

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب – البليدة 1

UNIVERSITE SAAD DAHLEB – BLIDA 1

Faculté De Technologie

Département De Génie Mécanique



جامعة البليدة 1

**Projet De Fin D'étude**

**Pour L'obtention De Diplôme De**

**Master En Fabrication Mécanique Et Production**

**Thème**

**EFFETS DES TRAITEMENTS THERMIQUE  
UN EXEMPLE DE DENTURE**

**Encadrer par :**

Mr temmar

**Co-encadré par:**

Mme MELZI

**Réalisé Par :**

HADJ ISMAIL Sofiane

DJABER Mohcine

Année universitaire 2022/2023

# REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force d'accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons notre respect au président du jury ainsi qu'aux membres du jury d'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Je tiens à remercier mon promoteur Monsieur Temmar pour sa disponibilité, ses aides précieuses et ses conseils judicieux ainsi que pour sa patience dont il a fait preuve à mon égard et qui m'a permis de mener à terme ce travail.

Je tiens également à remercier mon co-promotrice Madame Melzi pour son soutien, sa patience et surtout son accompagnement pendant tout le travail.

Enfin, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail, de près ou de loin.

## *Dédicaces*

*Je tiens vivement, à dédier ce travail en signe de respect et de reconnaissance :*

*Aux personnes très chères qui ont partagé mes joies et mes Peines, qui ont été toujours à mes côtés, qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui : ma mère, mon père et ma femme.*

*À mes frères et mes sœurs*

*Et à tous mes proches sans exception*

*Et à tous mes amis*

*À Tous ceux qui ont contribué à m'aider à la réalisation de ce mémoire.*

**HADJE ISMAIL Sofiane**

## *Dédicaces*

*Je tiens vivement, à dédier ce travail en signe de respect et de reconnaissance :*

*Aux personnes très chères qui ont partagé mes joies et mes Peines, qui ont été toujours à mes côtés, qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui : ma mère, mon père.*

*Ames frères et mes sœurs*

*Et à tous mes proches sans exception*

*Et à tous mes amis*

*A Tous ceux qui ont contribué à m'aider à la réalisation de ce mémoire.*

***DIABER*** *Mohcine*

## ملخص

تستخدم التروس في مختلف القطاعات الصناعية ، بما في ذلك قطاع المركبات. يتمثل اتجاه الصناعة الحالي في البحث عن طرق لتقليل الضوضاء والاهتزاز أثناء التشغيل. تتضمن عملية تصنيع التروس خطوة معالجة حرارية لها تأثير على تحسين مقاومة الانحناء عند جذر السن والضغط التلامسي. يعتبر تصلب العلبة هو العلاج المفضل حالياً ، لأنه يحسن بشكل كبير من قوة التروس وعملية يتم التحكم فيها جيداً. الحث الحراري هو معالجة حرارية بديلة للكربنة والتي تهتم الصناعة ونقل الحركات وتعطي نتائج واعدة. تقدم هذه الأطروحة دراسة تجريبية لمقاومة الانحناء عند جذر أسنان التروس المحفزة الأسطوانية المعالجة حرارياً بالحث. أثناء المعالجة الحرارية عن طريق الحث ، يمكن أن تتنوع العديد من المعلمات (الوقت ، التردد ، الطاقة ، هندسة المحرض ، إلخ). قوة الانحناء عند جذر السن هي بشكل أساسي وظيفة لمظهر الصلابة ومظهر الإجهاد المتبقي. تم قياس ملامح الصلابة فقط. تستكشف الأطروحة الروابط بين مقاومة الانحناء عند جذر السن ومعايير المعالجات الحرارية التعريفية.

## RÉSUMÉ

Les engrenages sont utilisés dans divers secteurs industriels, notamment le secteur des véhicules. La tendance actuelle de l'industrie est de rechercher des moyens de diminuer les bruits et vibration au moment de leur fonctionnement. Le procédé de fabrication des engrenages comprend une étape de traitement thermique qui a pour effet d'améliorer la résistance à la flexion en pied de dent et à la pression de contact. La cémentation est actuellement le traitement préféré, car il améliore grandement la résistance des engrenages et est un procédé bien maîtrisé. L'induction thermique est un traitement thermique alternatif à la cémentation qui intéresse l'industrie et la transmission des mouvements et qu'il donne des résultats prometteurs. Le présent mémoire présente une étude expérimentale de la résistance à la flexion en pied de dent de roues droites cylindriques traitées thermiquement par induction. Lors d'un traitement thermique par induction, plusieurs paramètres peuvent être variés (temps, fréquence, puissance, géométrie de l'inducteur, etc.). La résistance à la flexion en pied de dent est principalement fonction du profil de dureté et du profil des contraintes résiduelles. Seuls les profils de dureté ont été mesurés. Le mémoire explore les liens entre la résistance à la flexion en pied de dent et les paramètres des traitements thermiques par induction.

# ABSTRACT

Gears are used in various industrial sectors, including the vehicle sector. The current industry trend is to seek ways to reduce noise and vibration during operation. The gear manufacturing process includes a heat treatment step which has the effect of improving the resistance to bending at the root of the tooth and to contact pressure. Case hardening is currently the preferred treatment, as it greatly improves the strength of gears and is a well-controlled process. Thermal induction is an alternative heat treatment to carburizing which is of interest to industry and the transmission of movements and which gives promising results. This thesis presents an experimental study of the resistance to bending at the root of the tooth of cylindrical spur gears heat-treated by induction. During a heat treatment by induction, several parameters can be varied (time, frequency, power, geometry of the inductor, etc.). Tooth bending strength is primarily is mainly affected by the hardness profile and the residual stress profile. Only hardness profiles were measured. This thesis explores the relationship between tooth bending strength and induction heat treatment parameters.

# TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	
ABSTRACT .....	
TABLE DES MATIÈRES .....	
LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I : Notions générales sur les engrenages .....</b>	<b>4</b>
1.1. Généralités.....	4
1.2. Principe de l'engrènement.....	4
1.2.1. Critères de choix.....	6
1.2.2. Types d'accouplements.....	6
1.3. Les engrenages.....	8
1.3.1. Généralités.....	8
1.3.2. Avantages et inconvénients des engrenages.....	10
<b>Chapitre II : Théorie sur les engrenages :</b>	
2.1. Théorie.....	12
2.1.1. Principes d'engrènement.....	12
2.1.2. Eléments caractéristiques d'un engrenage.....	14
1.4.4.La développante de cercle.....	16
<b>Chapitre III : Traitements thermiques et conséquences :</b>	<b>20</b>
3.1.Généralités.....	20
3.2. Essais mécaniques et Traitements thermiques.....	20
3.2.1.Essais des matériaux.....	20
3.2.2. Traitements de surfaces.....	22
3.3. Effets des traitements thermiques.....	24
3.3.1.Aspects métallurgiques.....	24
3.3.2. Aspects de fabrication.....	26
3.4. Les différents types de détérioration des dentures d'engrenages.....	30
3.4.1. Défauts répartis sur toutes les dents.....	30
3.4.2. Les défauts localisés sur certaines dents.....	30

3.5. Les types d'usures.....	30
3.6. Les mécanismes d'usure.....	31
<b>Chapitre IV : Application et effets des traitements thermiques.....</b>	<b>33</b>
4.1.Généralités.....	33
4.2. Cémentation.....	33
4.2.1. Définition.....	33
4.2.2. Principe.....	35
4.2.3. Les Procédés de cémentation.....	36
4.2.4. Les aciers de cémentation.....	36
4.3. Modelisation numerique de notre engrenage en appliquant Ansys.....	37
4.3.1. Introduction.....	37
4.3.2. Etats de surface.....	38
4.3.3. Présentation du pignon.....	38
4.4. Applications.....	42
Caractéristiques De L'engrenage.....	44
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAPHI.....</b>	<b>56</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> : Exemple d'engrenages.....	5
<b>Figure 1.2</b> : Système Pignon/Crémaillère.....	5
<b>Figure 1.3</b> : Accouplement.....	6
<b>Figure 1.4</b> : Accouplement rigide.....	7
<b>Figure 1.5</b> : Accouplement à chaîne double.....	7
<b>Figure 1.6</b> : Engrenages cylindriques à denture droite.....	8
<b>Figure 1.7</b> : Engrenages cylindriques à denture hélicoïdale.....	9
<b>Figure 1.8</b> : Engrenages coniques.....	9
<b>Figure 1.9</b> : Engrenages à roue et vis sans fin.....	10
<b>Figure 2.1</b> : Transmission par friction.....	13
<b>Figure 2.2</b> : Transmission par obstacle.....	13
<b>Figure 2.3</b> : Principe d'une dent.....	14
<b>Figure 2.4</b> : Éléments caractéristiques d'un engrenage.....	14
<b>Figure 2.5</b> : Angle de pression.....	15
<b>Figure 2.6</b> : Développante de cercle.....	16
<b>Figure 2.7</b> : Positions relatives de développante.....	16
<b>Figure 2.8</b> : Lignes d'action de développante.....	17
<b>Figure 3.1</b> : Diagramme de fer-carbone.....	25
<b>Figure 3.2</b> : Différents types de traitements thermiques.....	25
<b>Figure 3.3</b> : Profil de contraintes résiduelles en creux de dent.....	26
<b>Figure 3.4</b> : Défauts métallurgiques.....	28
<b>Figure 3.5</b> : Décrochement.....	28
<b>Figure 3.6</b> : Cassures par écaillage.....	29
<b>Figure 3.7</b> : Défaut de grippage.....	30
<b>Figure 4.1</b> : Évolution de la dureté en fonction de la teneur en carbone pour divers taux de martensite.....	34
<b>Figure 4.2</b> : Principe de la cémentation.....	35
<b>Figure 4.3</b> : Variation de la concentration de carbone avec la distance.....	36
<b>Figure 4.4</b> : Étapes de démontage.....	38
<b>Figure 4.5</b> : Pignon séparé.....	39

<b>Figure 4.6</b> : Pignon en perspective.....	39
<b>Figure 4.7</b> :Dessin de définition du pignon.....	40
<b>Figure 4.8</b> : Pignon d'origine.....	40
<b>Figure 4.9</b> :Pignon utilisé.....	41
<b>Figure 4.10</b> :Pignon traité.....	41
<b>Figure 4.11</b> :Phases de cémentation.....	42
<b>Figure 4.12</b> :Schéma de l'engrenage.....	42
<b>Figure 4.13</b> :Schéma Vue en 3D de l'assemblage.....	43
<b>Figure 4.14</b> :Assemblage des roues.....	44
<b>Figure 4.15</b> :Conditions de contact.....	44
<b>Figure 4.16</b> :Maillage.....	45
<b>Figure 4.17</b> : Caractéristiques du maillage.....	45
<b>Figure 4.18</b> :Application du couple.....	46
<b>Figure 4.19</b> :Contrainte équivalente.....	46
<b>Figure 4.20</b> :Déformations sans cémentation.....	47
<b>Figure 4.21</b> :Déformation équivalente avec cémentation.....	47
<b>Figure 4.22</b> :Déformation équivalente avec cémentation.....	48
<b>Figure 4.23</b> : Effet de la cémentation sur la déformation.....	48
<b>Figure 4.24</b> :Machine rectifieuse.....	50



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 :Avantages et inconvénients des engrenages.....	10
Tableau 4.1 : Caractéristiques du pignon.....	39
Tableau 4.2 : Composition chimique en %.....	41
Tableau 4.3 : Caractéristiques mécaniques.....	41

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

Lorsqu'il s'agit de transmettre des couples importants et de réaliser des réductions de vitesse ou de changer les directions de rotation, les transmissions de puissance par engrenages constituent le meilleur compromis d'un point de vue rendement et précision.

Les domaines d'application sont aussi variés que la mécanique générale, le secteur de la production d'énergie, les transports, l'électronique, ...etc.

Dans ce contexte, les engrenages sont l'un des composants les plus critiques dans la majorité des machines tournantes industrielles comme le montrent les statistiques sur les causes de défaillance et la localisation des avaries dans les transmissions mécaniques. Leur bon fonctionnement impacte donc fortement la durée de vie et la qualité d'un grand nombre de systèmes mécaniques, justifiant ainsi une demande croissante en termes d'analyse et contrôle des sollicitations et de la résistance de ces organes.

Lors de ces sollicitations, les engrenages peuvent être soumis à de nombreuses avaries apparaissant dont les origines peuvent être multiples et, parfois, difficilement identifiables : défauts de fabrication, défaut d'assemblage ou de montage et défauts de matériaux.

Les défauts de fabrication peuvent apparaître lors de l'application des traitements thermiques. Leur application intervient pour modifier la structure du matériau et elle lui permet d'avoir une dureté plus forte dans la surface externe des engrenages. Après cette utilisation, un procédé de rectification est exigé dans le but d'obtenir un produit conforme au dessin de définition.

Dans ce travail, nous nous préoccupons de l'application de la cémentation caractérisée par une transformation en acier dur l'extérieur des pièces qui sont en acier doux en augmentant le % de carbone sur les couches superficielles. Aussi, nous nous préoccupons des effets de cette cémentation sur notre produit. Pour cela, nous avons partagé notre travail en quatre chapitre :

Le premier chapitre présente une théorie générale sur les engrenages, après un bref historique sur la naissance de ce moyen de transmission.

Le second chapitre est consacré aux études approfondie sur un seul type, qui sont les engrenages cylindriques à denture droite : (définition, caractéristique des dentures,

## Introduction générale

dimensions géométrique de la roue, les avantages et les inconvénients, le fonctionnement, les efforts sur les dents, ...etc.).

Ces efforts qui sont exercés sur la denture provoquent des avaries qui seront étudiées dans le troisième chapitre.

Le troisième chapitre comporte les différents types de détérioration des dentures d'engrenages puis nous avons pris en considération l'application des traitements thermiques.

Le dernier chapitre, à savoir le quatrième, prend en considération l'application de la cémentation et ses effets sur un exemple d'engrenage.

Ce travail s'est terminé par une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

## **Notions générales sur les engrenages**

## Chapitre I : Notions générales sur les engrenages

### 1.1. Généralités :

Les engrenages sont des éléments de machines qui permettent de transférer un mouvement de rotation d'un arbre à un autre.

