
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

**ÉTUDE ET ANALYSE DES MÉCANISMES
D'ENDOMMAGEMENTS D'UN ENGRENAGE
LIÉS A UNE LUBRIFICATION INADÉQUATE.**

Préparé par :

LARBI MOHAMED ZAKARIA ET NOUAR YOUCEF KAMEL EDDINE

Soutenu publiquement le : 20 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

M. ELGUERRI Mohamed	Président
M. HAMMOU Mahmoud	Examineur
M. DEBBIH Senouci	Examineur
M. MAZARI Djamel	Encadreur

Année universitaire : 2023-2024

Dédicaces

À nos professeurs, Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre encadrant, M. Djamel Mazari, pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Sa disponibilité, son expertise et ses encouragements ont été d'une aide inestimable dans la réalisation de ce travail de recherche. Nous remercions également les membres du jury, notamment le président M. Elguerri Mohamed, ainsi que les examinateurs M. Hammou Mahmoud et M. Debbih Senouci, pour avoir accepté d'évaluer notre travail avec attention.

À nos familles, pour leur amour indéfectible, leur soutien inconditionnel et leurs sacrifices sans fin. À nos amis, pour leur encouragement constant et leurs précieux moments de détente qui ont allégé nos charges en particulier. À Larbi Mohamed Zakaria, pour notre collaboration fructueuse et notre détermination partagée. À Nouar Youcef Kamel Eddine, pour ton soutien inébranlable et ton engagement constant dans ce projet. Ce mémoire est aussi le fruit de notre partenariat solide et de notre persévérance commune.

À ma mère Mokhtari Ahlem, mon pilier de force et ma source d'inspiration infinie, à travers chaque ligne de ce projet, je célèbre ta résilience, ta sagesse et ton amour inconditionnel. C'est grâce à toi que je suis devenu celui que je suis aujourd'hui, et chaque réussite est le reflet de ton dévouement et de ton soutien indéfectible. À mes sœurs bien-aimées, Khadidja et Bouchra Amina, dont la présence chaleureuse et le soutien constant ont illuminé mon chemin à chaque étape de cette aventure. À mon père Larbi Benchohra, dont la sagesse et la guidance m'ont façonné en homme. Et à mon cher frère défunt, dont la mémoire continue d'inspirer mes aspirations les plus profondes. Ton courage et ta gentillesse restent gravés dans mon cœur, illuminant chaque étape de ma vie. (L.M.Z)

Liste des figures :

Figure 1: Interface d'un service maintenance.	3
Figure 2: Les différents types de maintenance	4
Figure 3: Graphe de la maintenance corrective.	5
Figure 4: Définition AFNOR (norme x 60010).	6
Figure 5: Graphe de la Maintenance préventive.	6
Figure 6: Définition AFNOR (norme x 60010).	7
Figure 7: Schéma d'un contact lubrifié.	11
Figure 8: Lubrification limite.	13
Figure 9: Lubrification limite	14
Figure 10: Lubrification mixte	14
Figure 11: Lubrification mixte.	15
Figure 12: Courbe de Stribek.	16
Figure 13: Composition d'huile.	19
Figure 14: Indice de viscosité	21
Figure 15: Le graissage	23
Figure 16: Exemple d'un dispositif de transmission par engrenages.....	26
Figure 17: Fonction globale d'un engrenage	27
Figure 18: caractéristiques géométriques principales.	28
Figure 19: Ligne d'action	29
Figure 20: Transmission de puissance par un train d'engrenage à deux étages	29
Figure 21: Pignon crémaillère.	30
Figure 22: schéma d'une dent de pignon	32
Figure 23: Engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales.	33
Figure 24: Engrenages à axes concourants.	35
Figure 25: Caractéristiques d'engrenage gauche (système roue et vis sans fin).	37
Figure 26: Les différents types d'usure : (a) courante, (b) adhésion, (c) abrasion.	48
Figure 27: Piqure évolutive.	49
Figure 28: Écaillage.	49
Figure 29: Défaut de grippage.....	50
Figure 30; Grippage modéré sur les flancs d'un engrenage cémenté trempé.....	51
Figure 31: Grippage généralisé et destructif d'une roue d'engrenage	51
Figure 32: Traces de grippage à froid sur les dents d'une couronne de treuil	52

Figure 33: Fissuration au pied de la dent.	53
Figure 34: Rupture par surcharge	53
Figure 35: Rupture par fatigue	54
Figure 36: Aspect caractéristique de la déformation du profil d'une dent sous	55
Figure 37: Usure normale.	56
Figure 38: Usure modérée.	57
Figure 39: Usure excessive d'un pignon.	57
Figure 40: La classification de modes d'usure.	59
Figure 41: Logiciel Ansys workbench	64
Figure 42: Conception de la géométrie.	65
Figure 43: Dimensionnement des arrêtes	67
Figure 44: Maillage après dimensionnement au point de contact des arrêtes	68
Figure 45: Maillage après dimensionnement au point de contact (Image rapprochée) ...	68
Figure 46: Structure statique, moment appliqué sur la face intérieure.	69
Figure 47: Graphe moment N.mm/S	70
Figure 48: Structure statique support fixe applique sur la face intérieure (lower gear) ..	70
Figure 49: Structure statique support sans frottement applique sur la face intérieure (upper gear)	71
Figure 50: Concentration contrainte équivalente Von Mises	72
Figure 51: Concentration contrainte équivalente Von Mises (image rapprochée)	73
Figure 52: Concentration contrainte équivalente von mises (image rapprochée)	73
Figure 53: Déplacement totale	74
Figure 54: Coefficient de sécurité outil de contact.	74
Figure 55: Coefficient de sécurité outil de contact.	75
Figure 56: Structure statique outil fatigue sensibilité	76
Figure 57: Duré de vie	76
Figure 58: Coefficient de sécurité outil de fatigue	77

Liste des tableaux :

Tableau 1: Régime de lubrification	13
Tableau 2: types des lubrifiants	17
Tableau 3: Propriétés de quelques lubrifiants liquides.	18
Tableau 4: Classification ISO des huiles selon leur viscosité.....	22
Tableau 5: Classification NLGI des graisses et leurs applications.....	24
Tableau 6: Caractéristique géométrique des engrenages Cylindriques à denture droite intérieur et extérieur.	31
Tableau 7: Caractéristiques d'engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales.....	34
Tableau 8: Caractéristiques d'engrenage à axes concourants.	36
Tableau 9: Caractéristiques d'engrenage à vis sans fin.....	38
Tableau 10: Origines et localisation des défauts	47
Tableau 11: Caractéristiques de l'engrenage.....	65

Sommaire

Dédicaces	2
Liste des figures :	3
Liste des tableaux :	5
Introduction Générale	10
Chapitre I	2
Revue de littérature (concepts de maintenance industrielle et de lubrification)	2
I.1. Introduction :	3
I.2. Généralités sur la maintenance :	3
I.2.1. Définition de la maintenance :	3
I.2.2. Évolution de la maintenance	3
I.3. Les différents types de maintenance :	4
I.3.1. La maintenance corrective :	4
I.3.2. La maintenance curative :	5
I.3.3. La maintenance palliative :	5
I.3.4. Maintenance préventive :	6
I.4. Buts de la maintenance préventive	8
I.5. Les fonctions de la maintenance :	8
I.5.1. La fonction de méthode :	9
I.5.2. La fonction ordonnancement :	9
I.5.3. La fonction de la planification préventive de maintenance :	9
I.5.4. La fonction Réalisation :	10
I.6. Les tâches de maintenance :	10
I.6.1. Le dépannage :	10
I.6.2. La réparation :	10
I.6.3. Le contrôle :	10
I.6.4. Les révisions :	11
I.7. La lubrification :	11
I.7.1. Définitions :	11
I.7.2. Rôle des lubrifiants :	11

I.8. Lubrification ponctuelle :	12
I.9. Lubrification continue :	12
I.10. Régimes de lubrification :	12
I.10.1 Lubrification limite :	13
I.10.2 Lubrification mixte :	14
I.10.3 Marche à sec :	15
I.11. Contact lubrifié :	15
I.12. Facteurs affectant l'épaisseur du film de lubrifiant :	16
I.13. Type des lubrifiants :	17
I.13.1. Lubrifiants liquides :	18
I.14. Les huiles lubrifiantes :	18
I.14.1. Nature des huiles et leurs compositions :	18
I.14.2. Propriétés caractéristiques des huiles :	19
I.15. Classification des huiles selon leur viscosité	21
I.16. Additifs :	22
I.17. Les graisses lubrifiantes :	22
I.18. Propriétés des graisses	23
I.19. Classification :	23
I.20. Conclusion :	24
.....	25
Chapitre II	25
Les engrenages et leur lubrification	25
II.1. Introduction :	26
II.2. Notions sur les engrenages :	26
II.3. Définition d'un engrenage :	26
II.4. Fonction globale	26
II.5. Eléments géométriques des roues dentées :	27
II.6. Principe de fonctionnement des engrenages :	28
II.7. Classification des engrenages	30
I.7.1 Engrenages parallèles à denture droite	30
II.7.2. Les engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales	32
II.7.3. Les engrenages coniques :	35
II.7.4. Engrenages gauches (système roue et vis sans fin).....	36

II.8. Choix des matériaux	38
II.9. Types des engrenages.....	39
II.10. Méthode de lubrification des engrenages :	39
II.10.1. Lubrification par barbotage	39
II.10.2. Lubrification par circulation	40
II.10.3. Lubrification par bain d'huile	40
II.10.4. Lubrification par brouillard d'huile	41
II.10.5. Lubrification par graisse	41
II.11. Les défauts de lubrification dans les engrenages :	41
II.12. Conclusion :	42
Chapitre III.....	43
Mécanisme d'endommagements des engrenages.....	43
III.1. Introduction :.....	47
III.2. Les différents types de détérioration des dentures d'engrenages :.....	47
III.3. Défauts répartis sur toutes les dents :.....	47
a) Usure abrasive et adhésive :.....	47
b) Pitting (piques) :.....	48
III.4. Les défauts localisés sur certaines dents :	49
a) Ecaillage :	49
b) Le grippage :	50
c) Fissure :.....	52
d) Fatigue des engrenages :.....	54
III.5. Les types d'usures :.....	54
III.5.1. Usure normale :	55
III.5.2. L'usure anormale :.....	56
III.5.3. Usure modérée :.....	56
III.5.4. Usure excessive et destructive :.....	57
III.5.5. Le rodage :.....	58
III.5.2. Les mécanismes d'usure :.....	58
III.5.2.1. Usure par abrasion :	58
III.5.2.2. Usure par transfert ou adhésion :	58
III.5.2.3. Usure par fatigues :.....	58
Conclusion :.....	59

Chapitre IV.....	60
Étude de cas Simulation d'un engrenage avec le logiciel Ansys Workbench.....	60
IV.1 Introduction :	63
IV.2. Description du logiciel :	63
IV.3. Type d'analyse :	64
IV.4. Géométrie :	65
IV.5. Données du matériau :	65
IV.6. Maillage de la dent :	67
IV.7. Conditions aux limites :	69
IV.8. Résultats et discussion :	71
IV.9. Plan de maintenance :	77
IV.10. Conclusion :	78
Conclusion Générale	79
Bibliographie :	77
Webographie	80
Résumé	82
ABSTRACT	82
ملخص	82

Introduction Générale

Introduction Générale

Le présent mémoire s'intitule "L'étude et l'analyse des mécanismes d'endommagement d'un engrenage liée à une lubrification inadéquate" et s'inscrit dans un contexte technologique avancé visant à améliorer la compréhension et la gestion des défauts d'engrenages. Les engrenages sont des composants essentiels dans de nombreuses applications industrielles, où leur performance et leur fiabilité dépendent en grande partie de la qualité de leur lubrification.

Une lubrification inadéquate peut entraîner des défauts significatifs et des dommages aux engrenages, affectant non seulement leur efficacité, mais aussi la durée de vie des machines dans lesquelles ils sont utilisés. Ce mémoire se compose de quatre chapitres, chacun abordant un aspect crucial de cette problématique.

Le premier chapitre se concentre sur la maintenance industrielle et la lubrification. Il aborde les différentes philosophies de maintenance et leur importance pour assurer le bon fonctionnement des équipements mécaniques, avec un focus particulier sur les techniques et les stratégies de lubrification.

Le deuxième chapitre traite des engrenages et de leur lubrification. Il présente les types d'engrenages, leurs fonctions, et les critères essentiels pour une lubrification optimale. Ce chapitre examine également les défauts de lubrification, leurs causes, et les conséquences potentielles sur les engrenages.

