REPUBIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEDA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie

Mécanique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie

Mécanique Spécialité :

Construction Mécanique

Thème :

Dimensionnement, conception, et fabrication des pignons d'un Réducteur destiné à une pompe éolienne pour l'entreprise POVAL (Berouaghia)

Présentés par : Tchikou Sid Ahmed

Benrekia Youcef

Devant le jury composé de :

Pr. BACHENE MOURAD	**Université de Médéa**	**Président**
Pr. BOUGHEDAOUI RACHID	**Université de Médéa**	**Examinateur**
Pr. ABDELLAH EL-HADJ ABDELLAH	**Université de Médéa**	**Promoteur**
Dr. HABIRECHE MOHAMED	**Université de Médéa**	**Co-Promoteur**

2024/2025

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons nos sincères remerciements à nos professeurs et collègues, qui ont joué un rôle fondamental dans la réalisation de ce travail

Nous remercions également la société POVAL-BEROUAGHIA pour son soutien technique et financier, ainsi que pour la confiance accordée dans le cadre de ce partenariat université-entreprise.

Enfin, une pensée spéciale à notre famille et nos proches pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

DÉDICACE

NOUS DÉDIONS CE MÉMOIRE

À NOS PARENTS, POUR LEURS SACRIFICES ET LEUR AMOUR INCONDITIONNEL, QUI NOUS ONT PERMIS D'ATTEINDRE CE NIVEAU D'ÉTUDES.

À NOS ENSEIGNANTS, QUI NOUS ONT TRANSMIS LE SAVOIR ET L'ESPRIT DE PERSÉVÉRANCE.

ملخص:

تُركز هذه الرسالة على دراسة مُعمّقة لتصميم وإنتاج ترس صغير وترس تروس باستخدام الهندسة العكسية. يُشكّل هذان المكوّنان الميكانيكيان جزءًا لا يتجزأ من علبة تروس مضخة رياح مُخصصة لضخ المياه في المناطق الصحراوية. أُجريت الدراسة بالتعاون مع شركة بوفال، الكائنة في البرواقية، والمتخصصة في تصنيع المضخات الهيدروليكية.

في البداية، قُدّمت لمحة عامة عن أنظمة طاقة الرياح، مُسلّطةً الضوء على دورها المُتنامي في حلول إمدادات الطاقة المُستدامة، لا سيما في المناطق النائية. بعد ذلك، وُضِع تعريف مُفصّل لعلب التروس والتروس، مُركّزًا على مبدأ تشغيلها، ودورها في نقل الطاقة الميكانيكية، وأهميتها في أنظمة الضخ.

ثم ركّزت الدراسة على استكشاف تقنيات التصنيع المُستخدمة لإنتاج المُكوّنات الميكانيكية، بما في ذلك التحكم في الأبعاد، وطرق التشغيل، والصب. وُضِعَ تركيزٌ خاصٌّ على الخطوات الأساسية لإعادة البناء الهندسي للأجزاء من خلال القياسات الفعلية، وفقًا لمبادئ الهندسة العكسية.

وأخيرًا، تُختتم الرسالة بالتطبيق العملي للنهج المُتّبع، من خلال نمذجة وإنتاج كامل للترس الصغير والترس، بهدف إعادة إنتاجهما. يهدف هذا النهج إلى تحسين أداء وموثوقية نظام ضخ الرياح، مع اقتراح حلول تقنية مُلائمة للظروف القاسية للصحراء الكبرى.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح، التروس، Solidworks، الصب، التشغيل الآلي

Résume :

Ce mémoire porte sur une étude approfondie de la conception et de la réalisation d’un pignon et d’une roue dentée à l’aide de la méthode d’ingénierie inverse. Ces deux éléments mécaniques font partie intégrante du réducteur d’une pompe éolienne destinée au pompage d’eau dans les zones sahariennes. L’étude a été menée en collaboration avec la société Poval, située à Berrouaghia, spécialisée dans la fabrication de pompes hydrauliques.

Dans un premier temps, une présentation générale des systèmes éoliens a été proposée, mettant en lumière leur rôle croissant dans les solutions d’approvisionnement durable en énergie, notamment pour les régions isolées. Par la suite, une définition détaillée des réducteurs et des engrenages a été élaborée, en insistant sur leur principe de fonctionnement, leur rôle dans la transmission de puissance mécanique et leur importance dans les systèmes de pompage.

L’étude s’est ensuite orientée vers l’exploration des techniques de fabrication utilisées pour la réalisation des composants mécaniques, notamment le contrôle dimensionnel, les méthodes d’usinage et le moulage. Un accent particulier a été mis sur les étapes essentielles de la reconstruction géométrique des pièces à partir de mesures réelles, conformément aux principes de l’ingénierie inverse.

Enfin, le mémoire se conclut par la mise en œuvre pratique de la démarche adoptée, avec la modélisation et la réalisation complète du pignon et de la roue dentée, en vue de leur reproduction. Cette approche vise à optimiser la performance et la fiabilité du système de pompage éolien, tout en proposant des solutions techniques adaptées aux conditions extrêmes du désert saharien.

Mots clés : Eolienne, Engrenages, Solidworks, Moulage, usinage

Abstract:

This thesis focuses on an in-depth study of the design and production of a pinion and a gear wheel using reverse engineering. These two mechanical components are an integral part of the gearbox of a wind pump intended for pumping water in Saharan regions. The study was conducted in collaboration with the company Poval, located in Berrouaghia, which specializes in the manufacture of hydraulic pumps.

First, a general overview of wind power systems was provided, highlighting their growing role in sustainable energy supply solutions, particularly for isolated regions. Subsequently, a detailed definition of gearboxes and gears was developed, emphasizing their operating principle, their role in mechanical power transmission, and their importance in pumping systems.

The study then focused on exploring the manufacturing techniques used to produce mechanical components, including dimensional control, machining methods, and casting. Particular emphasis was placed on the essential steps of geometric reconstruction of the parts from actual measurements, in accordance with reverse engineering principles.

Finally, the thesis concludes with the practical implementation of the adopted approach, with the modeling and complete production of the pinion and gear wheel, with a view to their reproduction. This approach aims to optimize the performance and reliability of the wind pumping system, while proposing technical solutions adapted to the extreme conditions of the Saharan desert.

Keywords: Wind turbine, Gears, Solidworks, Casting, Machining

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : GENERALITES 3

I.1. INTRODUCTION : 4
I.2. DEFINITION DE POMPE D'EOLIENNE : 4
I.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT : 5
I.4. AVANTAGES : 5
I.5. APPLICATIONS : 5
I.6 INCONVENIENTS : 6

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES REDUCTEURS 7

II.1 LES REDUCTEURS : 8
II.1.1 Rapport de réduction : 8
II.1.2 Types de Réducteurs à Engrenages : 9
II.1.2.1 Réducteur Planétaire : 9
II.1.2.2 Réducteur conique : 9
II.1.2.3 Réducteur à vis sans fin : 10
II.1.2.4 Réducteurs à Engrenages Cylindriques Pignons Droits : 10
II.1.3 Rapport de réduction : 11
II.1.4 Fonction du Réducteur à Pignons Droits dans un Système de Pompage Éolien d'Eau 11
II.1.5 Structure et Fonctionnement : 12
II.1.6 Fonctionnement : 12
II.1.7 Avantages : 13
II.1.8 Inconvénients : 13
II.2 LES ENGRENAGES : 13
II.2.1 Rôle et fonction des engrenages dans les systèmes mécaniques : 14
II.2.2 Propriétés mécaniques pour les pignons : 15
II.2.3 Déférents types d'engrenage 16
II.2.4 Caractéristique et formules des engrenages Droits : 18
II.2.5 Etude cinématique : 20
II.2.6 Étude du profil en développante de cercle : 20
II.2.7 Conditions d'engrènement : 22
II.2.8 Phénomène d'interférence : 22
II.2.9. Coefficient de déport (X) : 25
II.2.10. Fonctionnement avec jeu : 29
II.2.11. Lubrification des Engrenages : 30
II.2.11.1Méthodes de Lubrification : 30

II.2.11.2. Diagramme profile de dent : 31
CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION 35
III.1. INTRODUCTION : 36
III.2. DIMENSIONNEMENT DE PIGNON ET LA ROUE DENTE : 36
III.2.1. Définition des spécifications techniques (dimensions) : 36
III.3. MODELISATION 3D DU PIGNON ET DE LA ROUE DENTEE PAR SOLIDWORKS : 40
III.4. MATERIAUX : 43
III.4.1. Critères de choix d'un matériau : 43
III.4.1.1. Matériaux non ferreux pour les engrenages : 43
III.4.1.2. Matériaux ferreux pour les pignons : 44
CHAPITRE IV : REALISATION 50
IV.1. INTRODUCTION : 51
IV.2. TECHNIQUES DE FABRICATION : 51
IV.2.1. Frittage (Métallurgie des poudres) : 51
IV.2.2. Moulage : 52
IV.2.2.1. Moulage en sable : 52
IV.2.3. Par Usinage : 64
IV.2.3.1. Stratégies d'Industrialisation des Dentures : 64
IIII.2.3.2. Techniques d'ébauche des dentures 65
CONCLUSION GENERALE 68
BIBLIOGRAPHIE 71
ANNEXES 76

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I :

Figure I. 1: Pompe éolienne 4
Figure I. 2: Fonctionnement d'une pompe éolienne 5

CHAPITRE II :

Figure II. 1: Réducteur de vitesse**.** 8
Figure II. 2: Réducteur Planétaire. 9
Figure II. 3 : Réducteur à roue 0conique. 10
Figure II. 4: Schéma cinématique 10
Figure II. 5: Réducteur à vis sans fin. 10
Figure II. 6: Réducteurs à Pignons Droits. 11
Figure II. 7: Schéma cinématique. 14
Figure II. 8 : Deux pignons engrener. 14
Figure II. 9: Engrenages droits à denture hélicoïdale. 16
Figure II. 10: Engrenages coniques à denture droite pour arbre concourants. 17
Figure II. 11: Engrenages roue et vis sans fin entre arbre orthogonaux. 17
Figure II. 12: Engrenages droits à denture droite pour arbre parallèle. 18
Figure II. 13: Caractéristiques géométriques de la roue dentée. 19
Figure II. 14: les point d'engrangement. 20
Figure II. 15: Développante de cercle. 21
Figure II. 16: Angle de pression et ligne d'engrènement ou action. 21
Figure II. 17: Angle de pression et ligne d'engrènement. 22
Figure II. 18: limite d'interférence. 22
Figure II. 19: interférence de fonctionnement. 23
Figure II. 20: Interférence de fonctionnement. 23
Figure II. 21: Interférence de taillage. 24
Figure II. 22: Influence du coefficient de déport de denture sur sa forme. 25
Figure II. 23: Influence du coefficient de déport (x) sur le profil de denture. 25
Figure II. 24: Influence du coefficient de déport (x) sur le profil de denture 26
Figure II. 25: Fonctionnement avec jeu 29
Figure II. 26: Fonctionnement sans jeu. 30
Figure II. 27: Trains d'engrenage lubrification. 31
Figure II. 28: Diagramme profile de de. 32

CHAPITRE III :

Figure III.1:les mesurés tirés à partir du réducteur de l'éolienne en étude. 37
Figure III. 2: les équations appropriées pour définir la géométrie des dents de pignon 40
Figure III. 3: Essquice de conception du pignon. 41
Figure III. 4: Modèle 3D de pignon. 41
Figure III. 5: les équations appropriées pour définir la géométrie des dents de la roue 42
Figure III. 6: Modèle 3D de la roue dentée. 42
Figure III. 7: Types de fontes. 44
Figure III. 8: Structure d'une fonte grise lamellaire. 45
Figure III. 9: Structure d'une fonte grise sphéroïdale. 46
Figure III. 10: Structure d'une fonte grise malléable. 46
Figure III. 11: Engrenages coniques en acier. 47

CHAPITRE IV :

Figure IV. 1: Pignon en fritté 51
Figure IV. 2 : Opération de frittage 51
Figure IV. 3: les étapes de moulage en sable. 52
Figure IV. 4: Organigramme de fabrication des moules en sable. 53
Figure IV. 5: les surépaisseurs de la roue. 54
Figure IV. 6: Dépouille de la roue. 56
Figure IV. 7: Assemblage boite à noyau. 57
Figure IV. 8: inferieur du modelé. 57
Figure IV. 9: modèle en bois. 58
Figure IV. 10: machine cnc. 59
Figure IV. 11: Impression 3D 59
Figure IV. 12: modèle en impression 3D PLA. 60
Figure IV. 13: Procédé à froid par CO2. 60
Figure IV. 14: Résultats des noyaux. 61
Figure IV. 15: Fabrication du moule inferieur. 61
Figure IV. 16: Resultat après des moullage. 63
Figure IV. 17: Remoulage du noyau. 62
Figure IV. 18: Fermeture du moule Coulée du métal. 62
Figure IV. 19: Coulée du métal. 63
Figure IV. 20 : Démoulage. 64
Figure IV. 21: fraises module. 65
Figure IV. 22: Taillage par outil-crémaillère. 66
Figure IV. 23: Taillage par outil-pignon. 66
Figure IV. 24: fraise-mère. 67

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE III :

Tableau II. 1: Mécanisme d'Engrènement dans une Denture Corrigée. 28
Tableau II. 2: Tableau des principales caractéristiques d'un engrenage à denture droite. ... 33

CHAPITRE III :

Tableau III. 1: Type d'acier. 48

CHAPITRE III :

Tableau IV. 1: dépouille. 55

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Dans le cadre d'un Programme National de Recherche, ce projet a été développé en partenariat entre l'université et l'entreprise Poval-Berrouaghia, dans l'objectif de concevoir et réaliser des composants mécaniques destinés à des systèmes de pompage éolien adaptés aux zones sahariennes. Ces régions, souvent isolées et dépourvues d'infrastructures énergétiques classiques, nécessitent des solutions techniques à la fois autonomes, fiables et durables pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation agricole.

Parmi les solutions envisagées, les pompes éoliennes apparaissent comme une alternative écologique de choix, exploitant l'énergie du vent — une ressource renouvelable, abondante et gratuite — pour actionner mécaniquement des dispositifs de pompage d'eau. Au cœur de ce système se trouve le réducteur mécanique, qui permet d'adapter la vitesse de rotation et le couple transmis du rotor éolien vers la pompe. Sa performance dépend directement de la qualité et de la robustesse de ses éléments internes, notamment les pignons et roues dentées.

C'est dans cette optique que notre travail s'est concentré sur la conception et la fabrication par ingénierie inverse d'un pignon et d'une roue dentée, composants essentiels du réducteur. La méthodologie adoptée s'est déroulée selon les étapes suivantes :

- Contrôle dimensionnel des pièces existantes par mesure directe et relevés précis ;
- Élaboration des dessins techniques 2D et modélisation 3D à l'aide du logiciel SolidWorks ;
- Fabrication de l'outillage de fonderie, incluant les modèles et la boîte à noyau, par impression 3D ;
- Réalisation du moulage et de la coulée en fonte grise des deux pièces dans les ateliers de fonderie de Poval-Berrouaghia ;
- Enfin, usinage et taillage des dents, suivi de l'assemblage dans le réducteur pour valider l'adéquation fonctionnelle.

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

1. Une revue générale des systèmes de pompage éolien et de leur principe de fonctionnement ;
2. Les notions techniques fondamentales sur les réducteurs et les engrenages ;
3. Le processus complet de conception, dimensionnement et fabrication du pignon et de la roue dentée ;
4. La phase de réalisation pratique, incluant le choix des procédés de fabrication, le contrôle de qualité et les perspectives d'industrialisation.

À travers cette étude, nous visons à démontrer la faisabilité technique et économique d'une telle démarche, tout en mettant en valeur l'intérêt de l'ingénierie inverse et de la fabrication numérique dans le développement de composants mécaniques adaptés aux conditions extrêmes des régions sahariennes.

Chapitre I :

Généralités

I.1.Introduction :

L'énergie éolienne connaît un développement croissant ces dernières années, s'imposant comme une solution durable face aux enjeux environnementaux. Une éolienne, machine convertissant la force du vent en énergie mécanique ou électrique, se décline en deux principaux types : les éoliennes de pompage (utilisation mécanique directe) et les aérogénérateurs (production d'électricité). Ces installations peuvent être regroupées en parcs éoliens terrestres ou offshore, offrant ainsi une flexibilité d'implantation adaptée aux différents contextes géographiques et énergétiques. Cette diversification des solutions éoliennes répond aux besoins croissants en énergie propre tout en minimisant l'impact environnemental **[1]**

I.2.Définition de pompe d'éolienne :

Une pompe d'éolienne, également appelée pompe à vent ou pompe à énergie éolienne, est un dispositif qui utilise l'énergie cinétique du vent captée par une roue à pales pour entraîner mécaniquement une pompe à eau. Le mouvement rotatif des pales est transformé, via un système de bielle-manivelle, en un mouvement alternatif vertical qui actionne un piston immergé dans un puits ou un forage. Ce piston aspire puis refoule l'eau, permettant ainsi son pompage sans recours à une source d'énergie fossile ou électrique. Ces pompes sont particulièrement adaptées aux zones rurales isolées, où elles fournissent une solution simple, durable et économique pour l'accès à l'eau. Leur fonctionnement dépend de la vitesse du vent, avec un démarrage possible dès environ 3 m/s, et elles peuvent être équipées de systèmes d'orientation et de blocage pour optimiser leur efficacité et les protéger en cas de vents violents. [2]



Figure I. 1: Pompe éolienne. **[3]**

I.3. Principe de Fonctionnement :

Une éolienne de pompage fonctionne de manière simple mais efficace. Les pales de l'éolienne captent l'énergie du vent et, par l'intermédiaire d'un mécanisme de transmission, cette énergie est convertie en un mouvement mécanique.

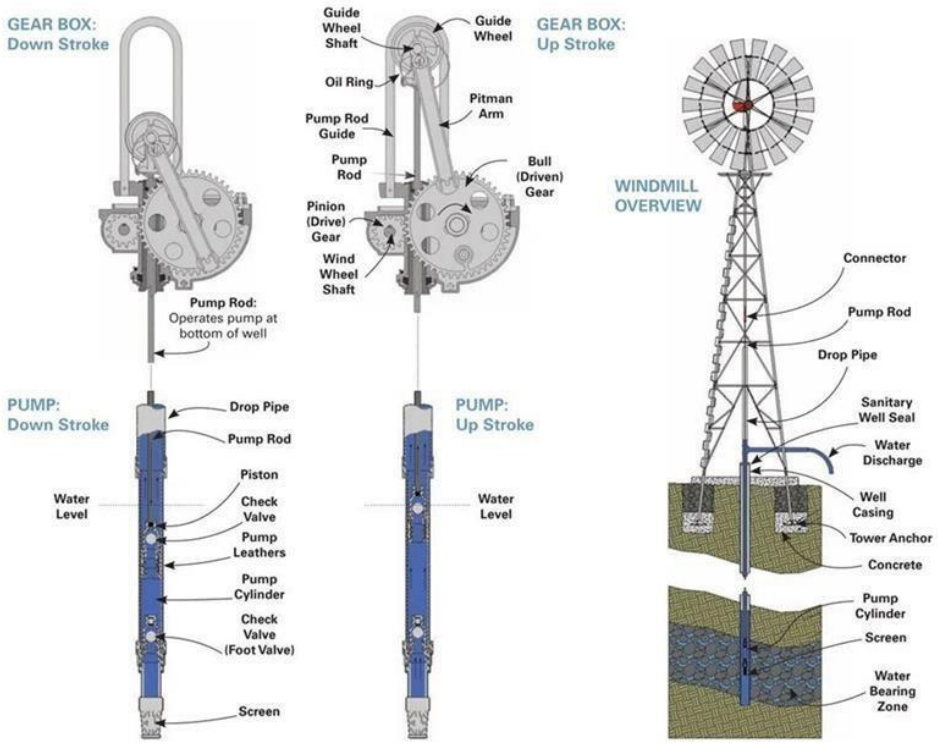


Figure I. 2: Fonctionnement d'une pompe éolienne. **[4]**

I.4. Avantages :

- Énergie propre et renouvelable ;
- Autonomie et indépendance énergétique ;
- Faibles coûts d'entretien ;
- Idéales pour les régions isolées.

I.5. Applications :

- Pompage agricole : Pour fournir de l'eau pour l'irrigation dans des régions où l'accès à l'électricité est limité ;
- Abreuvement du bétail : Dans des fermes ou des zones reculées où l'eau est nécessaire pour les animaux ;
- Approvisionnement en eau potable : Fournir de l'eau aux communautés rurales ou isolées.

I.6 inconvénients :

Malgré ses avantages, l'éolienne de pompage présente quelques limites :

- Dépendance au vent : Le principal inconvénient d'une éolienne de pompage est sa dépendance au vent. En l'absence de vent ou en cas de faible intensité, le système peut être inefficace, ce qui limite son utilisation dans certaines régions ou durant certaines périodes de l'année.
- Capacité limitée : Ce système est plus adapté à des besoins en eau modérés. Pour des installations nécessitant un grand volume d'eau ou un pompage intensif, d'autres solutions énergétiques (comme les pompes solaires ou les pompes électriques) peuvent être plus adaptées**. [5]**

Chapitre II :
Généralités sur les Réducteurs

II.1 Les réducteurs :

Les réducteurs (ou réducteurs de vitesse) sont des dispositifs mécaniques utilisés pour réduire la vitesse de rotation et augmenter le couple d'un moteur ou d'une autre source d'entraînement. Ils jouent un rôle essentiel dans de nombreuses applications industrielles, automobiles, robotiques et autres systèmes mécaniques.



Figure II. 1: Réducteur de vitesse**.[6]**

II.1.1 Rapport de réduction :

Le rapport de réduction (noté généralement i) est une caractéristique fondamentale d'un réducteur, définissant le facteur par lequel la vitesse de rotation est réduite (et le couple augmenté) entre l'entrée et la sortie du système.

Le rapport de réduction est le quotient de la vitesse d'entrée (généralement la vitesse du moteur, $N_{entré}$) par la vitesse de sortie (N_{sortie}) :

$$i = \frac{N_{entré}}{N_{sortie}}$$

- Si i >1 : Réduction de vitesse (cas le plus courant).
- Si i =1 : Pas de réduction (transmission directe).
- Si i <1 : Augmentation de vitesse (système multiplicateur).