A leurs débuts, la fabrication d'un engrenage tenait plus de l'art et de l'habileté de l'artisan que de la science. Avec le temps, les applications que l'on trouve aux engrenages se multiplient, et ils deviennent vite un élément de machine très varié et indispensable pour la transmission de mouvement et de puissance.

Les premières études de ce domaine furent entamées dès le 16<sup>ème</sup> siècle. Il s'agit de mathématiciens qui commencèrent à se pencher sur le problème de la théorie des engrenages. Il fallait au fur et à mesure améliorer leur fonctionnement et leur qualité de fabrication, et surtout transmettre sans obstacle un mouvement de rotation parfait. Aussi, Les dernières années ont été émaillées d'un très grand nombre de publications relatives au comportement des engrenages cylindriques droits et hélicoïdaux. Au départ, il s'agissait d'isoler les paramètres influant sur des manifestations brutales comme les ruptures de dents, les détériorations de surface ou encore les interférences de fonctionnement. Plus tard, une analyse plus fine des phénomènes physiques est apparue, largement motivée par la volonté de réduire des nuisances acoustiques comme par exemple le bruit d'engrènement.

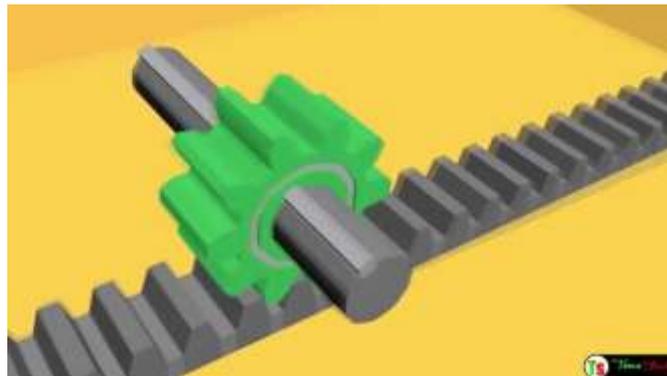
### 1.2. Principe de l'engrènement :

Un engrenage est constitué de roues dentées qui transmettent le mouvement d'un arbre moteur vers un arbre récepteur et déterminent ainsi les vitesses, les couples et le sens de rotation des éléments de machines. [1]. [2]. [3].

D'après la norme NF ISO701 et la norme NF EN ISO2203, un engrenage est un mécanisme élémentaire composé de deux roues dentées mobiles autour d'axe de positionnement relatif invariables. L'une des roues entraîne l'autre par l'action des dents successives en contact. La roue qui a le plus petit nombre de dents est appelée pignon. [4].



**Figure 1.1 :** Exemple d'engrenages



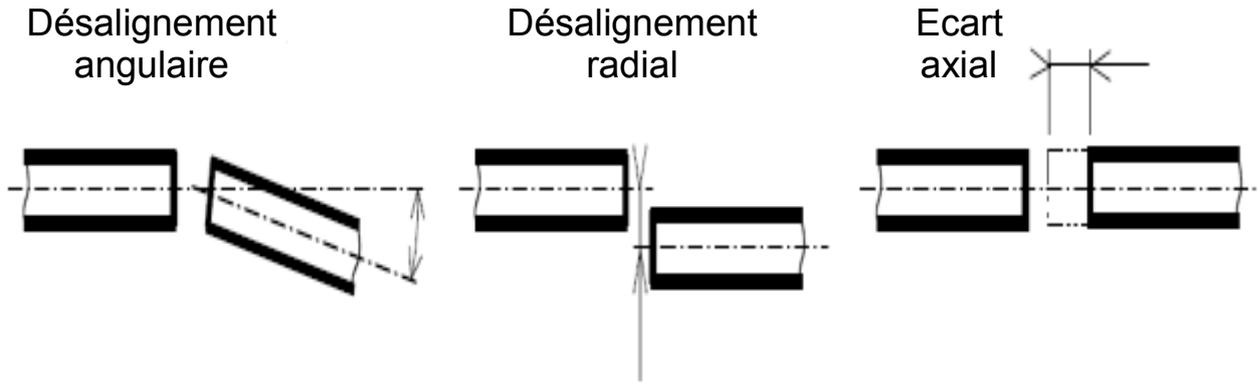
**Figure 1.2 :** Système Pignon/Crémaillère

Le but de leur utilisation est de transmettre un mouvement et une puissance entre 2 arbres.

Ces arbres peuvent être :

- Parallèles ou non,
- Concourants ou non,
- Perpendiculaires ou non.

Le but de leur utilisation est aussi d'accoupler deux arbres en vue de transmettre une puissance mécanique, d'un moteur vers un récepteur. Le plus souvent, les arbres n'étant jamais parfaitement alignés, l'accouplement devra compenser certains défauts, voire autoriser la mobilité d'un arbre par rapport à l'autre :



**Figure 1.3 :** Accouplement

### 1.2.1. Critères de choix :

Le choix d'une technologie d'accouplement se fait selon :

- Le type de motorisation : Un moteur thermique, surtout monocylindre, est source de vibrations de torsion. Un accouplement à élastomère amortira les fluctuations de couple.
- Le type de charge : Un compresseur à piston nécessite aussi d'amortir les vibrations. A l'inverse, une machine rotative d'imprimerie exige un parfait synchronisme entre les rouleaux, donc une grande rigidité en torsion des accouplements.
- Le couple à transmettre
- La vitesse atteinte
- Les défauts prévisibles d'alignement des arbres : Il ne suffit pas que l'accouplement autorise certains défauts. Il faut voir aussi quels efforts il génère lorsqu'il est déformé ; Efforts qui se répercuteront sur les guidages des arbres et affecteront leur durée de vie.
- Les mobilités éventuellement nécessaires entre les arbres : Par exemple pour compenser les mouvements des roues d'une traction avant.
- Des contraintes d'environnement : Telles que températures extrêmes, atmosphère corrosive...
- D'autres contraintes : Encombrement, poids, inertie, bruit, sens de montage, démontage rapide...

### 1.2.2. Types d'accouplements :

On peut citer les types d'accouplements suivants :

- **Accouplement rigide** : Il ne permet aucun défaut d'alignement des arbres.

La conséquence est que cela va inévitablement augmenter les charges sur les paliers des guidages.



**Figure 1.4 :** Accouplement rigide

- **Accouplement à chaîne double :** Il est composé de 2 pignons reliés par une chaîne à double rangée fermée sur elle-même.



**Figure 1.5 :** Accouplement à chaîne double

- **Accouplement à dentures bombées :** Le jeu interne, même s'il est plus faible que pour le précédent, peut être un problème, surtout en cas d'inversion du sens de rotation. C'est la forme bombée des dentures qui permet d'accoupler des arbres légèrement désalignés.
- **Accouplement à plots métalliques :** Le serrage des vis écrase des empilages de rondelles élastiques, qui se coincent dans leurs logements sur le moyeu de sortie. Il s'adapte surtout à un écart axial entre les deux arbres. Il est d'une grande rigidité.
- **Joint de Cardan :** Inventé au XVI<sup>e</sup> siècle par le mathématicien italien Cardano. Le cardan simple n'est homocinétique que si les arbres sont alignés (ce qui n'a pas un grand intérêt...). Plus l'angle de brisure entre les deux arbres est grand, plus la vitesse de sortie sera saccadée. Il n'est guère raisonnable d'aller au-delà d'un angle de 45°.
- Etc.....

### 1.3. Les engrenages :

#### 1.3.1. Généralités :

Les engrenages sont des éléments de machines qui permettent de transférer un mouvement de rotation d'un arbre à un autre. A leurs débuts, la fabrication d'un engrenage tenait plus de l'art et de l'habileté de l'artisan que de la science. Avec le temps, les applications que l'on trouve aux engrenages se multiplient, et ils deviennent vite un élément de machine très varié et indispensable pour la transmission de mouvement et de puissance. Dès le 16<sup>ème</sup> siècle, des mathématiciens commencent à se pencher sur le problème de la théorie des engrenages.

Au cours des derniers siècles, l'évolution des procédés de fabrication et de taillage, parallèlement au développement des relations mathématiques qui régissent le comportement des engrenages, a permis d'en améliorer grandement la qualité de fabrication comme de fonctionnement. De nouveaux types de dentures et d'engrenages font aussi leur apparition au cours de cette période.

Aujourd'hui encore ; les engrenages sont couramment utilisés et demeurent un moyen très efficace pour transmettre un mouvement de rotation et une puissance d'un arbre menant à un arbre mené.

Diverses catégories sont distinguées selon la géométrie des dents et suivant la génératrice.

Parmi les principaux types d'engrenages, on trouve : [5]

- Les engrenages cylindriques à denture droite :



**Figure 1.6 :** Engrenages cylindriques à denture droite

Avantages : Simple et économiques, et pas d'efforts axiaux,

Inconvénients : Vitesses de rotation limitées, Bruyant et Entraxes prenant des valeurs finies.

- Les engrenages cylindriques à denture hélicoïdale :



**Figure 1.7 :** Engrenages cylindriques à denture hélicoïdale

Avantages : Transmission plus souple et moins bruyante et transmission d'efforts et de vitesses plus importants, possibilités d'entraxes infinis,

Inconvénients : Effort axial supplémentaire, solution moins économique et rendement moins bon.

- Les engrenages coniques :



**Figure 1.8 :** Engrenages coniques

Avantages : Arbres non parallèles voir non concourants, possibilité de choisir le sens de rotation de la roue menée,

Inconvénients : Solution moins économique et nécessité d'un réglage des roues au montage.

- Les engrenages à roue et vis sans fin :



**Figure 1.9 :** Engrenages à roue et vis sans fin

Avantages : Arbres quelconques (Très souvent orthogonaux) et rapport de réduction élevés,  
 Inconvénients : Rendement faible et parfois non réversible (peut être un avantage).

**1.3.2. Avantages et inconvénients des engrenages :**

Le tableau suivant 1.1 résume les avantages et inconvénients des engrenages :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transmission de puissances élevées sous fréquences de rotation élevées,</li> <li>• Transmission à rapport rigoureusement constante (transmission synchrone),</li> <li>• Transmission parfaitement homocinétique.</li> <li>• Possibilités de transmissions entre plusieurs arbres,</li> <li>• Bon rendement général, suivant classe de qualité,</li> <li>• Durée de vie importante,</li> <li>• Bonne fiabilité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité d'un entraxe précis et constant,</li> <li>• Niveau sonore variable suivant type d'engrenage,</li> <li>• Transmission des à-coups et vibrations,</li> <li>• Nécessité d'une lubrification, souvent par fluide,</li> <li>• Réversibilité possible suivant type d'engrenage,</li> <li>• Coût très variable suivant type d'engrenage et classe de qualité.</li> </ul>

**Tableau 1.1 :** Avantages et inconvénients des engrenages

# **Chapitre II :**

# **Théorie sur les engrenages**

## Chapitre II : Théorie sur les engrenages :

### 2.1. Théorie :

Tout système mécanique a pour principe de transmettre et d'adapter une énergie mécanique depuis une source d'énergie vers une application donnée. Les premiers mécanismes ne pouvaient pas contrôler correctement le rapport qui existait entre les vitesses angulaires d'entrée et vitesses angulaires de sortie. Le frottement, non constant, se créait ainsi entre les deux roues qui assuraient leur rotation. Pour diminuer ce frottement, des dents furent utilisées pour augmenter la précision de la transmission de l'effort entre les roues. D'où est née, la théorie des engrenages dotés de dents permettant l'obtention de rapports de transmission précis.

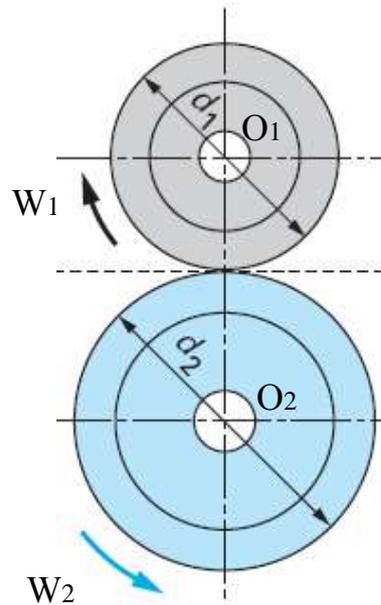
#### 2.1.1. Principes d'engrènement :

Soit deux arbres parallèles d'axes  $O_1$  et  $O_2$ . L'arbre d'axe  $O_1$  tourne à une vitesse angulaire  $\omega_1$ .

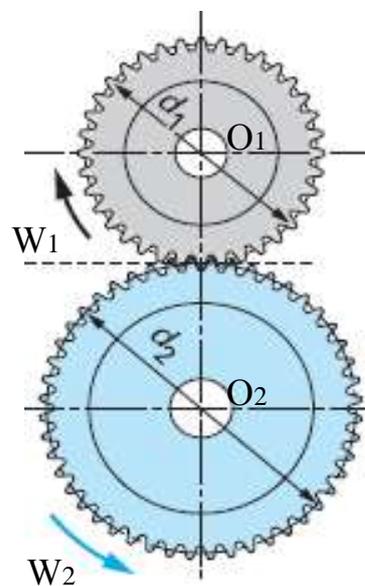
Pour mouvoir l'arbre d'axe  $O_2$ , nous montons sur chacun des arbres une roue circulaire. Les deux roues de diamètres respectifs  $d_1$  et  $d_2$  sont tangentes l'une à l'autre. Si elles roulent l'une sur l'autre sans glisser, nous avons l'égalité des vitesses tangentielles des points de contact. [6]. Les figures suivantes illustrent ce phénomène de transmission.

Nous pouvons écrire :

$$\omega_1 d_1 = \omega_2 d_2 \quad (2.1)$$



**Figure 2.1 :** Transmission par friction



**Figure 2.2 :** Transmission par obstacle

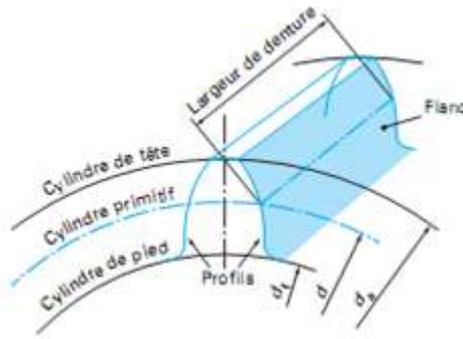
Alors que la friction est loin de représenter le procédé le plus recommandé pour la transmission de puissances, il est possible d'avoir recours à la pression en liant à chaque roue une surface de profil convenable.