Le troisième chapitre explore en profondeur les mécanismes d'endommagement des engrenages liés à une lubrification inadéquate. Il détaille les différents types de dommages, les processus de dégradation et les signes précurseurs de défaillance que les ingénieurs et techniciens doivent surveiller.

Enfin, le quatrième chapitre présente une étude de cas basée sur la simulation d'un engrenage utilisant le logiciel ANSYS Workbench. Cette étude vise à illustrer l'impact d'une lubrification inadéquate sur les performances et la durabilité des engrenages. Les résultats obtenus permettent de proposer un plan de maintenance préventive pour éviter les dégâts futurs et améliorer la fiabilité des systèmes mécaniques.

Chapitre I

Revue de littérature (concepts de maintenance industrielle et de lubrification)

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous examinerons les différents types de maintenance, y compris la maintenance préventive, corrective et prédictive, et analyserons leur rôle dans la gestion efficace des équipements industriels. Nous aborderons également les principes de la lubrification et les divers types de lubrifiants disponibles

I.2. Généralités sur la maintenance :

I.2.1. Définition de la maintenance :

L'AFNOR a donné une première définition normative de la maintenance en 1994, avec la norme NF X 60-010. [1]

Elle se définit comme étant : « toutes les actions visant à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié ou à assurer un service spécifique ». En ajoutant un complément avec le document X 60-000, il devient plus précis. « Maintenir efficacement, c'est garantir les opérations au meilleur prix ». Depuis 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition, maintenant européenne (NF EN 13306 X 60-319) : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion réalisée tout au long du cycle de vie d'un bien, avec pour objectif de le maintenir ou de le rétablir dans un état où il peut accomplir la fonction nécessaire ». [2]

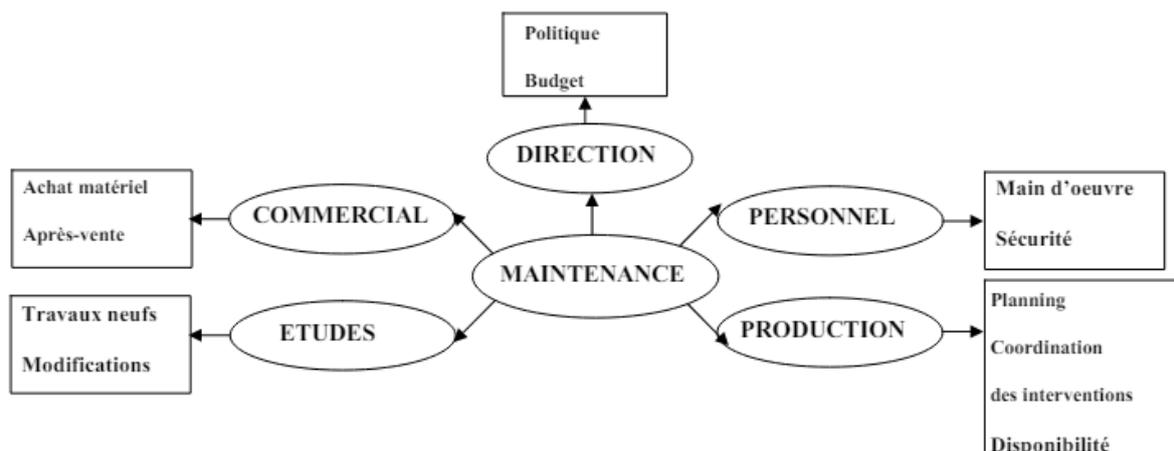


Figure 1: Interface d'un service maintenance.[3]

I.2.2. Évolution de la maintenance

Depuis la Seconde Guerre mondiale, la gestion de la maintenance a connu trois générations : la première génération a connu des interruptions peu importantes, avec une priorité moindre donnée à la prévention des défaillances, la deuxième génération a connu l'introduction de

révisions à intervalles fixes sur les équipements, entraînant une augmentation importante des coûts de maintenance, et la troisième génération, qui a commencé dans les années 1970, a été marquée par une remise en question des pratiques traditionnelles en raison des transformations industrielles et des nouvelles attentes.[4]

I.3. Les différents types de maintenance :

Deux catégories de maintenance sont présentes : la maintenance corrective et la maintenance préventive.

Elles se distinguent par le moment où elles interviennent sur la panne. La première forme de maintenance est mise en place après la survenue de la panne, tandis que la seconde forme s'applique avant celle-ci.

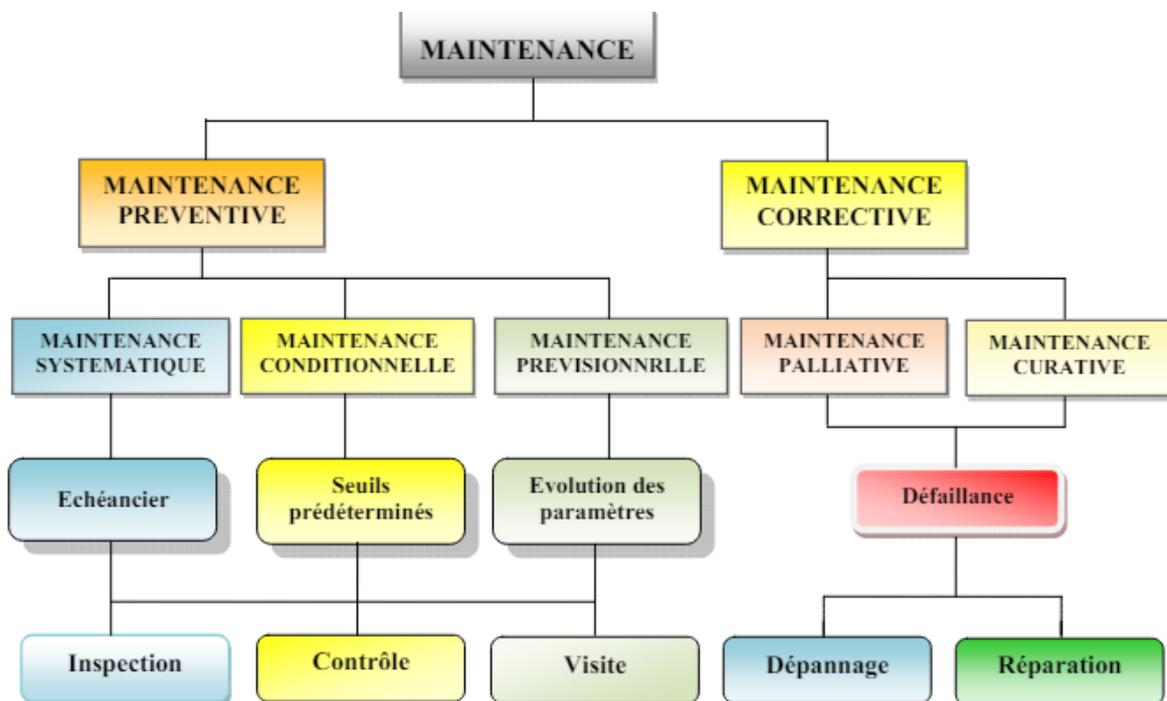


Figure 2: Les différents types de maintenance [5]

I.3.1. La maintenance corrective :

D'après la norme AFNOR NF 13306 X 60-319, la maintenance corrective consiste à effectuer une « maintenance après la détection d'une panne et visant à rétablir un bien dans un état permettant de l'utiliser ». [6]

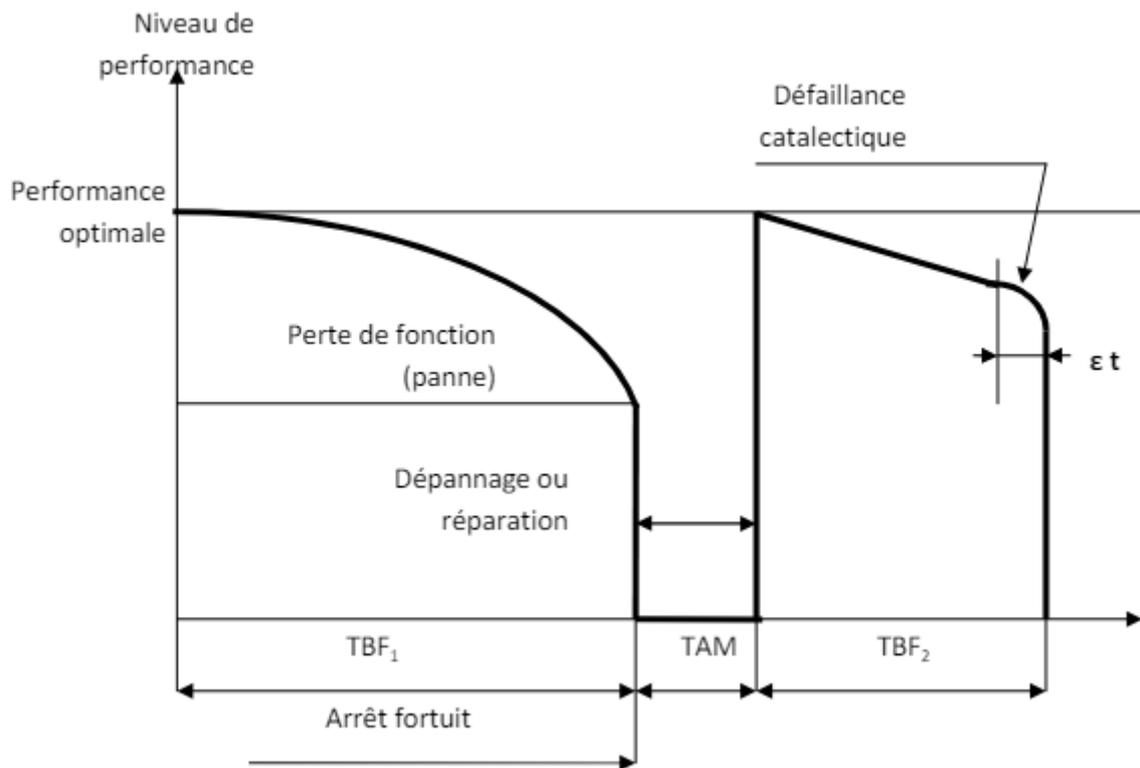


Figure 3: Graphe de la maintenance corrective. [3]

t : taux de défaillance.

TBF₁ : le temps de bon fonctionnement de la première fois.

TAM : temps propre d'indisponibilité. Cause de défaillance au d'action de maintenance préventive (changement, systématique, les roulements. Les courroies).

L'entretien correctif peut inclure :

I.3.2. La maintenance curative :

La maintenance curative implique la restauration de l'équipement et est définitive. Après cette intervention, l'équipement concerné retrouve les caractéristiques qu'il avait avant l'apparition du problème. [7]

I.3.3. La maintenance palliative :

Consiste à remettre en état temporaire le matériel qui a subi un dysfonctionnement : Il s'agit d'un soutien. La plupart du temps, cette maintenance est liée à des systèmes qui ne nécessitent pas d'impératifs de sécurité.[7]

I.3.4. Maintenance préventive :

D'après la norme AFNOR NF EN 13306 X 60-319, il s'agit d'une "maintenance effectuée à des intervalles préétablis ou selon certains critères spécifiés, visant à diminuer les risques de défaillance ou de détérioration du fonctionnement d'un bien" [8].

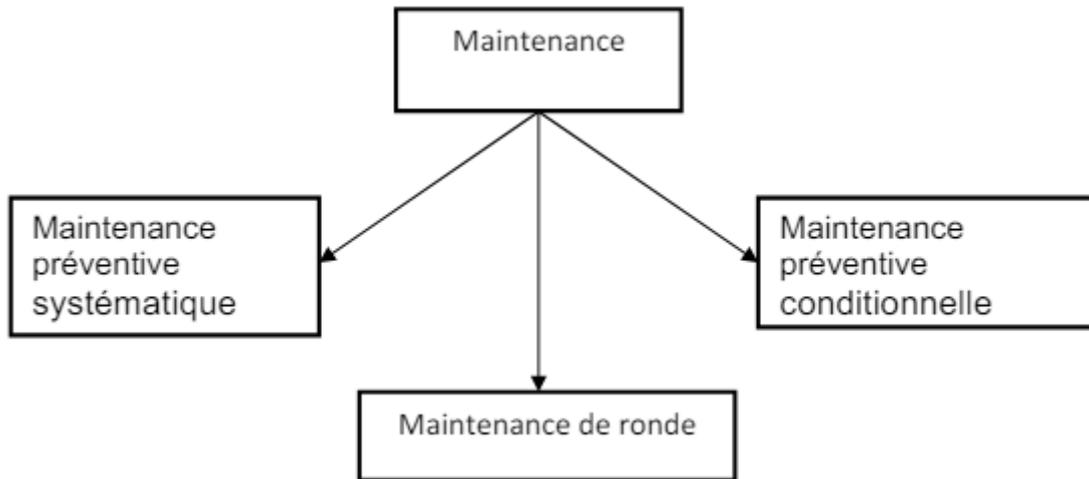


Figure 4: Définition AFNOR (norme x 60010). [3]

Ainsi, il s'agit d'une intervention préparée et planifiée en fonction de divers paramètres afin d'éviter la possibilité d'une défaillance identifiée.