La réduction de vitesse s'accompagne d'une augmentation du couple (C) en sortie (en négligeant les pertes par frottement) :

Où η est le rendement du réducteur (ex. : 0,95 pour un réducteur à engrenages bien lubrifié).

$$\eta \times i = \frac{C_{sortie}}{C_{entrie}}$$ [7]

II.1.2 Types de Réducteurs à Engrenages :

II.1.2.1 Réducteur Planétaire :

Un réducteur planétaire (ou réducteur épicycloïdal) est un système d'engrenages composé de :

- Un pignon central (soleil)
- Des satellites (engrenages mobiles)
- Une couronne fixe ou mobile
- Un porte-satellites (lié à l'arbre de sortie)



Figure II. 2: Réducteur Planétaire. **[8]**

II.1.2.2 Réducteur conique :

Un réducteur conique est un dispositif mécanique utilisé pour transmettre la puissance entre deux arbres perpendiculaires, généralement à un angle de 90 degrés, grâce à l'engrènement de deux roues coniques. Il permet de réduire la vitesse de rotation tout en augmentant le couple transmis. Ce type de réducteur est compact, adapté aux espaces restreints, et peut fonctionner avec des engrenages à denture droite ou hélicoïdale. Les réducteurs coniques hypoïdes, avec une denture spiralée, offrent une meilleure performance, un fonctionnement plus silencieux et la capacité de supporter des couples plus élevés. Ils sont largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels où un changement de direction du mouvement et une adaptation du couple sont nécessaires. Toutefois, ils subissent des forces axiales et radiales importantes qui doivent être compensées par des paliers adaptés. Contrairement aux réducteurs à vis sans fin, ils ne permettent pas l'auto blocage. Leur conception robuste assure une bonne durabilité et une efficacité énergétique élevée. **[9]**



Figure II. 3 : Réducteur à roue 0conique. **[10]**

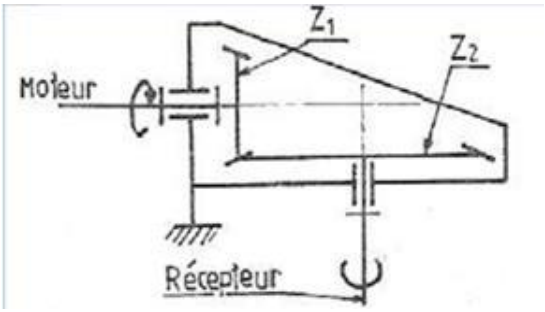


Figure II. 4: Schéma cinématique **[10]**

II.1.2.3 Réducteur à vis sans fin :

Ils utilisent une vis sans fin et une roue dentée pour réduire la vitesse de rotation. Les réducteurs à vis sans fin sont couramment utilisés dans les applications industrielles nécessitant un couple de sortie élevé et une faible vitesse de rotation. **[11]**

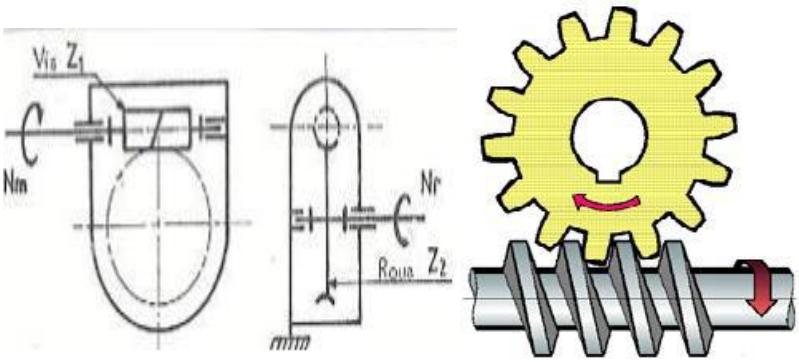


Figure II. 5: Réducteur à vis sans fin. **[11]**

II.1.2.4 Réducteurs à Engrenages Cylindriques Pignons Droits :

Les réducteurs à pignons droits jouent un rôle essentiel dans un système de pompage éolien d'eau. Leur fonction principale est d'ajuster la vitesse de rotation de l'éolienne pour qu'elle corresponde à celle nécessaire pour faire fonctionner la pompe efficacement. **[12]**

II.1.3 Rapport de réduction :

On peut assimiler l'engrènement d'un pignon et d'une roue au roulement sans glissement de deux cercles primitifs l'un sur l'autre. Le rapport de transmission de l'engrènement est alors :

$$i = \frac{wp}{wr} = \frac{zr}{zp} = \frac{D}{d}$$

wp: Vitesse de rotation du pignon.

wr: Vitesse de rotation de la roue.

zr: nombre de dents de la roue.

zp: nombre de dents du pignon.

d: diamètre du pignon.

D: diamètre de la roue.

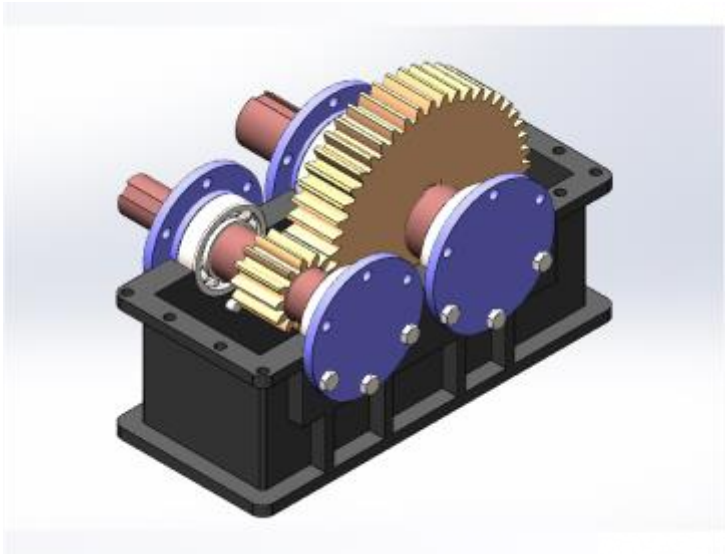


Figure II. 6: Réducteurs à Pignons Droits. **[13]**

II.1.4 Fonction du Réducteur à Pignons Droits dans un Système de Pompage Éolien d'Eau :

- **Adaptation de la vitesse** : L'éolienne tourne généralement à une vitesse rapide, mais la pompe nécessite une vitesse plus lente pour fonctionner correctement. Le réducteur à

pignons droits réduit cette vitesse tout en maintenant un couple élevé, ce qui est essentiel pour le pompage de l'eau. **[14]**

- **Transmission de la puissance** : Les pignons droits transmettent l'énergie mécanique générée par l'éolienne à la pompe de manière efficace.

II.1.5 Structure et Fonctionnement :

a) Composants Principaux :

- Pignon d'entrée :
- Fixé à l'arbre de l'éolienne
- Reçoit le mouvement rotatif des pales
- Généralement en acier trempé (ex : Acier C45 ou 20MnCr5) pour résister à l'usure.
- Nombre de dents réduit pour un premier étage de réduction.
- Pignon de sortie :
- Entraîne l'arbre de la pompe
- En prise avec le pignon d'entrée, avec un nombre de dents plus élevé pour réduire la vitesse.
- Montée sur un arbre avec la roue dentée 2
- Liée à bielle

II.1.6 Fonctionnement :

Le réducteur fonctionne grâce à un système d'engrenages qui transmet et réduit la vitesse de rotation de l'axe de l'éolienne vers l'axe de la pompe à eau. Le moyeu de la roue est connecté à un arbre qui traverse jusqu'à la boîte de vitesses. À l'intérieur de celle-ci, cet arbre actionne un mécanisme d'engrenages qui transforme le mouvement rotatif en un mouvement vertical de va-et-vient.

Dans la boîte de vitesses, l'arbre relié au moyeu porte deux engrenages. Lorsque ceux-ci tournent, ils entraînent des engrenages plus gros, qui pivotent en sens inverse. Ces grands engrenages sont liés à une roue de guidage via des bras Pittman. La roue, montée sur un guide Pittman, suit un mouvement de glissement vertical, synchronisé avec la rotation des engrenages connectés.

Cette transmission mécanique permet ainsi de convertir efficacement l'énergie rotative en un mouvement linéaire adapté au pompage de l'eau.

Couple élevé La réduction de la vitesse génère un couple plus élevé, ce qui permet à la pompe d'extraire l'eau même lorsque la vitesse du vent est faible. **[14]**

II.1.7 Avantages :

- **Simplicité et Robustesse :** Les réducteurs à pignons droits sont simples dans leur conception, ce qui les rend très robustes et fiables, même dans des conditions difficiles.
- **Faible entretien :** En raison de leur conception simple, ils nécessitent peu d'entretien, ce qui est particulièrement important pour des installations éloignées ou isolées.
- **Coût abordable :** Comparé à d'autres types de réducteurs, les réducteurs à pignons droits sont plus économiques, ce qui les rend accessibles pour des installations de pompage éolien de petite à moyenne échelle.

II.1.8 Inconvénients :

Bruyants et nécessitent souvent une lubrification régulière et généralement plus lourds que d'autres technologies de réducteurs.

II.2 Les Engrenages :

Les engrenages sont des composants mécaniques essentiels. Ils font partie des systèmes de transmission de mouvement et de puissance les plus utilisés, les plus résistants et les plus durables.

Ils sont normalisés. Les engrenages fabriqués avec la norme internationale ISO présentent l'avantage d'être facilement interchangeables et permettent des possibilités de fabrication plus économiques (conception type, méthodes de calcul normalisées, taillage et contrôle automatisés, équipements standards).

Dans le cas d'un engrenage à dentures droites, le contact entre les dents s'établit simultanément sur toute leur largeur. L'engrènement commence lorsque le pied de la dent de la roue menante entre en contact avec le sommet de la dent de la roue menée. Pour assurer une transmission continue du mouvement, il est nécessaire que le couple de dents suivant entre en prise avant que le couple précédent ne se désengage.

Pour les engrenages hélicoïdaux, le principe d'engrènement dans les sections perpendiculaires aux axes est similaire à celui des dentures droites. Cependant, du fait de l'inclinaison hélicoïdale des dents, le contact ne s'effectue pas simultanément sur toute la largeur. L'engrènement se produit progressivement le long des dents, commençant à la racine de la dent menante et à l'arête de la dent menée. Cette progression permet un engagement plus doux et continu

des dents, contrairement aux engrenages droits où l'engagement est instantané sur toute la largeur. **[15]**

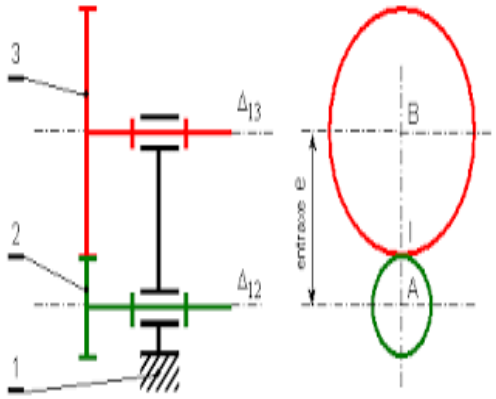


Figure II. 7: Schéma cinématique. **[15]**

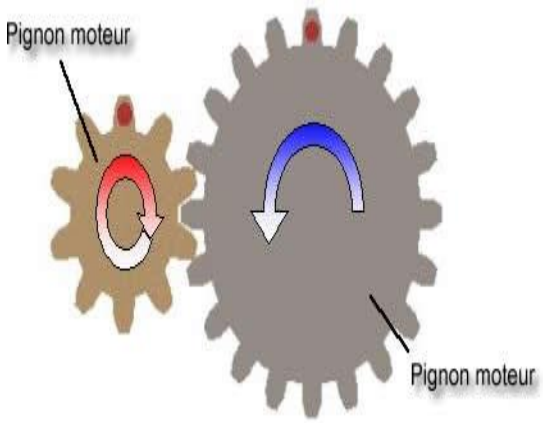


Figure II. 8 : Deux pignons engrener. [16]

II.2.1 Rôle et fonction des engrenages dans les systèmes mécaniques :

Les pignons sont des éléments essentiels dans les systèmes mécaniques, jouant un rôle clé dans la transmission de mouvement et de puissance entre les composants. Voici leurs principales fonctions et rôles :

1. Transmission de puissance :

Les pignons transmettent la puissance d'un arbre à un autre. Ils sont souvent utilisés dans des systèmes d'engrenages pour modifier la vitesse, le couple ou la direction de rotation. **[17]**

2. Modification de la vitesse et du couple :

En changeant la taille des pignons, on peut augmenter ou diminuer la vitesse de rotation et le couple. Par exemple, un petit pignon entraînant un grand pignon réduit la vitesse mais augmente le couple. **[17]**

3. Changement de direction de rotation :

Les pignons peuvent être utilisés pour inverser la direction de rotation. Par exemple, deux pignons engrenés l'un avec l'autre tourneront en sens opposé. **[17]**

4. Synchronisation des mouvements :

Dans des systèmes complexes, les pignons permettent de synchroniser les mouvements de différentes parties d'une machine, assurant un fonctionnement harmonieux et précis. **[17]**

5. Transmission de mouvement linéaire (crémaillères) :

Les pignons peuvent être associés à des crémaillères pour convertir un mouvement rotatif en mouvement linéaire, ou vice versa. Ce système est couramment utilisé dans les directions assistées de véhicules ou dans les machines-outils. **[17]**

6. Précision et contrôle :

Dans des applications de haute précision, comme les robots ou les machines CNC, les pignons permettent un contrôle précis des mouvements grâce à leur engagement précis avec d'autres engrenages**. [17]**

7. Transmission de puissance dans des conditions difficiles :

Les pignons sont capables de transmettre de la puissance dans des conditions difficiles, comme sous l'eau, dans des environnements poussiéreux ou à haute température, grâce à leur robustesse et à la possibilité de les lubrifier. **[18]**

8. Utilisation dans des systèmes complexes :

Les pignons sont utilisés dans des systèmes complexes comme les boîtes de vitesses, les différentiels, les systèmes de levage, et bien d'autres applications industrielles et mécaniques. **[18]**

II.2.2 Propriétés mécaniques pour les pignons :

1. Résistance à l'usure :

Les pignons doivent pouvoir résister au frottement constant avec d'autres dents d'engrenage, ce qui peut provoquer l'usure de la surface. Les matériaux résistants à l'usure, tels que les aciers trempés ou les alliages spéciaux, sont souvent utilisés. **[19]**

2. Résistance à la fatigue :

Les pignons sont soumis à des charges cycliques, ce qui peut entraîner des fissures et des ruptures dues à la fatigue. Une bonne résistance à la fatigue est donc essentielle pour une longue durée de vie. **[19]**

3. Dureté :

La dureté du pignon détermine sa capacité à résister à la déformation et à l'usure. Une dureté appropriée est nécessaire pour éviter les indentations et les déformations permanentes. **[19]**

4. Résistance à la traction :

La résistance à la traction est la capacité du pignon à résister à la force de traction exercée par l'engrènement. Il est important de choisir un matériau avec une résistance à la traction adéquate pour éviter la rupture du pignon. **[19]**

5. Résistance à la flexion :

Les pignons peuvent également être soumis à des forces de flexion, notamment lors de fortes charges. Une bonne résistance à la flexion est donc importante pour éviter la déformation et la rupture. **[19]**

II.2.3 Déférents types d'engrenage

1. Engrenages droits à denture hélicoïdale :

De même usage que les précédents, ils sont très utilisés en transmission de puissance ; les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des deux arbres.

A taille égale, ils sont plus performants que les précédents pour transmettre puissance et couple. Du fait d'une meilleure progressivité et continuité de l'engrènement, ils sont aussi plus silencieux.

L'inclinaison de la denture engendre des efforts axiaux, suivant l'axe de l'arbre, qui doivent être supportés par les paliers et des couples supplémentaires qui accentuent le fléchissement des arbres. **[20]**

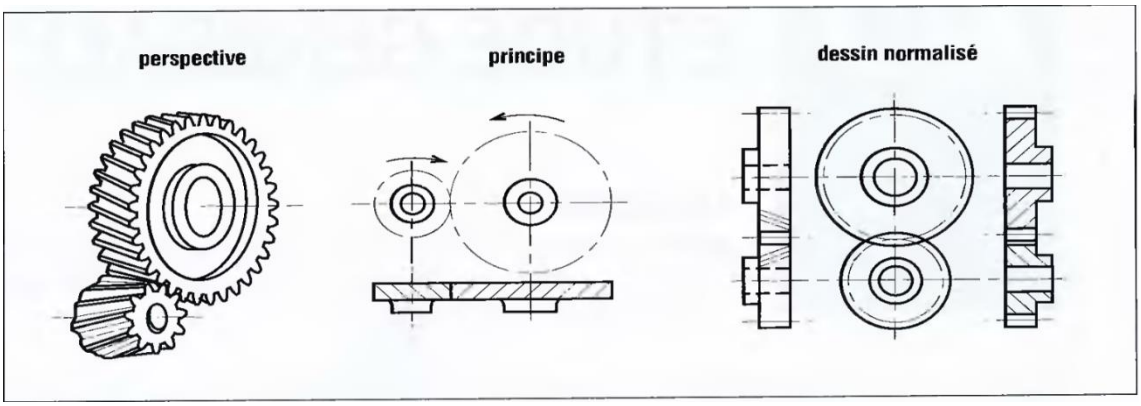


Figure II. 9: Engrenages droits à denture hélicoïdale. **[20]**

2. Engrenages coniques :

Utilisés pour transmettre la puissance entre des arbres qui se croisent, généralement à angle droit.

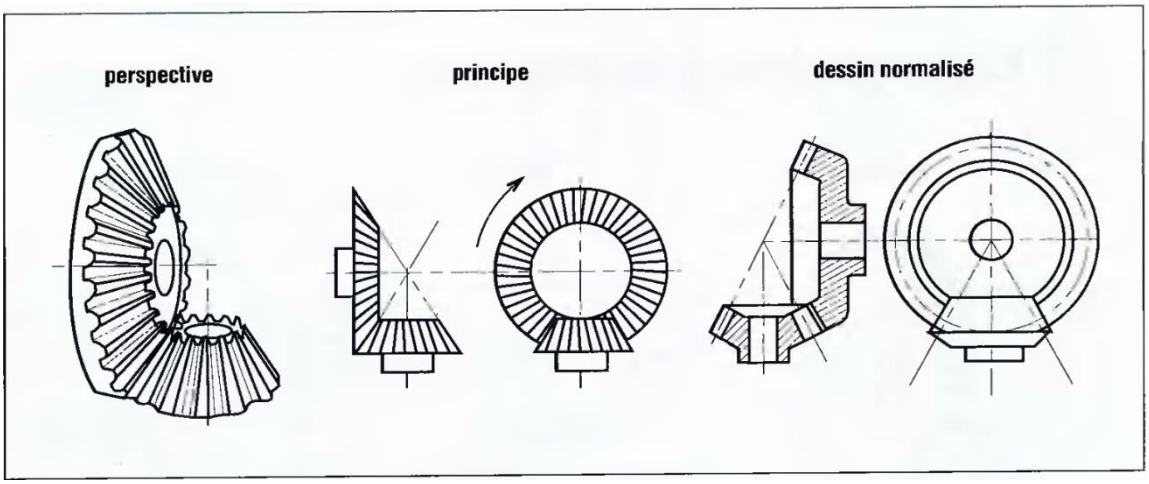


Figure II. 10: Engrenages coniques à denture droite pour arbre concourants. **[20]**

3. Engrenages roue et vis sans fin :

L'une des roues ressemble à une vis et l'autre à une roue hélicoïdale. Le sens de rotation de la roue dépend de celui de la vis mais aussi de l'inclinaison de la denture, filet à gauche ou à droite, L'irréversibilité est possible. **[20]**

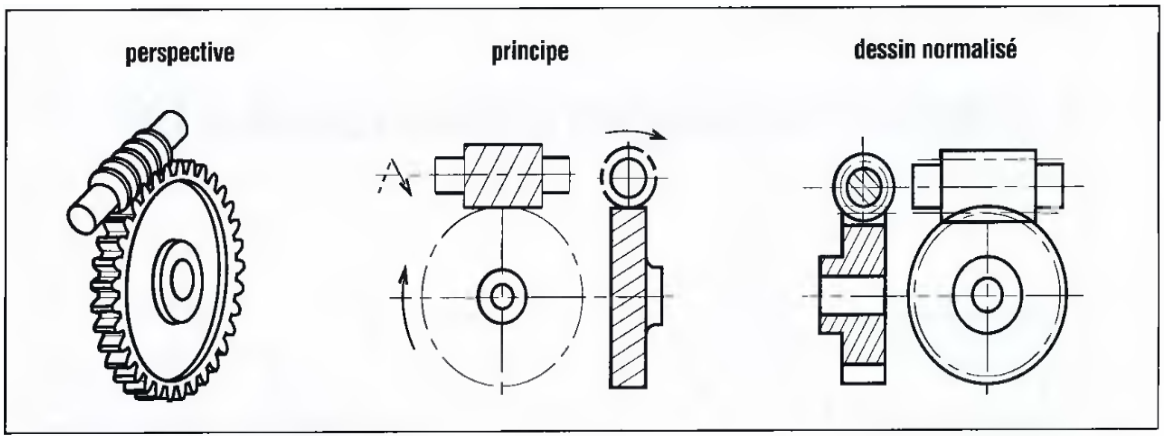


Figure II. 11: Engrenages roue et vis sans fin entre arbre orthogonaux. **[20]**

4. Engrenages droits à denture droite :

Utilisés pour transmettre la puissance entre arbres parallèles. Du fait de leur relative simplicité, ils sont souvent utilisés pour introduire les relations de cinématique et les définitions normalisées concernant la géométrie des engrenages. **[20]**

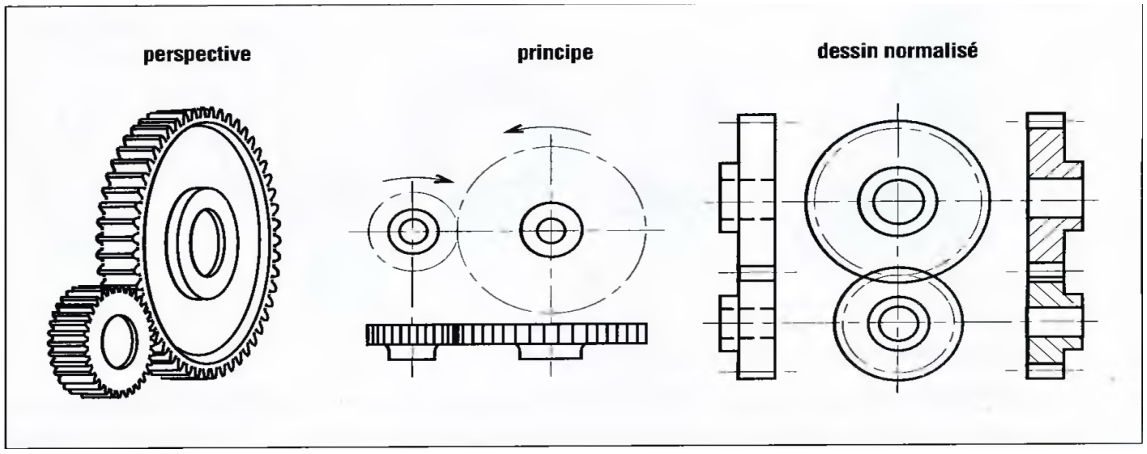


Figure II. 12: Engrenages droits à denture droite pour arbre parallèle.**[20]**

II.2.4 Caractéristique et formules des engrenages Droits :

1. Le Module (m) :

Le module d'une denture est une grandeur normalisée qui détermine les dimensions principales d'une roue dentée. Il est défini comme le rapport entre le diamètre primitif et le nombre de dents de la roue. Le module est une grandeur normalisée.

$$\boldsymbol{m = d \times Z}$$

d : diamètre

z : nombre des dent

2. Le nombre de dent (Z) :

Le nombre de dent est noté par « $\boldsymbol{Z}$ ».

3. Le Pas (P) :

Le Pas (P) est la distance entre deux flancs consécutifs de dents, mesurée le long du cercle primitif de l'engrenage. Il est calculé par la formule :

$$\boldsymbol{P = m \times \pi}$$

$\boldsymbol{m}$: c'est le module d'engrènent ;

$\boldsymbol{\pi}$:3.14

4. Cercle primitif :

Le cercle primitif est le cercle théorique sur lequel s'effectue le contact entre deux engrenages (un pignon et une roue) avec un roulement pur, sans glissement.