Les deux surfaces sont tangentes comme précédemment, mais cette fois-ci l'une poussant l'autre comme le montre la figure 2.2.

**2.1.2. Eléments caractéristiques d'un engrenage :**

Outre le module  $m$  et le nombre de dents  $Z$ , cinématiquement, un pignon d'un engrenage est caractérisé par :

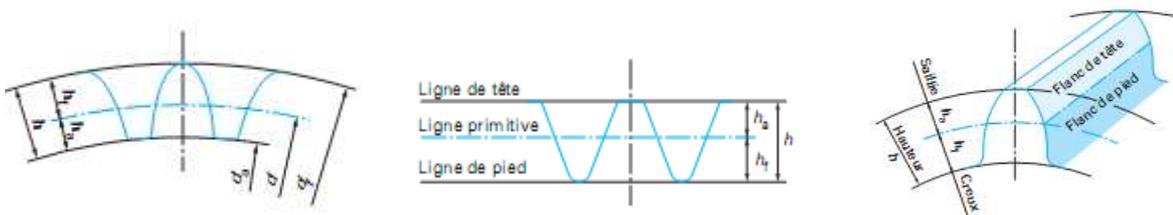
- Trois cylindres : de tête, primitif et de pied représentés par leurs diamètres respectifs.
- La largeur représente la largeur de la denture. Le balayage des profils de la dent nous donne les flancs de la denture.



**Figure 2.3 :** Principe d'une dent

La hauteur  $h$  de la dent, mesurée entre le diamètre de pied et le diamètre de tête est la somme de la saillie  $h_a$  et du creux  $h_f$  :

$$h = h_a + h_f \tag{2.2}$$



**Figure 2.4 :** Eléments caractéristiques d'un engrenage

- L'épaisseur  $s$  et l'intervalle  $e$  :

$$s = e = p/2 = p_b/2 \cos \alpha \tag{2.3}$$

Avec:

$$s_1 + e_1 = s_2 + e_2 = p \tag{2.4}$$

Pour un engrenage sans jeu, on a :

$$s_1 = e_2 \text{ et } e_1 = s_2 \tag{2.5}$$

- Le pas : Le pas primitif  $p$ , mesuré sur le diamètre primitif, est la distance entre deux points similaires de deux dents voisines. Le pas de base  $p_b$  est mesuré sur le cercle de base :

$$P_b = p \cos \alpha \tag{2.6}$$

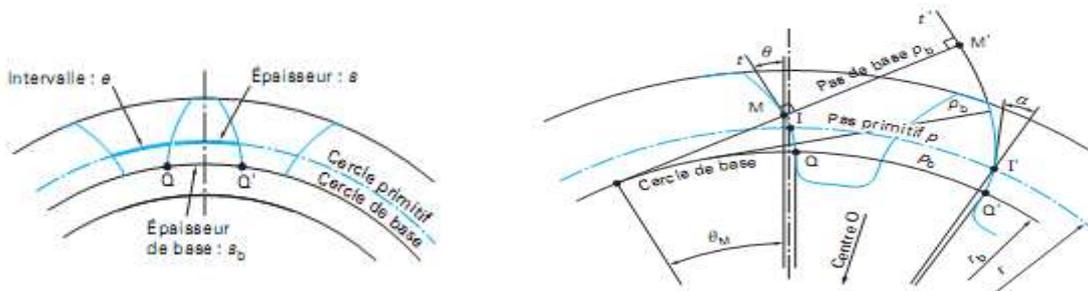
- Angle d'incidence  $\theta$  : Le point M de la développante situé à un rayon  $r_M$ .

Avec:

$$\cos \theta_M = \frac{r_b}{r_m} \tag{2.7}$$

- Angle de pression  $\alpha$

$$\cos \alpha = \frac{r_b}{r} \tag{2.8}$$



**Figure 2.5 :** Angle de pression

- Flèche et corde
- Fonction involute (inv)

$$MOQ = \tan \theta_M - \theta_M = \text{inv}\theta_M \text{ et } IOQ = \tan \alpha - \alpha = \text{inv} \alpha \tag{2.9}$$

$$\cos \theta_M = \frac{r_b}{r_m} \cos \theta_a = \frac{r_b}{r_a} \tag{2.10}$$

$$S_m \left[ = r_m \frac{s}{r} - 2 (\text{inv} \theta_M - \text{inv} \alpha) \right] \tag{2.11}$$

$$\left\{ S_a = r_a \frac{s}{r} - 2 (\text{inv} \theta_a - \text{inv} \alpha) \right\} \tag{2.12}$$

$$\left\{ S_b = r_b \frac{s}{r} + 2 \text{inv} \alpha \right\} \tag{2.13}$$

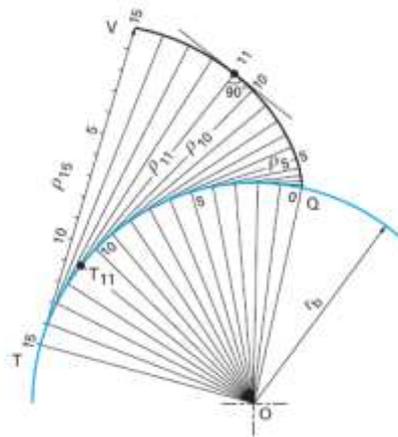
**1.4.4. La développante de cercle :**

La développante de cercle a été adoptée comme profil en raison de ses propriétés remarquables d'où découlent celles des engrenages. [7]. [8].

Une développante de cercle est la trajectoire tracée par un point M d'une droite qui roule sans glisser sur une circonférence appelée circonférence de base. La propriété fondamentale de la développante, résultant de son mode de génération même est qu'en chaque point M, la tangente MT au cercle de base vaut :

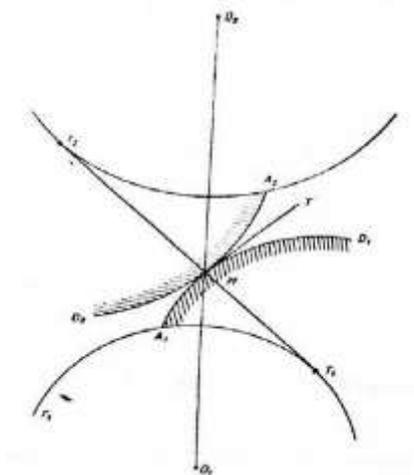
$$MT = \text{arc AT} \tag{2.14}$$

Aussi, elle est normale à la développante comme le montre la figure suivante :



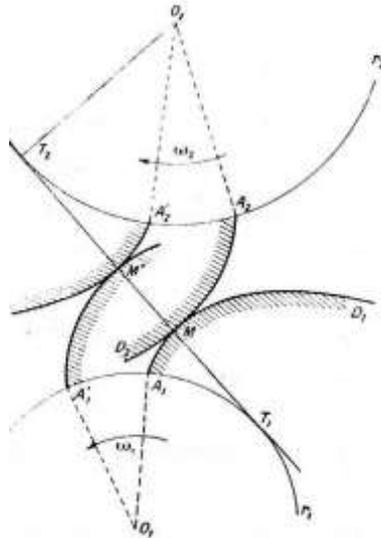
**Figure 2.6 :** Développante de cercle

Soient deux circonférences de base de rayon  $r_1$  et  $r_2$  portant chacune leur développante issue de  $A_1$  pour l'une, de  $A_2$  pour l'autre.



**Figure 2.7 :** Positions relatives de développante

Les centres  $O_1, O_2$  sont placés quelconques sous la seule condition que la distance des centres soit supérieure à la somme des rayons de base ( $O_1O_2 > r_1 + r_2$ ) et que les développantes de cercle se présentent en opposition.



**Figure 2.8 :** Lignes d’action de développante

Soit alors  $T_1T_2$ , une tangente commune intérieure et  $M$  le point où elle coupe la développante  $A_1 D_1$ . On fait pivoter la roue de rayon de base  $r_2$  autour de son axe  $X_2$  jusqu’à ce que sa développante  $A_2 D_2$  passe par  $M$  et elle y sera alors tangente à  $A_1 D_1$  du fait que toutes les deux ont, en ce point comme tangente commune, la perpendiculaire  $MT$  à  $T_1T_2$ .

Si à partir de cette première position, nous faisons tourner la roue d’axe  $X_1$  à la vitesse angulaire  $\omega_1$  de sorte qu’elle pousse la roue d’axe  $X_2$  par sa développante, les deux profils vont rester tangents sur la droite  $T_1T_2$  par suite de la propriété fondamentale des développantes.

Pour la même raison, lorsque le point de contact sera parvenu à sa seconde position  $M'$ , les deux roues ayant respectivement tourné des angles  $A_1 O_1 A'_1$  et  $A_2 O_2 A'_2$ , on aura :

$$A_1 A'_1 = MM' = A_2 A'_2 \tag{2.15}$$

Il s’ensuit que dans ce mouvement, la vitesse linéaire du point de contact  $M$  sur la droite d’action  $T_1T_2$  est égale à la vitesse tangentielle des deux points de base  $A_1A_2$ .

Si celle de  $A_1$  est constante, toutes les autres le sont.

On a donc :

$$\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 \tag{2.16}$$

*et*

$$\omega_1/\omega_2 = r_1/ r_2 \quad (2.17)$$

Tout cela nous permet d'arriver à la conséquence très importante suivante : Le rapport des vitesses de deux roues est constant et égal à l'inverse du rapport des rayons des cercles de base.

# **Chapitre III :**

## **Traitements thermiques et conséquences**

## **Chapitre 3 : Traitements thermiques et conséquences**

### **3.1. Généralités :**

De la même façon qu'il est nécessaire d'apporter des modifications de forme des dentures afin d'optimiser la répartition des efforts de contact, il est souvent nécessaire de réaliser des traitements thermiques sur les pièces fabriquées afin de leur permettre de mieux résister à ces efforts.

Dans le cas des engrenages, il est en général primordial de durcir la surface de la denture, afin de résister aux efforts de contact tout en gardant une certaine ductilité à cœur.

Le durcissement superficiel consiste à durcir la surface grâce à des variations de composition chimique, des déformations plastiques ou encore des changements de phases du matériau. Ceci a pour effet de créer des contraintes résiduelles de compression en surface qui sont avantageuses pour la résistance aux efforts, mais impliquent aussi l'apparition de distorsions qui peuvent être pénalisantes pour la cinématique d'engrènement. Plusieurs procédés permettent le durcissement de surface : le grenailage, la cémentation, la carbonituration, etc,...

### **3.2. Essais mécaniques et Traitements thermiques :**

Pour tout choix de matériau, il est demandé de subir à ce matériau des essais mécaniques et des traitements thermiques. Le but est d'obtenir un matériau adéquat et apte à être utilisé.

#### **3.2.1. Essais des matériaux :**

Les essais, en laboratoire ou sur le terrain, apportent des renseignements précis et fiables sur la qualité et les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre; des normes internationales règlent la plupart. [9].

Principaux essais : essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...), essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité), essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...), essais sur les fluides (viscosité, écoulements...).

Pour étudier les caractéristiques mécaniques des matériaux, on réalise des essais.

Les essais les plus courants sont :

- Essai de traction
- Essai de résilience
- Essai de dureté
- Essai de fatigue
- Essai de fluage

➤ **Essai de traction :**

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindre ou parallélépipédique (plate), deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

Cet essai permet de définir :

- La limite apparente d'élasticité Re
- La résistance à la traction Rm
- Le pourcentage d'allongement après rupture A%

➤ **Essai de résilience :**

Il consiste à rompre par choc une éprouvette et mesurer le travail absorbé par la rupture. Cette rupture doit être produite en seul coup par un levier possédant au moment du choc une énergie cinétique.

La résilience, de symbole K, caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre.

➤ **Essai de dureté :**

La dureté de symbole H, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage à l'usure et à l'érosion :

- Dureté Brinell Symbole HB
- Dureté Vickers Symbole HV
- Dureté Rockwell Symbole HR

➤ **Essai de fatigue :**

Consiste à appliquer à un matériau une sollicitation proche de celle qu'elle subira en service et à comptabiliser le nombre de cycles jusqu'à la rupture de la pièce.

➤ **Essai de fluage :**

L'éprouvette est placée dans un four (essai de traction).

### 3.2.2. Traitements de surfaces :

Les traitements que l'on fait subir aux matériaux métalliques sont choisis en fonction des caractéristiques que l'on désire obtenir: résistance à la corrosion, résistance à l'usure, résistance mécanique (dureté, résilience, résistance à la rupture,...),...

Les principaux traitements permettent d'obtenir des modifications de la structure dans toute la masse de la pièce et de ses caractéristiques mécaniques. Ils sont aussi étroitement liés aux transformations internes qui résultent de l'échauffement du métal à une température supérieure au point de transformation. Les sollicitations imposées à certaines pièces conduisent à employer des matériaux dont les caractéristiques internes et externes sont rendues différentes par des traitements thermiques appropriés (l'extérieur sera dur, l'intérieur moins dur mais résilient,...).[10].

**Les principaux traitements sont :**

- La trempe,
- Le revenu,
- Le recuit,
- La cémentation,
- La nitruration,
- La sulfinisation,
- La carbonitruration.

**La trempe :** Ce procédé fait appel à des moyens d'échauffements rapides des pièces suivi d'un refroidissement immédiat par immersion dans : eau, huile et gaz.

**But:** Résistance>, Dureté>, Allongement %<, Résilience<

**Le revenu :** Il ne s'applique qu'aux métaux préalablement trempés. Il consiste en un chauffage du métal trempé afin de diminuer les effets de la trempe. La pièce est chauffée à une  $T^{\circ} < T^{\circ}$  de la trempe pendant un temps nécessaire.

Le refroidissement se fait lentement à l'air.

**But:** Résistance<, Dureté<, Allongement %>, Résilience>

**Le recuit :** Il consiste à supprimer les effets de la trempe, l'écrouissage (travailler sur un métal en utilisant des efforts supérieurs à sa limite d'élasticité) et les tensions internes. La pièce est chauffée à une température supérieure ou au moins égale à la température de trempe. Le refroidissement doit être effectué lentement dans le four, portes fermées, ou dans le sable (caisse).