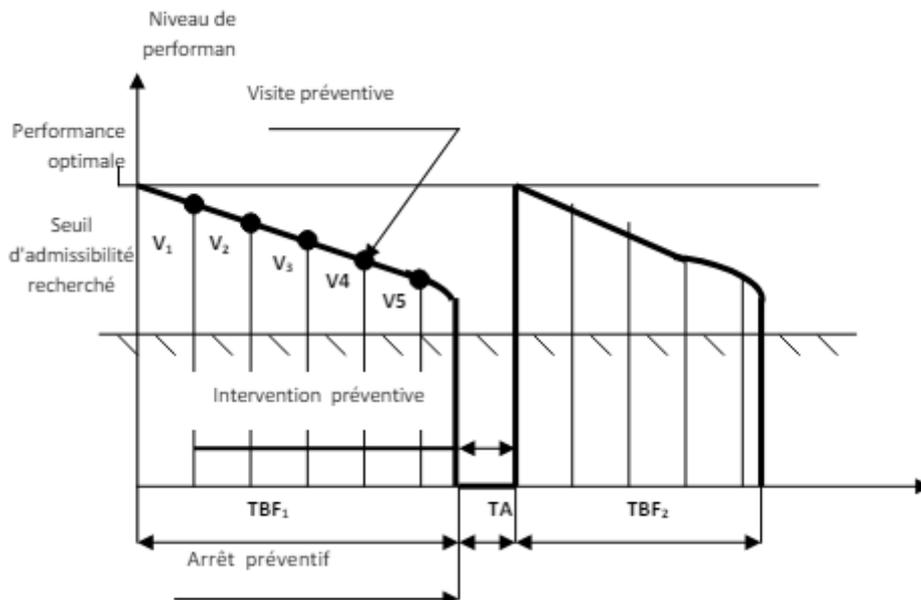


Figure 5: Graphe de la Maintenance préventive. [3]

TBF1 : Temps de bon fonctionnement n°1.

TA : Le temps d'arrêt.

TBF2 : Temps de bon fonctionnement n°2.

Trois principales formes de maintenance préventive existent :

I.3.4.1. Maintenance préventive systématique :

Il s'agit d'une maintenance réalisée selon un calendrier établi en fonction du temps ou du nombre d'unités d'utilisation (nombre prédéfini d'unités d'utilisation). Bien que le temps soit l'unité la plus utilisée, d'autres unités peuvent être prises en compte comme : la quantité de produits conçus, la longueur de produits conçus, la distance parcourue, la masse de produits conçus, le nombre de cycles réalisés.[9]

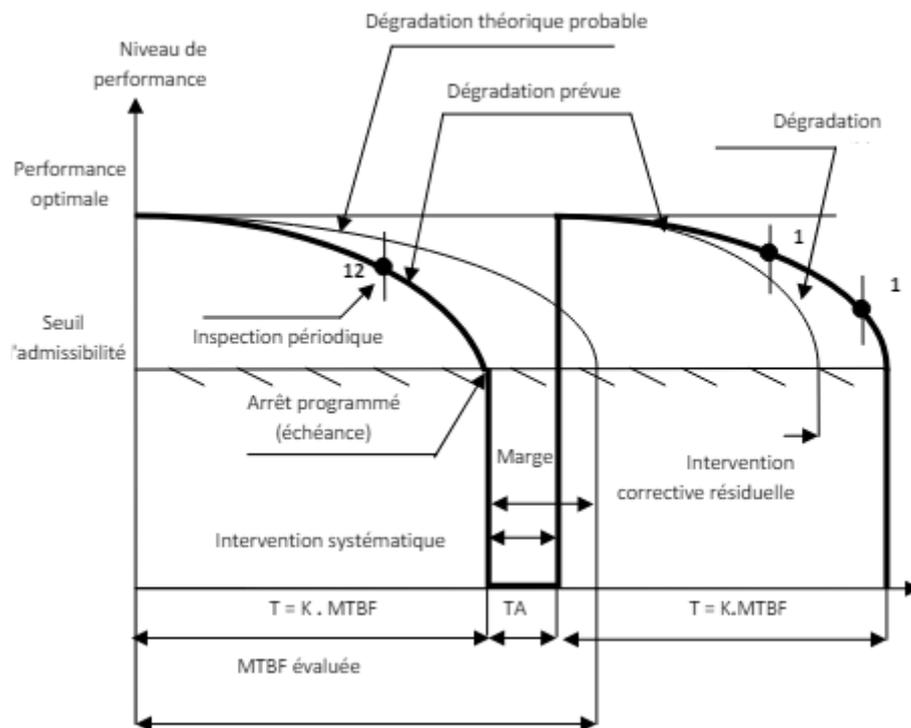


Figure 6 : Définition AFNOR (norme x 60010). [3]

I.3.4.2. Maintenance préventive conditionnelle :

Un type de maintenance préventive qui est conditionné par un événement prédéterminé (autodiagnostic, données d'un capteur, mesure d'une usure, etc.) qui révèle l'état de dégradation du bien. En d'autres termes, la maintenance est conditionnée par le dépassement d'un seuil prédéfini significatif de dégradation du bien. [9]

I.3.4.3. Maintenance préventive prévisionnelle :

Maintenance préventive qui repose sur l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres importants de la détérioration du bien, afin de retarder et de planifier les interventions. [9]

I.4. Buts de la maintenance préventive

Les buts de la maintenance préventive comprennent les éléments suivants :

- Améliorer la fiabilité d'un équipement, ce qui permet de diminuer les pannes en service
- Effectuer une augmentation de la durée de vie d'un équipement.
- Mettre à jour l'organisation des travaux, ce qui améliore les liens avec la production.
- Afin de diminuer et de réguler la charge de travail.
- Mettre en pratique la gestion des stocks (consommations anticipées).
- Garantir la sécurité (réduire les imprévus dangereux).
- En général, en diminuant la proportion de "situations imprévues", on peut améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours source de tension).
- Amélioration de la disponibilité, diminution des coûts de défaillance. [10]

I5. Les fonctions de la maintenance :

D'après la (norme FD X60-000), l'objectif principal de la fonction de maintenance est de garantir la disponibilité de l'outil de production en prenant des mesures préventives et correctives, c'est-à-dire sa capacité à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation spécifiques, pendant une période spécifique. En d'autres termes, la principale tâche de la maintenance consiste à gérer de manière optimale les équipements de production en fonction des objectifs spécifiques de l'entreprise.[11]

La maintenance peut être considérée comme jouant deux rôles principaux :

Rôle principal : Vérification de l'outil de production.

- Assurer de garantir une disponibilité optimale des équipements de production (machines, machines-outils, fours, installations et engins de levage et de manutention).
- Assurer la maintenance des appareils de mesure ou de contrôle (opérations de calibration, d'étalonnage, d'entretien ou de réparation)

Rôle N°2 : Assurer la maintenance des installations.

- Maintenir et préserver l'état de la structure des bâtiments.
- Assurer le maintien des systèmes de ventilation, de chauffage, de climatisation et d'éclairage.
- Préserver les dispositifs de sécurité et de préservation de l'environnement tels que les appareils d'évacuation d'air et les ventilateurs.
- Gérer et superviser les projets liés à l'hygiène, à la sécurité, à la pollution, à la gestion de l'énergie.

I.5.1. La fonction de méthode :

Les services méthodes se concentrent sur la préparation, qu'il s'agisse de maintenance corrective ou préventive. La maintenance corrective implique d'anticiper les risques et les problèmes potentiels, tandis que la maintenance préventive consiste à créer, évaluer et optimiser un plan de maintenance pour un équipement. Pour la maintenance externalisée, ils définissent les règles et procédures pour les prestataires et les soutiennent sur place. En outre, ils proposent des améliorations techniques et organisationnelles, fournissent une assistance technique et aident au diagnostic. Les agents méthodes doivent être en phase avec le terrain tout en gardant une perspective globale.[11]

I.5.2. La fonction ordonnancement :

L'ordonnancement en maintenance consiste à coordonner les actions, planifier les travaux, optimiser les ressources et contrôler l'avancement. Il s'agit de définir précisément quand et où un personnel équipé accomplira une tâche en harmonie avec d'autres. La principale difficulté réside dans la gestion des pannes fortuites. Certains services de maintenance, dont 90% des activités sont accidentelles, ne planifient pas leurs opérations. Cependant, une politique de prévention peut réduire ce taux à moins de 50%, rendant les interventions programmables. [11].

I.5.3. La fonction de la planification préventive de maintenance :

1. Nettoyer complètement les équipements
2. Valoriser les équipements
3. Identifier la pertinence des équipements
4. Élaborer un programme de maintenance
5. Gestion des pièces détachées
6. Améliorer la qualité de l'entretien [12]

I.5.4. La fonction Réalisation :

L'objectif est de mettre en place les mesures établies dans le dossier de préparation conformément aux normes en vigueur, afin d'atteindre les résultats escomptés dans les délais prévus par l'ordonnancement. [13]

I.6. Les tâches de maintenance :

I.6.1. Le dépannage :

Le dépannage vise à restaurer rapidement un équipement en panne, souvent avec des solutions temporaires qui peuvent nécessiter une réparation ultérieure. Il nécessite une bonne compréhension du matériel et de ses défaillances pour un diagnostic précis. Les interventions sont rapides et parfois répétées. Pour réduire les coûts, certaines maintenances planifient ces interventions et évaluent leur efficacité. Le dépannage est crucial pour les équipements en fonctionnement continu, où les exigences de production ne permettent pas l'interruption prolongée. [14]

I.6.2. La réparation :

La maintenance corrective définitive intervient après une panne ou une défaillance. Elle peut être effectuée immédiatement après l'incident, après un dépannage, ou après une maintenance préventive. Cette réparation est permanente et vise à garantir les performances d'origine de l'équipement. Toutes les installations sont concernées. [14]

I.6.3. Le contrôle :

Les vérifications, les visites et les inspections sont indispensables afin de contrôler l'évolution de l'état réel du bien. Les opérations de maintenance préventive sont réalisées de manière continue ou à des intervalles prédéfinis ou non, calculés en fonction du temps ou du nombre d'unités d'utilisation. [14]

- **Les inspections :** activités de surveillance qui impliquent de détecter régulièrement des anomalies et de réaliser des ajustements simples sans avoir besoin d'outils spécifiques, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

- **Les visites :** actions de suivi qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, se déroulent à une fréquence spécifique.

I.6.4. Les révisions :

Un ensemble d'exams, de contrôles et d'interventions est effectué pour protéger un bien contre les défaillances majeures sur une période déterminée ou pour un nombre spécifique d'unités d'utilisation. Il est crucial de distinguer les révisions partielles des révisions générales selon l'étendue des opérations, qui incluent l'installation de divers sous-ensembles. Le terme "révision" ne doit pas être confondu avec "visites", "contrôles" ou "inspections". [14]

I.7. La lubrification :

I.7.1. Définitions :

La lubrification est un ensemble de procédés qui permettent de diminuer le frottement, l'usure entre deux éléments en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre, ce qui permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique produite par ce frottement et d'éviter la corrosion. La lubrification permet de modifier le coefficient de frottement entre deux éléments pour faciliter le glissement ou le roulement entre eux, en évitant ou en minimisant l'usure et les échauffements.