On peut donc assimiler l'engrenage à deux cercles primitifs (d1) et (d2) qui roulent sans glisser l'un sur l'autre On détermine le diamètre primitif par la relation :

$$\boldsymbol{d = m \times Z}$$

Avec :

$\boldsymbol{Z}$: le nombre de dents.

$\boldsymbol{m}$: le module d'engrènement.

5. Cercle de tête (d_a) :

Le cercle de tête se trouve au sommet des dents. C'est celui qui peut être mesuré directement à l'aide d'un pied à coulisse.

6. Cercle de pied (d_f) :

Le cercle de pied se trouve au fond de dent. On détermine le diamètre de pied (d_f)

Par la relation :

$$\boldsymbol{d_f = m\,(z - 2.5).}\ \textbf{[21]}$$

7. Le cercle de base (db) :

Chaque denture possède un cercle de base. Ce cercle de diamètre « db » est fictif et non mesurable. Il est le point de départ théorique du profil en développante de cercle de chaque dent.

$$\boldsymbol{db = m\,(z + 2).}\ \textbf{[21]}$$

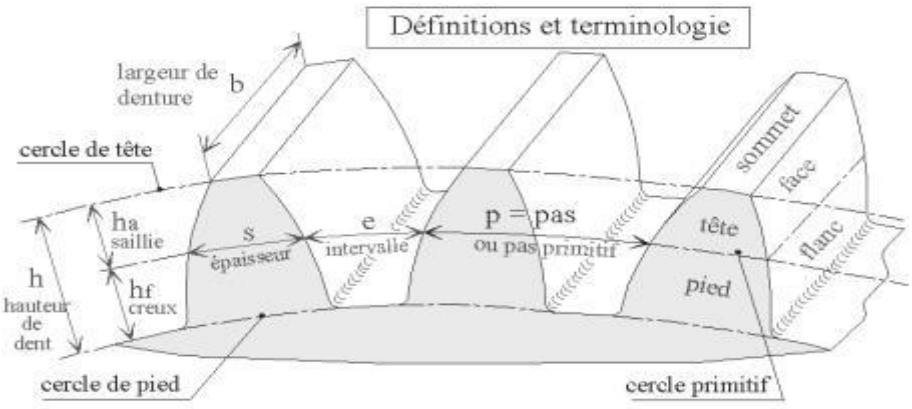


Figure II. 13: Caractéristiques géométriques de la roue dentée. [21]

II.2.5 Etude cinématique :

Lorsque la roue 1 engrène avec la roue 2, les cercles primitifs des deux roues roulent l'un sur l'autre sans glisser au point I (pas de patinage, analogie avec deux roues de friction roulant l'une sur l'autre sans glisser).

Si V_1 est la vitesse linéaire des points du cercle primitif 1 et V_2 celle des points du cercle primitif 2, le non glissement en I, point de contact des deux cercles, se traduit par :

$$V_1=V_2=VI. \quad \textbf{[22]}$$

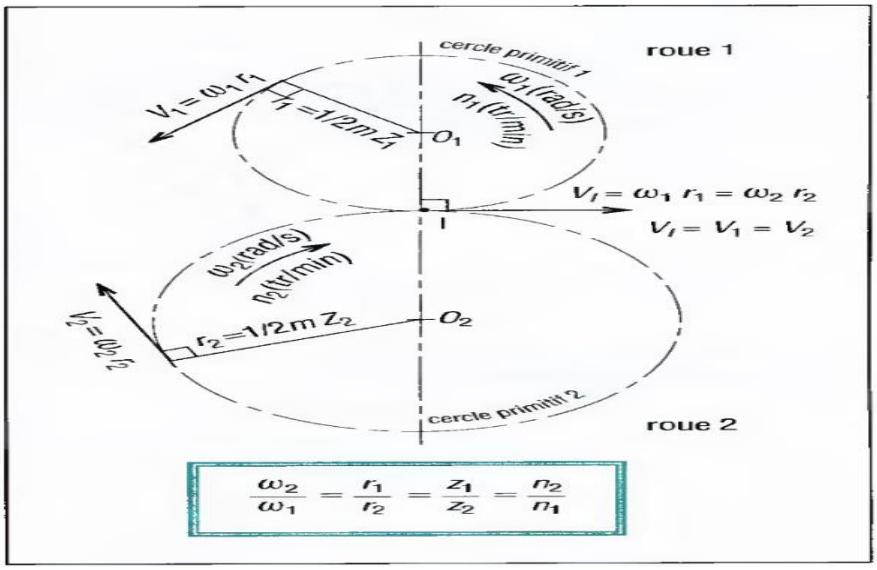


Figure II. 14: les point d'engrangement. **[22]**

II.2.6 Étude du profil en développante de cercle :

a) Développante de cercle :

Le cercle qui sert de support au tracé de la développante est appelé cercle de base (rayon rb).

Les développantes tracées à partir d'un même cercle de base sont toutes géométriquement identiques ou superposables.

Les profils des flancs et faces des dents suivent rigoureusement la géométrie de la développante. **[22]**

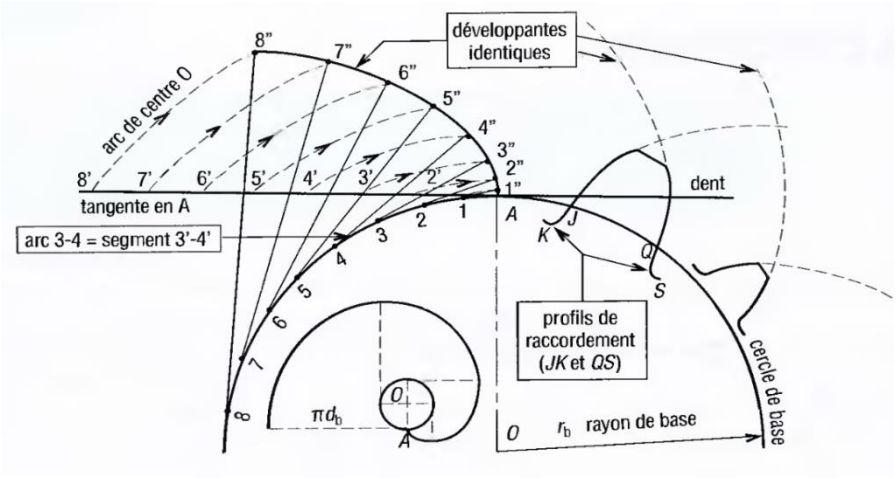


Figure II. 15: Développante de cercle. **[22]**

b) Propriétés et caractéristiques du profil en développante de cercle :

Le profil en développante de cercle est le plus couramment utilisé dans la fabrication d'engrenages. Ses principaux avantages résident dans son insensibilité aux variations d'entraxe et sa relative facilité de fabrication avec des outils simples.

Contrairement au profil cycloïdal, surtout employé en micromécanique, la développante de cercle permet de réaliser des roues avec un faible nombre de dents sans risque d'interférence lors du taillage. Cependant, le profil cycloïdal présente l'inconvénient d'être sensible aux variations d'entraxe, ce qui limite son utilisation à des applications spécifiques. **[22]**

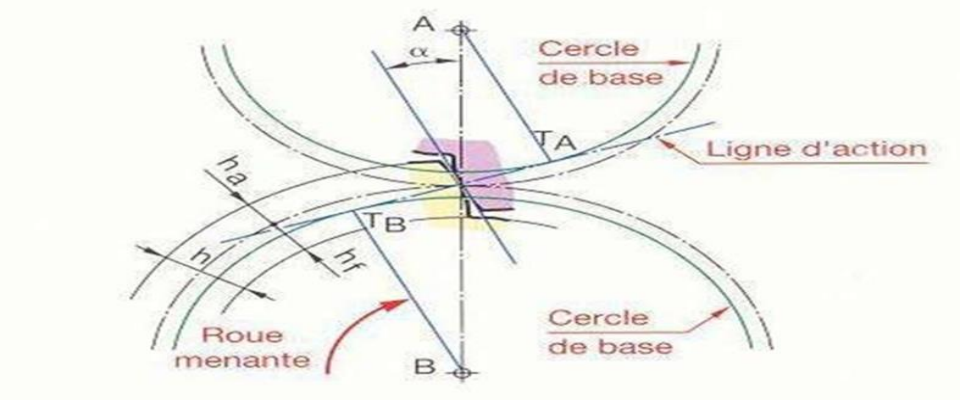


Figure II. 16: Angle de pression et ligne d'engrènement ou action. **[22]**

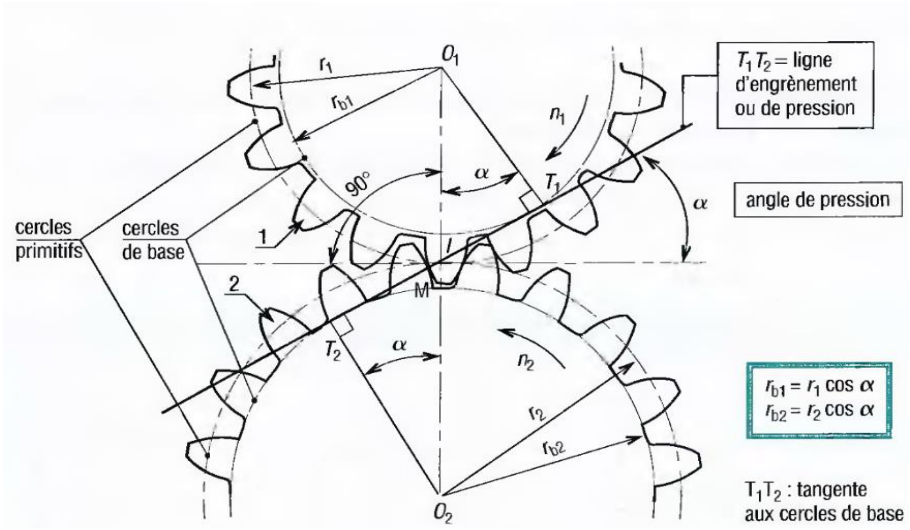


Figure II. 17: Angle de pression et ligne d'engrènement. **[22]**

II.2.7 Conditions d'engrènement :

En plus des conditions géométriques (profil de la dent), un engrenage doit respecter les conditions suivantes : Les conditions générales d'engrènement sont :

Condition 1 : Le rapport de transmission entre les deux roues doit rester constant indépendamment de la position du point de contact.

Conditions 2 : À chaque instant de l'entraînement, le mouvement doit se transmettre au moins par une paire de dents.

Condition 3 : grosseur relative des roues dentées (éviter l'interférence). **[23]**

II.2.8 Phénomène d'interférence :

Selon le nombre de dents des engrenages, il peut y avoir des problèmes d'interférence au niveau du pied des dents.

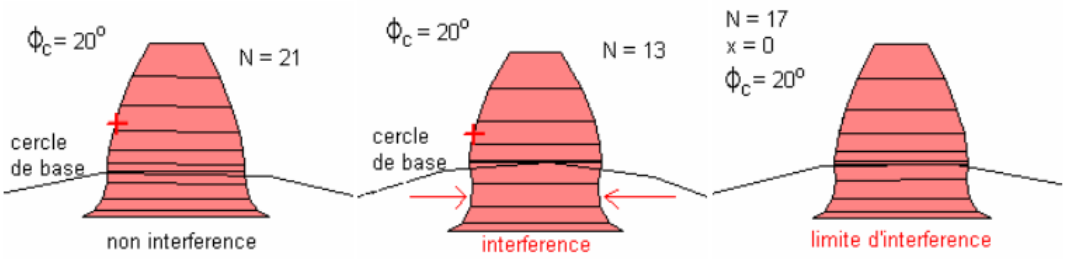


Figure II. 18: limite d'interférence. **[24]**

Conséquences :

- Blocage mécanique (impossibilité de rotation fluide).
- Usure prématurée et dommages aux dentures.
- Bruits et vibrations anormales. **[25]**

a) Interférence d'engrènement (interférence de fonctionnement) :

L'interférence d'engrènement se produit lorsqu'un pignon à faible nombre de dents (ayant des creux de denture étroits) engrène avec une roue à grand nombre de dents (présentant des sommets de dents larges). Dans ce cas, le sommet des dents de la roue peut entrer en contact parasite avec le fond des creux du pignon, empêchant un engrènement correct, Ce phénomène est appelé interférence de fonctionnement ou interférence d'engrènement. **[26]**

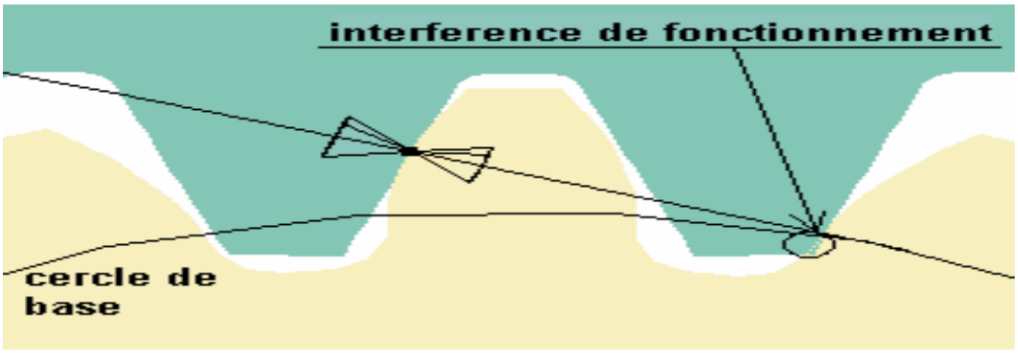


Figure II. 19: interférence de fonctionnement. **[26]**

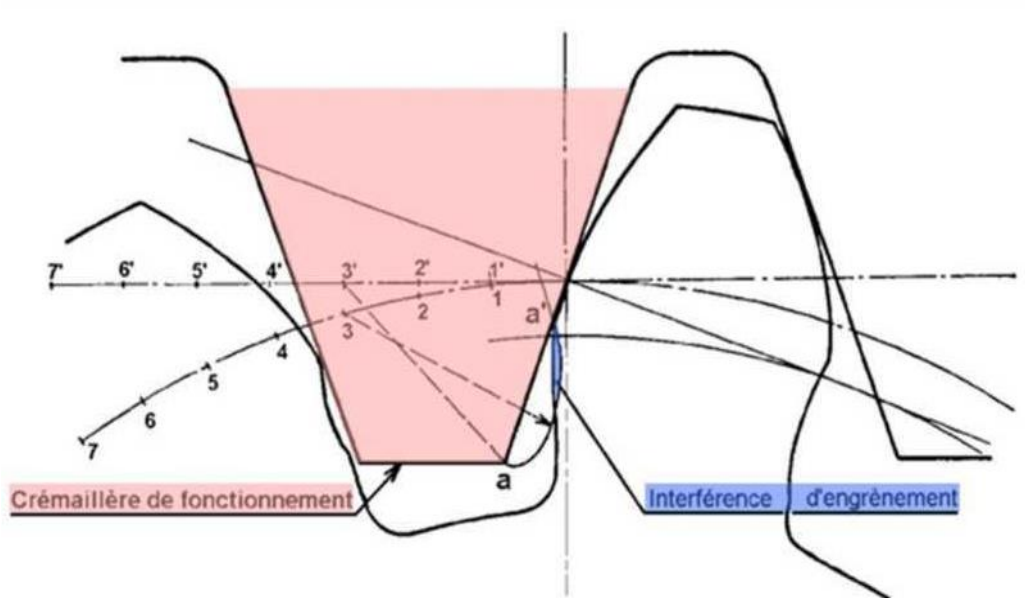


Figure II. 20: Interférence de fonctionnement. **[26]**

b) Interférence de taillage :

Lors de la taille d'un pignon avec un faible nombre de dents à l'aide d'un outil crémaillère, il peut se produire un phénomène d'interférence de taillage. Cela se manifeste par une troncature du profil de la denture au niveau du pied de la dent, entraînant la formation d'un point anguleux, dans ce cas on dit qu'il y a interférence de taillage. **[27]**

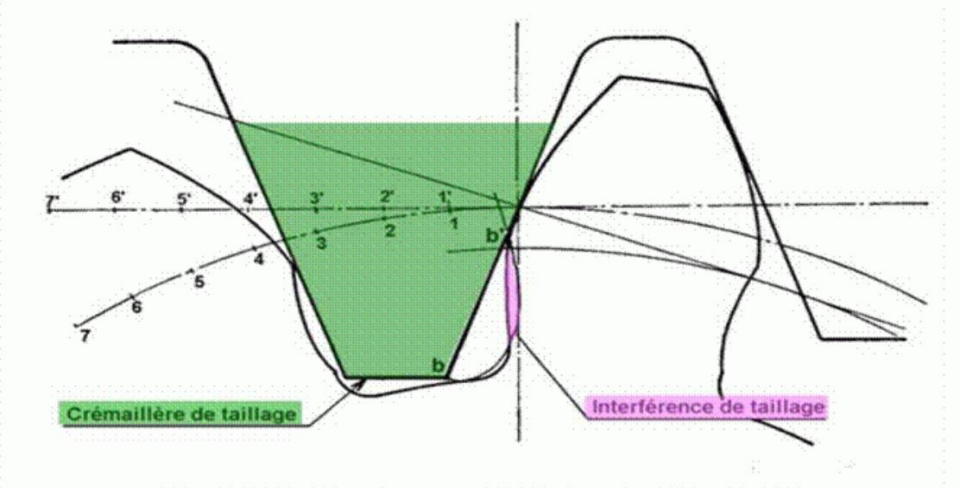


Figure II. 21: Interférence de taillage. **[26]**

Elle entraîne une usure prématurée, des vibrations, une baisse du rendement et peut même rendre l'engrenage inutilisable (risque de blocage). Cette interférence doit absolument être évitée en conception.

Pour Évitée l'interférence :

Pour éviter ce type de problèmes, il faut respecter la règle suivante : Pour Φ = 20° : nous avons l'intervalle [13, 17]

Si Z1≤13 il y'a toujours une interférence,

Si Z1≥17 il y'a pas d'interférence,

Si 13≤Z1≤17 il faut vérifier la valeur de $Z2\ max$ ou $Z1\ min$ pour éviter l'interférence selon la méthode suivante :

Soit $Z1$nombre de dents du pignon et $Z2$ celui de la roue. Si on connait Z1 alors :

$$\mathbf{Z2} = \frac{\mathbf{4 - Z1^2 * \sin\emptyset^2}}{\mathbf{2 * Z1 * sin\emptyset^2 - 4}} \quad \textbf{[28]}$$

De la même manière : Pour Φ =14.5 : nous avons l'intervalle [23, 31] et Pour Φ =25 : nous avons l'intervalle [9, 11].

- **Augmenter l'angle de pression α :** est une solution peu employée, car elle exige un outillage spécifique pour le taillage des dents et réduit le rapport de conduite Cα
- **Diminuer la hauteur de saillie :** est peu utilisé, car cela réduit aussi le rapport de conduite Cα.
- **Le déport de denture (avec ou sans modification d'entraxe) :** constitue la méthode la plus répandue pour éliminer les problèmes d'interférence. **[28]**

II.2.9. Coefficient de déport (X) :

Le déport de denture est une modification géométrique appliquée aux dents d'un engrenage qui consiste à déplacer la denture vers l'extérieur (déport positif) ou vers le centre (déport négatif) de la roue dentée par rapport à la ligne primitive de génération**. [29]**

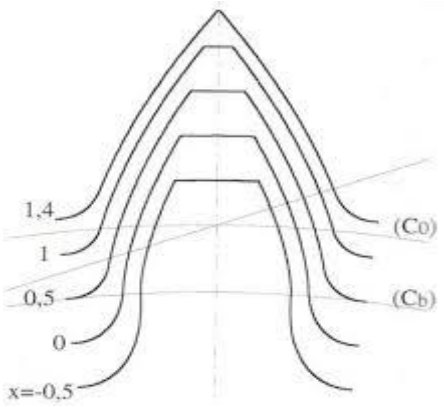


Figure II. 22: Influence du coefficient de déport de denture sur sa forme.

A. Relation entre le point de tangence de la droite d'action et le cercle de base :

Le point (C) est le point de tangence de la droite d'action avec le cercle de base.

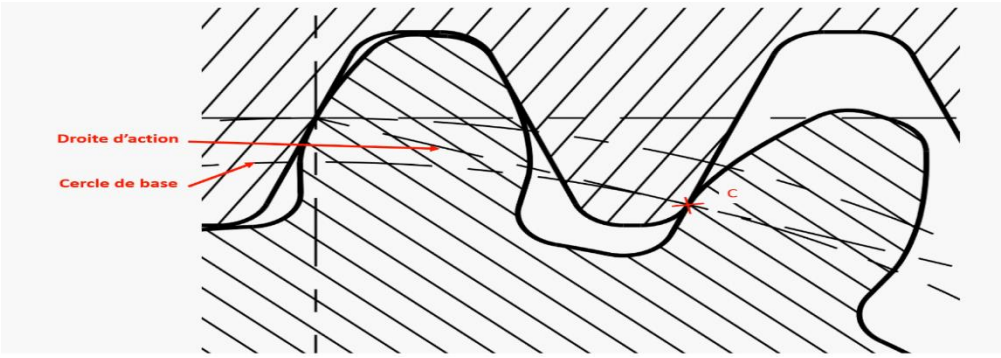


Figure II. 23: Influence du coefficient de déport (x) sur le profil de denture. **[32]**

B. Point de tangence de la droite d'action avec le cercle de base :

- La droite d'action (ou ligne de pression) est la trajectoire du point de contact entre deux dents en engrènement.
- Elle est tangente aux deux cercles de base (du pignon et de la roue) et inclinée selon l'angle de pression (α).
- Le point de tangence marque le début théorique de l'engrènement (où le contact entre les dents commence). **[33]**

C. Influence du coefficient de déport (X) sur ce point :

Le coefficient de déport (X) modifie la géométrie de la denture, ce qui impacte :

- La position du cercle de base (indirectement, car le cercle de base dépend du diamètre primitif et de l'angle de pression).
- La longueur de la droite d'action :
  - Un déport positif (X > 0) éloigne la denture du centre, augmentant la zone d'engrènement utile.
  - Un déport négatif (X < 0) rapproche la denture du centre, réduisant parfois la zone de contact.
- Le risque d'interférence :
  - Un mauvais choix de X peut déplacer le point de tangence de manière à provoquer un contact prématuré ou un engrènement incorrect**. [34]**

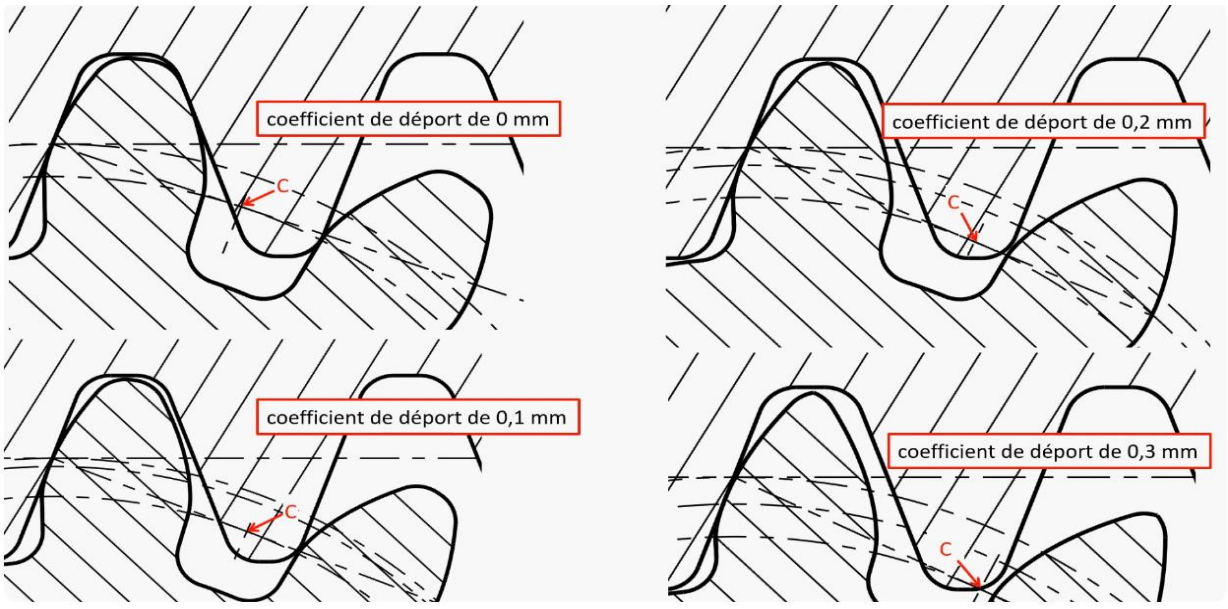


Figure II. 24: Influence du coefficient de déport (x) sur le profil de denture **[35]**

D. Conséquences pratiques :

- **Un X bien choisi permet :**

D'éviter l'interférence en ajustant la position des dents et D'optimiser la longueur de la droite d'action pour un engrènement plus fluide.

