique, nous avons récupéré les pièces puis procédé à l'opération de rectification. Cette opération donne un bon état de surface, des surfaces externes ainsi que des surfaces internes, avec un réglage approprié des conditions de travail afin d'améliorer la qualité de l'état de surface.



Figure III.14. machine de rectification cylindrique

III.12. la microstructure par microscopie optique

Dans cette étape, nous avons procédé à la préparation de l'échantillon en réalisant les opérations de polissage et d'attaque chimique, afin de mettre en évidence les différentes phases et les caractéristiques de la microstructure. Ensuite, un microscope optique a été utilisé pour observer et analyser la microstructure de manière détaillée.

III.12.1. Polissage Mécanique

Dans cette étape, nous avons réalisé l'opération de polissage afin d'obtenir une surface plane, brillante et exempte de rayures. Nous avons commencé par un prépolissage des surfaces à examiner à l'aide d'une machine de polissage sous eau, en utilisant des abrasifs de granulométrie progressive allant de 180, puis 400, 600, 800 jusqu'à 1000. Ensuite, nous avons effectué le polissage de finition à l'aide de poudre d'alumine, appliquée avec un diluant sur un disque en feutre, afin d'obtenir une surface lisse et adaptée à l'examen microscopique.

**Figure III.15.** polisseuse de finition**Figure III.16.** polisseuse d'ébauche

III.12.2. Attaque chimique

Dans cette étape, nous avons réalisé une attaque chimique afin de révéler la microstructure des métaux. L'échantillon, préalablement poli et sec, a été mis en contact avec une solution chimique appropriée composée de 5 % d'acide nitrique (HNO_3) et de 95 % d'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Cette réaction permet de créer un contraste entre les différents constituants de la microstructure, facilitant ainsi leur observation au microscope.

Après l'attaque chimique, la réaction a été arrêtée par un rinçage abondant de l'échantillon à l'alcool, suivi d'un séchage à l'aide d'un séchoir, afin de stabiliser l'état de surface et d'obtenir une observation microscopique claire et précise.

Tableau III.1. Composition du nital et durée de l'attaque chimique

Nuance	Réactif	Durée
40Cr	5 % d'acide nitrique (HNO_3) et 95 % d'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	20 secondes

III.13. Microscope optique

Le microscope optique est une méthode physique d'observation des métaux basée sur l'examen, par réflexion, d'une surface polie et généralement attaquée chimiquement. Il vise principalement à mettre en évidence la microstructure de l'échantillon ainsi que les inclusions non métalliques.

Dans cette étude, un microscope optique a été utilisé pour observer les changements de microstructure de l'acier avant et après traitement, ce qui permet d'obtenir une vision globale des modifications sur une surface relativement étendue. Le principal avantage de cette technique réside dans sa simplicité d'utilisation et la rapidité d'obtention des résultats. Cependant, sa résolution limitée ne permet pas une analyse détaillée des structures très fines ou des surfaces fortement rugueuses.



Figure III.17. le microscope optique utilisé. (ECMK-Khenchela)

III.13.1. Caractérisation du substrat

Étant donné que l'acier 40Cr est un acier hypoeutectoïde, sa microstructure est constituée de ferrite proeutectoïde et de perlite.

La ferrite apparaît en blanc dans la microstructure de la figure (III.18), tandis que la perlite présente une couleur gris foncé

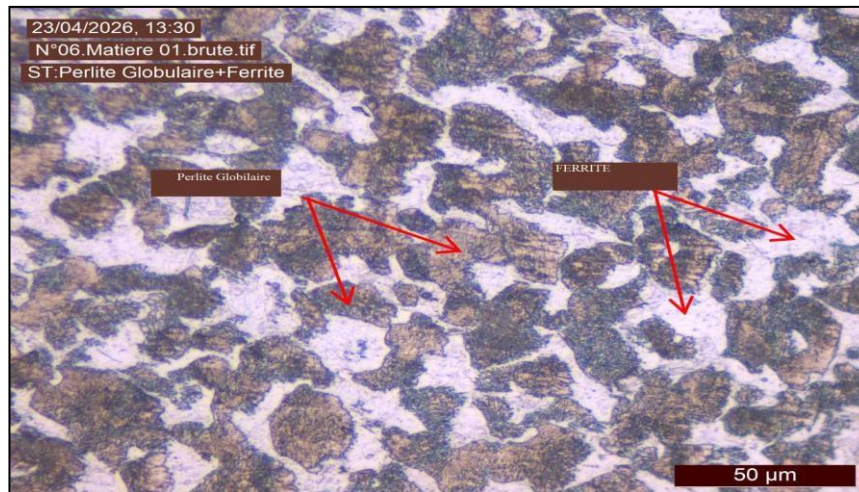


Figure III.18. Optical micrograph of the as-received 40Cr steel (Magnification:50 um)