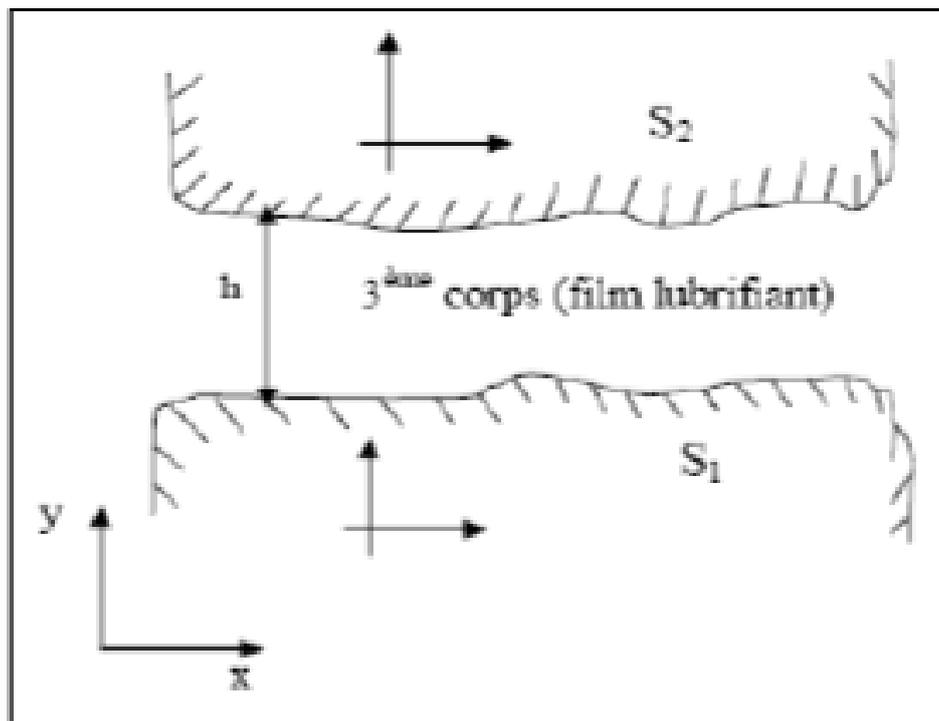


Figure 7 : Schéma d'un contact lubrifié. [15]

I.7.2. Rôle des lubrifiants :

Les lubrifiants remplissent différentes fonctions essentielles :

1. Minimiser les frottements dans les machines, ce qui permet d'économiser de l'énergie, car l'énergie de frottement est entièrement dissipée en chaleur. Le coefficient de frottement diminué entraîne une baisse des températures de fonctionnement des dispositifs. (Fonction principale)
2. Prévenir toute forme d'usure des surfaces frottantes et les préserver de la corrosion et de la rouille. (Fonction principale)
3. Réduire la chaleur produite dans le contact des machines en les refroidissant. (Fonction secondaire)
4. Assurer la protection contre les gaz, les liquides et les contaminants solides. (Fonction secondaire)
5. Maintenir les surfaces et les circuits propres en éliminant les produits indésirables tels que la poussière et les débris d'usure. (Fonction secondaire)
6. Transmettre l'énergie à travers les réseaux d'eau.
7. Capter les chocs et diminuer le niveau de bruit.
8. Gérer l'oxydation afin d'éviter les variations de viscosité. [16]

I.8. Lubrification ponctuelle :

La première méthode de lubrification consiste à appliquer le lubrifiant manuellement avant ou pendant le mouvement. Cela peut être fait en déposant des gouttes d'huile avec une burette, en utilisant de la graisse avec les doigts ou en l'appliquant avec un pinceau. Cette méthode est utilisée pour lubrifier des éléments comme les chaînes de vélo ou les gonds de porte, et peut également être réalisée à l'aide d'un aérosol (bombe) pour une projection plus précise. [17]

I.9. Lubrification continue :

La lubrification continue fournit régulièrement du lubrifiant aux organes en mouvement grâce à un réseau de conduites et à une pompe. Une fois utilisé, le lubrifiant est renvoyé au récipient pour être refroidi, puis est passé par un filtre afin de se débarrasser des impuretés.

I.10. Régimes de lubrification :

- Lubrification limite
- Lubrification mixte
- Lubrification élasto-hydrodynamique
- Lubrification hydrodynamique

Tableau 1: Régime de lubrification [17]

Type de lubrification	Exemples	Caractéristiques	Facteur de lubrifiant
Limite/mixte	Charges élevées Vitesses réduites	Frottement et usure élevés Contact métallique	Anti-usure ou extrême pression Additifs requis
Élasto-hydrodynamique	Paliers à roulement Engrenages très chargés	Frottement et usure faibles Fin film d'huile haute pression	Changement de viscosité sous l'effet de la pression
Hydrodynamique	Paliers lisses Segments/chemises de piston Glissières	Frottement et usure faibles Film d'huile épais	Changement de viscosité sous l'effet de la température

On se focalisera seulement sur les 2 régimes suivants :

I.10.1 Lubrification limite :

Dans cette configuration, les deux surfaces en mouvement relatif sont directement proches, ce qui crée une surface de contact significative. L'efficacité du lubrifiant diminue alors, car l'épaisseur moyenne du film est beaucoup plus faible que la rugosité.

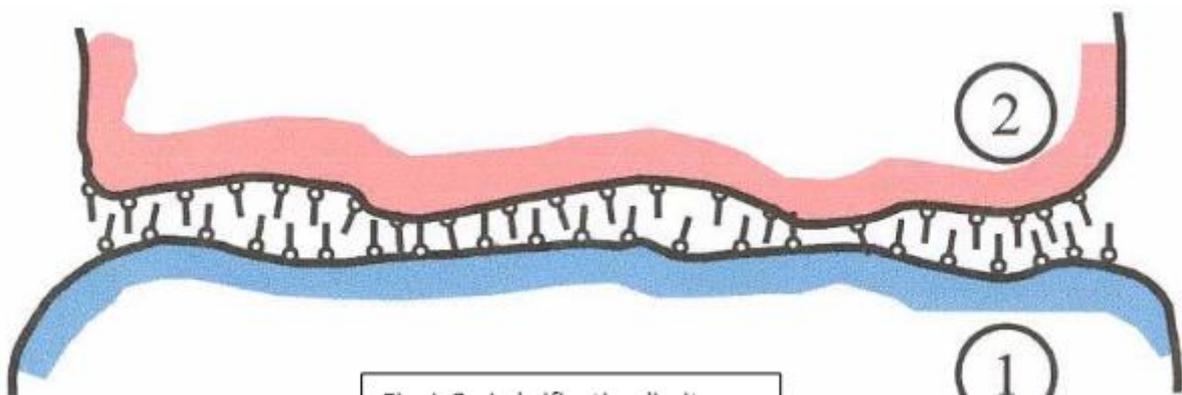


Figure 8 : Lubrification limite. [18]

Le régime est encouragé par des vitesses réduites, des viscosités de l'huile faibles et des pressions de contact élevées, le coefficient de frottement peut alors devenir très élevé ($f \approx 0.03$ à 0.2)

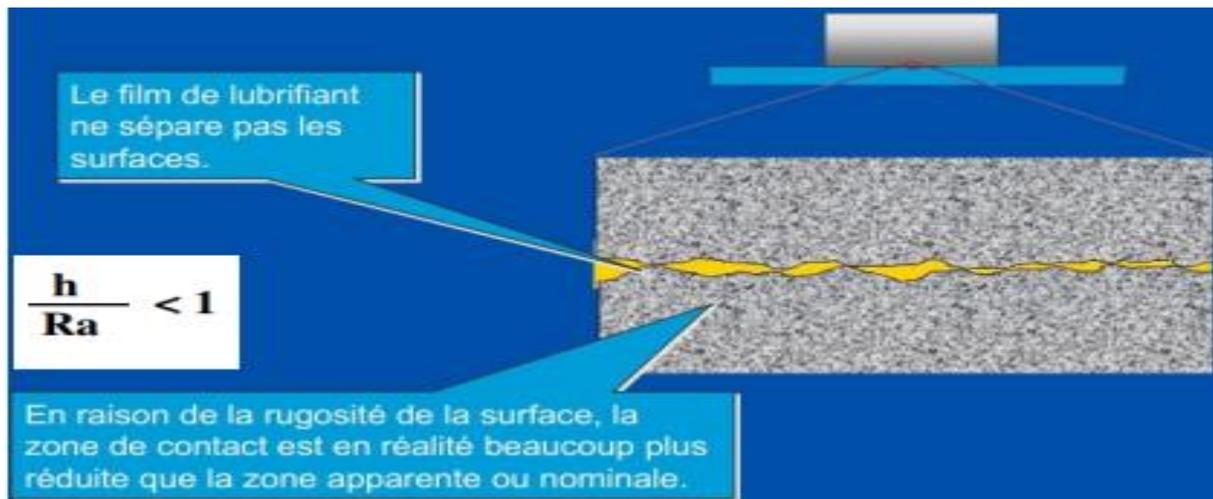


Figure 9: Lubrification limite [17]

I.10.2 Lubrification mixte :

En cas d'augmentation de la force normale ou de l'insuffisance de la viscosité du lubrifiant, le contact entre dans un état de lubrification mixte.

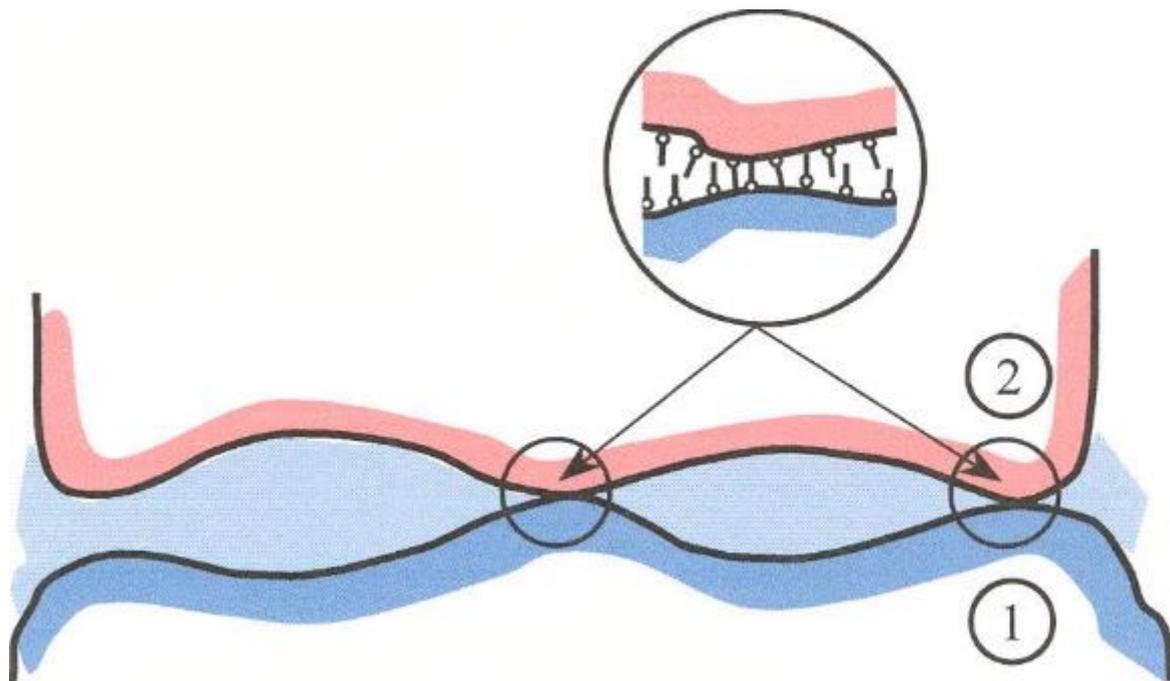


Figure10: Lubrification mixte [18]

Il y a donc une épaisseur du film liquide qui correspond à la rugosité moyenne de la surface et certaines aspérités entrent en contact, le frottement ($f \approx 0.04$ à 0.1) et l'usure sont réduits.