- **Un X inadapté peut :**

Dégrader la qualité de l'engrènement et Provoquer des phénomènes de contact parasite (usure, bruit, vibrations). **[36]**

E. Déport de denture sans variation d'entraxe :

- **Principe** :
  - Les coefficients de déport x1 (pignon) et *x*2 (roue) sont opposés ($x_1 = -x_2$).
  - La somme des déports est nulle : $x_1+x_2=0$.
  - L'entraxe théorique **(**a) reste inchangé : $a = a_w$. **[36]**

- **Applications** :
  - Équilibrage de la résistance entre pignon et roue.
  - Éviter l'interférence pour les pignons à faible nombre de dents. **[36]**
- **Avantages :**
  - Pas besoin de modifier la distance entre axes.
  - Même angle de pression ($\alpha_{tw} = \alpha t$). **[36]**

F. Déport de Denture Avec Variation d'Entraxe :

- **Principe :**
  - Les déports *x*1 et *x*2 sont **indépendants** (souvent tous deux positifs).
  - La somme x1+x2≠0
  - L'entraxe réel (a_w) est modifié :
  - L'angle de pression apparent (α_{tw}) change :

$$\cos \alpha_{tw} = \frac{a}{a_w} \times \cos \alpha t. \textbf{[36]}$$

- **Applications :**
  - Adaptation à des entraxes imposés (contraintes mécaniques).
  - Optimisation de la durée de vie pour des rapports de transmission élevés.

- **Avantages :**
  - Meilleure résistance des deux dentures (déports positifs).
  - Flexibilité pour des configurations complexes. **[36]**

Dans une denture corrigée :

- L'engrènement ne se produit pas sur les cercles primitifs théoriques (d = $m \cdot z$), mais sur les cercles primitifs corrigés (d′) liés à l'entraxe réel aw.
- La correction par déport x permet d'optimiser la résistance et le silence de fonctionnement, mais nécessite de recalculer précisément la géométrie d'engrènement. **[37]**

G. Mécanisme d'Engrènement dans une Denture Corrigée (avec Déport x)

1. Principe de Base :

- Dans une **denture corrigée**, le déport (x) modifie la position et la forme des dents pour :
- Éviter les interférences (surtout pour Z<17 dents)
- Équilibrer la résistance entre pignon et roue
- Adapter l'engrenage à des entraxes spécifiques **[38]**

2. Modifications Géométriques Clés :

Tableau II. 1: Mécanisme d'Engrènement dans une Denture Corrigée.

Paramètre	Denture Standard	Denture Corrigée
Diamètre primitif	Théorique (d = $m \times z$)	Effectif (d′=d× $\frac{\cos \alpha t}{\cos \alpha_{tw}}$)
Épaisseur de dent	$S = \pi \times \frac{m}{2}$	$\bar{s} = m(\frac{\pi}{2} + 2x \times \tan \alpha t)$
Saillie	$ha = 1m$	$ha = (1+x-k_{mn})m$

3. Ligne d'action :

- Toujours tangente aux cercles de base.
- Inclinée à l'angle de pression apparent α_{tw} .

4. Processus d'Engrènement :

- Contact initial : Début sur la partie inférieure du flanc de la dent menante.
- Roulement sans glissement : Sur les nouveaux cercles primitifs $d1'$ et $d2'$.
- Désengagement : Fin sur la partie supérieure du flanc. **[39]**

II.2.10. Fonctionnement avec jeu :

Lors du fonctionnement d'un engrenage avec jeu, un léger espace (jeu) est volontairement maintenu entre les flancs des dents en prise pour éviter le grippage, compenser les dilatations thermiques et faciliter la lubrification. Ce jeu, généralement mesuré sous forme de jeu circonférentiel ou jeu dentaire, permet un mouvement plus fluide et réduit les bruits parasites. Cependant, un jeu excessif peut entraîner des chocs entre les dents, augmenter l'usure et nuire à la précision de transmission.

Le contrôle du jeu dans un engrenage peut être réalisé par différentes méthodes, notamment :

- L'ajustement de l'entraxe entre les roues dentées,
- L'application d'un déport de denture lors de la fabrication,
- La modification de l'épaisseur des dents de l'outil de taillage. **[40]**

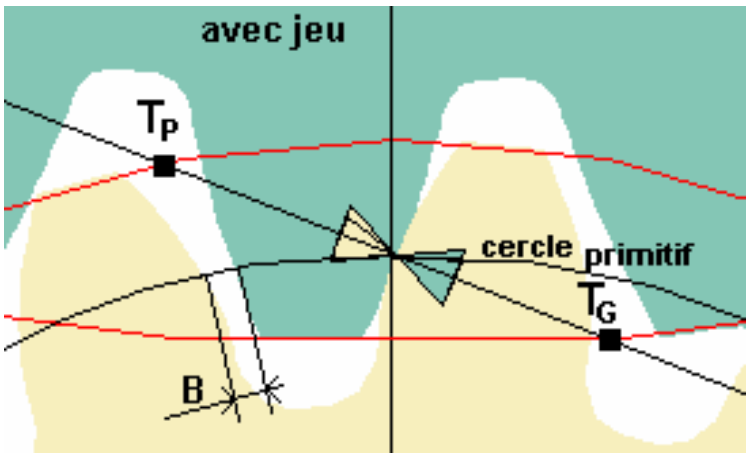


Figure II. 25: Fonctionnement avec jeu **[41]**

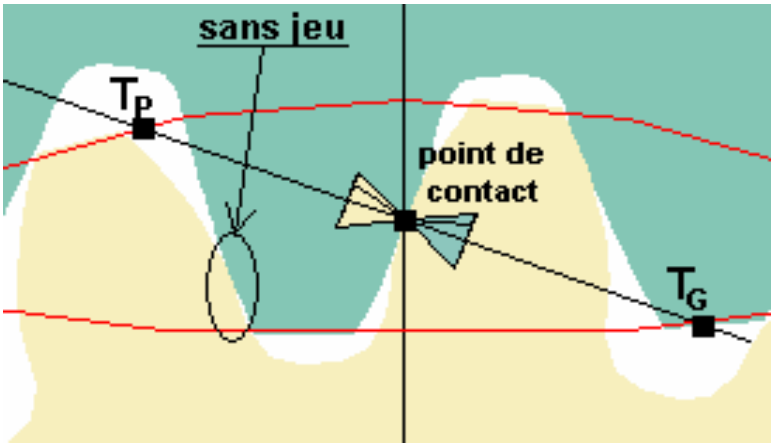


Figure II. 26: Fonctionnement sans jeu. **[41]**

II.2.11. Lubrification des Engrenages :

La lubrification est essentielle pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité des engrenages. Elle permet de :

- Réduire les frottements entre les dents en contact.
- Dissiper la chaleur générée par l'engagement des dentures.
- Protéger contre l'usure et la corrosion.
- Amortir les vibrations et les chocs.

II.2.11.1Méthodes de Lubrification :

1. Lubrification par graissage (graisse) :
   - Utilisée pour les engrenages faiblement chargés ou fonctionnant à basse vitesse.
   - Facile à appliquer, mais nécessite des réapprovisionnements périodiques.
2. Lubrification par bain d'huile (barbotage) :
   - Les engrenages partiellement immergés entraînent l'huile. **[42]**

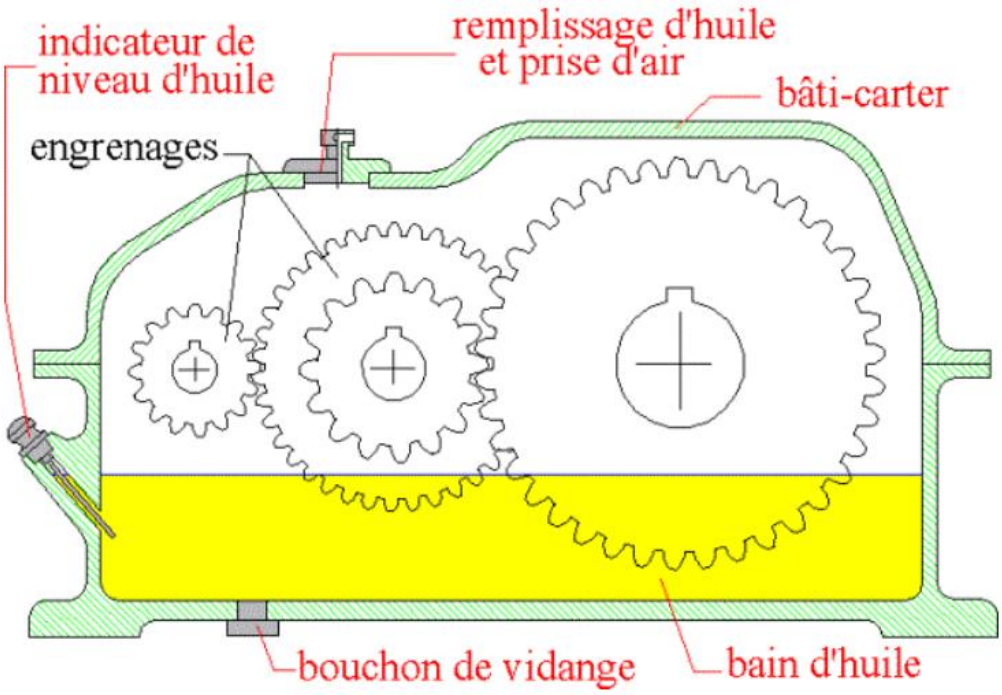


Figure II. 27: Trains d'engrenage lubrification. **[43]**

II.2.11.2. Diagramme profile de dent :

Plusieurs petits dessins de profils de dents sont placés à différents endroits du diagramme, illustrant comment la forme de la dent varie en fonction du nombre de dents et du coefficient de correction.

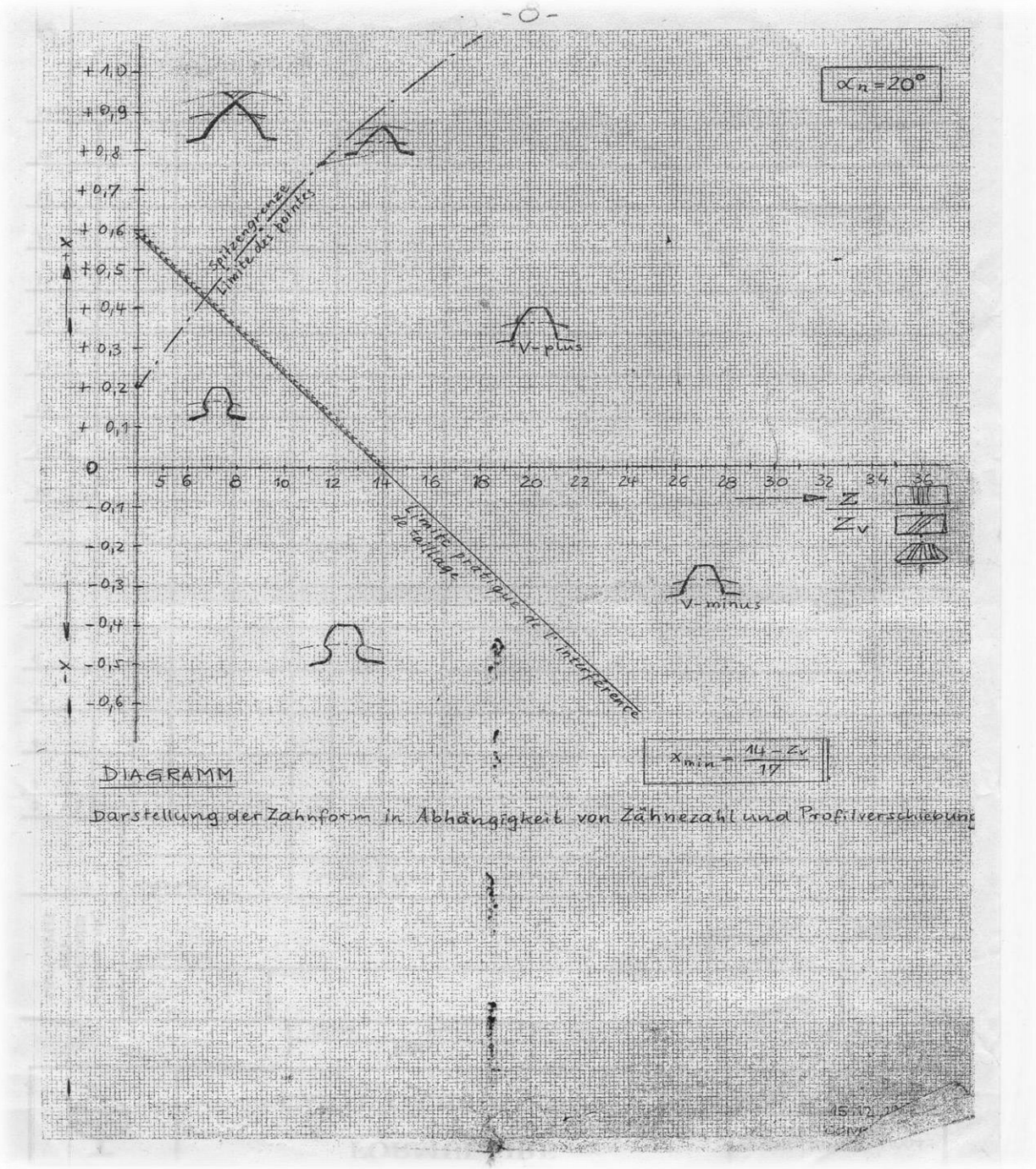


Figure II. 28: Diagramme profile des dents.

Tableau II. 2: Tableau des principales caractéristiques d'un engrenage à denture droite :

Désignation	Symbole	Formules
Module	m	$m = \frac{d_a}{z+2}$
Nombre de dents	z	D'après modèle
Saillie	ha	ha=(1+x-k_{mn})m
Creux	hf	hf=(1.25-x) m
Diamètre de base	db	db= m×z×cos αt
Diamètre de pied	d_f	d_f= d -2 m (1.25-x)
Entraxe mesurée	a_w	D'après le corps
Diamètre primitif Théorique	d	$d = m \times z$
Diamètres primitifs Effectif	d'	$d' = d \times \frac{\cos \alpha t}{\cos \alpha_{tw}}$
Entraxe calculée	a	$a = \frac{d1 + d2}{2}$
Angle de pression apparente	αt	$\alpha = \alpha t$
L'angle de pression en coup apparent	α_{tw}	$\cos \alpha_{tw} = \frac{a}{a_w} \times \cos \alpha t$

Coefficient de déport	x1; x2	$x1 + x2 = (z1 + z2) \times \frac{\text{inv}\alpha_{tw} - \text{inv}\alpha_t}{2 * \tan \alpha_t}$ Si : $z1 > 14$ x1 = ± 0.1 ..... 0.6 Si : $z1 < 14$ $x1 = \frac{14 - z1}{17}$ Si : $z1 = 14$ x1et x2 A choisi : x1; x2 < 0.5
Correction de raccourcissement	k_{mn}	$k_{mn} = (x1 + x2) - \frac{(a_w - a)}{m}$
La hauteur de la dent	h_{mn}	$h_{mn} = (2.25 - k_{mn})\ m$
Epaisseur de la dent	$\bar{s}$	$\bar{s} = m(\frac{\pi}{2} + 2x \times \tan \alpha t)$
Le diamètre extérieur	d_a	$d_a = d + 2\ m\ (1 + x - k_{mn})$

[81]

Chapitre III :

Dimensionnement et Conception

III.1. Introduction :

La conception par ingénierie inverse appliquée aux pignons d'engrenage est une méthode innovante qui permet de reconstituer ou d'optimiser des composants mécaniques existants sans documentation technique préalable. Cette technique est particulièrement utile dans l'industrie pour moderniser des systèmes obsolètes, corriger des défauts de conception ou adapter des pièces à de nouvelles contraintes fonctionnelles, comme c'est le cas dans les éoliennes de pompage. Cette approche permet de reproduire des pièces difficiles à obtenir, d'améliorer leur conception pour alléger ou renforcer la structure, et d'adapter les pièces à de nouveaux usages, tout en réduisant considérablement les coûts et les délais par rapport à une conception ex nihilo. **[44]**

III.2. Dimensionnement de pignon et la roue denté :

III.2.1. Définition des spécifications techniques (dimensions) :

Après avoir procédé à une rétro-ingénierie et à des mesures à partir d'engrenages réels, nous avons extrait les dimensions, le nombre de dents et les coefficients qui nous ont permis de calculer et de déterminer d'autres dimensions et angle.

Nombre de dents :

$$z1 = 46 \qquad \text{Et} \qquad z2 = 14$$

Z1 : nombre de dents de la roue denté Z1 : nombre de dents de pignon

Le diamètre extérieur mesuré d_a :

$$d_{a1} = 244 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = 81.5 \text{ mm}$$

Entraxe mesurée a_w :

$$a_w = 153 \text{ mm}$$

Le module m :

$$m = \frac{d_a}{z+2} = \frac{244}{48} = \frac{81.5}{16} = 5$$



Figure III.1: les mesurés tirés à partir des engrenages.

Entraxe calculée a :

$$a = \frac{d1+d2}{2} = \frac{230+70}{2} = 150 \text{ mm} \qquad (1)$$

Angle de pression apparente αt :

$$\alpha = \alpha t = 20 \text{ degrés}$$

L'angle de pression en coup apparent α_{tw} :

$$\cos \alpha_{tw} = \frac{a}{a_w} \times \cos \alpha t = \frac{150}{153} \times \cos 20 = 0.921267 \qquad (2)$$

$$\text{Et} \quad \alpha_{tw} = 22.8879 \text{ degré}$$

$$\text{INV } \alpha t = 0.014904 \quad \text{et} \quad \text{INV } \alpha_{tw} = 0.022699$$

Coefficient de déport x1; x2 :

$$x1 + x2 = (z1 + z2) \times \frac{\text{inv}\alpha_{tw} - \text{inv}\alpha_t}{2 * \tan \alpha_t} = (46 + 14) \times \frac{0.02269 - 0.014904}{2 \times 0.36397}$$

$$= 0.6417 \qquad (3)$$

La correction du raccord de tête k_{mn} :

$$k_{mn} = (x1 + x2) - \frac{(a_w - a)}{m} = 1.1847 - \frac{155.29 - 150}{5} = 0.0417 \text{ mm}$$

(4)

x1; x2 :

$$X1=\frac{d_{a1}-d1}{2m}-1+k_{mn}=\frac{244-230}{2\times5}-1+0.1262=0.4417 \quad (5)$$

$$X2=\frac{d_{a2}-d2}{2m}-1+k_{mn}=\frac{81.5-70}{2\times5}-1+0.1262=0.1917 \quad (6)$$

Epaisseur de la dent $\bar{s}$:

$$\bar{s}1 = m(\frac{\pi}{2}+2\,X1\times\tan\alpha t) = 5\times(\frac{\pi}{2}+2\times0.4417\times\tan 20)$$

$$\bar{s}1 = 9.4576 \text{ mm} \quad (7)$$

$$\bar{s}2 = m(\frac{\pi}{2}+2\,X2\times\tan\alpha t) = 5\times(\frac{\pi}{2}+2\times0.1917\times\tan 20)$$

$$\bar{s}2 = 8.5477\text{mm} \quad (8)$$

Les diamètres :

Diamètre de pied d_f :

$$d_{f1} = d - 2\,m\,(1.25- X1) = 230 - 2\times5\times(1.25-0.4417)$$

$$d_{f1} = 221.917 \text{ mm} \quad (9)$$

$$d_{f2} = d - 2\,m\,(1.25- X2) = 70 - 2\times5\times(1.25- 0.1917)$$

$$d_{f2} = 59.417 \text{ mm} \quad (10)$$

Diamètre de base db :

$$d_{b1} = m\times z1\times\cos\alpha t = 5\times46\times\cos 20$$

$$db1 = 216.129 \text{ mm} \quad (11)$$

$$d_{b2} = m\times z2\times\cos\alpha t = 5\times14\times\cos 20$$

$$d_{b2} = 65.7785 \text{ mm} \quad (12)$$

Diamètre primitif Théorique d :

$$d_1 = m\times z1 = 5\times46$$

$$d1 = 230 \text{ mm} \qquad (13)$$

$$d2 = m \times z2 = 5 \times 14$$

$$d2 = 70 \text{ mm} \qquad (14)$$

Diamètre primitifs Effectif d' :

Roulement sans glissement : Sur les nouveaux cercles primitifs $d1'$ et $d2'$:

$$d1' = d1 \times \frac{\cos \alpha t}{\cos \alpha_{tw}} = 230 \times \frac{\cos 20}{\cos 22.8879}$$

$$d1' = 234.5999 \text{ mm} \qquad (15)$$

$$d2' = d2 \times \frac{\cos \alpha t}{\cos \alpha_{tw}} = 70 \times \frac{\cos 20}{\cos 22.8879}$$

$$d2' = 71.4 \text{ mm} \qquad (16)$$

La hauteur de la dent h_{mn} :

$$h_{mn} = (2.25 - k_{mn})\, m = (2.25 - 0.0417) \times 5$$

$$h_{mn} = 11.0415 \text{ mm} \qquad (17)$$

Creux hf :

$$hf1 = (1.25 - X1)\, m = (1.25 - 0.4417) \times 5$$

$$hf1 = 4.0415 \text{ mm} \qquad (18)$$

$$hf2 = (1.25 - X2)\, m = (1.25 - 0.1917) \times 5$$

$$hf2 = 5.2915 \text{ mm} \qquad (19)$$

Saillie ha :

$$ha1 = (1 + X1 - k_{mn})m = (1 + 0.4417 - 0.0417) \times 5$$

$$ha1 = 7 \text{ mm} \qquad (20)$$

$$ha2 = (1 + X2 - k_{mn})m = (1 + 0.1917 - 0.0417) \times 5$$

$$ha2 = 5.749 \qquad (21)$$

Le rapport de réduction :

$$i = \frac{zp}{zr} = \frac{d}{D} = \frac{14}{46} = \frac{70}{230} = 0.3043 \qquad (22)$$