**But:** Résistance<, Dureté<, Allongement %>, Résilience>

**La cémentation :** Elle permet de transformer en acier dur l'extérieur des pièces qui sont en acier doux en augmentant le % de carbone sur les couches superficielles. La pièce est plongée dans un milieu riche en carbone (cément) et chauffée dans un four jusqu'à une température variant de  $900^{\circ}$  à  $1000^{\circ}$ . La dureté de maintien dépend de la profondeur souhaitée de la couche cémentée ( $\approx 10$  heures pour un mm).

Le refroidissement se fait lentement dans le four ou dans les caisses.

**But:** Résistance>, Dureté>

**La nitruration :** Ce traitement thermochimique consiste à durcir superficiellement les pièces en les soumettant à l'action d'un courant de gaz ammoniac qui leur communique de l'azote sous l'action de la chaleur. La pièce est chauffée dans un four jusqu'à une température variant de  $500^{\circ}$  à  $550^{\circ}$ . La dureté de maintien est fonction de la profondeur de nitruration souhaitée ( $\approx 10$  heures pour 0.1 mm).

Le refroidissement se fait lentement dans le four ou dans les caisses.

**But:** Résilience>

**La sulfinitation :** Elle consiste à faire absorber superficiellement du soufre par les métaux ferreux (fonte ou aciers). Ce procédé offre la propriété d'augmenter la résistance des pièces à l'usure sans augmenter la dureté.

La pièce est plongée dans un bain de sels portés à une température variant de 560° à 580° comprenant du sodium et du sulfite de sodium. La profondeur maximale de 0.3 mm est atteinte en 3 heures, au delà le métal n'absorbe plus de soufre.

Le refroidissement se fait lentement dans de l'eau chaude (80°).

**But:** La couche extérieure a une excellente résistance à l'usure

**La carbonituration :** Elle ne s'applique qu'aux alliages ferreux et plus particulièrement aux aciers. C'est un perfectionnement de la cémentation au carbone dans lequel l'azote agit en même temps que le carbone. L'opération se déroule entre 730° et 830°C. On obtient une couche cémentée d'épaisseur 0.5 à 0.7 mm au bout de 2 à 3 heures.

Le refroidissement se fait dans de l'huile ou à l'air.

### 3.3. Effets des traitements thermiques :

Les effets des traitements thermiques sur les matériaux son diverses. Mais on peut les classer en deux catégories :

- Aspects métallurgiques
- Aspects de fabrication

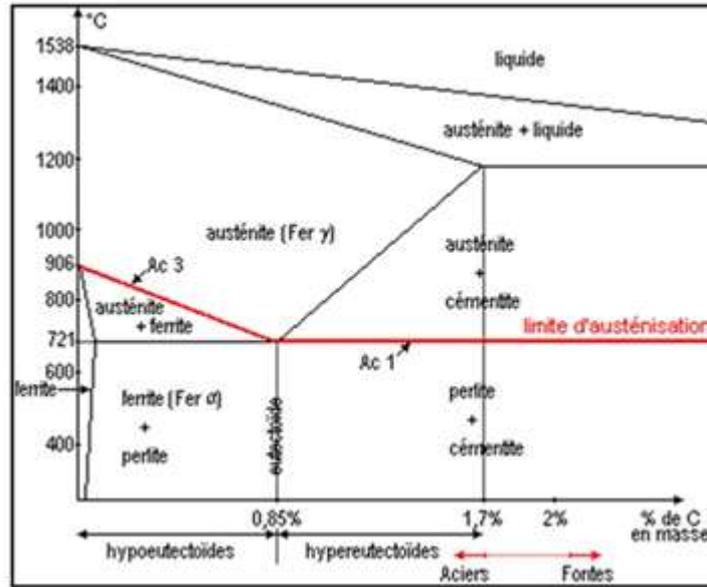
#### 3.3.1. Aspects métallurgiques

Le but du traitement thermique superficiel sur les matériaux est de faire apparaitre une phase dure de martensite en surface afin d'en améliorer certaines caractéristiques mécaniques. La première étape consiste à chauffer la zone à traiter au-delà de la température d'austénitisation  $A_{c3}$ , spécifique à chaque matériau.

La structure du matériau devient alors cubique face centrée (fer  $\gamma$ ) avec des atomes de carbone en solution solide. Ensuite, un refroidissement suffisamment rapide entraine une transformation allotropique du matériau qui permet d'obtenir une phase métastable appelée martensite.

Au cours de cette transformation, les atomes de carbone restent emprisonnés dans le réseau qu'ils distordent fortement ce qui augmente la dureté. La structure cristalline devient quadratique centrée, ce qui entraîne une augmentation de volume.

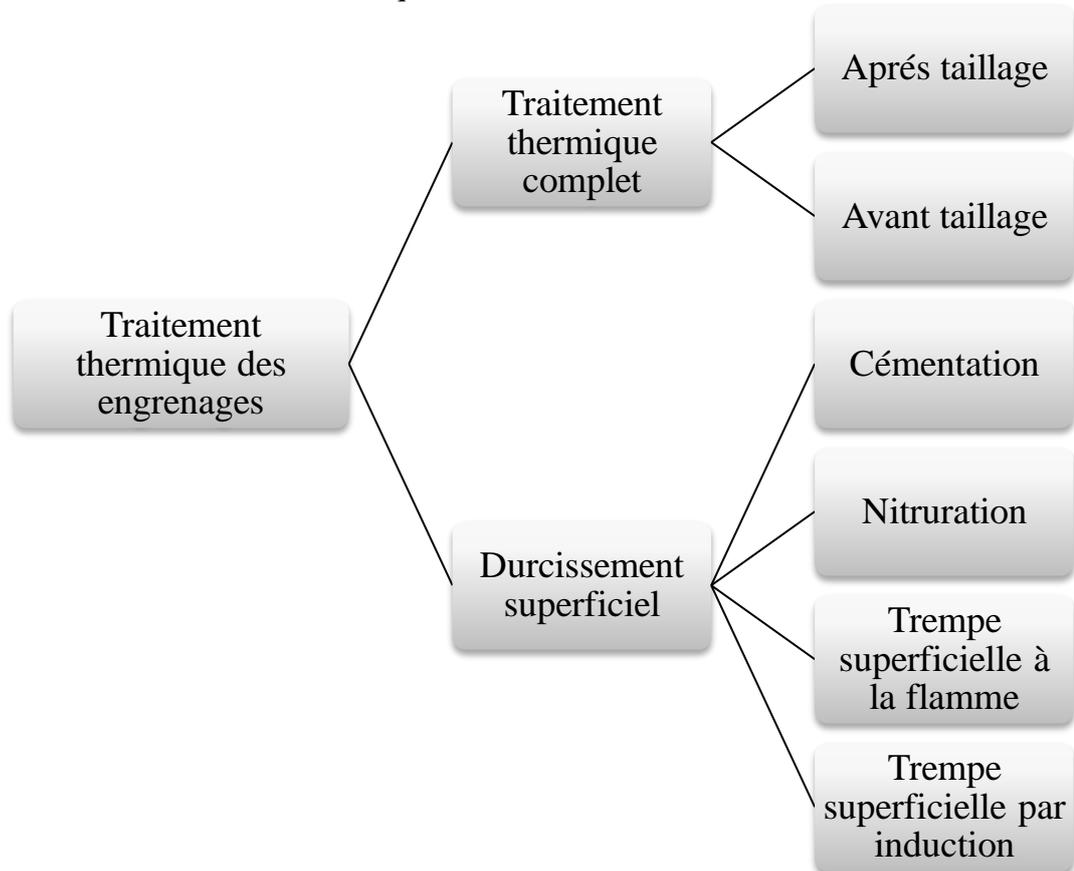
La vitesse de refroidissement joue un rôle important. Si celle-ci est trop faible de la bainite, de la perlite ou de la cémentite peuvent se former selon les éléments du matériau.



**Figure 3.1 :** Diagramme de fer-carbone

Aussi, on trouve les contraintes résiduelles qui sont des contraintes existantes dans un solide sans imposer de chargement externe.

La figure 3.2 rappelle les effets et les couplages dans la genèse des contraintes internes au cours d'un traitement thermique.

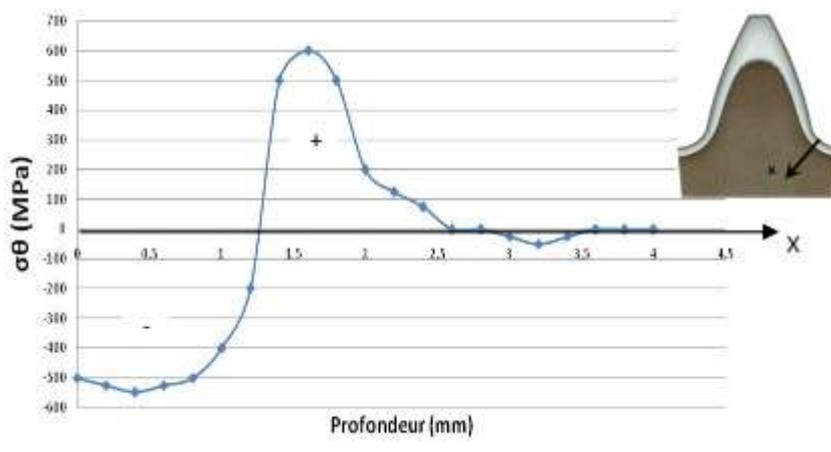


**Figure 3.2 :** Différents types de traitements thermiques

Il est intéressant de remarquer que dans un sens les contraintes sont dues à la transformation, mais elles ont aussi une influence sur la transformation. Les contraintes internes présentes avant le traitement thermique influencent donc les distorsions induites au chauffage et au refroidissement. Ces contraintes peuvent être de compression ou de tension. Le bénéfice majeur d'éliminer les contraintes résiduelles dans une pièce est d'éliminer les changements dimensionnels qu'elles impliquent durant la fabrication.

Par contre, il y a un bénéfice intéressant à former des contraintes résiduelles de compression en surface, qui est l'amélioration de la tenue en fatigue par l'augmentation de la résistance aux fissures. Des contraintes de tension en surface sont généralement indésirables car elles fragilisent la pièce et augmentent les risques de fissure au refroidissement. De même, des contraintes de tension trop importantes à l'intérieur de la pièce favorisent l'apparition de fissures internes.

La figure 3.3 représente le type de profil de contraintes résiduelles qu'il est intéressant d'obtenir suite à un traitement superficiel.



**Figure 3.3 :** Profil de contraintes résiduelles en creux de dent

### 3.3.2. Aspects de fabrication :

La conception des engrenages repose généralement sur des suppositions et incertitudes qui rendent leurs durées de vies variables d'une application à une autre. Néanmoins, cela est dû principalement aux :

- Charge initiale, et par conséquent dureté variable.
- Causes constitutives d'alignement.
- Non-linéarité de mouvement.
- Résultats de jeu entre-dents, des lacunes entre les composants et ses causes.

- Manque provisoire de mouvement sur l'inversion de couple.
- Causes de frottement.
- Problèmes de contrôle.
- Rétablissement de chaleur.
- Usage.

Les mécanismes de défaillance primaires pour les dents d'engrenage sont :

- Contraintes de flexion excessives à la base de la dent (flexion pignon / roue).
- Tension excessive de roulement ou de contact au moment où le contact (pression de contact).

Et pour que les transmissions par engrenage soient satisfaisantes, elles doivent fonctionner comme prévu à l'étape de conception.

Lors de la réalisation, un grand nombre de matériaux sont utilisés pour la fabrication des engrenages. [11].

On peut citer :

- Aciers de toutes nuances.
- Fontes ordinaires et spéciales.
- Bronzes.
- Matières synthétiques, etc.

Le choix dépend d'un assez grand nombre de facteurs comme :

- Types d'engrenages.
- Vitesses de rotation.
- Résistances demandées à la rupture et à l'usure.
- Silence de fonctionnement.
- Dimensions de l'engrenage.
- Matériel d'usinage disponible, etc.

On peut toutefois qu'à l'exception des engrenages à vis sans fin pour lesquels le bronze est pratiquement le seul matériau possible pour la roue, ce sont les aciers qui sont de loin les plus utilisés. Ils permettent d'obtenir le maximum de sécurité avec un encombrement minimum ; les

questions de fonderie, de forge et d'usinage des grandes roues ne constituent même plus un obstacle dans l'industrie moderne.

Dans l'Industrie, les traitements thermiques superficiels sont utilisés pour renforcer les aciers et leur tenue mécanique. Cependant, il arrive que des défauts métallurgiques se forment lors de la réalisation de ces traitements, favorisant des ruptures de pièces en service.



**Figure 3.4** : Défauts métallurgiques

Par exemple, la figure 3.5 indique le décrochement qui se produirait inévitablement au pied des dents si un outil de taillage à protubérance n'est pas utilisé. Cet outil a comme avantage complémentaire de permettre l'utilisation du fond des dents brutes de cémentation : ce traitement introduit une précompression superficielle très bénéfique pour les tenus des dents à la fatigue de flexion. Une rectification du fond des dents serait néfaste, car elle introduirait une contrainte de tension superficielle défavorable sur la tenue des dents à la fatigue de flexion.



**Figure 3.5** : Décrochement

Une opération de rectification conduite avec une avance ou une profondeur de passe excessive peut entraîner des criques par suite d'échauffement localisé important. Ces criques peuvent constituer des amorces de rupture, surtout si elles sont localisées vers le pied des dents et dans le sens longitudinal. Il convient d'être attentif pour les premières passes, c'est-à-dire jusqu'à ce que les déformations de traitement thermique aient été absorbées : une prise de matière locale trop forte est à craindre durant cette période.

Une dureté superficielle trop importante est également à rejeter. Aussi, le choix de la meule de rectification est aussi un facteur prépondérant, de même que le fluide d'arrosage utiliser dans certains cas.



**Figure 3.6 :** Cassures par écaillage

Un autre facteur important est la lubrification.

Elle est l'un des problèmes le plus important et le plus délicats qui puissent se poser pour le bon fonctionnement des engrenages.