a) Microstructure après trempe à l'huile

La figure (III.19) présente la microstructure de l'échantillon après un traitement de trempe réalisé à 850°C, suivi d'un refroidissement rapide dans un bain d'huile. Ce mode de refroidissement assure une vitesse de trempe suffisante pour favoriser la formation de la martensite tout en réduisant les risques de fissuration associés aux milieux de refroidissement plus sévères.

L'observation microscopique révèle la présence majoritaire de martensite aciculaire, distribuée de manière dense dans la matrice. Ce produit de trempe résulte de la transformation rapide de l'austénite lors du refroidissement. On distingue également des zones plus claires correspondant au ferrite résiduel, qui n'a pas entièrement subi la transformation martensitique en raison du taux moyen de carbone de l'acier 40Cr.

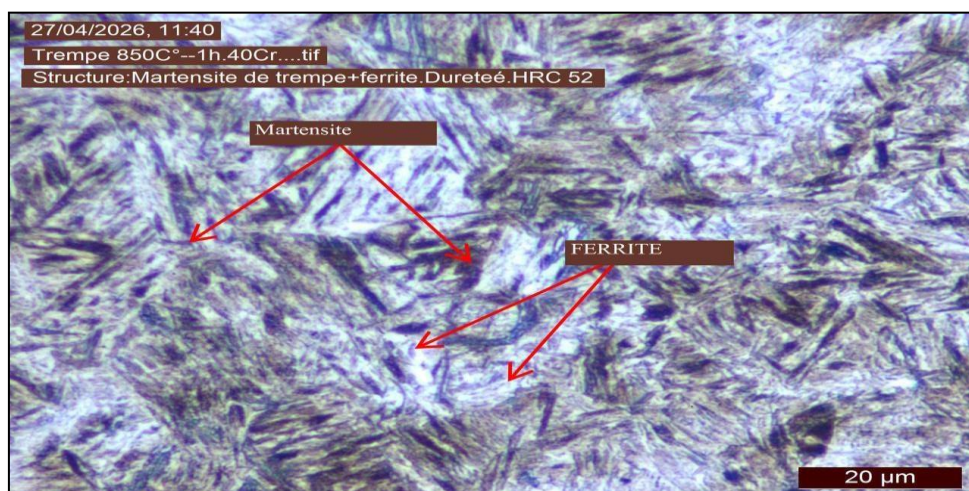


Figure III.19. Microstructure martensitique du 40Cr après trempe à l'huile

La microstructure finale est donc constituée d'un mélange de **martensite + ferrite résiduel**, traduisant un durcissement significatif du matériau tout en conservant une certaine ductilité grâce à la présence du ferrite.

La structure obtenue après la trempe à l'huile montre que le traitement thermique a été efficace. La dominance de la martensite confirme que la vitesse de refroidissement était suffisante pour provoquer la transformation martensitique. La présence de ferrite résiduel indique une transformation partielle, typique des aciers faiblement ou moyennement alliés comme le 40Cr

b) Microstructure après le cycle de revenu

Après l'opération de trempe, l'échantillon a subi un cycle de revenu à 350°C, permettant une évolution significative de la microstructure. L'observation microscopique révèle la transformation du martensite trempé, initialement dur et fortement contraint, vers une structure plus stable connue sous le nom de troostite de revenu.

Cette microstructure se caractérise par une décomposition partielle du martensite sous forme d'amas fins et uniformément dispersés, accompagnée d'une précipitation de carbures très fins à l'intérieur de la matrice. Ce phénomène permet de réduire les contraintes internes générées lors de la trempe, tout en améliorant de manière notable la ténacité du matériau.