III.3. Modélisation 3D du pignon et de la roue dentée par SolidWorks :

SOLIDWORKS est un modeleur 3D utilisant la conception paramétrique crée par Dassault Systèmes. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés. **[45]**

1.Modélisation de Pignon :

Esquisse et les équations de pignon :

Pour esquisser et modéliser un pignon (engrenage) dans SolidWorks, vous pouvez suivre ces étapes et utiliser les équations appropriées pour définir la géométrie des dents. Voici un guide détaillé :

Equations, variables globales et cotes

Filtrer tous les champs

Nom	Valeur / Equation	Equivaut à
Variables globales		
"m"	= 5	5
"z"	= 14	14
"d"	= "m" * "z"	70
"a"	= 20	20
"db"	= "d" * cos ("a")	65.7785
"df"	= "d" - 2 * "m" * (1.25 - "x2")	59.417
"da"	= "d" + 2 * "m" * ("x2" + 1 - "km")	81.5
"ap"	= 180 / "z"	12.8571
"ei"	= ("m" * ((3.14 / 2) + (2 * "x2" * tan ("a")))) / 2	4.27387
"rb"	= "m" * "z" / 5	14
"x2"	= 0.1917	0.1917
"km"	= 0.0417	0.0417
Ajouter une variable globale		
Fonctions		
Ajouter une suppression de fonction		

Reconstruction automatique Unités angulaires des équations: Degrés Ordre de résolution automatique

Lier au fichier externe: C:\Users\Asus\Desktop\equations pignon 2.txt

Figure III. 2: les équations appropriées pour définir la géométrie des dents de pignon

aprés les équations nous modilisée l'esquisse de pignon :

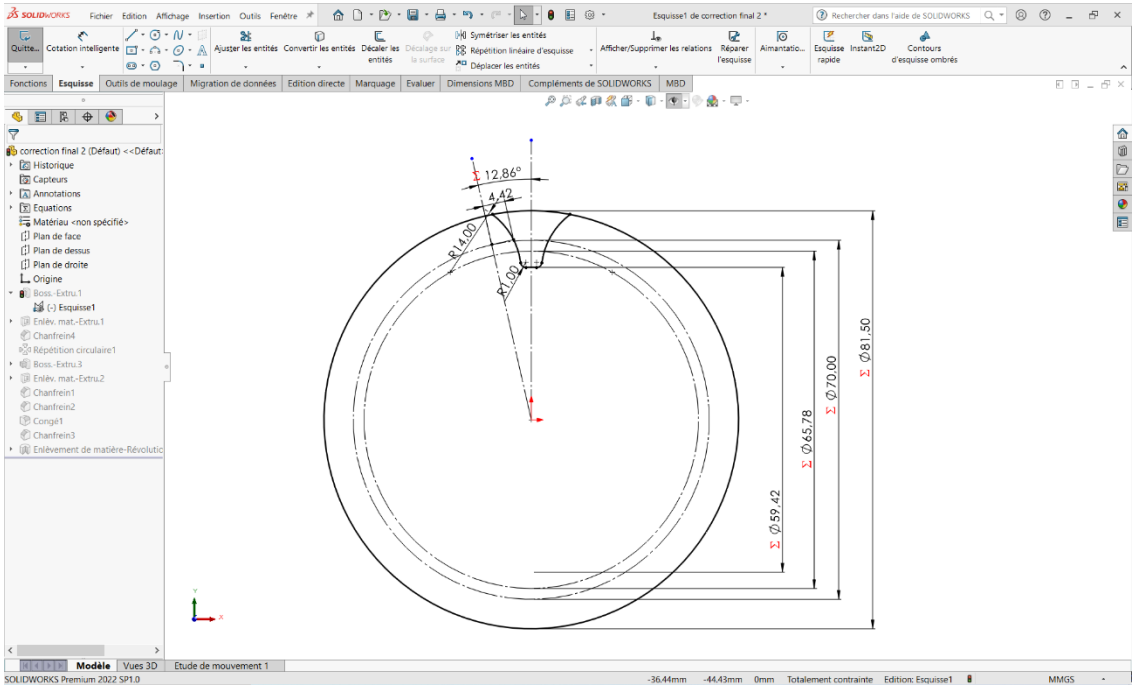


Figure III. 3: Esquisse de conception du pignon.

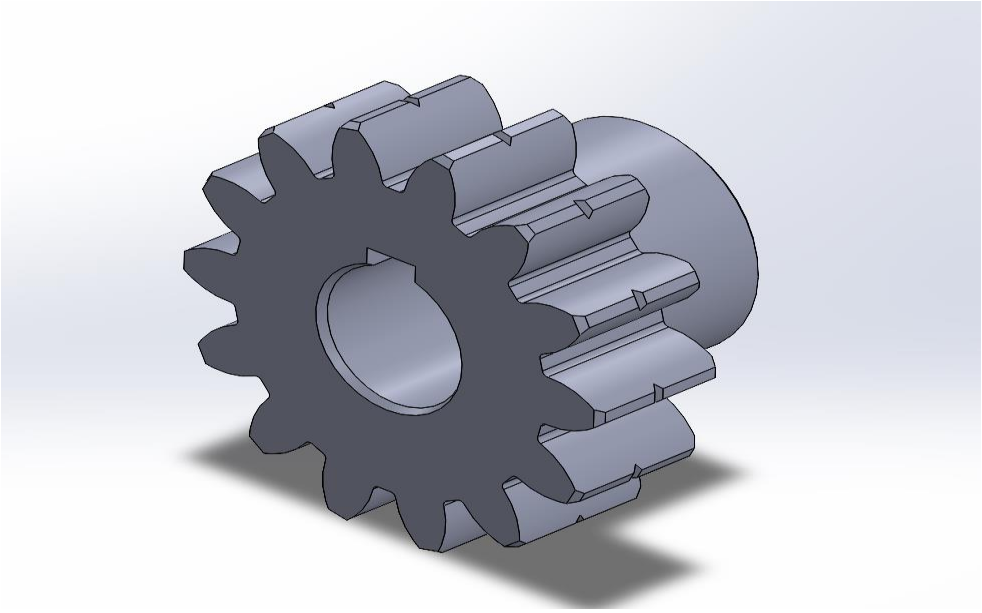


Figure III. 4: Modèle 3D de pignon.

2. Modélisation de la roue dentée :

Les equations :

Equations, variables globales et cotes

Filtrer tous les champs

Nom	Valeur / Equation	Equivaut à
Variables globales		
"m"	= 5	5
"z"	= 46	46
"d"	= "m" * "z"	230
"a"	= 20	20
"db"	= "d" * cos ("a")	216.129
"df"	= "d" - 2 * "m" * (1.25 - "x1")	221.917
"da"	= "d" + 2 * "m" * ("x1" + 1 - "km")	243.975
"ap"	= 180 / "z"	3.91304
"ei"	= ("m" * ((3.14 / 2) + (2 * "x1" * tan ("a")))) / 2	4.72883
"rb"	= "m" * "z" / 5	46
"x1"	= 0.4417	0.4417
"km"	= 0.04417	0.04417
Ajouter une variable globale		

Reconstruction automatique | Unités angulaires des équations: Degrés | Ordre de résolution automatique

Lier au fichier externe: C:\Users\Asus\Desktop\equations pignon 2.txt

Figure III. 5: les équations appropriées pour définir la géométrie des dents de la roue

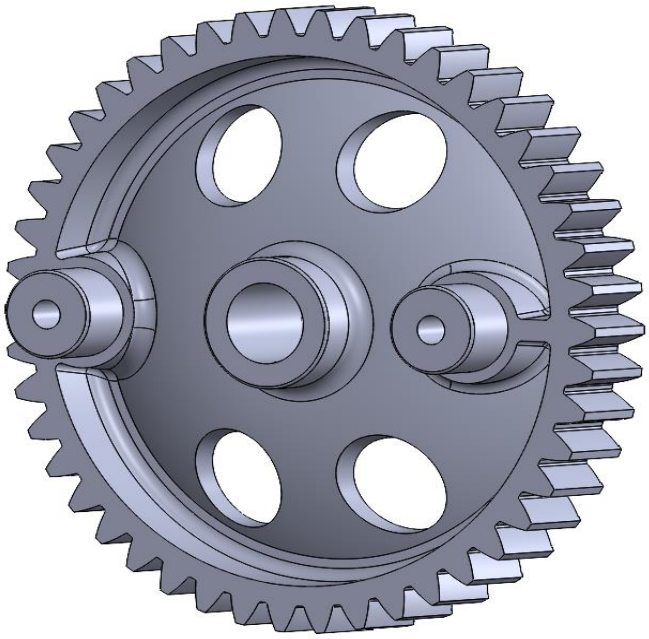


Figure III. 6: Modèle 3D de la roue dentée.

III.4. Matériaux :

III.4.1. Critères de choix d'un matériau :

Le choix d'un matériau dépend de plusieurs critères :

- Caractéristiques mécaniques : limite élastique, masse, dureté, résilience ;
- Caractéristiques physico-chimiques : comportement à la corrosion, vieillissement ;
- Caractéristiques de mise en œuvre : usinabilité, soudabilité, trempabilité ;
- Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle. **[69]**

III.4.1.1. Matériaux non ferreux pour les engrenages :

Les matériaux non ferreux comme l'aluminium, le bronze, le laiton et certains plastiques techniques sont privilégiés pour les engrenages dans des applications où la légèreté, la résistance à la corrosion, la réduction du bruit et la facilité d'usinage sont essentielles. Le bronze reste le choix de référence pour les roues à vis sans fin en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et tribologiques, tandis que le laiton est une alternative économique pour des charges modérées. **[47]**

III.4.1.1.1. Alliages de cuivre pour les engrenages :

Les alliages de cuivre sont appréciés pour la fabrication de pignons en raison de leur excellente résistance à l'usure, leur bonne conductivité thermique, leur résistance à la corrosion et leur capacité à fonctionner sans lubrification excessive. Ils sont particulièrement adaptés aux environnements où le silence de fonctionnement, la résistance aux frottements et la durabilité sont recherchés. **[48]**

A. Laitons (alliages cuivre-zinc) :

Les laitons sont les alliages de cuivre les plus couramment utilisés pour les pignons industriels. Leur teneur en zinc varie généralement de 15 à 45 %. Pour des applications mécaniques, on privilégie souvent des laitons avec une teneur en zinc inférieure à 35 % (laitons α), offrant une bonne ductilité et une usinabilité à froid. Certains laitons contiennent aussi du manganèse, de l'aluminium, du fer ou du silicium pour améliorer la résistance à l'usure et la dureté. **[49]**

B. Bronzes (alliages cuivre-étain) :

Les bronzes, notamment le CuSn8 (8 % d'étain), sont utilisés pour les pignons soumis à de fortes charges ou à des conditions de frottement sévères. Ils se distinguent par leur ténacité, leur faible coefficient de frottement et leur résistance à la corrosion. [50]

C. Alliages spéciaux :

Certains alliages modernes incorporent de faibles quantités de plomb (pour l'usinabilité), de fer, de nickel, d'aluminium, de manganèse ou de silicium, afin d'optimiser la résistance mécanique et la résistance à l'usure, tout en respectant les normes environnementales (réduction du plomb). [51]

III.4.1.2. Matériaux ferreux pour les pignons :

III.4.1.2.1. Les Fontes :

Les éoliennes de pompage fonctionnent généralement à basse vitesse, de manière continue et sans choc violents. Dons ce cas, la résistance aux chocs dynamiques (où l'acier est meilleur) n'est pas essentielle, donc la fonte suffit largement.

C'est pourquoi on utilise parfois la fonte pour fabriquer des pignons en fonte :

- La fonte a une excellente capacité à absorber les vibrations et les bruits, ce qui la rend utile dans les machines où le confort sonore ou la stabilité est recherchée ;
- La vitesse de rotation est faible ;
- Pas besoin traitement thermique et traitement chimique
- La fonte offre une bonne résistance à l'usure ;
- La fonte est facile à usiner ;
- La fonte est moins chère ;
- La fonte est peu oxydable ;
- Excellente coulabilité (teneur en C > 2%), permettant la production de pièces moulées complexes ;
- Température de fusion inférieure à celle des aciers (moindre dissolution des gaz).

A. Classification des Fontes :

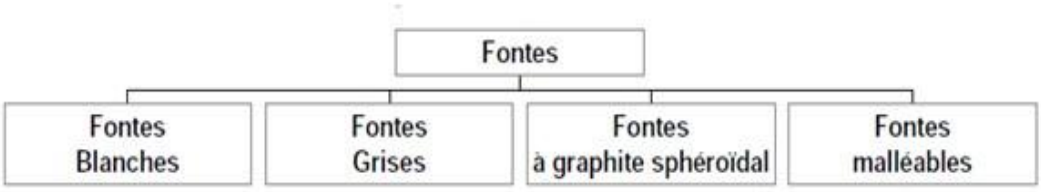


Figure III. 7: Types de fontes.

1. Fontes Blanches :

- Très dures et très fragiles.
- Ne s'usinent pas.
- Très résistantes à l'usure.
- Application : Concasseurs et Broyeurs (boulets).
- Addition de Cr et Ni (NI-Hard), encore plus résistantes.

3. Fontes Grises :

- **Fontes à graphite lamellaire FGL :**

Nuances disponibles : FGL 100 à FGL 400

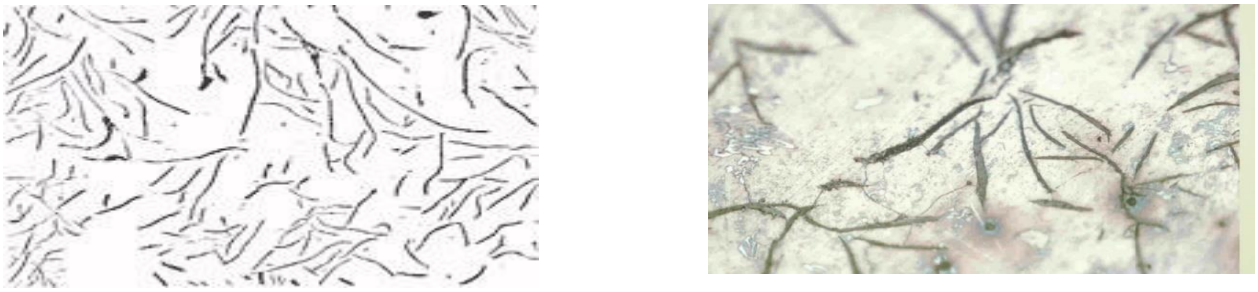


Figure III. 8: Structure d'une fonte grise lamellaire.

Les fontes grises à graphite lamellaire sont les plus répandues en raison de leurs multiples avantages :

- Coût avantageux : Elles offrent un excellent rapport qualité-prix.
- Absorption des vibrations : Idéales pour les bâtis de machines grâce à leur capacité à amortir les vibrations.
- Facilité de mise en œuvre : Leur bonne coulabilité et usinabilité simplifient leur utilisation.
- Résistance à l'oxydation : Elles présentent une faible sensibilité à la corrosion.
- Tenue à l'usure : Leur résistance aux frottements en fait un matériau durable.
- Résistance en compression : Elles supportent bien les charges compressives.
- Conductivité thermique élevée : Le réseau de graphite lamellaire favorise une dissipation rapide de la chaleur.
- Autolubrification : La structure en feuillets du graphite réduit naturellement le frottement, limitant l'usure des surfaces en contact.

Le graphite possède une structure en couches où les atomes de carbone forment des feuillets pouvant glisser facilement. Cette propriété lui confère un effet lubrifiant, diminuant la friction et l'usure entre les pièces mécaniques.

- **Fontes à graphite sphéroïdal (FGS) :**

  Les fontes à graphite sphéroïdal (FGS) sont obtenues par l'ajout d'une petite quantité de magnésium (Mg) avant le moulage. Comparées aux fontes grises, elles offrent une meilleure résistance mécanique tout en conservant leurs avantages, tels que :

  - Bonne coulabilité et usinabilité
  - Trempabilité améliorée
  - Ténacité élevée
  - Excellente résistance à l'usure

- **Désignation des nuances (Exemple : FGS 600-3) :**
  - **FGS** : Fonte à Graphite Sphéroïdal
  - **600** : Résistance minimale à la rupture (600 MPa ou 25 kgf/mm²)

- **3** : Allongement à la rupture (3%)

- **Nuances courantes :**
  - FGS 380 -15
  - FGS 420 -12
  - FGS 500 -7
  - FGS 600 -3
  - FGS 700 -2

Ces nuances offrent différentes combinaisons de résistance et de ductilité, permettant une adaptation optimale aux besoins mécaniques spécifiques.

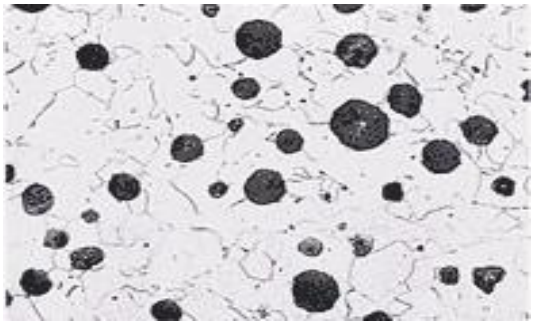


Figure III. 9: Structure d'une fonte grise sphéroïdale.

- **Fontes Malléables FGM :**

Applications typiques :

- Pièces de quincaillerie
- Raccords de plomberie
- Vannes et robinetterie
- Carters et boîtiers mécaniques
- Composants nécessitant une bonne tenue aux vibrations et chocs.

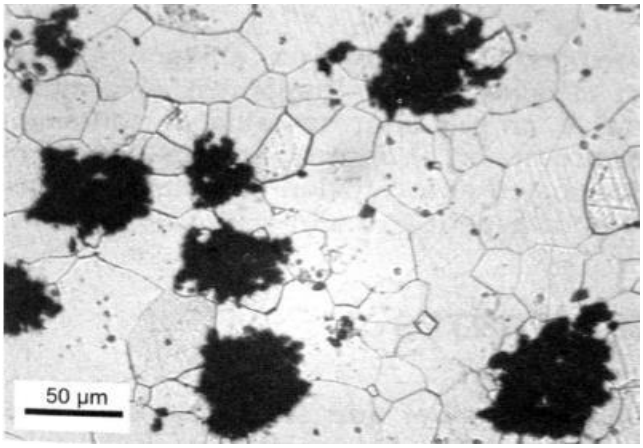


Figure III. 10: Structure d'une fonte grise malléable.

- **Fontes malléables à cœur blanc :**

Exemple : MB 400 -10 : MB, Symbole de la fonte malléable à cœur blanc (400, Résistance minimale à la rupture par extension R min 400Mpa ou 40 Kgf/mm2 et 10, Allongement en % mesuré après rupture, A 10%).

- **Fontes malléables à cœur noir :**

Exemple : MN 350 -10 : MN, Symbole de la fonte malléable à cœur noir (**350**, Résistance minimale à la rupture par extension R min 350Mpa ou 35 Kgf/mm2 et **10**, Allongement en % mesuré après rupture, A 10%).

III.4.1.2.2. Acier :

Les pignons (engrenages) sont soumis à des contraintes mécaniques élevées (usure, fatigue, chocs). Le choix de l'acier dépend de :

- La charge appliquée (puissance transmise).
- L'environnement (corrosion, température).
- Le procédé de fabrication (usinage, traitement thermique).



Figure III. 11: Engrenages coniques en acier.

A. Les aciers non alliés :

Les aciers non alliés (ou aciers carbone) sont des aciers dont les propriétés mécaniques dépendent principalement de leur teneur en carbone. Ils sont largement utilisés en fabrication mécanique en raison de leur bon rapport coût/performance et de leur facilité d'usinage. Ils peuvent être utilisés pour engrenages à condition de l'application d'un traitement thermique superficielle par induction ou par chalumeaux. **[54]**

Tableau III. 1: Type d'acier.

Type d'acier	Teneur en carbone (%)	Caractéristiques	Applications typiques
Acier doux	< 0,25 %	Excellente ductilité, bonne soudabilité, faible résistance	Tôlerie, carrosserie, structures soudées (S235, E24, XC18)
Acier mi-dur	0,25 % – 0,50 %	Bon compromis résistance/usinabilité, traitable thermiquement	Arbres, engrenages, boulons (C35, C45, XC38)
Acier dur	> 0,50 %	Haute résistance, faible ductilité, difficile à souder	Ressorts, outils, axes fortement sollicités (C60, C80, XC75)

Aciers faiblement alliés :

Les **aciers faiblement alliés** contiennent des éléments d'alliage (Cr, Ni, Mo, V, etc.) en petites quantités (généralement < 5 %), ce qui améliore leurs propriétés mécaniques par rapport aux aciers carbone non alliés. Ils sont largement utilisés en **construction mécanique** pour des pièces soumises à des contraintes élevées.

Les aciers fortement alliés :

Les aciers fortement alliés contiennent une teneur élevée en éléments d'alliage (Au moins un élément d'addition atteint la teneur de 5%.), ce qui leur confère des propriétés exceptionnelles : résistance mécanique extrême, tenue à la corrosion, résistance à la chaleur ou à l'usure. Ils sont utilisés dans des applications critiques (aéronautique, énergie, outillage de haute performance). **[56]**

A la fin : Les aciers de cémentation sont des aciers faiblement alliés ou non alliés, caractérisés par une faible teneur en carbone (généralement entre 0,10% et 0,30%). Ils sont spécialement conçus pour recevoir un traitement thermique appelé cémentation, qui consiste à enrichir la surface de la pièce en carbone afin

d’augmenter sa dureté et sa résistance à l’usure, tout en conservant un cœur tenace et ductile. **[76]**

Chapitre IV :

Réalisation

IV.1. Introduction :

La fabrication de pignons peut être réalisée selon plusieurs procédés industriels, chacun adapté à des exigences de production, de précision et de coût spécifiques. Voici un panorama des méthodes principales : frittage, moulage et usinage**. [60]**

IV.2. Techniques de fabrication :

IV.2.1. Frittage (Métallurgie des poudres) :

Le frittage est un procédé privilégié pour la production de pignons en grande série, notamment pour des formes complexes ou de petites dimensions. **[61]**

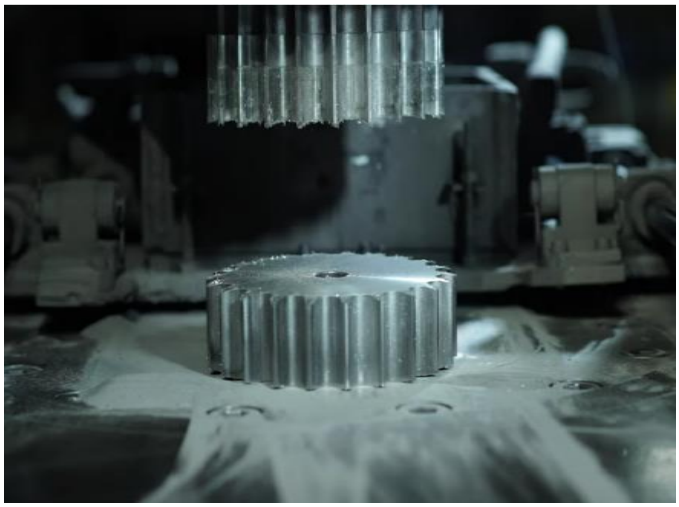


Figure IV. 1: Pignon en fritté **[62]**



Figure IV. 2 : Opération de frittage [62]

IV.2.2. Moulage :

Le moulage est une technique de fabrication qui consiste à produire des pièces en versant un matériau en fusion dans un moule reproduisant la forme souhaitée, puis en attendant sa solidification. Cette méthode est souvent la solution la plus économique pour obtenir des produits finis ou semi-finis, notamment pour des pièces aux formes complexes, des séries importantes ou des pièces massives.