Elle peut :

1/ Eviter le contact métal sur métal qui pourrait provoquer, au bout d'un temps très court, une sorte de soudage des dentures conjuguées sachant que les conditions de glissement et de pression superficielle sont souvent très sévères dans les engrenages. Il est donc nécessaire d'interposer un film d'huile résistant entre les dentures conjuguées. Il ne faut pas perdre de vue que le soudage peut se produire à des températures bien au-dessous du point de fusion du métal si la pression de contact est élevée.

2/ La lubrification s'impose également pour la question du rendement de l'engrenage. Un frottement métal sur métal entraînerait un coefficient de frottement beaucoup plus élevé.

3/ Une autre fonction importante du lubrifiant consiste à absorber la chaleur dégagée durant l'engrènement (la perte de rendement est en effet matérialisée par un dégagement de chaleur).

Un volume d'huile souvent important est nécessaire pour éviter un échauffement anormal de l'engrenage.

### 3.4. Les différents types de détérioration des dentures d'engrenages :

Sur un couple d'engrenages d'un réducteur simple les principaux défauts sont les défauts répartis sur toute les dents et les défauts localisés sur certaines dents [12].

#### 3.4.1. Défauts répartis sur toutes les dents :

On trouve :

- ✓ Usure abrasive et adhésive
- ✓ Pitting (piques)

#### 3.4.2. Les défauts localisés sur certaines dents :

- ✓ Ecaillage
- ✓ Le grippage



**Figure 3.7 : Défaut de grippage**

- ✓ Fissure :

### 3.5. Les types d'usures :

L'usure se caractérise par une diminution lente et régulière de l'épaisseur des dents accompagnée d'une modification plus ou moins prononcée de la surface des dentures, due au

glissement. Son développement est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant.

On utilise deux classifications distinctes pour séparer les différents types d'usure :

1/ La première prendra en compte l'intensité des phénomènes d'usure et définira des éléments pour pouvoir quantifier leur évolution.

2/ La deuxième sera basée sur les modes d'action des différents phénomènes d'usures sur les dents et elle permettra de caractériser les divers aspects de surface.

Au cours de l'analyse quantitative, on peut classer les usures de la manière suivante :

- ✓ Usure normale.
- ✓ Usure anormale.
- ✓ Usure modérée.
- ✓ Usure successive.
- ✓ Le rodage.

### **3.6. Les mécanismes d'usure :**

On distingue quatre principaux modes d'usure :

- ✓ Usure par abrasion :
- ✓ Usure par transfert ou adhésion :
- ✓ Usure par fatigue :
- ✓ Usure par réactions tribochimiques :

# **Chapitre IV :**

# **Application et effets des traitements**

# **thermiques**

## Chapitre 4 : Application et effets des traitements thermiques

### 4.1. Généralités :

De la même façon qu'il est nécessaire d'apporter des modifications de forme des dentures afin d'optimiser la répartition des efforts de contact, il est souvent nécessaire de réaliser des traitements thermiques sur les pièces fabriquées afin de leur permettre de mieux résister à ces efforts.

Dans le cas des engrenages, il est en général primordial de durcir la surface de la denture, afin de résister aux efforts de contact tout en gardant une certaine ductilité à cœur.

Dans ce travail, nous allons prendre comme exemple des traitements thermiques ; la cémentation sur un pignon à denture droite. Ce pignon est utilisé dans la prise de mouvement de la boîte de vitesses d'un camion.

### 4.2. Cémentation :

#### 4.2.1. Définition :

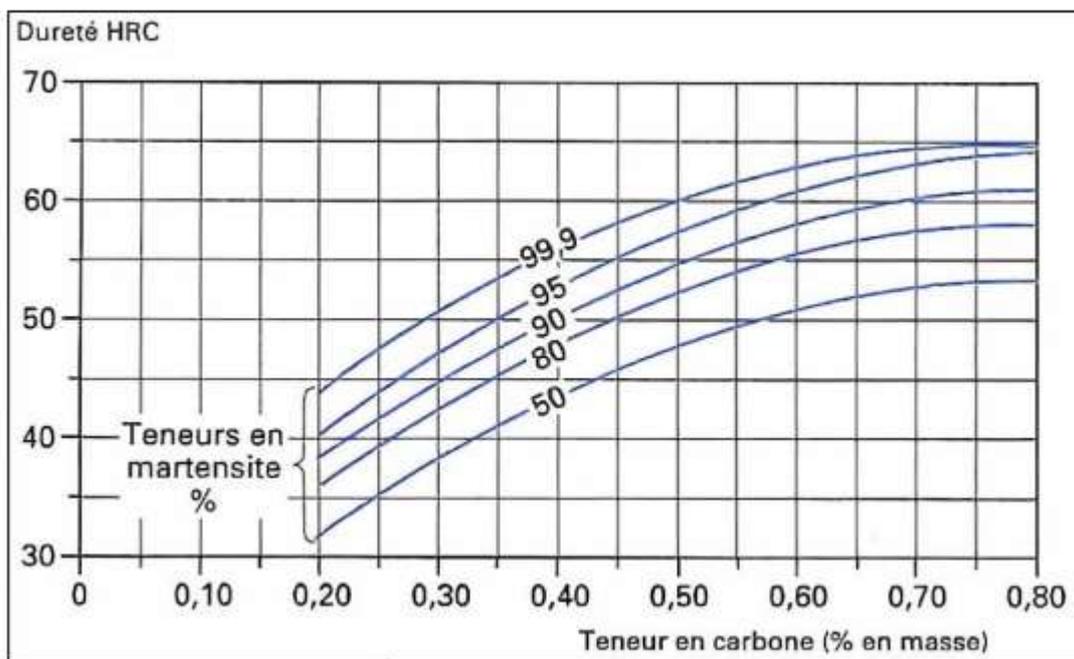
La cémentation est un processus dans lequel le métal ferreux (l'acier) austénitisé est mis en contact avec un environnement à potentiel de carbone suffisant pour provoquer l'absorption du carbone à la surface et, par diffusion, créer un gradient de concentration de carbone entre la surface et l'intérieur du métal. [13]

L'objectif principal de la cémentation et du durcissement des pièces est d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées des couches superficielles tout en conservant un cœur doux et tenace.

Pour ce procédé, des aciers à faible teneur en carbone (jusqu'à un maximum d'environ 0,30% de carbone), avec ou sans éléments d'alliage (nickel, chrome, manganèse, molybdène), sont normalement utilisés. On sait que le durcissement superficiel d'un alliage fer-carbone par transformation martensitique est directement relié à sa teneur en carbone. La recherche d'une dureté maximale conduit à obtenir des teneurs superficielles en carbone comprises entre 0,7 et 0,9 % de carbone.

Appliquée sur un acier à faible teneur en carbone, la cémentation est un moyen de durcissement superficiel permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une martensite à haute teneur en carbone, tout en garantissant à cœur une bonne ductilité par l'obtention d'une martensite à bas carbone.

Les profondeurs de diffusion du carbone seront pratiquement limitées à 4 mm pour des raisons économiques évidentes. Les fortes profondeurs seront réservées aux pièces de mécanique lourde, les plus courantes variant de 0,3 à 2,5 mm. [14]



**Figure 4.1 :** Évolution de la dureté en fonction de la teneur en carbone pour divers taux de martensite

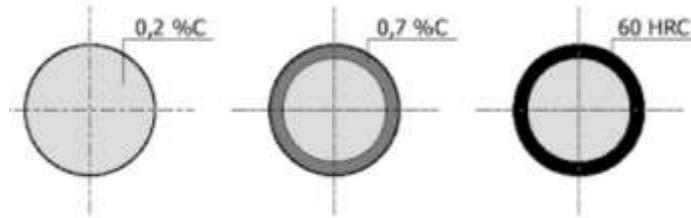
Le traitement se décompose en deux phases distinctes : [15]

- Enrichissement de la surface en carbone à haute température (généralement 900 à 980°C). On distingue trois types de cémentation suivant l'état du milieu cémentant : cémentation solide, cémentation liquide, cémentation gazeuse.
- Trempe de la pièce afin d'obtenir une structure martensitique en surface (< 900 HV) et une structure plus douce (bainite) à cœur.

La trempe est réalisée soit directement :

- ✓ Après cémentation (trempe directe).

✓ Soit après refroidissement du métal et réchauffage ultérieur. La couche cémentée atteint le maximum de dureté (environ 800 à 900 HV) après la trempe martensitique pour des teneurs en carbone voisines de l'eutectoïde. Un éventuel revenu de détente (entre 180°C et 200°C) après trempe ramènerait la dureté aux environs de 600HV à 760HV.



Avant cémentation    Après cémentation    Après trempe

**Figure 4.2 :** Principe de la cémentation

#### 4.2.2. Principe :

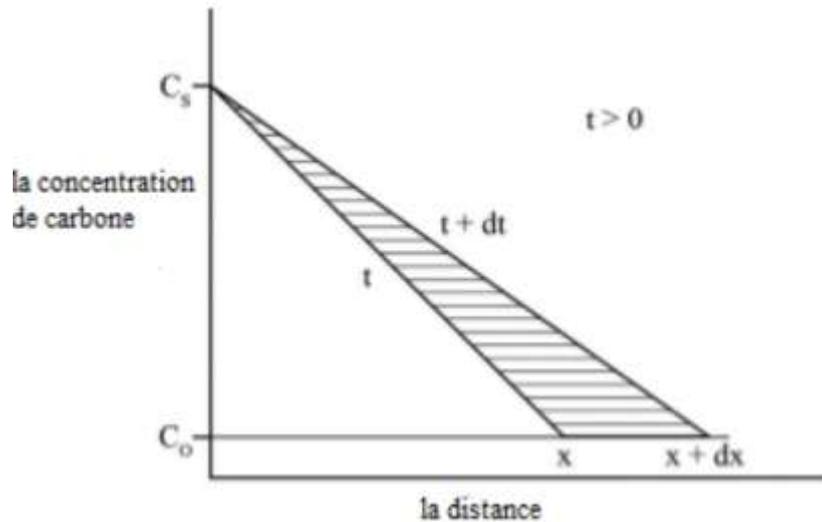
Dans ce processus, le carbone est diffusé dans l'acier en chauffant au-dessus de la température de transformation et en maintenant l'acier en contact avec un matériau carboné qui peut être un milieu solide, un liquide ou un gaz.

Dans de telles conditions, le carbone est absorbé en solution solide dans l'austénite. Comme la solubilité du carbone est plus à l'état austénitique qu'à l'état ferritique, l'état entièrement austénitique est essentiel pour la cémentation.

La cémentation se déroule en deux étapes :

1/ L'absorption de carbone libre sur la surface de l'acier se produit en raison d'une grande différence entre le potentiel de carbone de l'atmosphère et la teneur en carbone de la surface de l'acier. Le taux d'absorption de la teneur en carbone supplémentaire sur la surface augmente avec une augmentation de la teneur en carbone de la surface jusqu'à ce qu'elle devienne égale à celle de l'atmosphère.

2/ La diffusion du carbone de la surface vers l'intérieur se produit dans la deuxième étape. Dès que l'acier entre en contact avec l'atmosphère de cémentation, le carbone en surface atteint sa valeur maximale ( $C_s$ ). Il reste constant tout au long du processus. La teneur en carbone de l'intérieur est la même que la teneur en carbone d'origine dans l'acier,  $C_o$ . À un instant  $t > 0$ , la concentration en carbone varie linéairement avec la distance.



**Figure 4.3 :** Variation de la concentration de carbone avec la distance

La profondeur de la couche cémentée et la rapidité de l'opération sont fonction des trois paramètres suivants :

1. Le pouvoir cémentant du ciment caractérisé par son potentiel carbone.
2. La cinétique de réaction gaz-métal.
3. La diffusion du C dans l'acier.

#### 4.2.3. Les Procédés de cémentation :

Il existe trois méthodes générales de cémentation, selon la forme du milieu de cémentation. Elles sont :

- Cémentation solide ou en pack, utilisant un matériau de cémentation solide,
- Cémentation liquide : utilisant des bains fondus de sels de cémentation,
- Cémentation gazeuse, utilisant des gaz d'hydrocarbures appropriés.

#### 4.2.4. Les aciers de cémentation :

Les aciers de cémentation sont utilisés dans la construction de pièces dont la surface doit être dure et résistante à l'usure et dont le cœur présente les ca correspondant aux sollicitations de service.

La cémentation augmente la limite de fatigue de pièces. Cet accroissement de la résistance aux contraintes alternés est dû aux bonnes caractéristiques mécaniques de la couche superficielle.

Par ailleurs, les contraintes de compression propres provoqués par la cémentation réduisent la sensibilité à l'effet d'entaille de la surface. Ce phénomène permet de mettre à profit la bonne résistance aux contraintes alternés de la couche superficielle extra-dure. Les aciers de cémentation sont mis en œuvre dans la construction mécanique générale et navale, la construction de véhicules, la fabrication d'engrenage, de roues dentés, de crémaillères, de pignons et d'autres pièces soumises à usure.

Les aciers de cémentation ont généralement des teneurs en carbone inférieurs à 0.25%. En fonction des éléments d'addition, on peut élaborer toute gamme d'aciers qui possèdent des caractéristiques à cœur différentes et qui satisfont aux exigences de l'utilisation prévue.

Les aciers de cémentation peuvent être classés dans les groupes suivants :

- Aciers au carbone,
- Aciers au chrome ou au chrome-manganèse,
- Aciers au chrome-molybdène ou au molybdène-chrome,
- Aciers au nickel,
- Aciers au nickel-chrome,
- Aciers au nickel-chrome-molybdène.

Le choix de la nuance se fait en fonction des caractéristiques à cœur nécessaires (résistance, limite élastique, allongement, striction et résilience), en tenant compte de l'application prévue et de la dimension de la pièce.

Lorsque les pièces ne sont qu'usure et que les exigences à cœur sont peu élevées, on peut utiliser des aciers au carbone ou au chrome. Si les pièces doivent résister non seulement à l'usure, mais également à des efforts dynamiques par compression, traction, pliage ou torsion, il faut choisir des aciers à plus forte résistance à cœur.