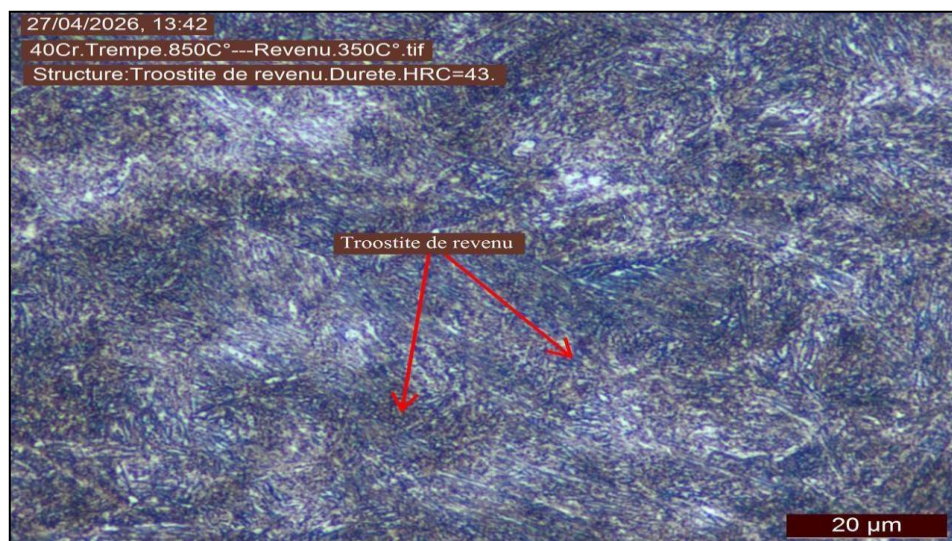


Figure III.20. Microstructure du 40Cr après revenu à 350°C montrant une troostite de revenu

Ainsi, le revenu assure un compromis optimal entre dureté et ductilité, en conférant à l'acier une meilleure résistance à la rupture fragile et une stabilité dimensionnelle accrue. À l'issue de cette étape thermique, l'acier présente une microstructure homogène et mécaniquement plus équilibrée, adaptée aux applications nécessitant à la fois solidité et résistance aux chocs. À l'issue du cycle de revenu appliqué à 350°C, l'acier présente une microstructure entièrement transformée en troostite de revenu, caractérisée par une dispersion homogène de carbures très fins au sein d'une matrice ferrito-martensitique adoucie. Cette évolution microstructurale traduit une diminution notable des contraintes internes et une amélioration de la stabilité thermique du matériau.

Le revenu a permis d'obtenir un compromis équilibré entre résistance mécanique et ténacité : la structure devient moins fragile que l'état trempé, tout en conservant un niveau élevé de performance. Ainsi, l'échantillon traité présente des propriétés mécaniques optimisées, adaptées aux sollicitations où une bonne résistance aux chocs et une tenue à la fatigue sont requises

Duromètre utilisé pour contrôler la dureté de notre engrenage



Figure III.21. Duromètre utilisé pour l'essai de dureté HRC (ECMK-Khenchela)

III.14. La nitruration

III.14.1. Préparation mécanique et chimique

Dans cette étape, nous avons préparé la surface de l'échantillon avant la nitruration en procédant à un nettoyage complet afin d'éliminer les huiles, graisses et saletés, ainsi que la

rouille ou les oxydes à l'aide d'un brossage ou d'un polissage léger, dans le but de permettre la pénétration des atomes d'azote dans le métal.

III.14.2. Etape de prechauffage

Ensuite, nous avons effectué une étape de préchauffage à une température comprise entre 400 et 450 °C pendant environ 1 à 2 heures, afin d'éliminer l'humidité, de réduire les contraintes internes issues des opérations précédentes et d'éviter la fissuration lors d'un chauffage rapide.

III.14.3. Etape de nitruration température

Par la suite, nous avons réalisé la nitruration à une température de 500 à 520 °C en utilisant un mélange gazeux composé d'hydrogène (H_2) et d'azote pur (N_2), pendant une durée de 10 à 20 heures selon l'épaisseur requise. Au cours de cette étape, une saturation progressive de la surface du métal en azote se produit, formant une couche superficielle dure ainsi qu'une couche de diffusion plus profonde.

III.14.4. Etape de refroidissement

Enfin, nous avons procédé à un refroidissement lent jusqu'à 100–150 °C, en évitant un refroidissement rapide afin de limiter les risques de fissuration, avec possibilité d'utilisation d'un gaz inerte tel que N_2 pour réduire l'oxydation.