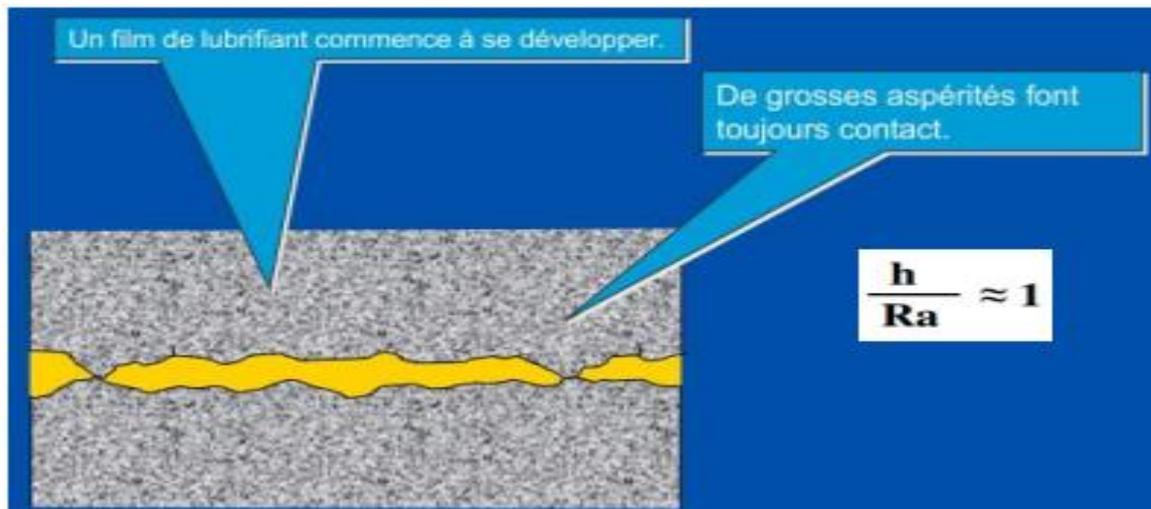


Figure11: Lubrification mixte. [17]

I.10.3 Marche à sec :

La marche à sec, aussi appelée lubrification inadéquate, apparaît lorsque de l'air est présent dans la chambre du rotor, ce qui fait que les éléments rotatifs ne sont ni refroidis ni lubrifiés. La marche à sec aboutit très rapidement à la destruction de la pompe.

I.11. Contact lubrifié :

Dans les contacts lubrifiés, un film protecteur se forme entre les surfaces en contact, aidant à les séparer. Les différents régimes de lubrification dépendent des pressions de contact et de la vitesse relative des surfaces. Ces régimes sont ensuite décrits pour les contacts surfaciques et hertziens, avec des exemples de mécanismes lubrifiés pour illustrer ces différents types de contacts.

Pour classifier les divers phénomènes de lubrification, il est pratique d'utiliser la courbe de Stribeck, qui a été initialement présentée en 1902 pour un palier lisse, à la fois pour les contacts surfaciques et hertziens.[19]

La courbe de Stribeck est généralement représentée par un graphique où :

L'axe des abscisses (x) représente le nombre de Sommerfeld, qui est une fonction de la vitesse de glissement, de la viscosité du lubrifiant et de la charge appliquée.

L'axe des ordonnées (y) représente le coefficient de frottement.

Importance de la Courbe de Stribeck :

Optimisation des Lubrifiants : La courbe de Stribeck permet de choisir les lubrifiants et les conditions de fonctionnement optimaux pour minimiser le frottement et l'usure.

Conception de Matériaux : Elle aide à concevoir des matériaux et des surfaces avec des propriétés adaptées aux différents régimes de lubrification.

Maintenance : En comprenant les différents régimes de lubrification, on peut mieux prévoir les besoins en maintenance et en remplacement des composants mécaniques.

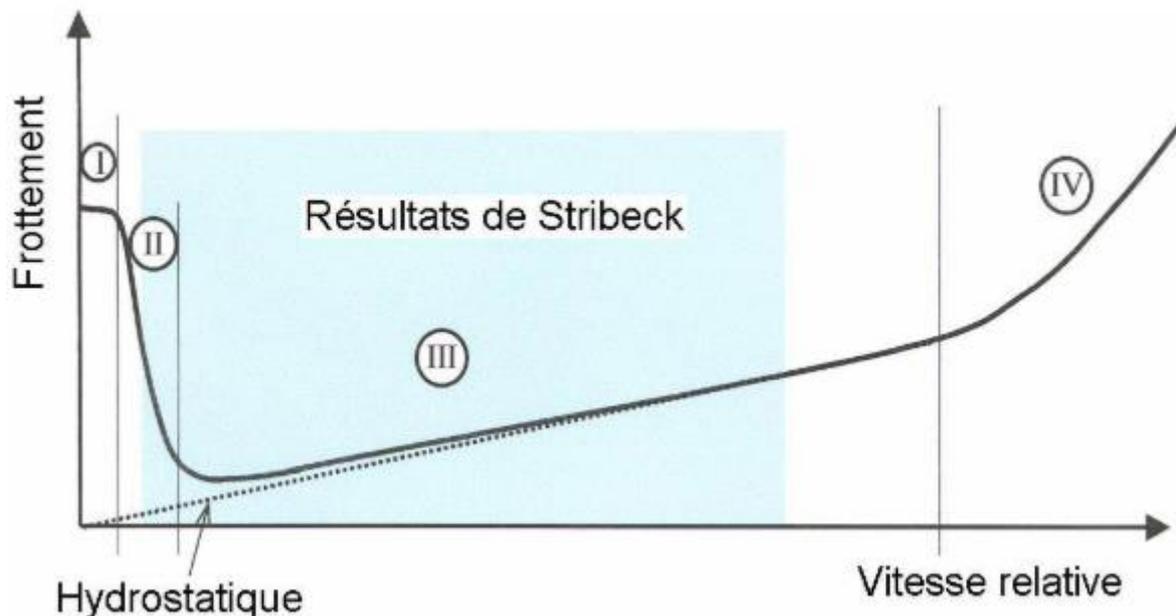


Figure12: Courbe de Stribek. [18]

$$S = \frac{v_{gl} \cdot \eta}{F_N}$$

η : Viscosité du lubrifiant, v_{gl} : Vitesse de glissement, F_N : Force normale

La courbe de Stribeck est un outil fondamental en ingénierie mécanique et en tribologie pour comprendre et optimiser les interactions entre surfaces en mouvement relatif. Elle permet de réduire les pertes d'énergie dues au frottement, d'augmenter la durée de vie des composants et d'améliorer l'efficacité globale des systèmes mécaniques.

I.12. Facteurs affectant l'épaisseur du film de lubrifiant :

- **Charge** : plus la charge est élevée, plus le film est fin.
- **Vitesse** : Quand la vitesse d'une surface augmente par rapport à une autre, cela entraîne une augmentation de l'épaisseur du film de lubrifiant.

Chapitre I : Revue de littérature (concepts de maintenance industrielle et de lubrification)

- **Viscosité** : Les lubrifiants avec une viscosité accrue créent des films plus épais.
- **Pression** : Augmentation de la viscosité avec la pression. Les pressions de 280 à 350 bars n'ont guère d'impact sur la viscosité. On ne considère pas la pression comme un élément essentiel pour les paliers lisses moyens.

I.13. Type des lubrifiants :

On peut distinguer les lubrifiants selon leur origine, animale, végétale, minérale ou synthétique, ou selon leur présentation :

Tableau 2: types des lubrifiants [17]

	animale	végétale	minérale	synthétique
<i>Liquides</i>	oléines, huiles de lard, de pied de bœuf ou de mouton, etc., très onctueuses, huiles de poisson, de baleine, de phoque, glycérine autrefois utilisée pour son point de congélation très bas.	huiles semi siccatives de coton, de colza, huiles non siccatives d'arachide, d'olive, et surtout de ricin intéressante par sa forte viscosité et la possibilité de l'utiliser dans une large gamme de températures.	huiles de houille, de schiste (Roche sédimentaire ou métamorphique qui se débite en feuillets), utilisables comme produits de remplacement, et surtout huiles de pétrole.	silicones, polyglycols, esters phosphoriques, esters aliphatiques, polyoléfines, métaux liquides
<i>Pâteux</i>	oléo stéarines, suifs, suintines et brais résultant du traitement de la laine, lanoline très utilisée dans les produits antirouille car elle absorbe l'eau ;	huiles de palme, de coco et de coprah, liquides aux températures tropicales mais pâteuses dans les régions froides ;	vaseline	verres, borates et oxyde de bore B2O3 (pâteux à chaud), graisses silicones.
<i>Solides</i>	stéarine, dont l'usage est restreint à la formulation de graisses très dures.	résines et colophanes tirées du pin, pouvant résister à l'eau	soufre utilisé autrefois pour sauver les paliers endommagés, talc, mica, bisulfures de molybdène et de tungstène, graphit, sulfure de plomb, oxyzinc	olééthylènes, polytétra fluoroéthylène (PTFE), savons (stéarates de zinc, de calcium, d'aluminium), oxyde de plomb (PbO), disulfure de tungstène,

I.13.1. Lubrifiants liquides :

Tableau 3: Propriétés de quelques lubrifiants liquides. [17]

Propriétés de quelques lubrifiants liquides

Lubrifiant	Stabilité thermique [°C]	Stabilité oxydation [°C]	Viscosité cinématique [cSt] à [°C]			Point d'éclair [°C]	Point écoulement [°C]	Gravité spécifique
			-20	40	100			
● Huile minérale	135		170	19	5,5	105	-57	0,86
● Diesters	210		193	13	3,3	230	-60	0,90
● Phosphate ester	240		85	11	4,0	180	-57	1,09
● Silicate ester	250		115	12	4,0	185	-65	0,89
● Silicones								
Phenyl methyl	280	240	850	74	25	260	-70	1,03
Fluoro	260	220	20 000	190	30	290	-50	1,20

I.14. Les huiles lubrifiantes :

I.14.1. Nature des huiles et leurs compositions :

Les huiles de lubrification se composent de diverses huiles essentielles et d'un certain pourcentage d'additifs. Les additifs sont ajoutés de manière adéquate afin d'améliorer les caractéristiques naturelles des huiles et de leur donner des caractéristiques de lubrification. Les principales sources d'huiles de base sont des huiles minérales extraites du pétrole ou synthétiques [20].

On nomme deux types d'huiles :

● **Les huiles paraffiniques ont :**

1. Un point d'écoulement entre -17,8 et -6,7°C.
2. Une viscosité variant de façon moyenne avec la température (VI 85 à 100)

● **Les huiles naphthéniques ont :**

1. Une densité plus faible
2. Un point d'écoulement entre -50 et -12°C
3. Une viscosité variant de façon importante avec la température (VI 0 à 60)



Figure13: Composition d'huile. [21]

I.14.2. Propriétés caractéristiques des huiles :

Un lubrifiant conçu pour une application spécifique doit posséder des caractéristiques spécifiques à cet usage. Ces caractéristiques sont mentionnées dans un manuel, une norme ou une spécification. Dans les fiches, certaines sont reprises sous forme de résumé techniques à destination des usagers. [22]

1. Couleur
2. Masse volumique
3. Densité

4. Viscosité :

La viscosité des huiles est cruciale pour évaluer les pertes de frottement, la capacité de charge et l'épaisseur du film d'huile. Elle mesure la résistance des molécules à se déplacer par glissement dans le liquide, anciennement appelée coefficient de frottement interne. [23].

I.14.2.1. Viscosité dynamique :

La viscosité dynamique, également appelée viscosité absolue, est la viscosité utilisée pour évaluer l'épaisseur du film d'huile. Selon la loi de Newton, on peut déduire que l'écoulement laminaire d'un fluide visqueux entre une surface S mobile animée d'une vitesse u et une surface fixe située à une distance h égale à l'épaisseur du film d'huile est réglé.

On a :
$$\frac{F}{S} = \eta \frac{du}{dh}$$

Le Pascal.seconde (Pa.s) est l'unité de viscosité dynamique dans le système international (SI). Dans le système CGS précédent, l'unité était le poise (P). Par exemple, la viscosité dynamique de l'eau à une température de 20°C est de 1cP = 1mPa.s.

I.14.2.2. Viscosité cinématique :

Les fiches techniques des lubrifiants indiquent la viscosité cinématique comme la viscosité. La mesure du temps d'écoulement d'un volume d'huile spécifique dans un tube capillaire est déduite de la loi de poiseuille [22].

Il existe une relation entre les deux viscosités cinématique et dynamique :

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\eta} / \boldsymbol{\rho}$$

Avec :

ρ : masse volumique (kg/m³); $\boldsymbol{\eta}$: viscosité dynamique (Pa. s); \mathbf{K} : constante du tube;

\mathbf{t} : temps d'écoulement de l'huile (s)

La viscosité cinématique est exprimée en mm²/s ou en Stokes « St » (1St = 1cm²/s)

I.14.2.3. Indice de viscosité (IV) :

Le VI est une méthode pour évaluer la corrélation entre la viscosité et la température. On l'a créé à partir de deux huiles raffinées en utilisant la même méthode à l'acide sulfurique :

1. Une huile paraffinique minérale issue des champs de pétrole de la Pennsylvanie aux États-Unis. Cette huile avait à cette époque la viscosité la plus basse entre 38°C et 100°C. Elle a obtenu le score VI = 100.

2. Une huile naphthénique minérale issue des champs de pétrole du Texas aux États-Unis. Cette huile avait à cette époque la viscosité la plus élevée entre 38°C et 100°C.