Dans ces cas, les aciers alliés au chrome-manganèse ou au chrome-molybdène sont indiqués. Si les pièces sont exposés simultanément à des chocs et à des efforts particulièrement élevés, la ténacité à cœur et de la couche cémenté revêt une importance toute spéciale. Les aciers alliés au nickel, au nickel-chrome ou nickel-chrome-molybdène sont alors recommandés.

### **4.3. Modélisation numérique de notre engrenage en appliquant Ansys :**

#### **4.3.1. Introduction :**

A travers cette partie, nous étudier les effets de la cémentation sur notre engrenage. Une modélisation numérique sera appliquée en utilisant le logiciel Ansys.

### 4.3.2. Etats de surface :

Le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre  $10^{-2}$  et  $10^{-16}$  mm.

La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celle du cœur du matériau.

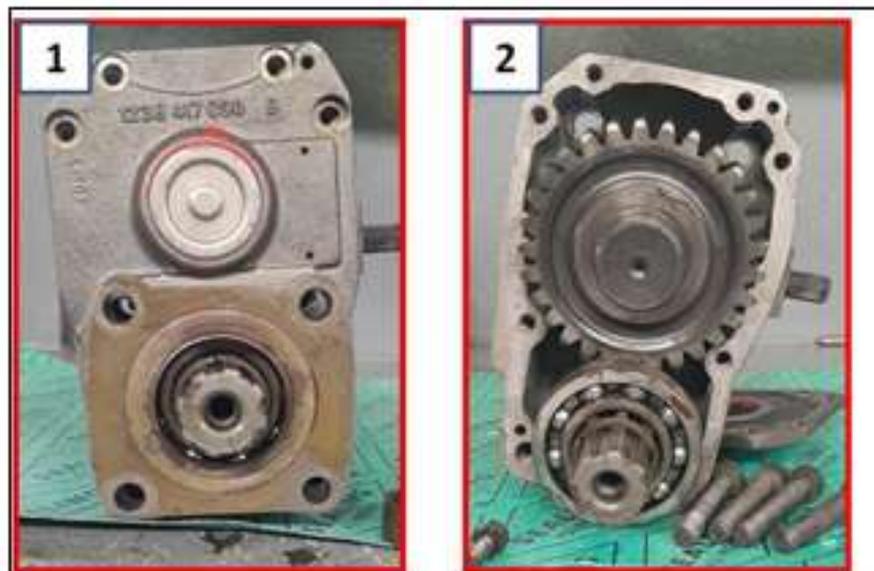
La surface peut être recouverte d'une couche protectrice ou écran qui modifie le comportement tribologique des corps en contact.

### 4.3.3. Présentation du pignon :

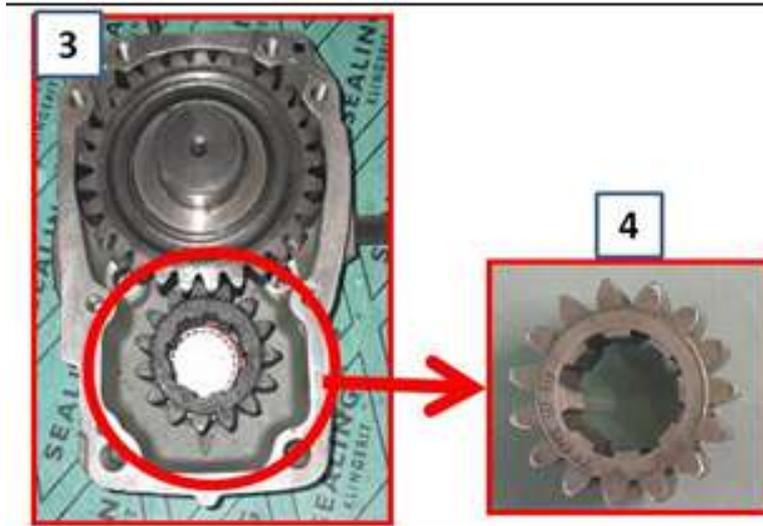
Il s'agit d'un pignon à denture droite utilisé dans les prises de mouvement d'une boîte de vitesses d'un camion.

La prise du mouvement est destinée à entrainer des pompes hydrauliques pour le cas d'un camion à benne ou à entrainer des pompes à eau pour le cas des camions citernes.

Les étapes de démontage sont illustrées dans les figures suivantes :



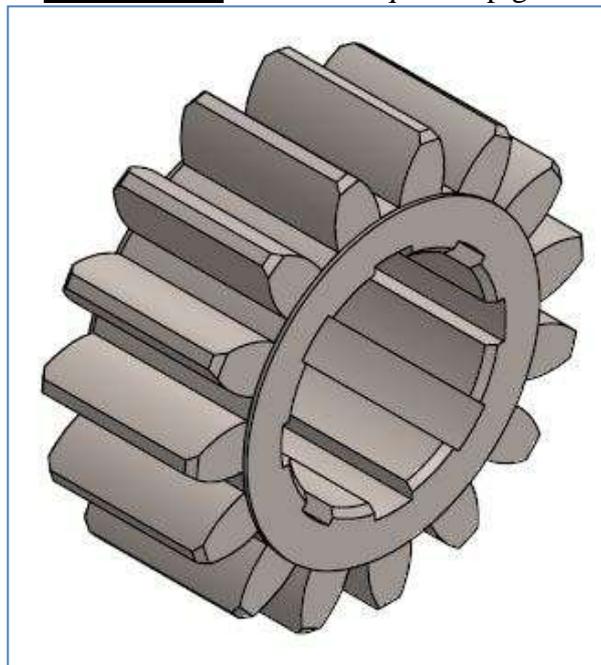
**Figure 4.4 :** Etapes de démontage

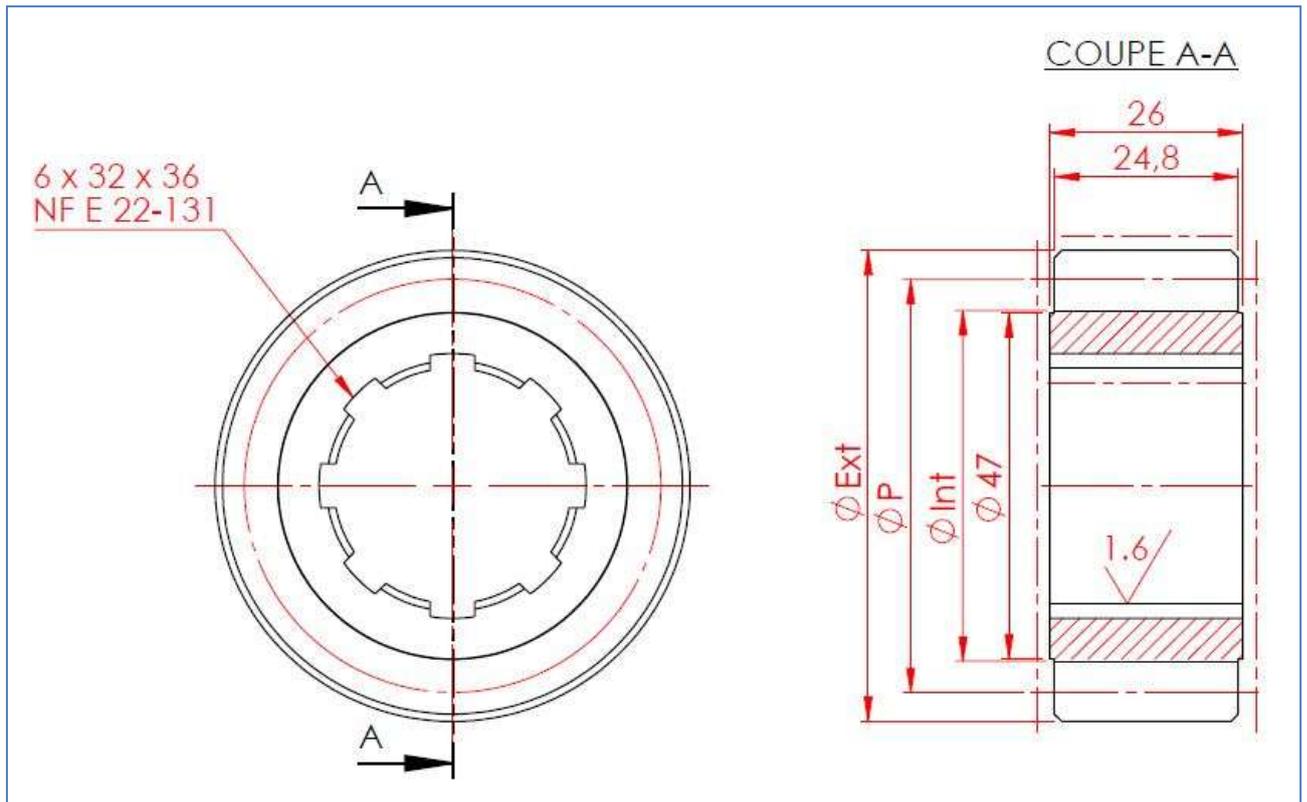


**Figure 4.5 :** Pignon séparé

Désignation	Symbole	Valeur
Nombre de dents	Z	15
Module	m	3.62
Angle de pression	a	20°
Coefficient de la hauteur de dent	Y	1
Déplacement du profil	m*x	1.41
Diamètre extérieur	ØExt	64.5
Diamètre primitif	ØP	54.42
Diamètre intérieur	ØInt	45.37
Cote de contrôle sur 2 dents	K <sub>n</sub>	17.75 <sup>-0.034</sup> <sub>-0.068</sub>

**Tableau 4.1 :** Caractéristiques du pignon



**Figure 4.6 :** Pignon en perspective**Figure 4.7 :** Dessin de définition du pignon

Les figures suivantes représentent respectivement un pignon d'origine, un pignon utilisé et un pignon traité.

**Figure 4.8 :** Pignon d'origine



**Figure 4.9 :** Pignon utilisé



**Figure 4.10 :** Pignon traité

Notre matériau utilisé est le 16 NC 6.

C'est un acier de construction, allié au nickel chrome pour cémentation.

Il est couramment utilisé et présente une résistance élevée aux chocs et aux déformations. On le trouve dans l'industrie automobile : engrenages, arbres, fusées, pièces de boîte de vitesse, etc...

Sa composition chimique (en %) est représentée dans le tableau ci-dessous :

<b>C</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>S</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>
0.12 - 0.17	1.20 / 1.50	0.90 / 1.20	0.035 Max	0.60 / 0.90	0.035	0.10 / 0.40

**Tableau 4.2 :** Composition chimique en %

Ses caractéristiques mécaniques moyennes à l'état traité cémenté sont représentées ci-dessous :

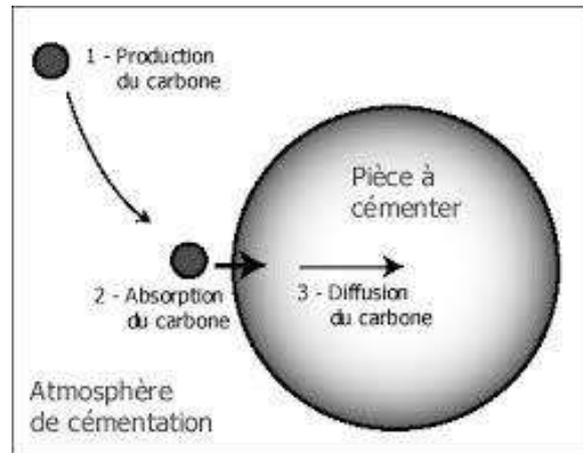
<b>Rm N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Rp 0.2 N/mm<sup>2</sup></b>	<b>A %</b>	<b>Dureté HB</b>
650 / 1400	470 / 800	9 / 11	

**Tableau 4.3 :** Caractéristiques mécaniques

La cémentation sur notre acier se fera de la manière suivante :

La profondeur de la couche cémentée et la rapidité de l'opération sont fonction de trois paramètres. Il s'agit de :

- Le pouvoir cémentant du ciment caractérisé par son potentiel carbone.
- La cinétique de réaction gaz-métal.
- La diffusion du C dans l'acier.

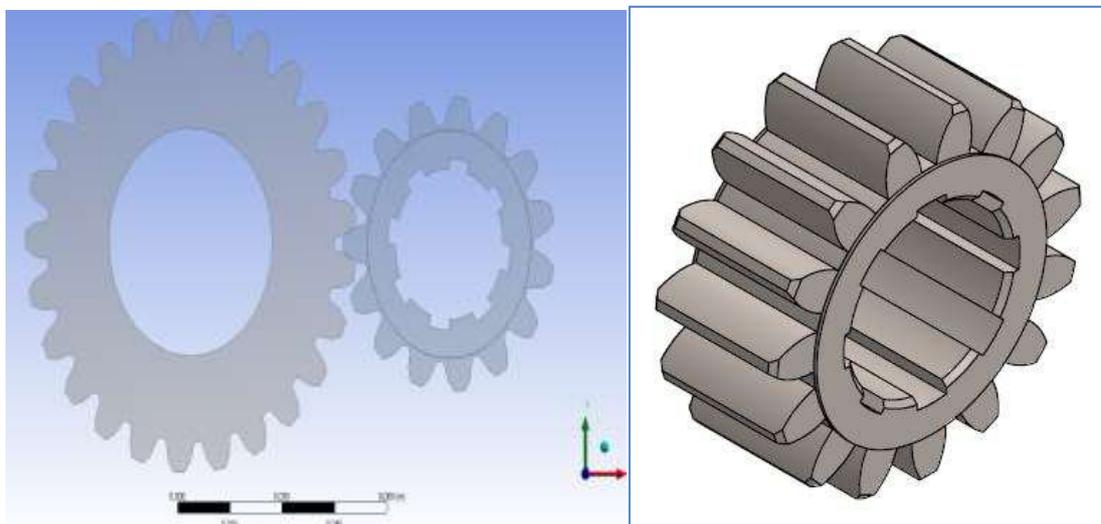


**Figure 4.11** : Phases de cémentation

#### 4.4. Applications :

Le programme ANSYS permet de modéliser l'assemblage de notre engrenage afin d'étudier les déformations et les contraintes au niveau de la denture.