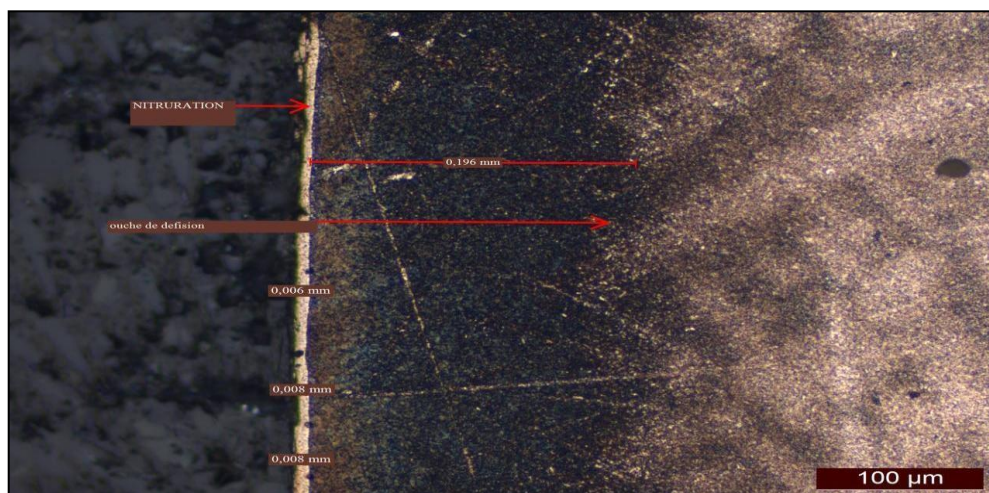


Figure III.22. analyse de la section transversale de l'échantillon nitruré

D'après les valeurs observées de 0,006 et 0,008 nm (**Figure III.22**), l'échantillon présente une couche nitrurée d'une épaisseur moyenne d'environ 0,010 nm pour une tension de

polarisation bien précise . Ce résultat indique que, bien que la vitesse globale de croissance demeure limitée, l'énergie cinétique des ions est suffisante pour franchir la barrière énergétique de surface et amorcer la diffusion de l'azote.

Dans des conditions relativement faible énergie, la microscopie optique révèle la présence d'une couche composée (couche blanche) mince mais continue, présentant une interface nette avec le substrat. Cette observation témoigne du stade initial de formation des nitrures au sein de la matrice.

III.14.5. Résultats de la nitruration plasma

La mesure de la dureté après nitruration plasma a révélé une valeur de **639,68 HV** sous une charge de **0,5 kgf**, correspondant à **57,1 HRC**. Cette valeur confirme l'efficacité du traitement de nitruration plasma dans l'amélioration des caractéristiques superficielles de l'acier 40Cr. L'enrichissement de la surface en azote a permis d'obtenir une couche présentant une dureté élevée, ce qui favorise une meilleure résistance à l'usure et aux contraintes mécaniques. Les résultats obtenus démontrent ainsi que la nitruration plasma constitue un procédé performant pour augmenter la qualité et la durée de vie des pièces mécaniques soumises à des conditions de service sévères.

III.15. Mesure de la dureté

III.15.1. Éprouvette non traitée

Les valeurs de nanodureté de l'éprouvette non traitée 184 HB servent de référence pour l'évaluation des effets du traitement.

III.15.2. Éprouvette traitée

L'éprouvette traitée présente des valeurs de nanodureté nettement plus élevées 43 HRC, ce qui indique la formation de phases nitrurées dures à la surface.

III.15.3. Analyse des duretés

Le profil de dureté montre généralement une augmentation marquée de la dureté à la surface (zone nitrurée), suivie d'une diminution progressive vers le cœur du matériau. Ce gradient résulte de la diffusion de l'azote, qui favorise la formation de composés nitrurés durs dans les couches superficielles .

III.15.4. Dureté de surface

La dureté de surface de l'éprouvette traitée est considérablement plus élevée que celle de l'échantillon non traité, ce qui est directement associé à une amélioration de la résistance à l'usure. L'augmentation de la dureté superficielle suggère que la couche nitrurée améliore la résistance à la corrosion.



CONCLUSION GÉNÉRALE



CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de cette étude consacrée à l'amélioration de la durée de vie des engrenages en acier faiblement allié 40Cr par traitement de nitruration, il apparaît clairement que les propriétés de surface jouent un rôle déterminant dans le comportement et la fiabilité des engrenages soumis à des sollicitations mécaniques importantes.