La valeur VI a été donnée à 0. [21]

On calcule VI avec :

$$VI = 100 \left(\frac{L - x}{L - H} \right)$$

Où

L = viscosité SUV à 38°C de l'huile de référence à faible VI (naphténique);

H = viscosité SUV à 38°C de l'huile de référence à VI élevé (paraffinique);

x = viscosité SUV à 38°C de l'huile à évaluer;

Exemples :

- Huile minérale pour engrenages industriels : VI= 95
- Huile synthétique PAG pour engrenages : VI = 200-250

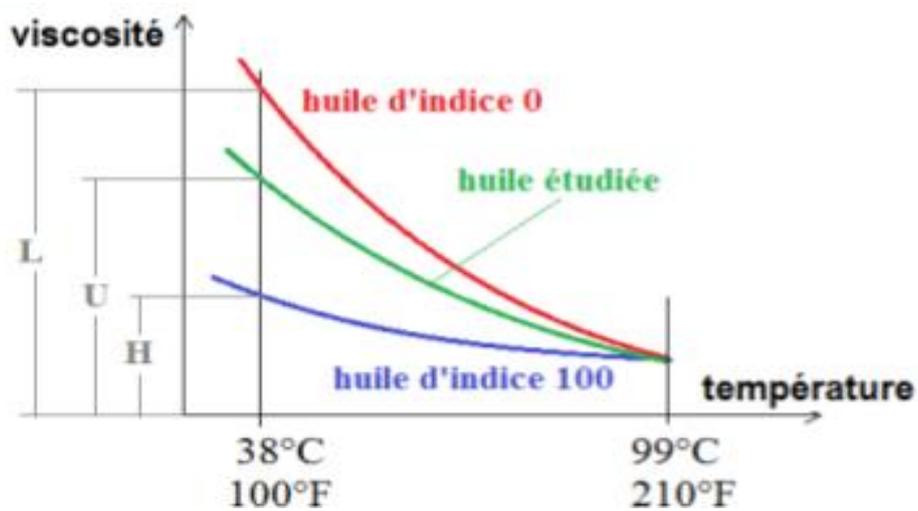


Figure14: Indice de viscosité [21]

I.15. Classification des huiles selon leur viscosité

Les huiles industrielles sont classées selon la classification ISO VG, avec chaque classe identifiée par un nombre entier qui correspond à la viscosité cinématique en centistokes (mm²/s) du lubrifiant à une température de 40 °C.

Tableau 4: Classification ISO des huiles selon leur viscosité. [24]

CLASSIFICATION ISO DE LA VISCOSITÉ DES HUILES					
Classe ISO de viscosité	Limites de viscosité cSt à 40 °C	Viscosité moyenne	Classes ISO de viscosité	Limites de viscosité cSt à 40 °C	Viscosité moyenne
ISO VG 2	1,98 à 2,42	2,2	ISO VG 68	61,2 à 74,8	68
ISO VG 3	2,88 à 3,52	3,2	ISO VG 100	90,0 à 110	100
ISO VG 5	4,14 à 5,06	4,6	ISO VG 150	135 à 165	150
ISO VG 7	6,12 à 7,48	6,8	ISO VG 220	198 à 242	220
ISO VG 10	9,00 à 11,0	10	ISO VG 320	288 à 352	320
ISO VG 15	13,5 à 16,5	15	ISO VG 460	414 à 506	460
ISO VG 22	19,8 à 24,2	22	ISO VG 680	612 à 748	680
ISO VG 32	28,8 à 35,2	32	ISO VG 1 000	900 à 1 100	1 000
ISO VG 46	41,4 à 50,6	46	ISO VG 1 500	1 350 à 1 650	1 500

I.16. Additifs :

Les additifs ont la capacité de renforcer les caractéristiques déjà présentes, éliminer les caractéristiques indésirables et ajouter de nouvelles caractéristiques aux fluides de base, on trouve : [25]

- 1- Additifs protégeant la surface
- 2- Additifs améliorant l'huile
- 3- Additifs protégeant l'huile

Exemples d'additifs :

- **Antioxydant** : éliminer ou au moins ralentir les processus d'oxydation du lubrifiant qui se produisent. Contribuer à l'allongement des vidanges en améliorant la résistance aux températures élevées.
- **Anti-corrosion** : l'objectif est de prévenir l'attaque des métaux ferreux, qui résulte de l'interaction entre l'eau, l'oxygène de l'air et certains oxydes produits lors de la combustion.
- **Anti-friction (usure)** : - Améliorer l'efficacité anti-usure d'un lubrifiant sur les organes qu'il lubrifie.
- **Anti-congelant (jusqu'à 0.5 %)** : Encourager la fluidité du lubrifiant à des températures basses (de -15°C à -45°C).

I.17. Les graisses lubrifiantes :

La graisse lubrifiante est un produit semi-fluide constitué d'un agent épaississant dispersé dans une huile lubrifiante. Elle peut contenir des additifs pour des propriétés spécifiques. Grâce à sa

structure, elle reste en place même après l'arrêt, évitant les circuits de lubrification complexes et protégeant les surfaces contre la rouille, la corrosion et l'abrasion. Elle contribue également à l'étanchéité des mécanismes, facilitant la conception des joints et permettant le graissage à vie de nombreux composants tels que les roulements et les articulations.[23]



Figure15: Le graissage [21]

I.18. Propriétés des graisses

- Consistance : c'est la propriété principale. Elle exprime la résistance à la déformation de la graisse.
- Point de goutte : il caractérise la tenue de la graisse à la chaleur en précisant la température de début de liquéfaction.
- Point de solidification : il indique la température de début de solidification de la graisse.
- Autres propriétés : résistance au cisaillement, qualité extrême pression, filmorésistance, acidité...

I.19. Classification :

Le grade NLGI (Nationale Lubricant Grease Institute) est la classification la plus usuelle.

Tableau 5: Classification NLGI des graisses et leurs applications.[21]

Dureté NLGI	Applications
0	graisse très liquide qui coule facilement.
1	réservé aux systèmes de lubrification centraux à basse température (< à 30°C, NLGI 1).
2	usage le plus courant, roulements scellés et lubrifiés à vie.
3	même que NLGI 2, mais pour des températures plus élevées.
4	applications spéciales à température élevée.

I.20. Conclusion :

Ce chapitre aborde la maintenance industrielle et la lubrification, deux aspects essentiels pour le bon fonctionnement et la pérennité des équipements industriels. La maintenance, qu'elle soit préventive, corrective ou prédictive, vise à assurer la fiabilité des machines, à prévenir les pannes et à minimiser les interruptions de production. La lubrification, quant à elle, est une composante clé de cette maintenance, car elle réduit la friction, l'usure et la chaleur, contribuant ainsi à la performance et à la longévité des équipements.

Chapitre II

Les engrenages et leur lubrification

II.1. Introduction :

Les engrenages sont des composants essentiels dans de nombreuses machines industrielles et mécaniques, transmettant la puissance et le mouvement entre différents éléments. Pour assurer leur performance optimale et prolonger leur durée de vie, une lubrification adéquate est cruciale. Ce chapitre examinera les différents types de lubrifiants utilisés, les mécanismes de lubrification, ainsi que les méthodes et les technologies employées pour appliquer ces lubrifiants

II.2. Notions sur les engrenages :

II.3. Définition d'un engrenage :

Le mécanisme d'un engrenage est constitué de deux roues dentées mobiles circulant autour d'axes de position fixe, l'une entraînant l'autre par l'action des dents successivement en contact. On appelle cela un engrenage. Le pignon est la roue la plus petite. En d'autres termes, un engrenage est composé de deux roues équipées de dents qui garantissent un entraînement positif (sans glissement) entre deux axes relativement éloignés l'un de l'autre. [25]

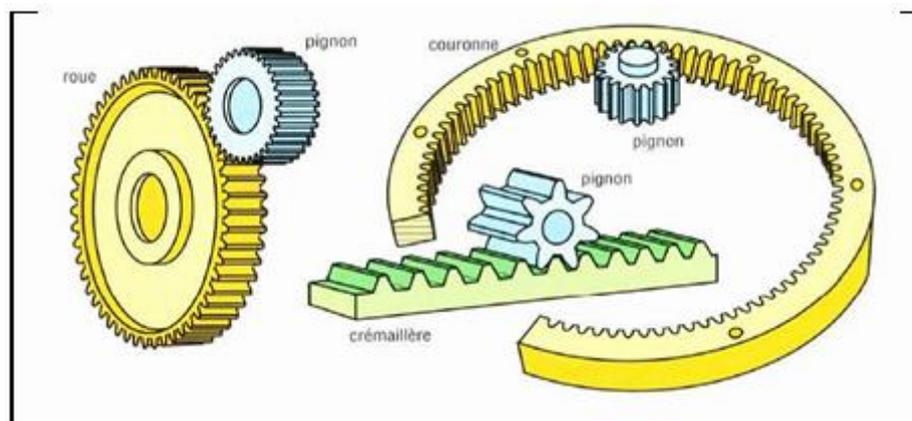


Figure16 : Exemple d'un dispositif de transmission par engrenages.

La conception des architectures de trains d'engrenages modernes est de plus en plus influencée par les critères de confort acoustique, de résistance mécanique et de réduction de poids, ce qui ouvre de nouvelles perspectives d'études.

II.4. Fonction globale

L'objectif principal d'un mécanisme à engrenages est de garantir la transmission d'une puissance mécanique sans modification du mouvement, entre deux arbres non en prolongement, en fluctuant le couple et la vitesse de transmission.

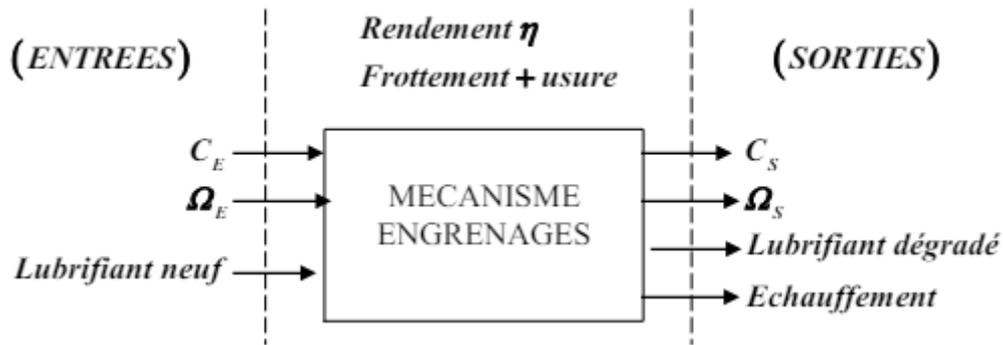


Figure17: Fonction globale d'un engrenage [27]

La forme et la technique de fabrication varient d'une roue dentée à l'autre. Prenons l'exemple des roues à denture droite, où les surfaces primitives sont des cylindres droits avec des axes parallèles. De plus, les dentures sont des surfaces en forme de cylindre dont les génératrices sont parallèles aux axes. Les roues dentées ont la possibilité d'être à contact externe ou interne.

II.5. Éléments géométriques des roues dentées :

Le cercle initial correspond au diamètre de la roue de friction. Le cercle de tête correspond au diamètre externe de la roue dentée au sommet des dents, tandis que le cercle de pied se situe à la base des dents : cercle de tête = cercle de pied + 2 x hauteurs des dents. Le module des dents est proportionnel à leur creux et à leur saillie.