La géométrie de notre modèle est comme suit :



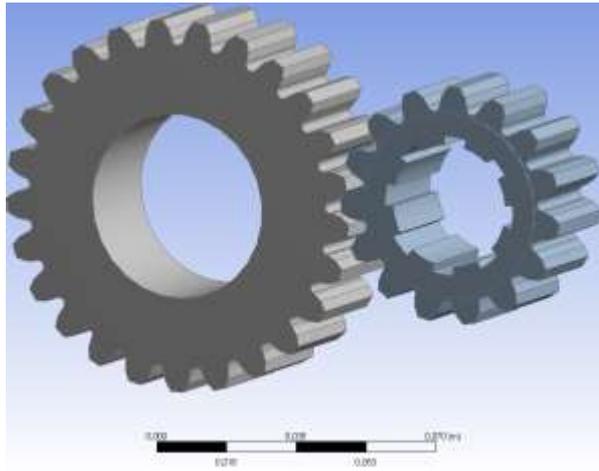
**Figure 4.12** : Schéma de l'engrenage

Les avantages de notre engrenage cylindrique à denture droite sont :

- Simple.
- Economique.
- Pas d'efforts axiaux.

Leurs inconvénients sont :

- Vitesses de rotation limitées.
- Bruyants.
- Entraxes prenant des valeurs finies.



**Figure 4.13 :** Schéma Vue en 3D de l'assemblage

L'analyse se fait en deux étapes :

- Avant la cémentation.
- Après la cémentation.

De la figure 4.13 et de la figure 4.14, on remarque que lors du fonctionnement de cet engrenage, la partie la plus sollicitée se trouve au niveau des surfaces des aciers à faible extérieures.

Pour cela, et pour avoir un bon état de surface, il est recommandé de faire un traitement thermique, à savoir la cémentation.

Ce procédé de la cémentation s'effectue pour atteindre une dureté de 60-62 HRC.

La profondeur de la cémentation est de l'ordre de 0.1mm à 0.15mm.

Une cémentation de 0.1mm se fait avec une trempe de 1h et à une température de 920°C.

La prochaine étape est d'analyser en utilisant ANSYS, la différence entre les 2 états : cémenté et non cémenté.

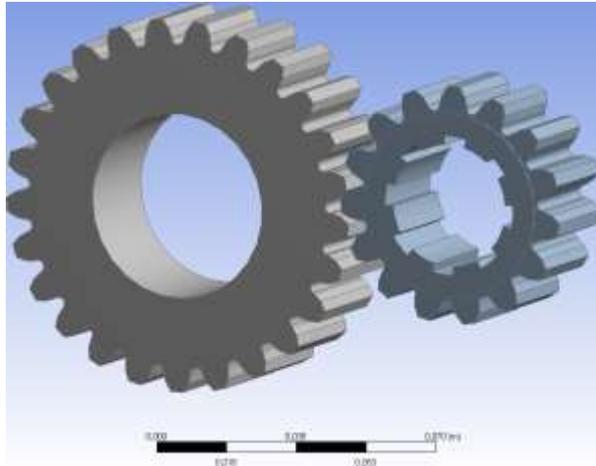
**CARACTERISTIQUES DE L'ENGRENAGE :**

L'engrenage est représenté par un assemblage de roues dentées droits.

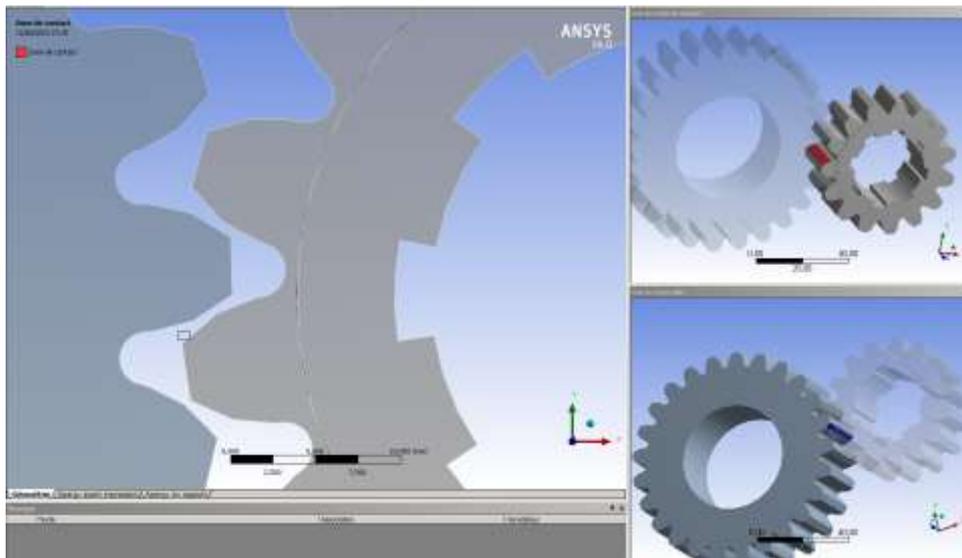
La roue du est constituée de 15 dents.

Avec :

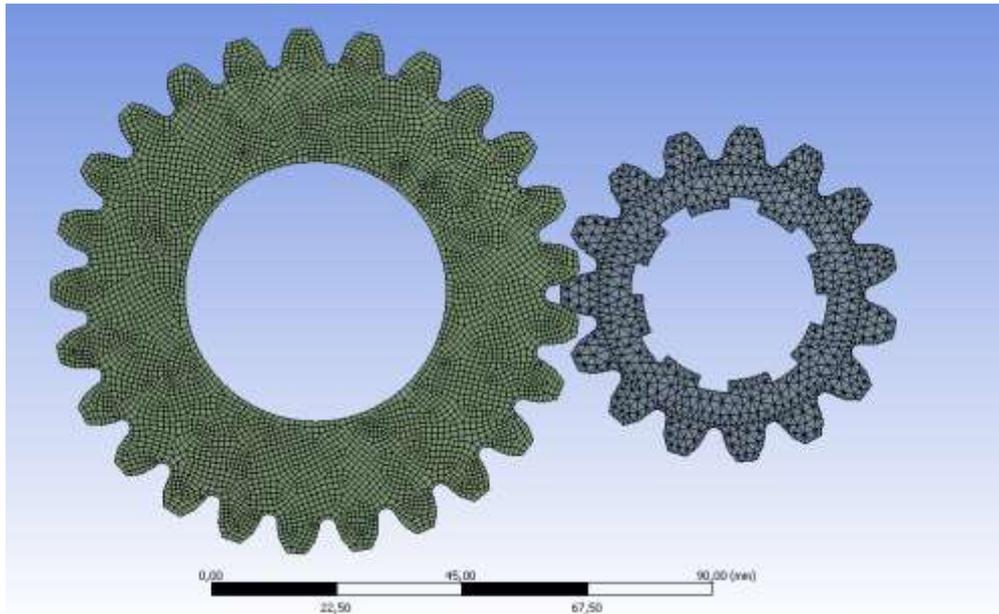
- Module  $E_{16NC6} = 84410$  MPA
- Coefficient de Poisson  $\nu = 0.3$



**Figure 4.14 :** Assemblage des roues



**Figure 4.15 :** Conditions de contact



**Figure 4.16 :** Maillage

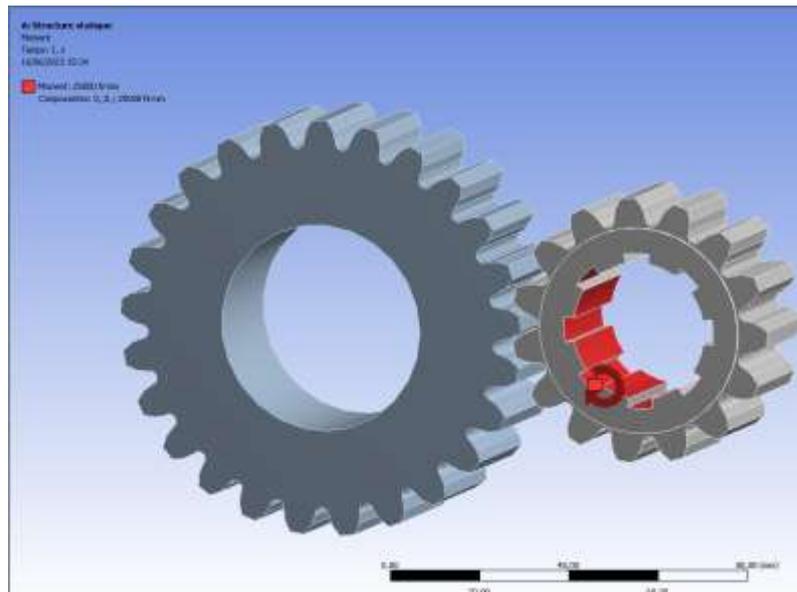
Le maillage basé sur les lois de la physique est l'approche utilisée par défaut, qui définit le maillage en fonction de l'étude de simulation et de la géométrie.

Les contrôles de maillage nous permettent de contrôler différentes propriétés du maillage, ce qui peut affecter les résultats globaux et les performances de l'étude de simulation.

Cliquez sur **Affiner le modèle (Refine Model) > Contrôle de maillage (Mesh Control)** pour ouvrir l'onglet **Contrôle de maillage (Mesh Control)**, qui nous permet de contrôler les paramètres de maillage de l'étude active.

Détails de "Maillage"	
[-] <b>Affichage</b>	
Style d'affichage	Couleur du corps
[-] <b>Réglages par défaut</b>	
Physique de préférence	Mécanique
<input type="checkbox"/> Pertinence	0
[-] <b>Dimensionnement</b>	
Utiliser la fonction de ...	Désactivé
Centre de pertinence	Fin
<input type="checkbox"/> Taille des éléments	1,0 mm
Taille d'élément initiale	Assemblage actif
Lissage	Moyen
Transition	Rapide
Centre d'angle de cou...	Grossier
Longueur d'arête mini...	0,257870 mm

**Figure 4.17 :** Caractéristiques du maillage



**Figure 4.18 :** Application du couple

La figure 4.17 montre le couple appliqué au niveau du pignon.

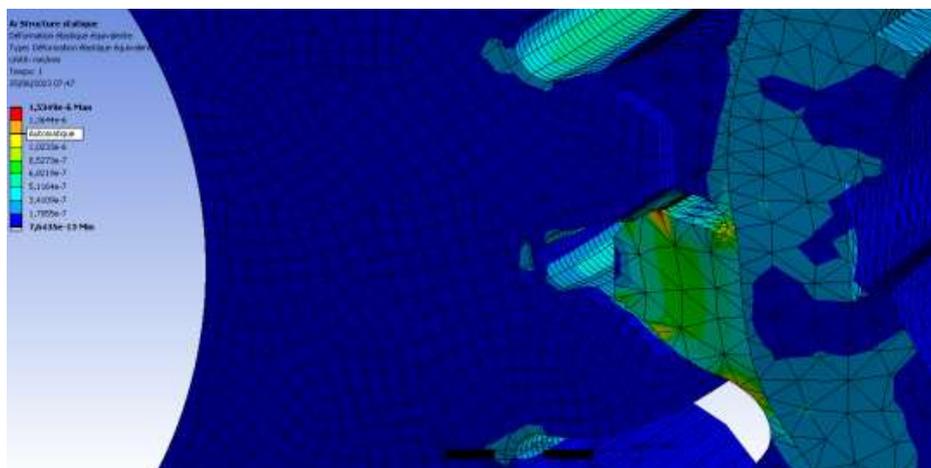
Le couple est égal = 25000N.mm

La transmission de couple se fait par contact des dentures au niveau de l'engrenage.

Ce contact peut engendrer des erreurs de profil. Celles-ci sont représentatives des écarts existant entre le profil théorique de la denture et le profil réel.

Le profil théorique en développante de cercle, de forme parabolique ou présente une dépouille s'il a subi une correction volontaire.

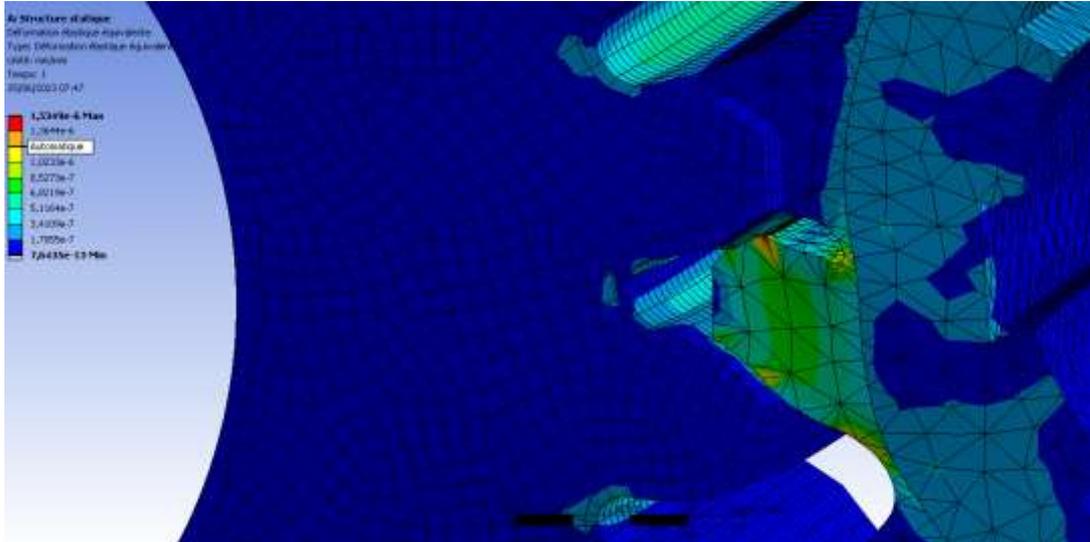
Ces erreurs peuvent être générées lors de la fabrication ou au cours du fonctionnement par l'usure et la détérioration des profils. La présence d'un déphasage entre ces défauts introduits des modulations sur les signaux d'erreur de transmission et de bruit.