Il y a deux catégories principales :

➢ Le moule permanent : Conçu pour être utilisé de nombreuses fois, ce moule est fabriqué en plusieurs parties afin de faciliter l'extraction de la pièce. Il est particulièrement adapté aux productions en grande série.

➢ Le moule non permanent : Destiné à un usage unique, il doit être détruit pour extraire la pièce. L'empreinte est obtenue en façonnant le matériau du moule autour d'un modèle. [63]

IV.2.2.1. Moulage en sable :

Le moulage en sable consiste à verser un métal en fusion dans l'empreinte d'un moule réalisé en sable, reproduisant la forme de la pièce à obtenir grâce à un modèle.

C'est l'une des techniques de fonderie les plus anciennes, mais elle reste largement utilisée car elle convient à presque tous les métaux et alliages. Elle est particulièrement adaptée aux petites séries de production et aux pièces de grandes dimensions.

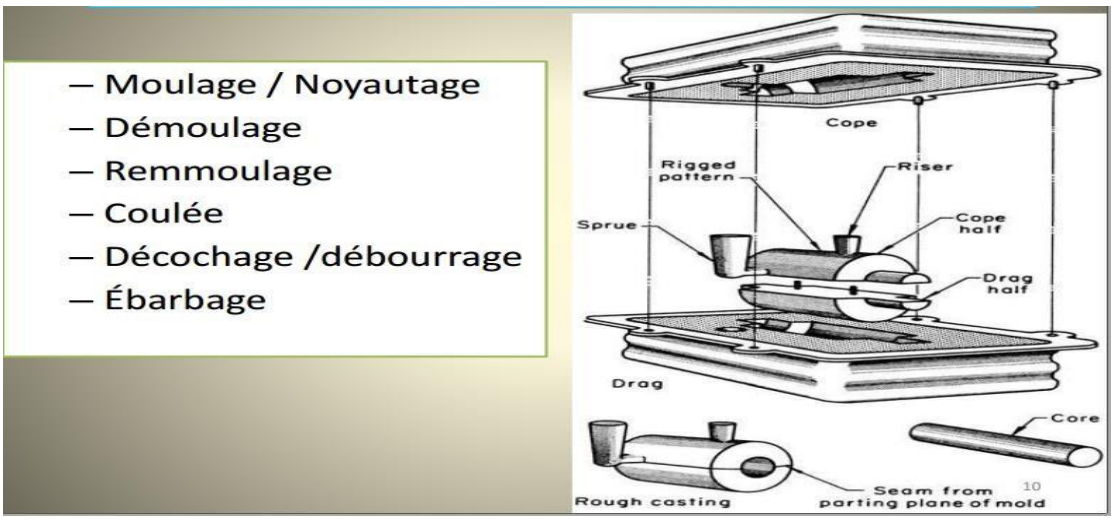


Figure IV. 3: les étapes de moulage en sable. **[64]**

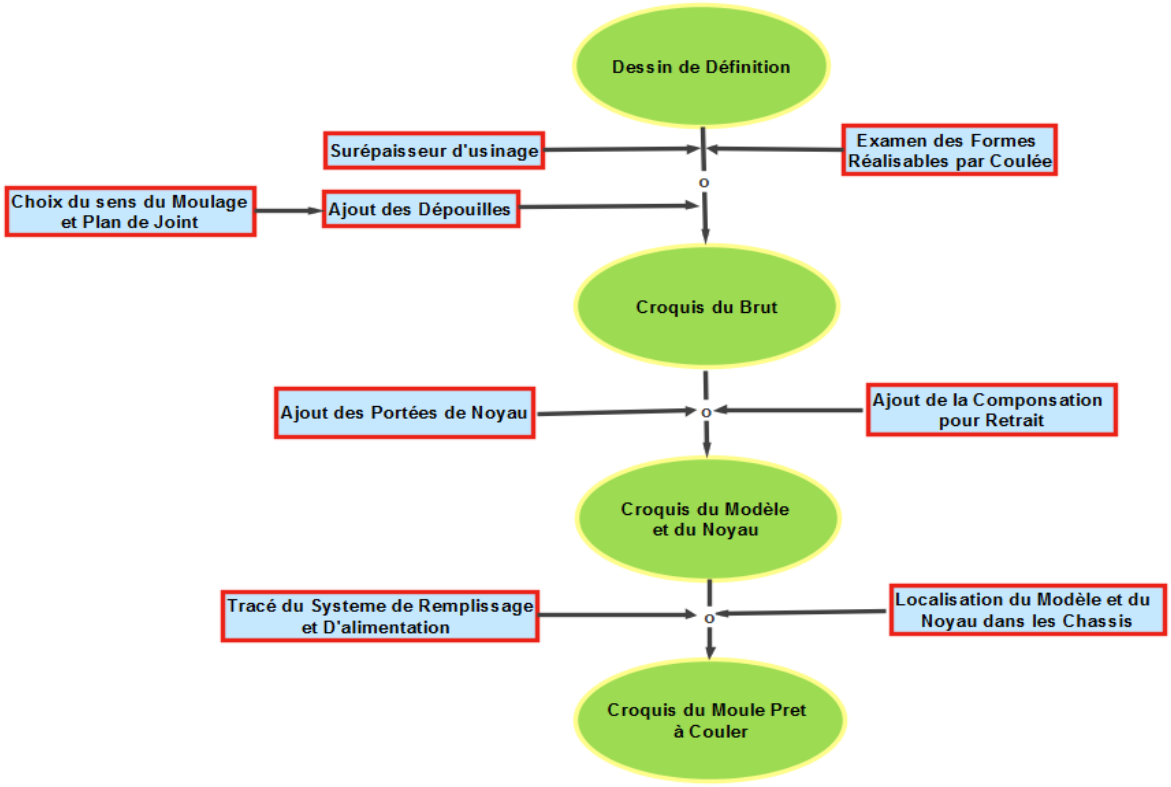


Figure IV. 4: Organigramme de fabrication des moules en sable. [64]

IV.2.2.1.1. Conception et fabrication des moules en sable :

A. Dessin de définition :

Mission du modeleur lors de l'étude du plan :

1. Analyser la géométrie
2. Vérifier l'échelle
3. Identifier les surfaces
4. Contrôler les cotes
5. Intégrer les spécifications

Cette analyse rigoureuse du dessin technique permet au modeleur d'établir la stratégie optimale de fabrication du modèle, en anticipant les contraintes de moulage et d'usinage ultérieurs. [65]

B. Croquis du brut :

Pour passer du dessin de définition au dessin de brut (pièce brute de fonderie), plusieurs étapes sont nécessaires afin d'adapter le plan de la pièce finie aux contraintes du moulage en sable**. [66]**

Les Etapes de conception de dessin brut :

La conception du modèle s'effectue à partir du dessin de définition en suivant une méthodologie précise intégrant les spécificités du moulage. À l'aide de logiciels de CAO comme SolidWorks, Ce modèle doit prendre en compte les éléments supplémentaires nécessaires (ajout les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles et contrôle les formes non réalisables par moulé …). **[67]**

Surépaisseur d'usinage :

La surépaisseur d'usinage est une quantité de matière additionnelle prévue lors de la conception d'une pièce moulée afin de permettre des opérations d'usinage de finition. Essentielle pour compenser les variations dimensionnelles dues au retrait et aux déformations lors du refroidissement, elle garantit la précision des cotes finales, notamment sur les zones fonctionnelles comme les alésages ou l'épaisseur. Pour un pignon en fonte, les surépaisseurs typiques varient généralement entre 2 et 5 mm pour les surfaces planes, 3 à 6 mm pour les alésages, selon la taille de la pièce et les exigences techniques. Une modélisation 3D précise (via SolidWorks) permet d'intégrer ces surépaisseurs dès la phase de conception, en optimisant leur répartition pour minimiser l'enlèvement de matière tout en assurant une finition conforme aux spécifications. **[69]**

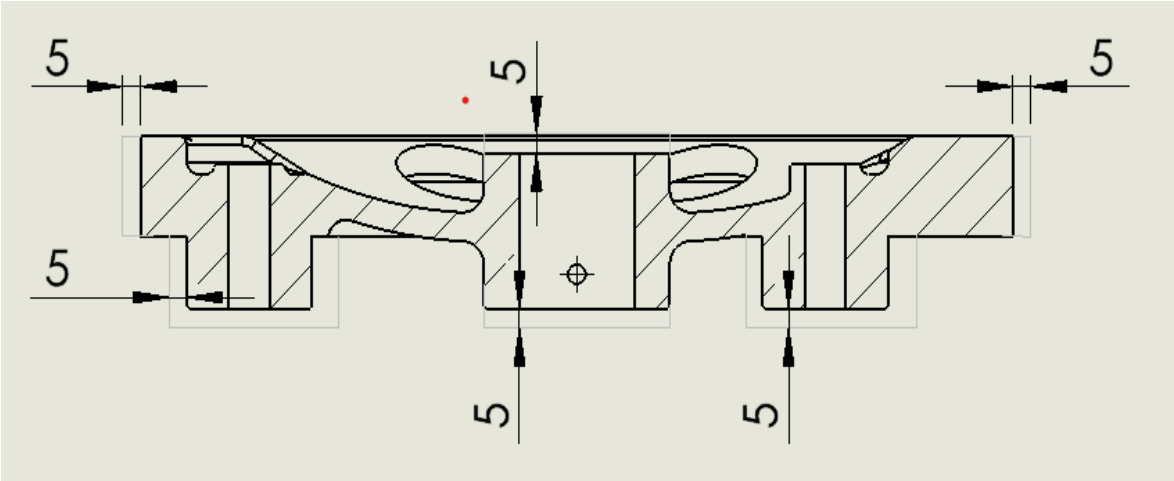


Figure IV. 5: les surépaisseurs de la roue.

Plan de joint :

Le plan de joint (Pd J) en fonderie représente une surface théorique de séparation entre les deux parties du moule (châssis supérieur et inférieur) qui conditionne toute la stratégie de fabrication. Ce choix technique capital doit satisfaire simultanément plusieurs impératifs : faciliter le démoulage en évitant les contre-dépouilles, optimiser la position des masselottes et des évents, tout en minimisant les surépaisseurs d'usinage. Les fonderies expérimentées

déterminent ce plan après une analyse minutieuse de la géométrie de la pièce, en privilégiant généralement les grandes surfaces planes comme référence. **[69]**

En générale, le démoulage s'effectue perpendiculairement au plan de joint (Pd J).

Dépouille :

La dépouille est une légère inclinaison conique, généralement comprise entre 0,5% et 4% (souvent 1° à 3° par côté), appliquée aux surfaces verticales des modèles utilisés pour la fabrication des moules en sable. Cette inclinaison est essentielle pour permettre le démoulage facile du modèle sans endommager le moule en sable, en réduisant les frottements et les risques d'arrachement du sable. **[69]**

Hauteur du modèle ou boite à noyau H (mm)	Dépouille			
	Modèle ou boite à noyau en bois		Modèle ou boite à noyau métallique	
	a (mm)	ϒ (degré)	a (mm)	ϒ (degré)
Jusqu'à 20	< 1	< 3°	0,5 à 1	1°30' à 3°
20 à 50	1,0 à 2	1°30' à 2°30'	0,8 à 1,2	1° à 2°
50 à 100	1,5 à 2,5	1° à 1°30'	1,0 à 1,5	0°45' à 1°
100 à 200	2 à 3	0°45' à 1°	1,5 à 2	0°30' à 0°45'
200 à 300	2,5 à 4	0°30' à 0°45'	2 à 3	0°30' à 0°45'
300 à 500	4 à 5	0°30' à 0°45'	2,5 à 4	0°20' à 0°30'
500 à 800	5 à 6	< 0°30'	3,5 à 6	0°20' à 0°30'
800 à 1800	6	< 0°20'	< 4	< 0°15'
Plus 2000	< 10	< 0°15'	-	-

Tableau IV. 1: dépouille.

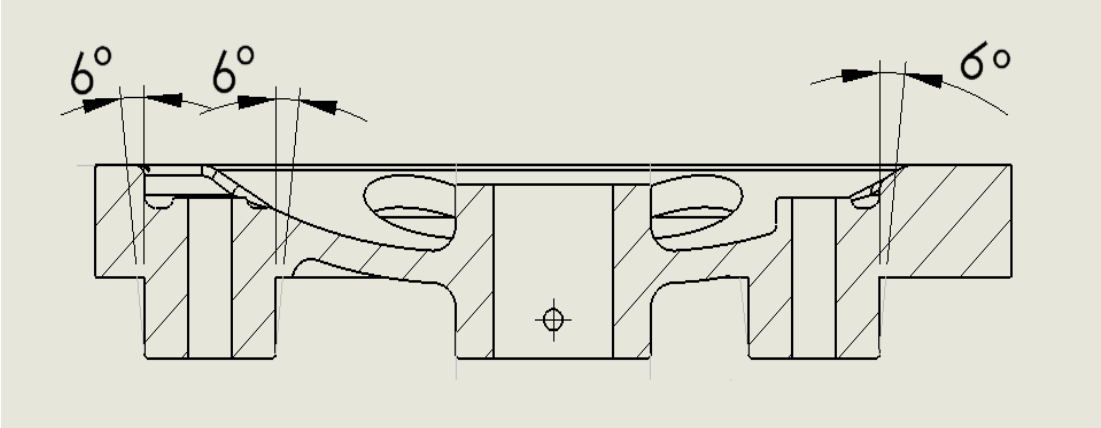


Figure IV. 6: Dépouille de la roue.

C. Croquis du modelé et du noyau :

Tout d'abord, nous devons ajouter des et boîtes à noyaux.

Boîtes à noyaux en fonderie :

Les noyaux sont des éléments essentiels pour réaliser les cavités internes d'une pièce moulée. Ils permettent de créer des évidements complexes impossibles à obtenir par simple moulage naturel. Ces composants sont particulièrement indispensables pour les pièces présentant des géométries internes sophistiquées (alésages, conduits, etc.). **[69]**

Fabrication des noyaux :

1. **Constitution** : Réalisés en sable spécial auto-durcissant
2. **Moulage** : Produits dans des boîtes à noyaux (en bois ou métal) qui donnent leur forme
3. **Traitement thermique** : Cuisson en étuve pour :

- Acquérir la résistance nécessaire
- Résister à l'érosion du métal en fusion
- Supporter les contraintes thermomécaniques lors du refroidissement

Retrait :

Le retrait est un phénomène inévitable lors de la solidification du métal, entraînant une réduction dimensionnelle de la pièce coulée.

On sait que tous les matériaux métalliques s'allongent sous l'effet de l'élévation de la température et rétrécissent sous la diminution de cette dernière, donc le retrait se traduit par une diminution des dimensions au cours de refroidissement. Le retrait varie avec la nature du métal, les valeurs moyennes du retrait des métaux et alliages sont les suivantes :

- 10 millimètres par mètre (soit 1%) pour les fontes.

- 12 millimètres par mètre (soit 1,2%) pour l'aluminium et ses alliages.

-15 millimètres par mètre (soit 1,5%) pour le cuivre et ses alliages.

-20 millimètres par mètre (soit 2%) pour les aciers.

Pour la fonte, le mètre à retrait à une longueur de 1000 + 10 = 1010 mm, c'est-à-dire 1010 divisés en 1000 parties égales, vaut que chaque division est égale à 1,01 mm .

Conception :

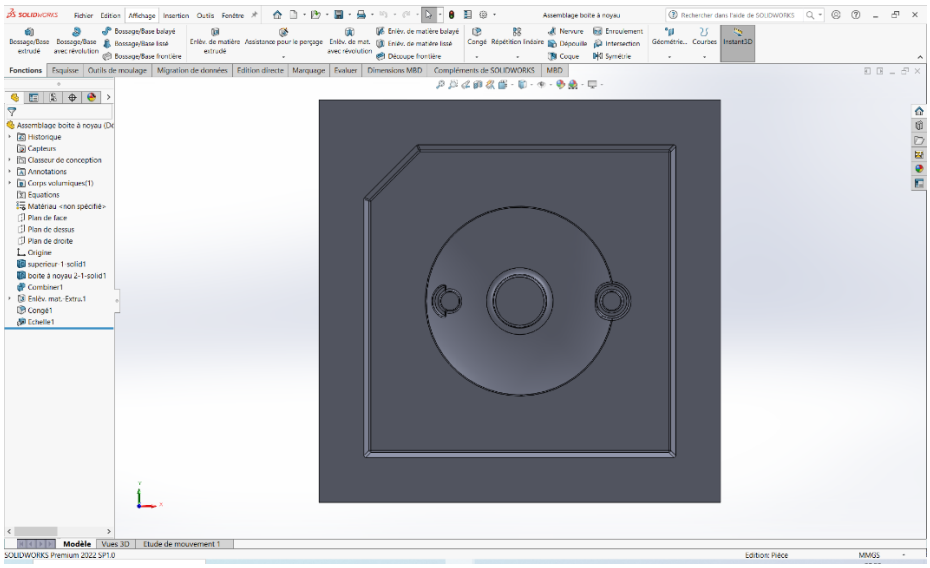


Figure IV. 7: boite à noyau.

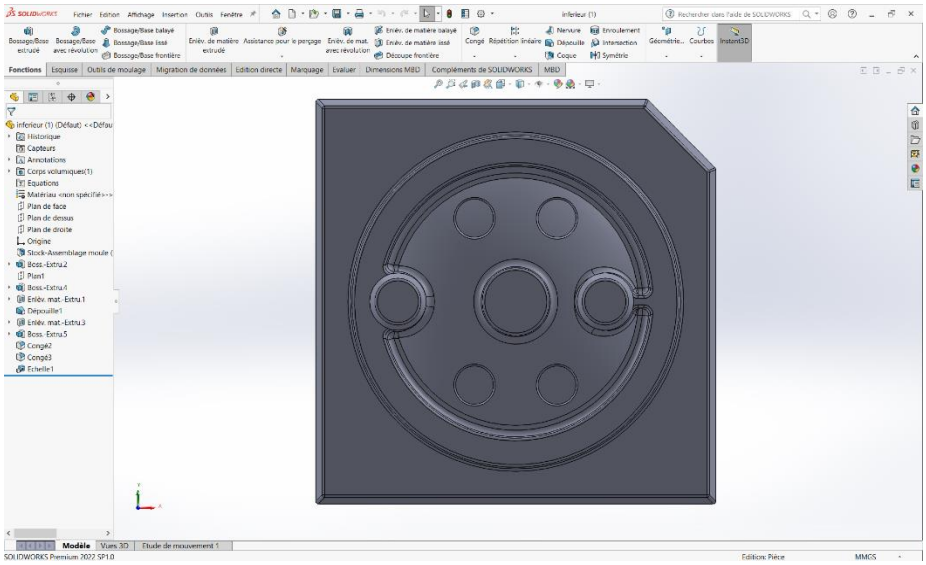


Figure IV. 8: inferieur du modelé.

D. Fabrication des modèles :

Un modèle est une réplique précise de la pièce finale à produire par moulage. Il sert de référence pour créer l'empreinte dans le moule, déterminant ainsi la forme, les dimensions et la finition de la pièce coulée. **[70]**

Propriétés des matériaux de modèle :

- Économique et léger
- Résistant à l'humidité
- Durabilité
- Polyvalence

Méthodes de fabrication des modèles :

1. Modelage manuel :

Le modelage manuel est la méthode traditionnelle de fabrication des modèles pour le moulage en sable. Elle consiste à façonner le modèle à la main, généralement à partir de matériaux comme le bois, la résine ou parfois le métal. **[71]**



Figure IV. 9: modèle en bois. **[72]**

2.Usinage CNC :

L'usinage assisté par ordinateur (CNC) est une technique de fabrication automatisée utilisée pour produire des modèles de fonderie à partir de blocs de matériau solide, tels que le bois, le plastique ou le métal. Les machines CNC utilisent des commandes numériques pour effectuer des opérations de découpe, de perçage, de fraisage et de tournage afin de créer le modèle souhaité**.** **[73]**

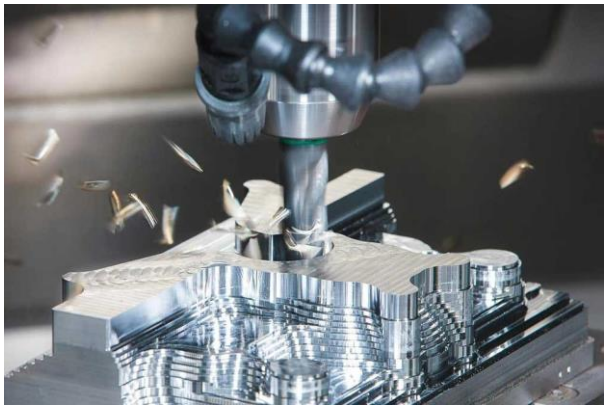


Figure IV. 10: machine cnc. **[75]**

3. Impression 3D (Fabrication additive) :

L'impression 3D, ou fabrication additive, révolutionne la production de modèles pour le moulage grâce à sa technologie de construction couche par couche à partir de fichiers CAO. Cette méthode permet d'utiliser divers matériaux, notamment des résines, plastiques et même des métaux, offrant une liberté de conception inégalée pour réaliser des géométries complexes.

Les atouts majeurs de cette technologie incluent sa rapidité de production pour les prototypes et l'absence de coûts d'outillage, ce qui en fait une solution économique pour les développements initiaux. Cependant, certaines limitations persistent, comme une résistance mécanique parfois insuffisante pour des applications exigeantes et des finitions de surface souvent imparfaites nécessitant des retouches.

Particulièrement adaptée aux besoins modernes de la fonderie, l'impression 3D excelle dans la production de prototypes rapides, de noyaux complexes et de modèles en cire pour le procédé de moulage à la cire perdue. Son adoption croissante dans l'industrie témoigne de son potentiel pour accélérer les cycles de développement tout en réduisant les coûts initiaux. **[76]**

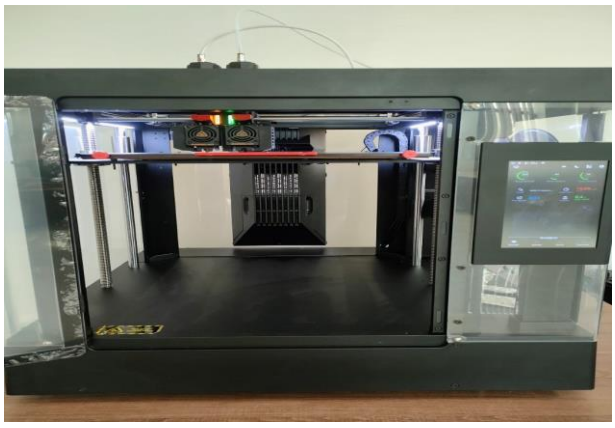


Figure IV. 11: Impression 3D.



Figure IV. 12: modèle en impression 3D PLA.

D. Croquis du moule prêt à couler :

Le châssis est un cadre métallique robuste conçu pour contenir et maintenir le sable de moulage lors de la fabrication des empreintes. Essentiel dans le processus de fonderie, il se compose généralement de deux éléments principaux :

Fabrication de noyaux :

Pour le moulage en sable : le modèle est enfoncé dans du sable pour créer l'empreinte.