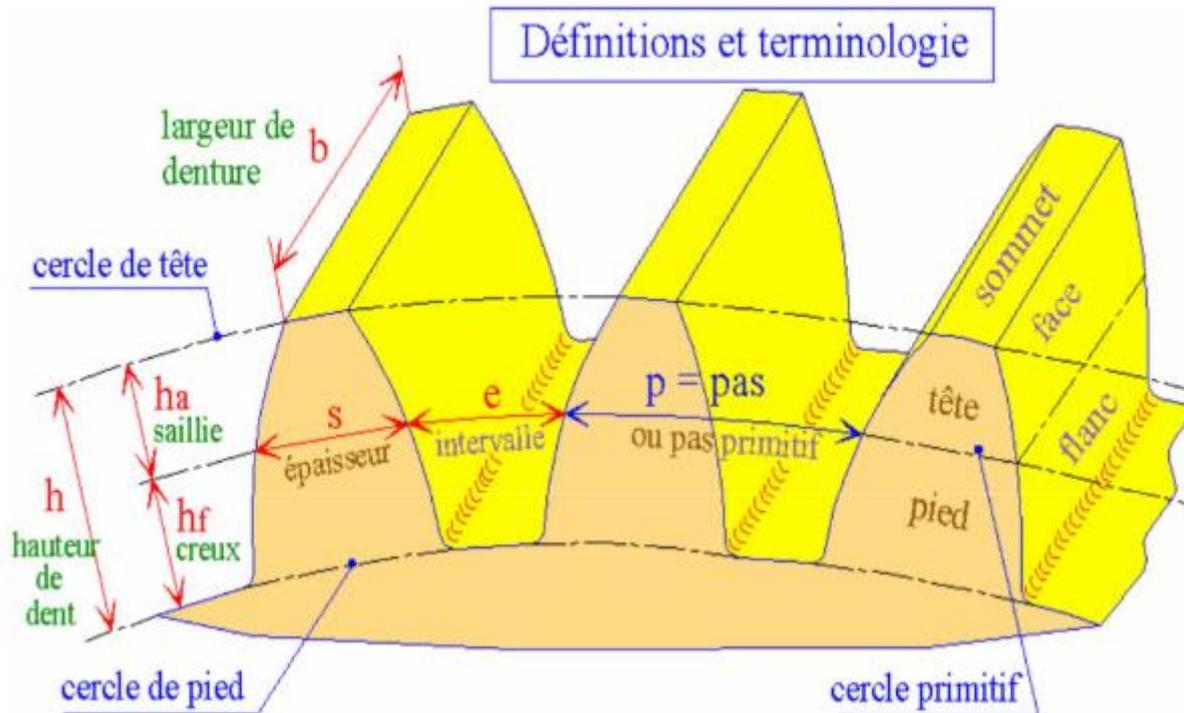


Figure18: caractéristiques géométriques principales. [29]

II.6. Principe de fonctionnement des engrenages :

La transmission par engrenages repose sur l'utilisation d'une roue dentée menante qui transmet le mouvement et la puissance à une autre roue dentée menée. Il est essentiel que ces deux roues dentées aient le même pas afin de garantir une continuité d'engrènement. La transmission de puissance repose sur la transmission du couple mécanique d'un arbre de transmission à un autre. L'action mécanique de contact entre les dents des roues menantes et menées produit ce couple.

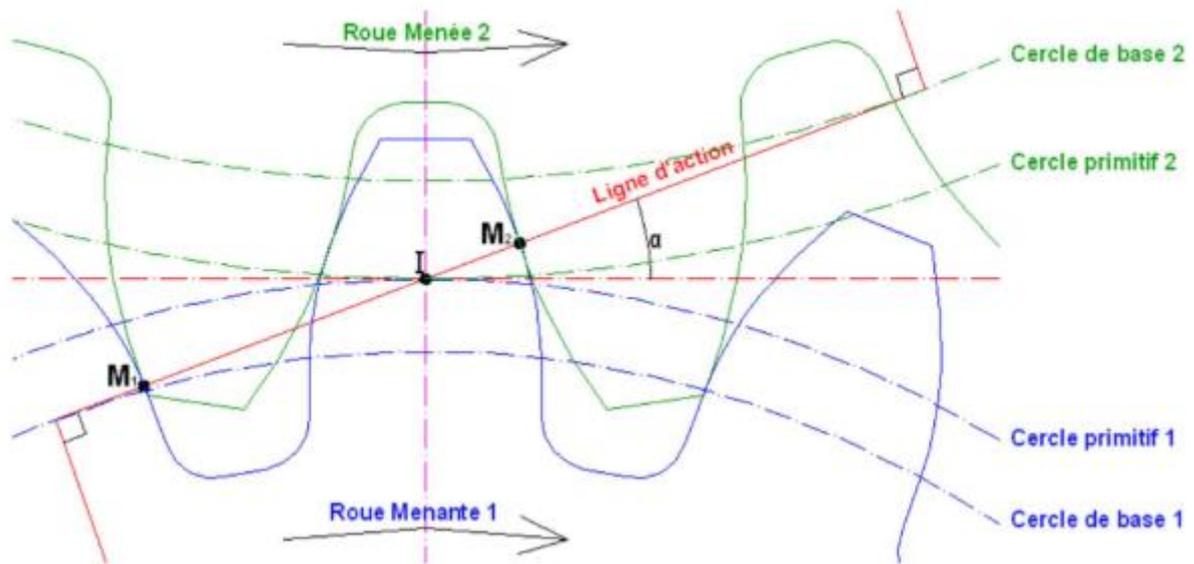


Figure19: Ligne d'action

Pendant l'engrènement, les dents en contact sont soumises à un phénomène de flexion, ce qui entraîne une fatigue et, par conséquent, la rupture des dents.

Le contact entre les deux développantes est établi en suivant une droite appelée ligne d'action, qui est inclinée d'un angle α par rapport à la tangente commune à deux cercles appelés cercles primitifs. Cet angle α est connu sous le nom d'angle de pression et représente généralement 20° .

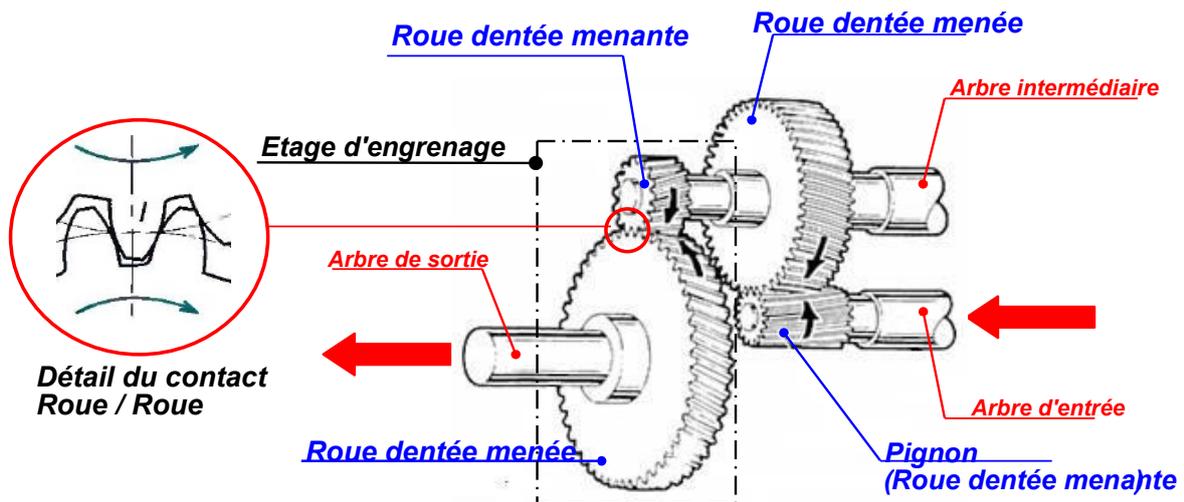


Figure20: Transmission de puissance par un train d'engrenage à deux étages [27]

La principale fonction des engrenages est de transmettre un mouvement circulaire ou de rotation. Si elles sont équipées de roues engrenant des dents rectilignes, elles convertissent un

Chapitre II : Les engrenages et leur lubrification

mouvement rectiligne, alternatif ou non, en mouvement de rotation, et vice versa. Un équipage ou train d'engrenages est composé de plusieurs roues d'engrenage qui transmettent le mouvement d'un arbre à un autre.

II.7. Classification des engrenages

Les différentes catégories d'engrenages sont classées en fonction de la position relative des axes des arbres d'entrée et de sortie, la forme extérieure des roues dentées et le type de denture.

I.7.1 Engrenages parallèles à denture droite

Ils sont les plus basiques et les plus économiques, et ils servent à transmettre la puissance et le mouvement entre deux arbres. Ces engrenages produisent des bruits et des vibrations. Deux types d'engrenages parallèles sont présents.[26]

Le pignon crémaillère (à rayon infini) est un pignon dont le mouvement de rotation est transformé en mouvement de translation de la crémaillère.

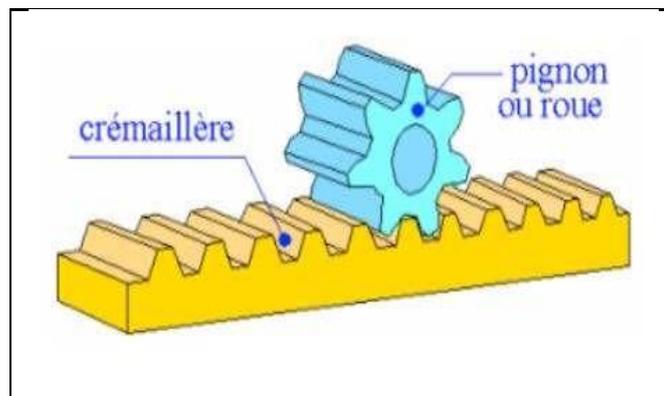


Figure21: Pignon crémaillère.[28]

Le module m choisi parmi les modules normalisées est déterminé par un calcul de résistance des matériaux, la relation permettant le calcul de ce module est :

$$m \geq 2.34 \sqrt{\frac{T}{K.Rpe}}$$

T : effort tangentiel sur la dent. ; k : coefficient de largeur de denture.

Chapitre II : Les engrenages et leur lubrification

Rpe : résistance pratique à l'extension. Rpe dépend du matériau utilisé.

Note : Deux roues dentées doivent avoir le même module pour pouvoir engrener ensemble.

Les dentures des roues de l'engrenage à dentures droites présentent des caractéristiques qui sont parallèles à l'axe de rotation des arbres. Les dents se rapprochent les unes des autres, ce qui entraîne des chocs d'engrènement. [26]

Tableau 6: Caractéristique géométrique des engrenages Cylindriques à denture droite intérieur et extérieur. [30]

		Roue à denture extérieure
Module	m	Déterminé par un calcul de résistance de matériaux
Nombre de dents	Z	Déterminé à partir des rapports des vitesses angulaires
Pas de la denture	p	$p = \pi \cdot m$
Saillie	ha	$ha = m$
Creux	hf	$hf = 1,25 \cdot m$
Hauteur de la dent	h	$h = ha + hf = 2,25 \cdot m$
Diamètre primitif	d	$d = m \cdot Z$
Diamètre de tête	da	$da = d + 2m$
Diamètre de pied	df	$df = d - 2,5m$
Largeur de denture	b	$b = k \cdot m$ (k valeur à se fixer, fréquemment on choisit entre 6 et 10)
Entraxe de 2 roues A et B	a	$a = \frac{d_A + d_B}{2} = \frac{m \cdot Z_A}{2} + \frac{m \cdot Z_B}{2} = \frac{m(Z_A + Z_B)}{2}$

- **Le cylindre de fonctionnement primitif, avec un diamètre primitif d** : est caractérisé par l'axe instantané de rotation du mouvement relatif de la roue conjuguée par rapport à la roue considérée. Le cercle primitif de diamètre d est obtenu par la section droite du cylindre primitif.
- **Le cylindre de la tête a un diamètre de da** : il enveloppe le sommet des dents. Le cercle de tête de diamètre da est formé par la partie droite du cylindre de tête.
- **Le diamètre du pied df** : représente le cylindre qui enveloppe le fond des dents.

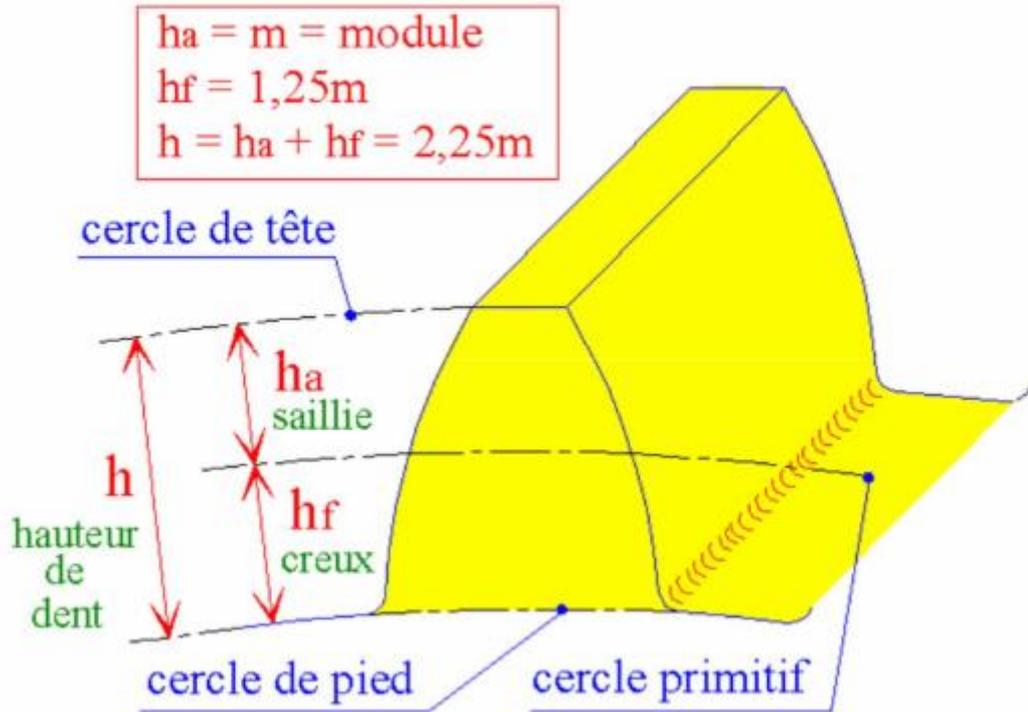


Figure22: schéma d'une dent de pignon

Rapport de vitesses : ω_1 et ω_2 sont les vitesses angulaires respectives des roues dentées (1) et (2), non glissement au point (M).