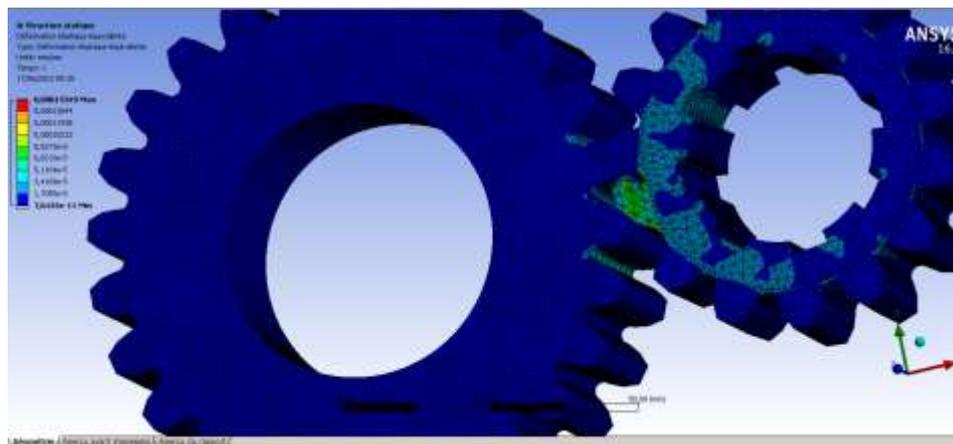
**Figure 4.19:** Contrainte équivalente

La figure 4.19 nous montre la répartition des déformations au niveau de dents du pignon étudié.

La valeur de la déformation se trouve au niveau de la dent en contact comme montré sur la figure 4.20. La valeur de la déformation est  $1.53 \times 10^{-6}$  mm sans cémentation



**Figure 4.20 :** Déformations sans cémentation



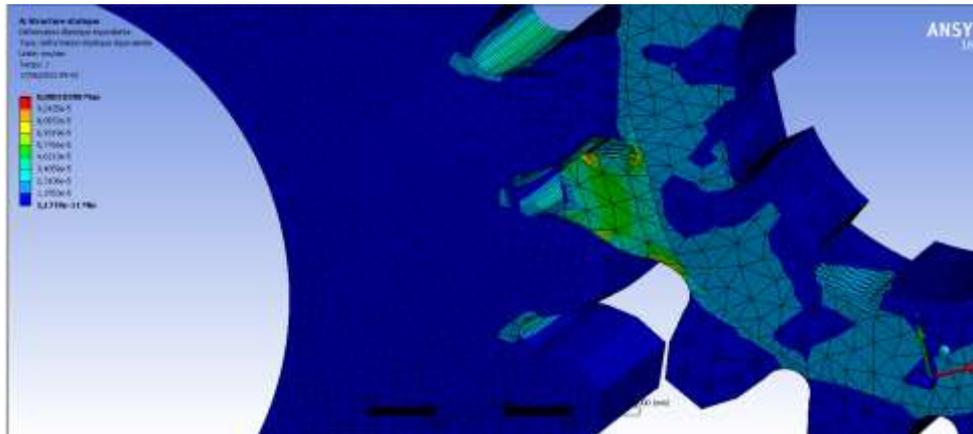
**Figure 4.21 :** Déformation équivalente avec cémentation

La figure 4.21 nous montre la répartition des déformations au niveau de dents du pignon étudié.

Ces déformations sont généralement sous-estimées alors qu'elles peuvent expliquer les différences de niveau sonore observées sur des transmissions d'architecture absolument identique.

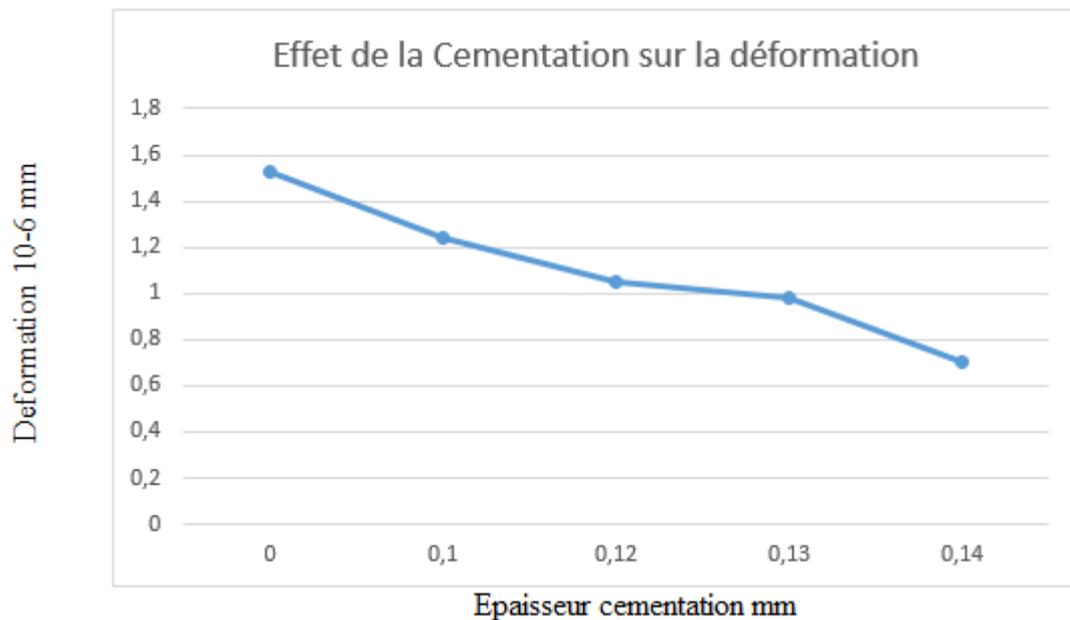
L'ensemble de ces défauts caractérise le positionnement relatif des deux roues dentées résultant du montage ou de la déformation de la structure lors de l'application de

chargement. Il est représenté par le défaut d'entraxe et les défauts de parallélisme entre les axes des roues.



**Figure 4.22 :** Déformation équivalente avec cémentation

La valeur de la déformation au niveau de la dent en contact montré sur la figure 4.22 nous indique que l'effet de la cémentation est positif.



**Figure 4.23 :** Effet de la cémentation sur la déformation

Nous remarquons que l'analyse numérique par éléments finis nous donne une prévision sur l'évolution de la déformation au niveau des dents de l'engrenage.

Cette déformation tend à décroître en fonction de l'épaisseur de la cémentation. Donc plus la cémentation est importante et plus la déformation est moindre.

Dans notre cas, le traitement thermique a une importance toute spéciale.

En effet, dans un engrenage, on peut distinguer les qualités géométriques et les qualités mécaniques.

Les premières, grâce aux procédés modernes de taillage et de finition des dentures, peuvent atteindre un très haut degré de perfection. Les secondes sont fonction des caractéristiques physiques du métal constituant l'engrenage.

Ces caractéristiques, dont les principales sont : la limite élastique, la résilience et la résistance à l'usure, dépendent du traitement thermique ; si l'on considère que ce traitement influe également sur les qualités géométriques par les déformations plus ou moins grandes qu'il peut entraîner, on aperçoit toute l'importance qu'il convient de lui attribuer dans la fabrication des engrenages.

Pour notre cas, nous n'avons pas effectués des essais mécaniques après la cémentation pour connaître les nouvelles caractéristiques : la limite élastique, la résilience et la résistance à l'usure.

Aussi, on remarque qu'après l'application de la cémentation que les dimensions finales définies par le service du bureau d'étude (dessin de définition) ne sont pas respectées.

C'est pourquoi la déformation dans le four est anticipée et la pièce avant traitement thermique n'est pas une denture parfaite (elle présente des écarts de direction et bombés non nuls). La déformation de la dent de la pièce réelle sera donc identifiée en réalisant la différence après et avant traitement thermique.

Aussi, et lors du fonctionnement des engrenages, on peut rencontrer des difficultés liées à plusieurs paramètres comme par exemple les déformations qui peuvent être d'origine rencontrées lors de l'application de la cémentation.

Si c'est le cas, on peut y remédier en utilisant les opérations suivantes :

- Chauffer les engrenages d'une manière aussi uniforme que possible,
- Choisir la température de cémentation donnant le minimum de déformation,
- Refroidir par un procédé diminuant le plus possible les déformations,
- Eviter l'oxydation.

Donc, et pour être conforme au dessin de définition, le procédé de rectification est exigé. Il constitue l'un des procédés primordiaux pour l'accomplissement des exigences de qualité supérieures.

Ce procédé agit surtout sur les roues dentées. Les exigences imposées pour ces produits en matière de transmission, de puissance et de silence de fonctionnement ne cessent de croître.



**Figure 4.24 :** Machine rectifieuse

Lors de l'application de ce procédé, la rectification du fond des dents serait néfaste, car elle introduirait une contrainte de tension superficielle défavorable sur la tenue des dents à la fatigue de flexion.

Une opération de rectification conduite avec une avance ou une profondeur de passe excessive peut entraîner des criques par suite d'échauffement localisé important.

Ces criques peuvent constituer des amorces de rupture, surtout si elles sont localisées vers le pied des dents et dans le sens longitudinal. Il convient d'être attentif pour les premières passes, c'est-à-dire jusqu'à ce que les déformations de traitement thermique aient été absorbées : une prise de matière locale trop forte est à craindre durant cette période.

Le choix de la meule de rectification est aussi un facteur prépondérant, de même que le fluide d'arrosage utilisé dans certains cas.

**CONCLUSION :**

Au vue des résultats constaté lors de la simulation de l'effet de cémentation sur les déformations et donc la dureté des dents nous pouvons dire que l'effet de la cémentation est positif et donne.

Une cémentation de 0.15mm d'épaisseur nous donne une augmentation de dureté de l'ordre de 38%.

Appliquée sur un acier à faible teneur en carbone, la cémentation est un moyen de durcissement superficiel permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface et une bonne résistance à l'usure grâce à l'obtention d'une martensite à haute teneur en carbone, tout en garantissant à cœur une bonne ductilité grâce à l'obtention d'une martensite à bas carbone (la transformation du cœur sera, selon la trempabilité de l'alliage et la section de la pièce à traiter, totale ou partielle).

Le traitement de cémentation appliqué aux aciers est un traitement thermochimique superficiel d'enrichissement en carbone réalisé en phase austénitique. Il est destiné à obtenir après refroidissement un durcissement superficiel par trempe. La cémentation est le moyen de durcissement superficiel qui permettant d'assurer une forte mise en précontrainte de compression de la surface grâce à l'obtention d'une couche à haute teneur en carbone.

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à bien comprendre l'effet des traitements thermiques sur une denture.

La première partie de notre recherche bibliographique a été consacré aux engrenages qui sont des éléments de machines qui permettent de transférer un mouvement de rotation d'un arbre à un autre. Cette recherche bibliographique a montré que différentes normes existent afin d'aider à la conception des engrenages.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique s'est basé sur la théorie des engrenages car tout système mécanique a pour principe de transmettre et d'adapter une énergie mécanique depuis une source d'énergie vers une application donnée.

La troisième partie a été concerné sur les traitements thermiques. Ainsi et de la même façon qu'il est nécessaire d'apporter des modifications de forme des dentures afin d'optimiser la répartition des efforts de contact, il est souvent nécessaire de réaliser des traitements thermiques sur les pièces fabriquées afin de leur permettre de mieux résister à ces efforts. Dans le cas des engrenages, il est en général primordial de durcir la surface de la denture, afin de résister aux efforts de contact tout en gardant une certaine ductilité à cœur. A cet effet, nous avons utilisé le procédé de cémentation.

La dernière partie a mis en évidence un exemple pratique. En pratique, les problèmes mécaniques rencontrés en générale pour les engrenages sont en particulier dus à deux causes principales à savoir une pression de contact élevée entre les dents ou un défaut de résistance au niveau du pied de la dent apparaît.

Parmes les effets thermiques :

1. Le développement progressif de la ferrite dans le cœur enrichit l'austénite au carbone. Ceci, freine et limite la transformation bainitique pendant la trempe et favorise la formation de la martensite en place.
2. Durant la formation de la bainite, les atomes de carbone en excès sont diffusés dans l'austénite, et augmentent ainsi leur stabilité chimique. Ceci, explique la relation directe entre la fraction de la bainite et l'austénite résiduelle.
3. L'amélioration de la résistance au choc est directement proportionnelle à la fraction du bainite et l'austénite résiduelle, et a l'inverse pour la fraction de la ferrite et la martensite. Le rôle du bainite est attribué à la structure intrinsèque avec énormément de joints des grains, ces derniers augmentent la résistance de la propagation des fissures. La présence de l'austénite résiduelle freine la propagation des fissures, contrairement, la ferrite et la martensite qui ont des joints de grain à différente dureté peuvent donner naissance à des fissures, par conséquent, la résilience va diminuer.

# **BIBLIOGRAPHI**

**Bibliographie**

- [1] M.Mir, Contribution à l'étude des engrenages, Thèse de Magister, Université Saad Dahlab de Blida 1, Blida, 2016
- [2] G.Henriot, Traité théorique et pratique des engrenages, tome 2, Edition DUNOD
- [3] Liebheer, Ehingen / DOAU Allemagne, Calcul technique préalable de la réalisation des roues dentées, Rapport interne du bureau d'études, N° 448, Mai 1971
- [4] A.Chevalier, Guides du dessinateur industriel, Hachette Technique, 2004
- [5] L.P.T.I. Saint Joseph La Joliverie, Train d engrenages.doc
- [6] M.S.Mecibah, Modélisation de calcul des roues d'échange dans une transmission mécanique par engrenage, Thèse de doctorat d'état en Génie mécanique, Université Mentouri de Constantine, Constantine, 2010
- [7] B.Bechkri, Analyse des défauts de denture et leurs influences sur les transmissions mécaniques par engrenages, Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2007
- [8] Orém Redon/ cours de construction, les engrenages
- [9] J. Mandel, propriétés mécanique des matériaux, Editions Eyrolles, 1978
- [10] C.Tournier, Traitements Thermiques, 246, 57-60, 1991
- [11]. G. Henriot, Traité théorique et pratique des engrenages », tome 1, Dunod, Paris,1968.
- [12] L.Faure, Aspect des dentures d'engrenages après fonctionnement, Senlis (Oise),CETIM, 1993, pp128
- [13] American Gear Manufacturers Association. Gear Materials and Heat Treatment Manual. AGMA Standard, C08. (2004)
- [14] Noussaiba, G. Fatma, Comportements mécaniques des aciers faiblement alliés avant et après cémentation (Thèse de master), 2016
- [15] M.M.Tadger, Thèse de Master, Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un acier cémenté, UBMAAnnaba, 2019/2020