Figure IV. 13: Fabrication de noyaux.

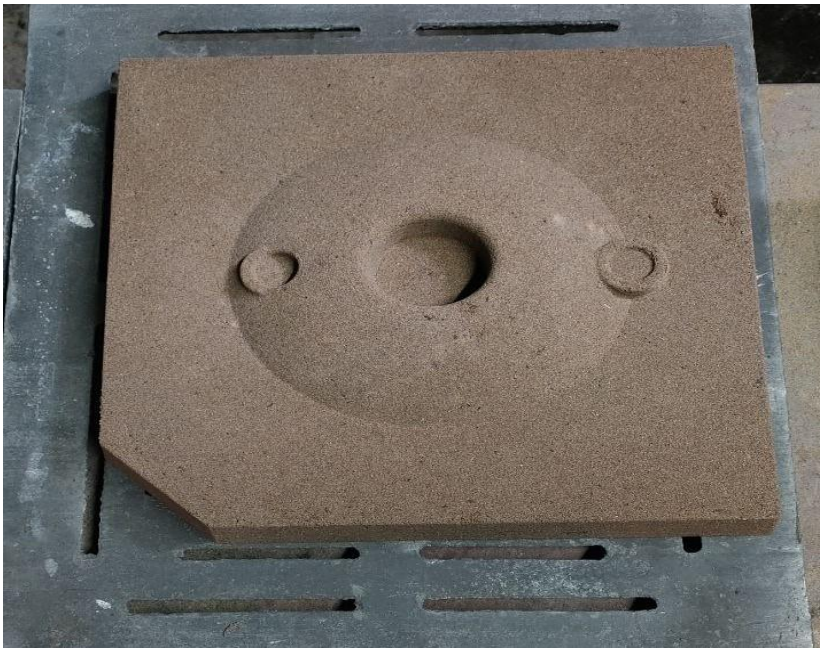


Figure IV. 14: Résultats de noyaux.

Confection de la partie inférieure du moule :



Figure IV. 15: Fabrication du moule inferieur.



Figure IV. 16 : Résultat après démoulage.

Remoulage :



Figure IV. 17 : Remoulage du noyau.

Assemblages des châssis inférieurs et châssis supérieur. Le moule est fermé et crampé afin de résister aux pressions générées par la coulée du métal en fusion dans l'empreinte.



Figure IV. 18 : Fermeture du moule Coulée du métal.

c. Coulée du métal :

Le métal en fusion est préparé dans un four.

Le métal est versé ou injecté dans le moule.



Figure IV. 16: Coulée du métal.

d. Refroidissement et solidification :

Le métal refroidit et se solidifie dans le moule.

Le temps de refroidissement dépend du matériau et de la taille du pignon.

e. Démoulage :

Le moule est ouvert ou brisé pour extraire le pignon.

Les pièces sont nettoyées pour éliminer les résidus de moule.



Figure IV. 17 : Démoulage.

IV.2.3. Par Usinage :

IV.2.3.1. Stratégies d'Industrialisation des Dentures :

L'industrialisation des dentures est étroitement liée à la cadence de production et à la classe de précision requise pour l'application. Les fabricants de boîtes de vitesses adoptent différentes stratégies en fonction des critères suivants :

- Prix de revient des dentures finies,
- Précision macro et micro-géométrique,
- Acoustique des engrenages en fonctionnement.

Deux grandes approches se distinguent :

1. **Première stratégie** : Usinage géométrique à l'état recuit, suivi d'un traitement thermique.

   - **Avantages** : Coûts réduits, adapté aux grandes séries.
   - **Inconvénients** : Nécessite d'anticiper les déformations lors du durcissement.
   - **Précision** : Classe 7 à 8 (tolérance standard).

2. **Deuxième stratégie** : Ébauche à l'état recuit, puis rectification après traitement thermique.

   - **Avantages** : Précision élevée (jusqu'à classe 3), meilleure tenue mécanique.
   - **Inconvénients** : Coûts supérieurs (opérations supplémentaires).

La comparaison entre ces deux stratégies révèle un compromis clair entre précision et coût :

La seconde approche, avec rectification post-traitement thermique, offre une précision dimensionnelle nettement supérieure, permettant d'atteindre des tolérances de classe 3 - le niveau le plus exigeant pour les engrenages critiques. Cette qualité extrême s'accompagne cependant de coûts de production plus élevés.

À l'inverse, la première méthode, basée sur un usinage complet avant traitement thermique, présente l'avantage décisif d'une réduction significative des coûts de fabrication. Cette solution économique se paye par une précision limitée aux classes 7-8, tout à fait acceptable pour de nombreuses applications industrielles courantes.

Cette opposition fondamentale explique les choix divergents des constructeurs automobiles français et allemands, reflétant des priorités industrielles distinctes : optimisation économique d'un côté, excellence technique de l'autre.

IIII.2.3.2. Techniques d'ébauche des dentures

Les méthodes d'ébauche des dentures couvrent un large spectre de solutions, depuis les procédés artisanaux jusqu'aux techniques de production industrielle de masse. Cette étape fondamentale est commune à toutes les gammes de fabrication d'engrenages.

Principales techniques d'ébauche :

1. **Fraisage de forme (fraises module)**

   - Utilisation de fraises module
   - Méthode polyvalente pour petits lots



Figure IV. 18: fraises module. **[78]**

2. **Taillage par outil-crémaillère**

   - Procédé par génération de profil

- Adapté aux productions moyennes

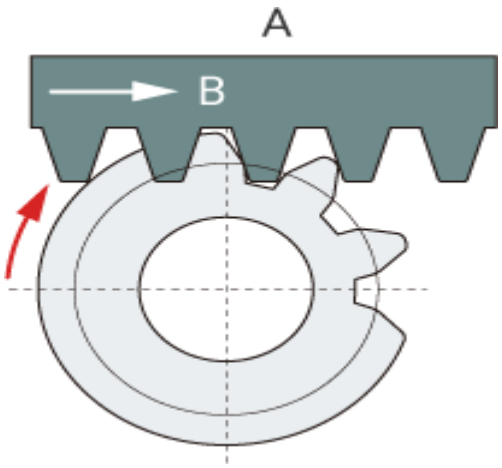


Figure IV. 19: Taillage par outil-crémaillère. **[78]**

3. **Taillage par outil-pignon :**

- Technique précise pour engrenages spécifiques

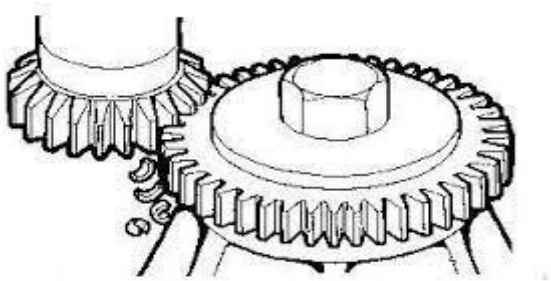


Figure IV. 20: Taillage par outil-pignon. **[78]**

4. **Taillage par fraise-mère**

Le taillage par outil fraise-mère est de loin le plus utilisé des procédés de génération de dentures à développante de cercle. Méthode de haute productivité et solution idéale pour grandes séries.

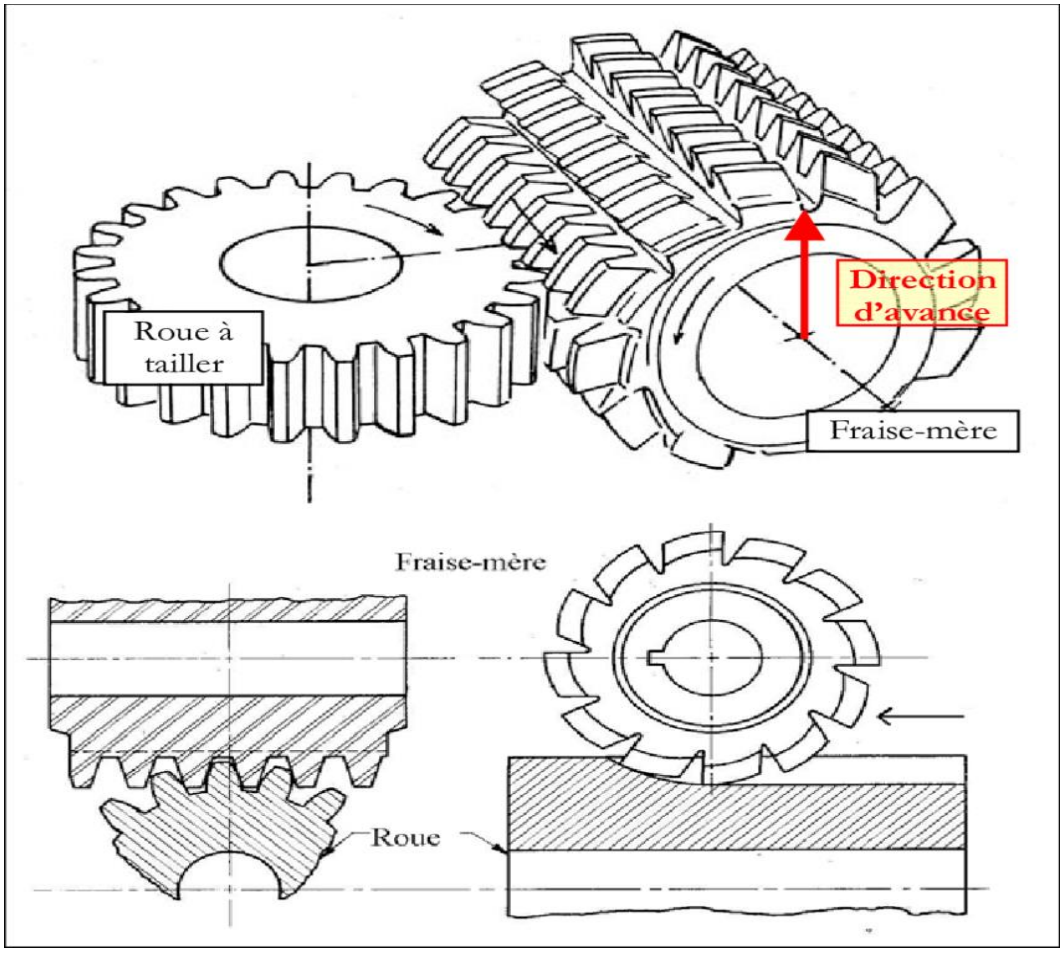


Figure IV. 21: fraise-mère. **[77]**

Le rapport des vitesses angulaires est :

Avec : $\frac{W}{W_0} = \frac{Z}{Z_0}$

W: vitesse de rotation de la pièce à tailler (tr/min).

W_0: vitesse de rotation de la fraise-mère (tr/min).

Z_0: C'est le nombre de filet de la fraise-mère.

Z: C'est le nombre de la pièce à tailler.

Le choix de la technique d'ébauche dépend fortement du volume de production, de la précision finale requise et des investissements machines disponibles. Les méthodes par génération (fraise-mère, outil-crémaillère) offrent le meilleur compromis qualité/productivité pour les productions industrielles.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Le présent travail, mené en partenariat avec la société Poval-Berrouaghia, s'inscrit dans une démarche de développement de solutions techniques durables pour le pompage d'eau dans les zones sahariennes, en exploitant l'énergie éolienne comme alternative écologique aux sources d'énergie conventionnelles. L'étude s'est focalisée sur la conception et la fabrication, par ingénierie inverse, d'un pignon et d'une roue dentée en fonte grise, constituant les éléments clés du réducteur mécanique intégré à la pompe éolienne.

À travers une méthodologie rigoureuse, les différentes étapes du projet ont été menées avec soin : à commencer par le relevé dimensionnel des pièces existantes, suivi par l'élaboration de modèles numériques 2D et 3D sous SolidWorks, puis la fabrication additive de l'outillage de fonderie (modèle et boîte à noyau) via impression 3D, avant de procéder au moulage en sable, à la coulée de la fonte grise et enfin à l'usinage de précision et au taillage des dents. Le montage final dans le réducteur a permis de valider la conformité fonctionnelle des composants réalisés.

Les choix technologiques ont été guidés par les contraintes spécifiques du milieu désertique: températures extrêmes, maintenance limitée et autonomie énergétique. Les pignons conçus en fonte grise offrent une excellente résistance mécanique et une bonne tenue à l'usure, tout en évitant les traitements thermiques coûteux, grâce à une vitesse de rotation modérée du rotor éolien.

Ce projet démontre ainsi la faisabilité technique et économique de la reproduction ou de l'amélioration de pièces mécaniques complexes par ingénierie inverse, en s'appuyant sur des outils numériques modernes et des procédés de fabrication adaptés. Il ouvre également la voie à une éventuelle industrialisation locale de composants pour systèmes de pompage éoliens, renforçant l'autonomie des régions sahariennes en matière d'accès à l'eau.

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] https://www.engie-green.fr/guide-energie-eolienne/

[2] https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_002_09.pdf

[3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe_%C3%A0_vent

[4] **Hillebrand, L. (2024, Novembre 7). Electric Conversion of a Water-Pumping Windmill in Namibia. Inscrutables.** https://www.instructables.com/Electric-Conversion-of-a-Water-Pumping- Windmill-in/

[5]https://www.innergex.com/fr/energies/energieeolienne#:~:text=L'%C3%A9nergie%20%C3%A9olienne%20contribue%20au%20d%C3%A9veloppement%20durable%20en,changement%20climatique%20et%20%C3%A0%20promouvoir%20l'ind%C3%A9pendance%20%C3%A9nerg%C3%A9tique.

[6] https://www.transmission-aquitaine.com/avantages-et-inconvenients-des-differents-types-de-reducteurs5

[7]Guide des Sciences et Technologies Industrielles *G. Henriot, Éd. Dunod, 2018* (Chapitre 12 : Transmissions mécaniques)

[8] https://www.directindustry.fr/prod/licat-srl/product-68451-557400.html

[9]https://www.neugart.com/fr-fr/wiki/reducteurs-a-engrenages-coniques

[10]Mokhtari L .,Mahmoudi M., Chiker Y.,Bachene M (2022) (*Étude et Conception d'un Rèducteur à train èpicycloidal.)*

[11]**Guenouna D., Bouteldja EL (2019).(*Etude de réducteur de vitesse pour convoyeur à sel*). Mémoire De Master Abdel Hamid iben badis-mostaganem**

[12] Université YAHIA FARES de Médéa Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master Elaboration d'un code de calcul des Éléments de taillage

[13] https://youtube.com/shorts/C99zLc--arU?si=seY4biTCFHkRCq3J

[14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Engrenage

[15] https://lololemecano.info/MaintVI/transmission/boite_de_vitesse/boite_de_vitesse.htm

[16] https://lololemecano.info/MaintVI/transmission/boite_de_vitesse/boite_de_vitesse.htm

[17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Engrenage

[18]https://eonsi.eu/fr/quels-types-dengrenages-existe-t-il-et-quelles-sont-leurs-applications/

[19] https://fr.wikipedia.org/wiki/Engrenage

[20] Jean-Louis Fanchon - Guide des sciences et technologies industrielles French.

[21]http://joho.p.free.fr/EC/Construction/Engrenage%20droit/engrenage%20droit.htm

[22]Jean-Louis Fanchon - Guide des sciences et technologies industrielles French.

[23]**Polycop cour dr.boukhlef module construction mécanique 2 université Médéa**

[24]**htpdspace.univouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/9855/1/MOULATI_BENAOUN.pdf**

[25] https://www.sarl-dassonville.com/interference-correction-de-denture

[26] https://www.sarl-dassonville.com/interference-correction-de-denture/

[27] **Denture - Interférence et deport.doc STS Conception et Industrialisation en Microtechniques.**

[28] **Polycop cour dr. boukhlef module construction mécanique 2 université Médéa**

[29] https://www.sarl-dassonville.com/interference-correction-de-denture/

[30] https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8421954/deport

[31]https://sti.eduscol.education.fr/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/9159/9159-engrenages-conditions-dengrenement-et-procedes-dobtention-ensps.pdf

[32] https://youtu.be/Ckzjgm-ihrI?si=Tlbns0yS0OWr4cED

[33] https://www.apmep.fr/IMG/pdf/AAA06071.pdf

[34] **livre Gears – Cylindrical involute gears and gear pairs**

[35] https://youtu.be/Ckzjgm-ihrI?si=Tlbns0yS0OWr4cED

[36] **"Gear Geometry and Applied Theory"** (Faydor L. Litvin, 2nd ed., Cambridge University Press)n*Chapitre 6* : "Modified Gears" → Détaille les corrections de profil (déport) et leurs effets sur l'entraxe. *Page 210* : Formules exactes pour aw*aw* avec/sans jeu.

[37]https://moodle.insarouen.fr/pluginfile.php/138341/mod_resource/content/35/Cours%20engrenages17.pdf

[38] https://fr.scribd.com/document/791177476/Engrenages-paralleles-Dentures-corrigees-BM-5621

[39] https://usergeweb.github.io/synthese_engrenages.pdf

[40]https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/9855/1/MOULATI_BENAOUN.pdf

[41]https://dspace.univouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/9855/1/MOULATI_BENAOUN.pdf

[42] http://fr.tkeme.com/info/what-are-the-lubrication-methods-for-gear-redu-101999563.html

[43]http://joho.p.free.fr/EC/COURS%20DOC/ENGRENAGES/TRAINS%20D%20ENGRENAGES/TRAINS%20D%20ENGRENAGES%20LUBRIFICATION.htm

[44] https://formlabs.com/fr/blog/reverse-engineering/

[45] https://fr.wikipedia.org/wiki/SolidWorks

[46]https://www.youtube.com/watch?v=qjZfUO2akEo&pp=ygUnc29saWQgd29ya3MgbGVzIGVxdWF0aW9uIGxlcyBlbmdyZW5hZ2Vz

[47] https://richconn.com/fr/ferrous-vs-non-ferrous-metals/

[48]https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/10734/1/BOUZEKOURA.Karim.pdf

[49] https://patents.google.com/patent/WO2016092195A1/fr

[50] https://www.broncesval.com/fr/bronce/b8-bronce-aleacion-de-cobre-estanio/

[51] https://patents.google.com/patent/WO2016092195A1/fr

[52] https://artizono.com/fr/types-de-pignons/

[53] **Polycop cour dr. hebirech module matériaux université Médéa**

[54]https://www.norelem.com/be/fr/Produits/Vue-d-ensemble-des-produits/Syst%C3%A8mes-et-composants-pour-la-construction-de-machines-et-d-installations-techniques/22000-%C3%89l%C3%A9ments-de-transmission/Engrenages-droit-Cr%C3%A9maill%C3%A8res-Engrenages-coniques/22430-Engrenage-conique-en-acier-rapport-1-4-Denture-droite-frais%C3%A9e-angle-de-pression-20%C2%B0.html

[55] https://materiautheque.fr/materiaux/inconvenients-de-lacier/

[56] https://www2.cs.arizona.edu/patterns/weaving/articles/pa1_peig.pdf

[57] https://materiautheque.fr/materiaux/vulnerabilites-de-lacier/

[58] https://materiautheque.fr/materiaux/inconvenients-de-lacier/

[59] https://www2.cs.arizona.edu/patterns/weaving/articles/pa1_peig.pdf

[60] https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2024/06/MEMOIRE-SLAMA-HOUDA.pdf#:~:text=Parmi%20les%20familles%20de%20pi%C3%A8ces%20mises%20en,tr%C3%A8s%20bonne%20application%20pour%20l'usinage%20des%20pi%C3%A8ces.

[61] https://fr.wikipedia.org/wiki/Frittage

[62]https://www.youtube.com/watch?v=s1TGXa3pB5M&pp=ygUab3BlcmF0aW9uIGZyaXR0YWdlIHBpZ25vbnM%3D

[63] https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/moulage.pdf

[64] **Polycop cour dr. hebirech module matériaux université Médéa**
https://fr.scribd.com/document/498028932/Rapport-PFE-etude-de-conception-dun-moule-en-sable-de-culbuteur-dun-basculeur

[66] https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/chapitre3_2_3.html

[67] https://www.technologuepro.com/cours-moulage/12-moulage-en-sable.pdf

[68] https://interflon.com/lu/news/lubrification-engrenages-ouverts
[69] **Polycop cour dr.hebirech module matériaux université Médéa**

[70]https://www.3ds.com/fr/make/guide/process/3d-printing

[71] https://fr.wikipedia.org/wiki/Moulage_en_sable Atlas-Artisan. (2024, 13 février). Fabrication du bois traditionnel. Atlas-Artisan.

[72] https://atlas-artisan.com/blogs/news/fabrication-du-bois-traditionnel

[73] Bouhenniche, S., & Mecili Dounia Amira, M. (2024). Optimisation de la technologie de moulage en fonderie par l'intégration de l'impression 3D [Mémoire de Master, Université deMédéa]. (Année universitaire 2023/2024).