Cette étude nous a permis, dans un premier temps, de mettre en évidence l'importance des engrenages dans les systèmes de transmission mécanique ainsi que les principaux phénomènes responsables de leur dégradation, notamment l'usure, le frottement et la fatigue de contact. Une analyse des caractéristiques de l'acier 40Cr a également montré que ce matériau présente une bonne aptitude aux traitements thermochimiques grâce à sa composition chimique et à ses propriétés mécaniques.

La partie expérimentale a permis de suivre les différentes étapes de fabrication de l'engrenage, depuis les opérations d'usinage jusqu'aux traitements appliqués, ainsi que la mise en œuvre des différentes techniques de caractérisation. Les essais réalisés ont permis d'évaluer l'influence du traitement de nitruration sur la dureté, la rugosité et la microstructure de l'acier étudié.

Les résultats obtenus montrent que le traitement de nitruration améliore considérablement les propriétés superficielles de l'acier 40Cr grâce à la formation d'une couche enrichie en azote présentant une dureté élevée. Cette amélioration contribue à accroître la résistance à l'usure et à la fatigue de contact, tout en conservant une bonne ténacité du cœur de la pièce. Par conséquent, la nitruration constitue une solution efficace pour prolonger la durée de vie des engrenages et améliorer leur comportement en service.

Les observations microstructurales ainsi que les mesures de dureté et de rugosité ont permis de confirmer l'efficacité du traitement appliqué et son intérêt dans le domaine de la fabrication des composants mécaniques fortement sollicités. Les performances obtenues démontrent que la nitruration représente un procédé particulièrement adapté aux engrenages destinés aux applications industrielles nécessitant une grande résistance à l'usure et une longue durée de vie.

En perspective, ce travail pourrait être complété par des études plus approfondies portant sur l'influence des paramètres de nitruration, tels que la température, la durée du traitement et la

composition de l'atmosphère, ainsi que par la réalisation d'essais de fatigue et d'usure à long terme afin d'optimiser davantage les performances des engrenages en acier 40Cr dans différentes conditions de fonctionnement.

Ainsi, la nitruration apparaît comme une technique thermochimique performante permettant d'améliorer durablement les propriétés superficielles des engrenages et de répondre aux exigences croissantes de l'industrie moderne en matière de fiabilité, de productivité et de durabilité.



RÉFÉRENCES



Références

- [1] Thierry GUERTIN, Mesure expérimentale de l'erreur de transmission cinématique d'engrenages spiro-coniques et hypoïdes, Université Laval, 1999, pp 1-2
- [2] J. Dufailly, Engrenages cylindriques de transmission de puissance – Étude géométrique, 2e éd. Paris: Ellipses, 2016.
- [3] Saib T.smaili R., Étude et modélisation d'un réducteur de vitesse à engrenages : cas de dentures hélicoïdales, Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida 1, Algérie, Année universitaire 2020/2021.
- [4] G.R. Nicole, Conception Et Calcul Des Eléments De Machines, Ecole D'ingénieurs De Fribourg
- [5] Saib T.smaili R., Étude et modélisation d'un réducteur de vitesse à engrenages : cas de dentures hélicoïdales, Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida 1, Algérie, Année universitaire 2020/2021.
- [6] CHAREF A. A., MEBROUK Y., Étude CAO du profil des dents d'engrenages droits afin d'améliorer leur résistance, Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie, 2022-2023.
- [7] Le guide pratique ultime pour les paramètres d'engrenage,” SKS Gear. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.sks-gear.com/fr/blog/gear-parameters-ultimate-practical-guide>
- [8] A. Meyer, “Cours engrenages,” INSA Rouen, 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://moodle.insa-rouen.fr/pluginfile.php/138341/mod_resource/content/35/Cours%20engrenages17.pdf
- [9] G.Lenormand, Construction mécanique TOME 3 Eléments de Technologie, 1971
- [10] Abdoulaye Fall, «Mise en évidence des phénomènes d'interférence dans les systèmes de transmission par engrenages, département de électromécanique, université de Cheikh Anta Diop de Dakar », 2006.
- [11] G. Henriot, Traité Pratique et Théorique des engrenages, tome 1.
- [12] G. Henriot, Traité théorique et pratique des engrenages : Théorie et technologie, vol. 1. Paris: Dunod, 1960.
- [13] J. C. Fauroux, M. Sartor, et M. Paredes, “Conception optimale de mécanismes. Application aux réducteurs à engrenages,” Actes du Congrès de Mécanique, 1999.
- [14] M. Aroudj, “Influence des contraintes sur le rendement des engrenages,” ResearchGate, 1955.