[74]https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Frichconn.com%2Ffr%2Fswiss-machining-vs-traditional-cnc-machining%2F&psig=AOvVaw1IQZsm3aJTiDL_m78ckQ2V&ust=1751196390848000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCOjVnYuBlI4DFQAAAAAdAAAAABBP

[75] https://www.3ds.com/fr/make/guide/process/3d-printing

[76] https://shop.d-a.ch/fr/aciers-pour-l-industrie/aciers-de-cementation-etires/c/673496

[77] https://www.researchgate.net/figure/Principe-du-taillage-a-la-fraise-mere_fig4_46175388

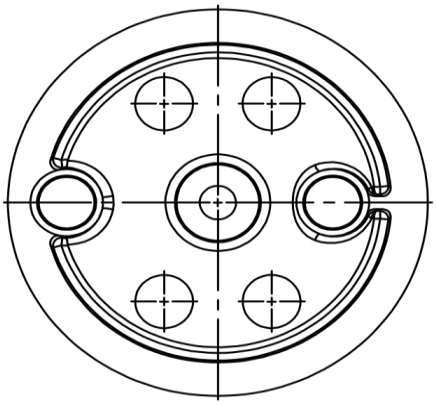
[78] https://shop.odm.eu/fr-fr/fraise-module-1-n-6-al-27/6963

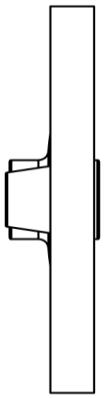
[79] https://fr.scribd.com/doc/248585396/Le-moulage-en-sable-pdf

[80] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.futura-sciences.com%2Ftech%2Fquestions-reponses%2Fimpression-3d-nouvelles-perspectives-impression-3d-12094%2F&psig=AOvVaw2loPo8ff5WML2-ba_dW3XS&ust=1751196738901000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCOjPqq6Cll4DFQAAAAAdAAAAABAE

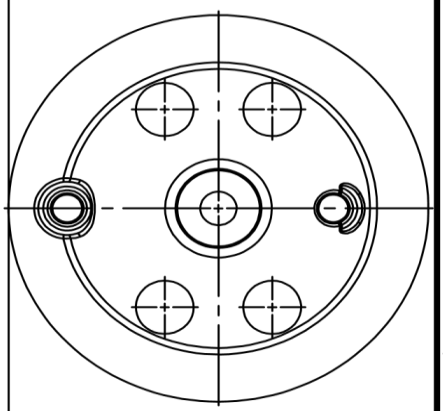
[81] Cour monsieur bachen mourad

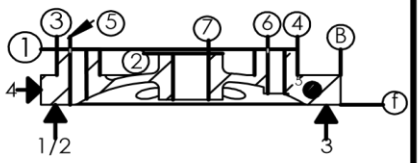
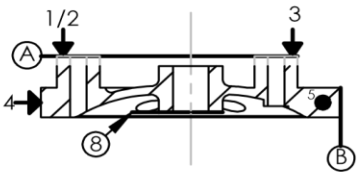
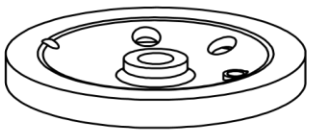
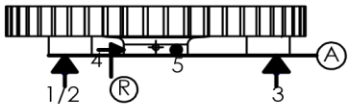
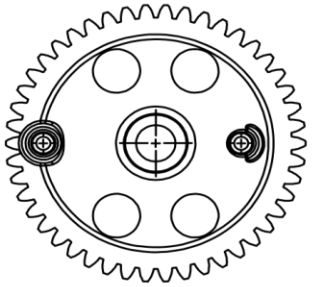
ANNEXES

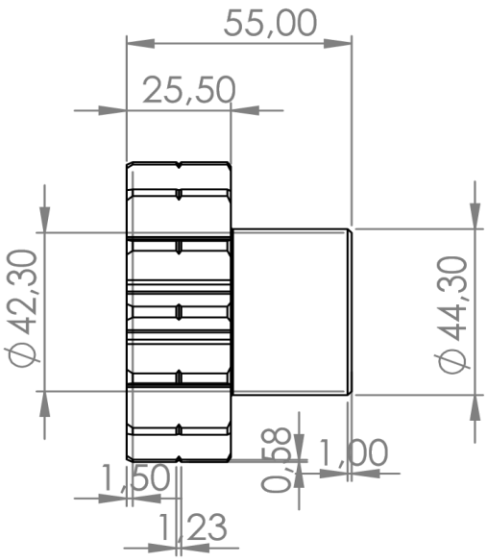


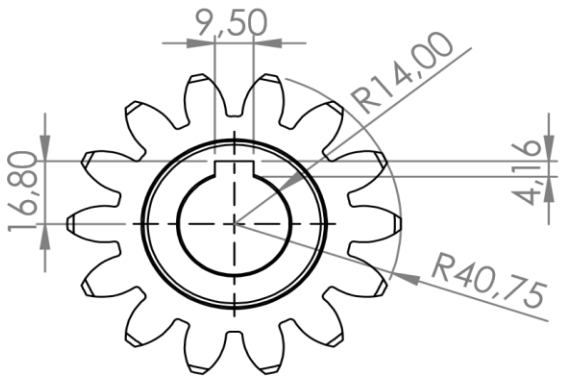


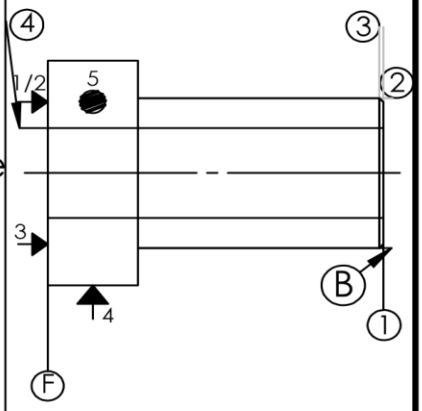


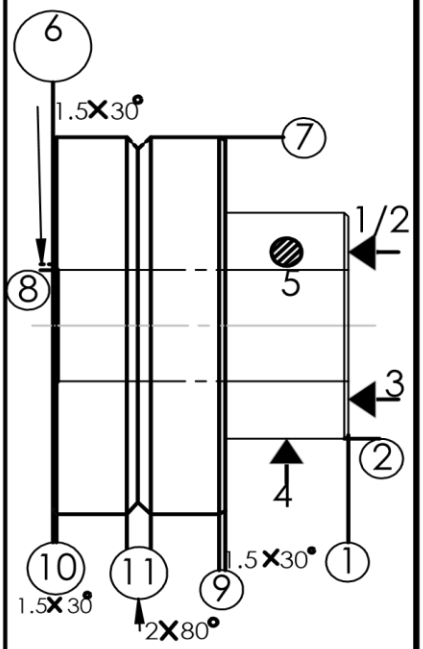
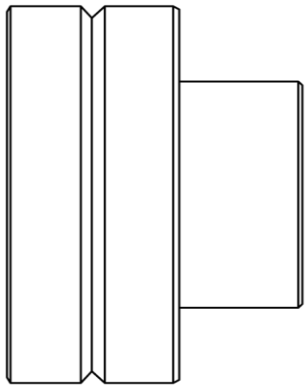
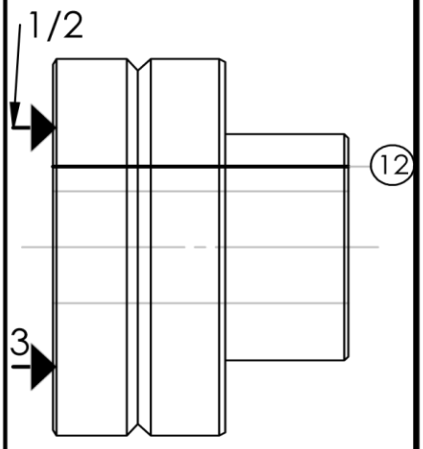
mati ére	FGL250	brut coullée		production unitaire
phase	désignation de phase et sous phase et des opération	la machi ne	les outiles de coupe et de controle	dessin de phase
100	controle de brut		pied a coulisse pied de profondeur	 

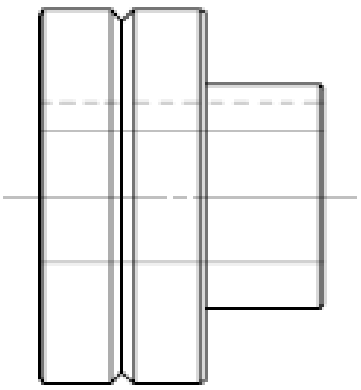
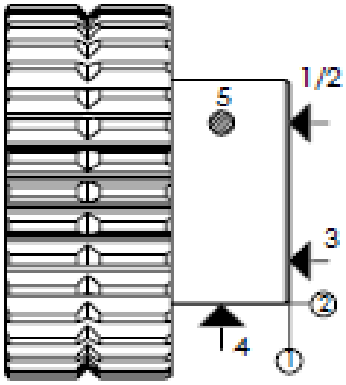
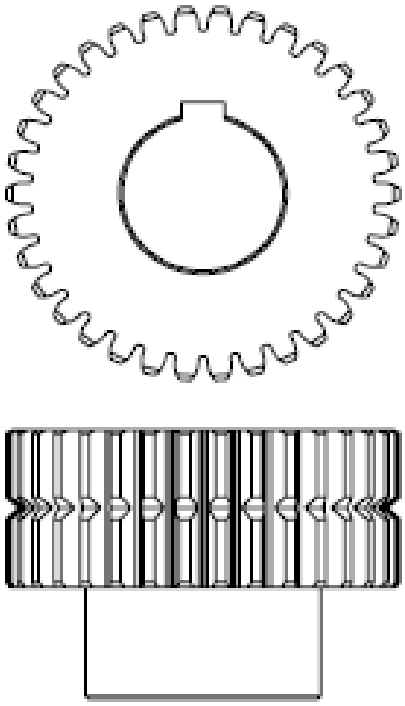
200 210 211 212 213 214 215 216 217	fraisage 1 piece en montage referentiel de reprise defini par : - Apui plan(1,2,3)sur(F) - Apui linaire(4,5)sur(B) Dressage de la phase (1) Dressage de la phase (2) Chariotage (3) Ø35 Chariotage (4) Ø35 percage (5) Ø11.5 percage (6) Ø11.5 alésage (7) Ø35	fraise use	Pied a coulisse Pied de profondeur Outil de dressage et chariotage foret de percage(alésage)	
220 221	fraisage 1 piece en montage referentiel de reprise defini par : - Apui plan(1,2,3)sur(A) - Apui linaire(4,5)sur(B) Dressage de la phase (8)		Outil de dressage	
300	controle intermidial		Pied a coulisse Pied de profondeur	
400 410 411	Taillage 1 Piece ene montage referentielle defini par : Apui plan (1,2,3)sur (A) Apui linaire (4,5)sur(R) Taillage des dents	Taille use	Fraise mere module 5	
500	controle final de la piéce		Pied a coulisse Pied de profondeur Palmer	

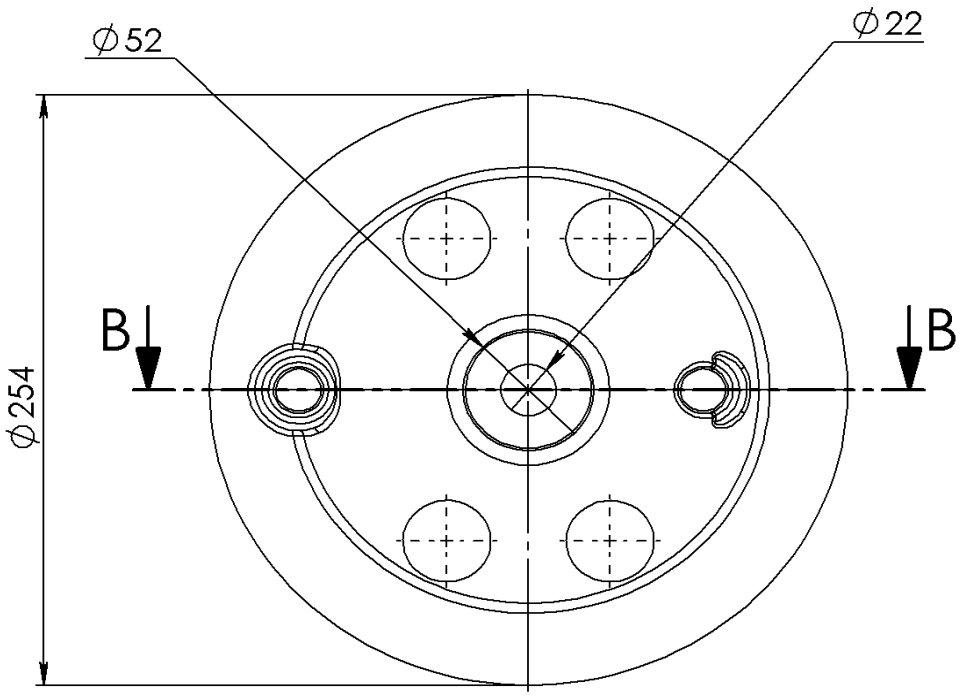


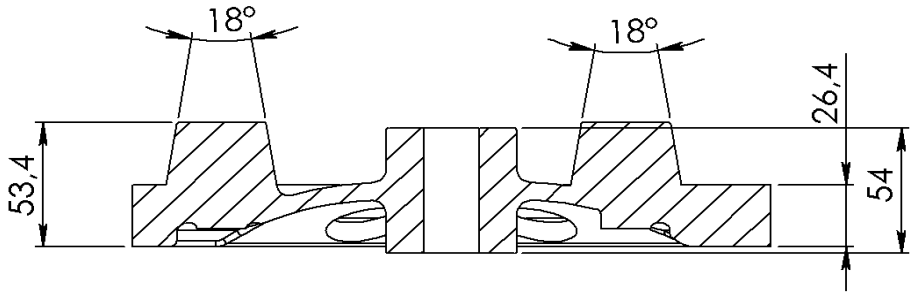


matiére	Acier 20Mncr5	Brute		production unitaire
phase	désignation de phase et sous phase et des opération	la machine	les outiles de coupe et de controle	dessin de phase
100	controle de brut		pied a coulisse	
200	tournage	tour//	pied a coliisse	
210	1 piece en montage referentiel de reprise defini par : - Apui plan(1,2,3)sur(F) - Apui linaire(4,5)sur(B)			
211	Dressage de face (1)		outil de dressage et chariotage	
212	Chariotage (2) ebauche 44.5 1/2 finition 44.35 finition 44.3			
213	Chanfrainnage (3) 1*45degré		outil a chanfreiner	
214	Alaisage(4) diametre27 ebauche 26.8 1/2 finition 26.95 finition 27		foret de percage et alesage	

220	tournage 1 piece en montage referentiel de reprise defini par : - Apui plan(1,2,3)sur(1) - Apui linaire(4,5)sur(2)	Tour//	Pied a coulisse Pied de profondeur	
221	Dressage de face (6)25.5		Outil de dressage et chariotage	
222	Chariotage (7) ⌀ 81.5 h9 Ebauche 83.5 1/2 Finition 82 Finition 81.5 ⌀			
223	Chanfrinnage (8)1.5X30°		Outil a chanfreiner	
224	Chanfrinnage (9)1.5X30°			
225	Chanfrinnage (10)1.5X30°			
226	chariotage gorge (11) 2 X80°			
300	controle intermidial		Pied a coulisse Pied de profondeur	
400	Freseusse 1 piece en montage referentiel de reprise defini par : - Apui plan(1,2,3)sur(6)	Morti sseus	Outil de clavete 9,50	
410	Clavetage (12)			

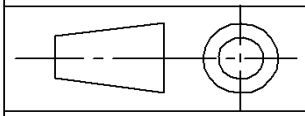
500	controle intermidial		Pied a coulisse Pied de profondeur	
600 610	Taillage 1 Piece ene montage referentielle defini par : Apui plan (1,2,3)sur (1) Apui linaire (4,5)sur(2) Taillage des dents	Taille use	Fraise mere module 5	
700	controle final de la piéce		Pied a coulisse Pied de profondeur Palmer	

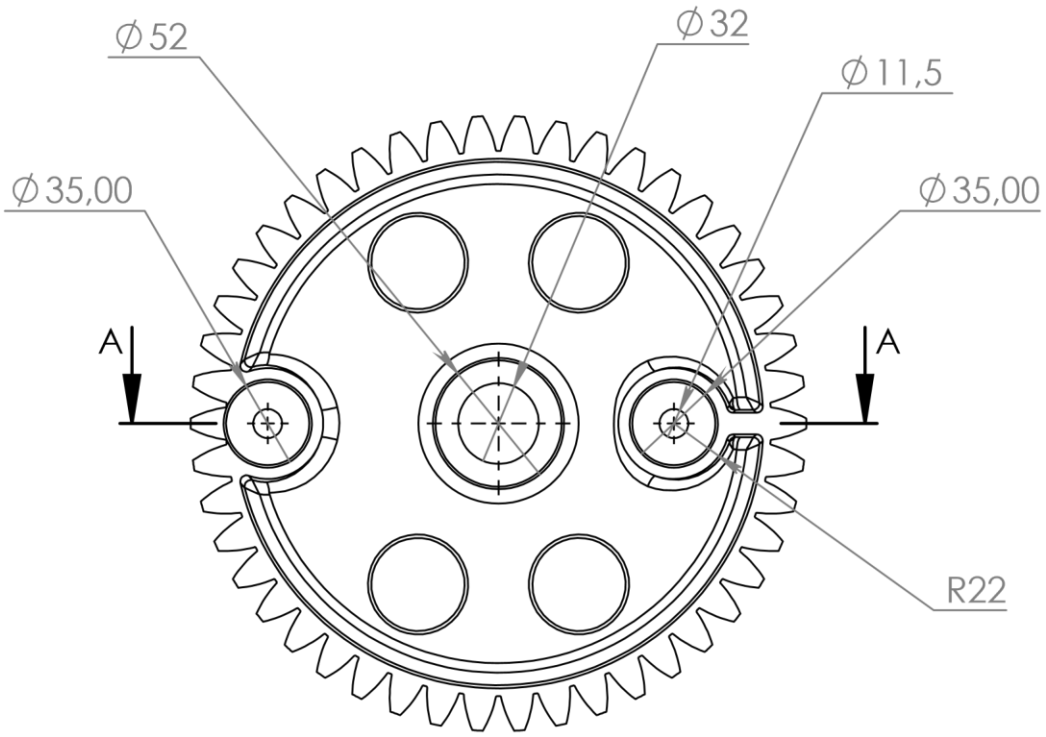


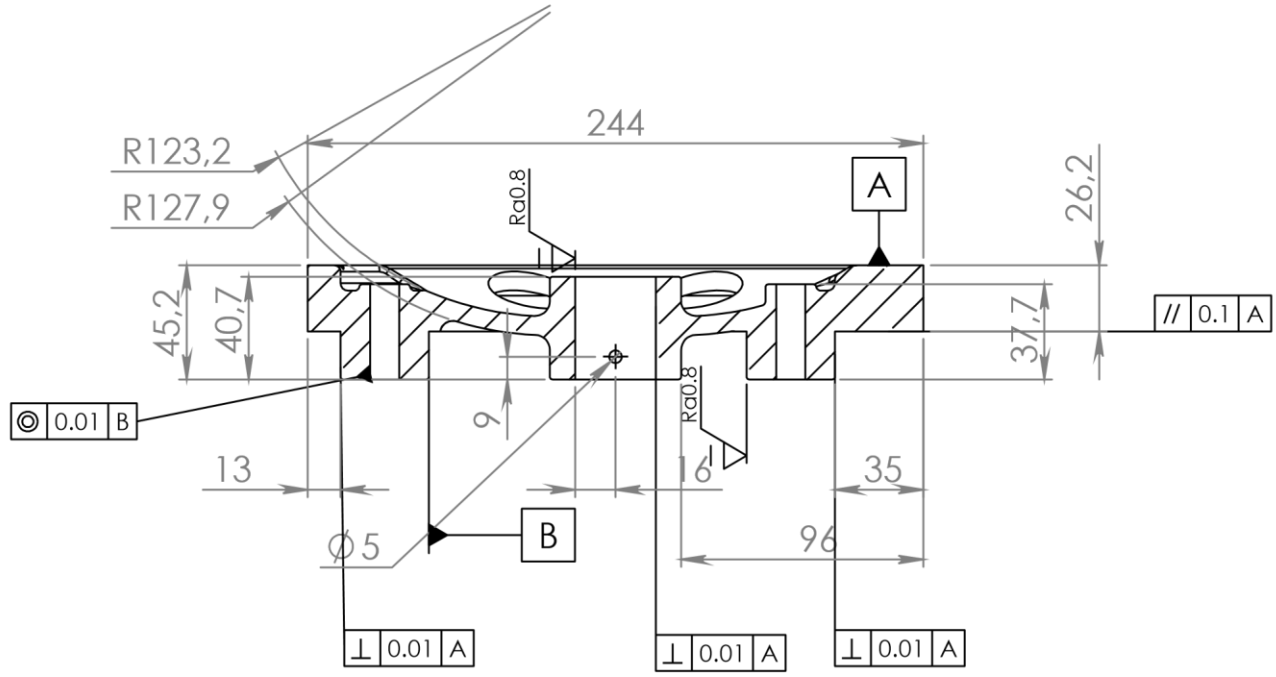


COUPE B-B

ECHELLE 1 : 3

ECHELLE: 1:3	**Benrekia.Y - Tchikou. S**	**Université de Médéa**
	**Brute coullee de la roue**	Matière: Fonte Grise
29/06/2025		A4

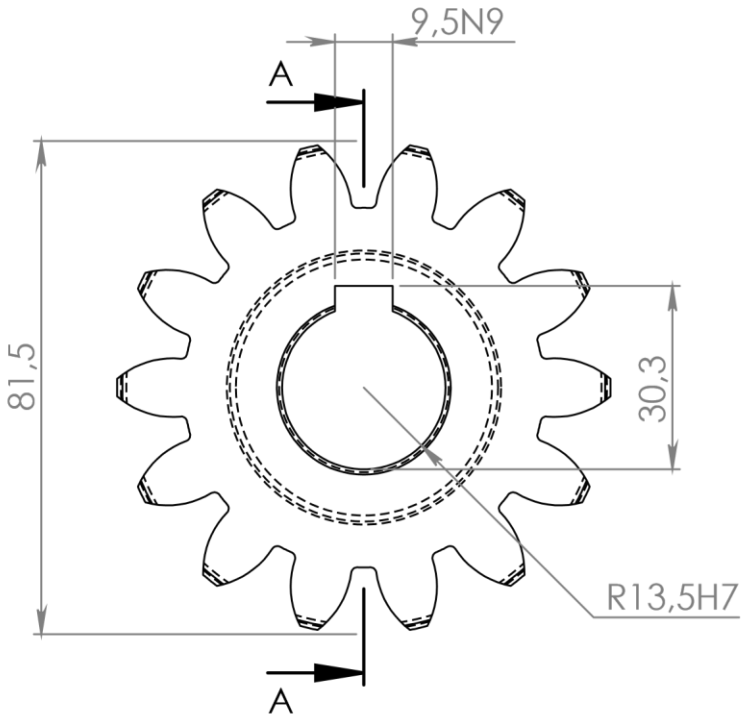


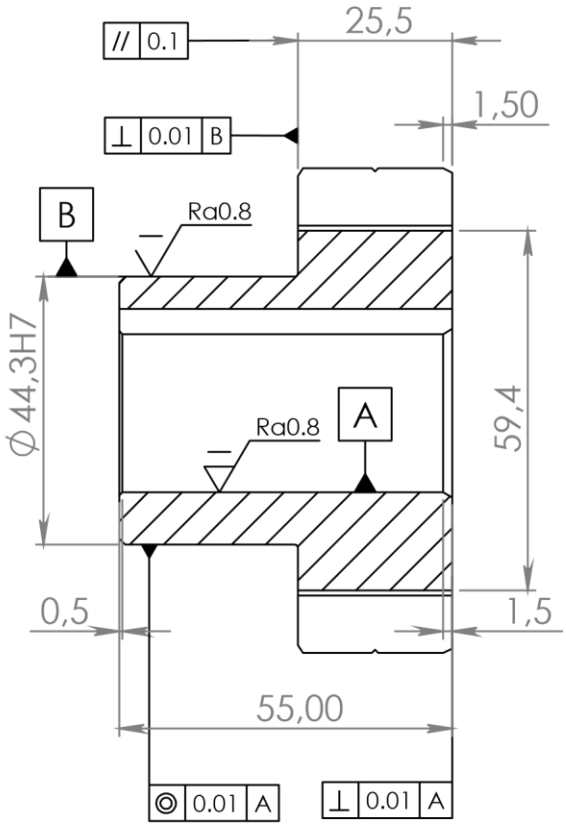


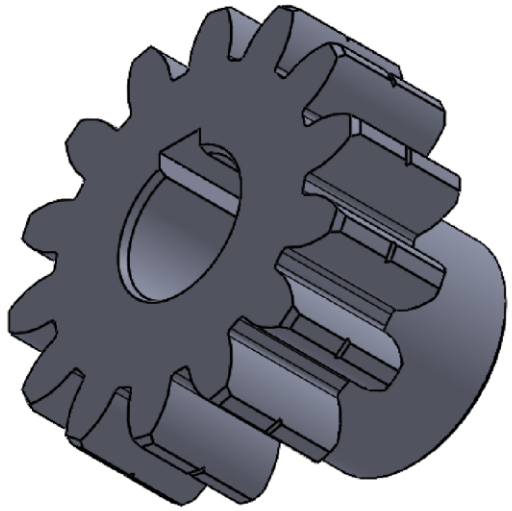
COUPE A-A
ECHELLE 1 : 3

ECHELLE: 1:3	**Benrekia**.Y - **Tchikou**. S	**Universitè de Mèdèa**
	Roue Dentee	Matièrie: Fonte Grise
229/06/2025		A4

COUPE A-A
ECHELLE 1 : 1.25







ECHELLE: 1:1.25	**Benrekia**.Y - **Tchikou**. S	**Université de Mèdèa**
	Pignon	Matièrie: Fonte Gries
29/06/2025		A4