- [15] ASM International, *ASM Handbook, Volume 1 : Propriétés et sélection des fontes, aciers et alliages à hautes performances*, Materials Park (Ohio, États-Unis), ASM International, 1990.
- [16] Comité Européen de Normalisation (CEN), *NF EN 10083-3 : Aciers pour trempe et revenu – Partie 3 : Conditions techniques de livraison pour les aciers alliés*, Bruxelles, Belgique.
- [17] Totten G. E., *Traitement thermique des aciers : métallurgie et technologies*, 2^e édition, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [18] Krauss G., *Les aciers : élaboration, structure et performances*, 2^e édition, ASM International, Materials Park, Ohio, 2015.
- [19] Dr. Mansouri Naima, Cours « Fonderie et traitements thermiques », Université de Batna02 (2021)
- [20] Said Bensaada « Traitements thermiques des aciers et fontes » 1^{ère} éd, publié en 2010, pages 90-91, ISBN 02-10 : 6131546673
- [21] Transformation Diagrams (CCT & TTT),” IspatGuru. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ispatguru.com/transformation-diagrams-cct-ttt/>
- [22] H .hadjel ;O .abbassi.(Amélioration des Propriétés Mécaniques d'une Fraise à Rainurer (trois tailles) en Acier Rapide par Traitement Thermique) . Mémoire de Master.Université de Khenchela.2022-2023.
- [23] H .hadjel ;O .abbassi.(Amélioration des Propriétés Mécaniques d'une Fraise à Rainurer (trois tailles) en Acier Rapide par Traitement Thermique) . Mémoire de Master.Université de Khenchela.2022-2023.
- [24] Mebarki Lahcen « Contribution à l'étude de précipitation du carbure dans les aciers fortement alliés (frittée) »,mémoire de magistère, Université de Batna02 (2014)
- [25] A. ARFAOUI, A. CHAKER ; Matériaux métalliques isetkasserine ; Année 2009/2010.
- [26] **Mebarki Lahcen.** *Contribution à l'étude de précipitation du carbure dans les aciers fortement alliés (frittés).* **Mémoire de Magistère, Université de Batna 2, 2014.**
- [27] Diagramme TTT Fe-C (acier),” Wikimedia Commons. [En ligne]. Disponible sur : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e3/TTT_diagram_Fe-C.svg/1200px-TTT_diagram_Fe-C.svg.png
- [28] « soudage des canalisation et installation conneses, segment canalisation Norme API 1104 », de uxième édition, septembre 1999.
- [29] Mémoire de fin d'études, Université Saad Dahlab de Blida 1, Étude bibliographique sur la nitruration et les traitements thermochimiques, 2019

- [30] P. Reilhac, “Influence du traitement de nitruration ionique sur les propriétés fonctionnelles des aciers inoxydables martensitiques,” Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2019.
- [31] L. Marot, “Développement d’un nouveau système d’implantation ionique en immersion plasma et analyses des processus de nitruration,” Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2001.
- [32] Traitement thermique et nitruration ionique,” Groupe Thermi-Lyon. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.groupe-thermi-lyon.com/solutions/nitruration-ionique/>
- [33] Explication de la nitruration : définition, types et propriétés,” Bodycote. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.bodycote.com/fr/services/traitements-thermiques/nitruration/>.
- [34]. "Mécanique appliquée - Résistance des matériaux" par James M. Gere et Barry J. Goodno.
- [35]. "Conception des engrenages" par B.-P. Stéphan.
- [36]. Robert L. Norton : Auteur renommé dans le domaine de la mécanique des machines, notamment dans son ouvrage "Machine Design: An Integrated Approach".
- [37]. "Handbook of Gear Design" par Gitin M. Maitra.
- [38]. "Mechanical Engineering Design" par Joseph E. Shigley et Charles R. Mischke.
- [39]. Joseph E. Shigley et Charles R. Mischke : Leurs livres "Mechanical Engineering Design" sont une référence dans le domaine de la conception mécanique.
- [40]. Gitin M. Maitra : Son "Handbook of Gear Design" est une ressource précieuse pour les ingénieurs travaillant dans le domaine de la conception des engrenages.
- [41]. "Machine Design: An Integrated Approach" par Robert L. Norton.
- [42]. B.-P. Stéphan : Auteur spécialisé dans la conception des engrenages, notamment dans son livre "Conception des engrenages".