Z_1 : Nombre de dents de la roue (1) Z_2 : Nombre de dents de la roue (2)

ω : Vitesse angulaire exprimée en rd/s ; N : Vitesse de rotation exprimée en tr/min

Avec :
$$\omega = \frac{2\pi N}{60}$$

$$\omega_1 \cdot \frac{d_1}{2} = \omega_2 \cdot \frac{d_2}{2}; \quad \Gamma_t = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

II.7.2. Les engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales

Les dentures hélicoïdales offrent de nombreux avantages pour la transmission de puissance grâce à leur inclinaison par rapport à l'axe, augmentant la surface de contact, répartissant mieux les charges, et assurant une meilleure progressivité et continuité d'engrènement. Elles sont plus

Chapitre II : Les engrenages et leur lubrification

efficaces, peuvent transmettre des forces supérieures, et sont plus discrètes. Cependant, elles génèrent des poussées axiales et des surcharges sur l'arbre. La denture hélicoïdale à chevrons, ou denture « Citroën », composée de deux dentures hélicoïdales opposées, neutralise ces poussées axiales. Inventée par Charles Renard et brevetée par André Citroën, elle combine les avantages des dentures hélicoïdales sans leurs inconvénients axiaux.[31]

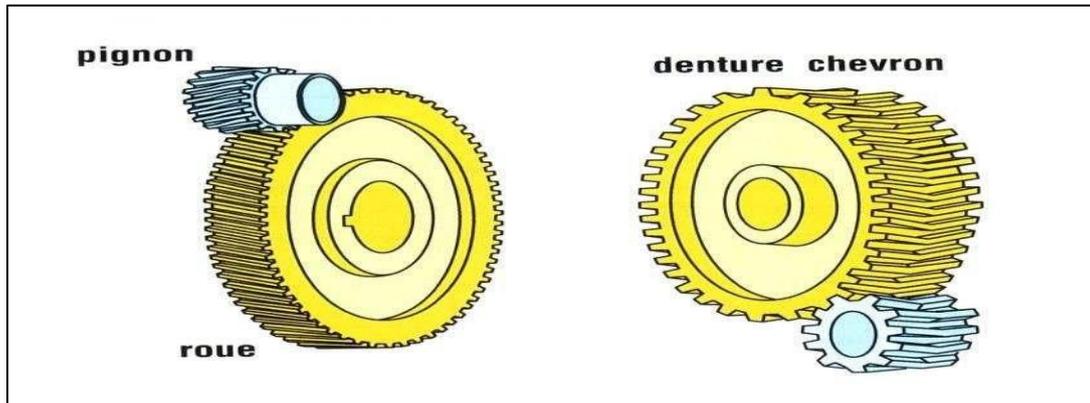


Figure23: Engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales. [31]

Les différentes caractéristiques d'un engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7: Caractéristiques d'engrenage cylindrique à dentures hélicoïdales. [32]

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

On peut observer les trois types d'efforts sur la dent.

Rapport de vitesses :

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

La denture hélicoïdale présente des avantages par rapport à la denture droite :

- * Une transmission plus flexible.
- * Réduction du bruit.
- * Il y a toujours 2 ou 3 dents en prise ; les efforts transmis sont plus importants.
- * Modification de l'entraxe en modifiant l'angle de l'hélice.

Conséquences de l'utilisation de la denture hélicoïdale par rapport à la denture droite :

- * Moins de performance.
- * Provoque une pression axiale.
- * Il est impossible de l'utiliser en baladeur.
- * Plus onéreux.

II.7.3. Les engrenages coniques :

Il s'agit d'un groupe majeur employé afin de communiquer un mouvement entre deux axes non parallèles dont les axes sont convergents. Les axes à 90 degrés sont les plus fréquents. Les surfaces primitives sont désormais des cônes, plutôt que des cylindres. Les cônes sont tangents sur une ligne MM' et leur point commun est le point S. Il s'agit également du croisement des axes de rotation des deux roues.[33]

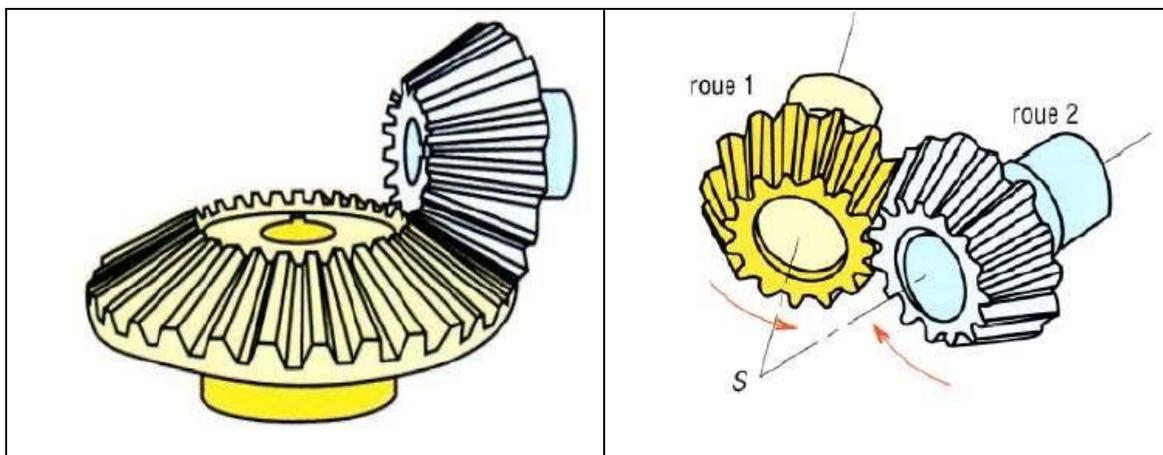


Figure24: Engrenages à axes concourants. [34]

Le tableau suivant représente les différentes caractéristiques :

Tableau 8: Caractéristiques d'engrenage à axes concourants. [32]

Principales caractéristiques des engrenages coniques à denture droite		
caractéristiques	symboles ISO	observations et formules usuelles
vitesse angulaire	ω	$\omega = (\pi \cdot n)/30 \approx 0,1n$ (unités : rad/s)
nombre de tours/minute	n	n_1 (roue 1) n_2 (roue 2)
module	m	valeurs normalisées (tableau 1) mesurée sur cône complémentaire
pas primitif	p	$p = \pi \cdot m = 3,141 59m$ (avec $p = p_1 = p_2$)
nombre de dents	z	Z_1 (roue 1) Z_2 (roue 2)
diamètre primitif	d	$d_1 = mZ_1$ et $d_2 = mZ_2$
angle primitif	δ	δ_1 (roue 1) δ_2 (roue 2)
angle de pression	α	valeur la usuelle $\alpha = 20^\circ$
angle de tête	δ_a	$\delta_a = \delta + \theta_a$
angle de creux	δ_f	$\delta_f = \delta - \theta_f$
angle de saillie	θ_a	$\tan \theta_a = 2m \cdot \sin \delta / d$
angle de creux	θ_f	$\tan \theta_f = 2,5m \cdot \sin \delta / d$
angle de hauteur	θ	$\theta = \theta_a + \theta_f$
longueur génératrice primitive		$L = d_1/2 \sin \delta_1 = d_2/2 \sin \delta_2$
largeur de dent	b	$L/4 \leq b \leq L/3$ (raisons de taillage)
saillie	h_a	$h_a = m$
creux	h_f	$h_f = 1,25m$
hauteur de dent	h	$h = h_a + h_f = 2,25m$
diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m \cdot \cos \delta$
diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2,5m \cdot \cos \delta$
$\delta_1 + \delta_2 = 90^\circ$ $\delta_1 + \delta_2 < 90^\circ$ $\delta_1 + \delta_2 > 90^\circ$		
$\phi_1 = \delta_2$ $\phi_2 = \delta_1$ $\tan \delta_1 = Z_1/Z_2$ $\tan \delta_2 = Z_2/Z_1$		
$\phi_1 = 90 - \delta_1$ $\phi_2 = 90 - \delta_2$ $\tan \delta_2 = \frac{\sin(\delta_1 + \delta_2)}{Z_1/Z_2 + \cos(\delta_1 + \delta_2)}$		
$\phi_1 = 90 - \delta_1$ $\phi_2 = 90 - \delta_2$ $\tan \delta_2 = \frac{\sin[180 - (\delta_1 + \delta_2)]}{Z_1/Z_2 - \cos[180 - (\delta_1 + \delta_2)]}$		

Rapport de vitesses :

- N1 et N2 sont les vitesses respectives des roues coniques (1) et (2).
- Z1 et Z2 sont les nombres de dents respectifs des roues coniques (1) et (2).

$$r = \frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

II.7.4. Engrenages gauches (système roue et vis sans fin)

Un engrenage à vis est un ensemble d'engrenages gauches composés d'une vis et d'une roue à vis. La vis présente un profil (en règle générale) trapézoïdal. Ce dispositif est, dans de nombreux cas, irréversible, c'est-à-dire que si la vis peut entraîner la roue, la roue ne peut pas, par frottements, entraîner la vis. Par exemple, ce cas est intéressant pour la commande d'un treuil qui ne peut pas fonctionner seul.

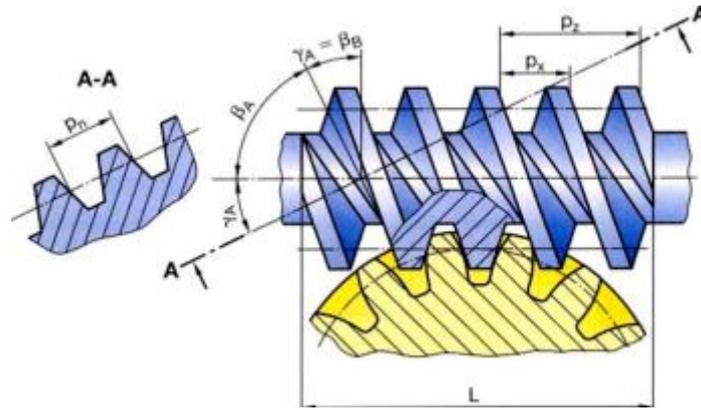


Figure25: Caractéristiques d'engrenage gauche (système roue et vis sans fin). [35]

Rapport de vitesses :

N_1 et N_2 sont les vitesses respectives de la vis et de la roue.

Z_1 : nombre de filets de la vis. ; Z_2 : nombre de dents de la roue.

$$r = \frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Les différentes caractéristiques des engrenages vis sans fin sont illustrées dans le tableau 1.5 ci-dessous.

Tableau 9: Caractéristiques d'engrenage à vis sans fin. [27]

Caractéristiques de la vis A		
Nombre de filets	z_A	Fonction du rapport des vitesses angulaires : $\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{z_B}{z_A}$
Angle d'hélice	β_A	Fonction de la réversibilité de la transmission (si $\gamma_A < 5^\circ$ système pratiquement réversible). $\beta_A + \gamma_A = 90^\circ$.
Sens de l'hélice « à droite » ou « à gauche »		La vis a le même sens d'hélice que la roue
Module réel	m_n	Déterminé sur la roue, choisi suivant § 73.12
Module axial	m_x	$m_x = m_n / \cos \gamma_A$
Pas réel	p_n	$p_n = m_n \cdot \pi$
Pas axial	p_x	$p_x = p_n / \cos \gamma_A$
Pas de l'hélice	p_z	$p_z = p_x \cdot z_A$
Diamètre primitif	d_A	$d_A = p_z / \pi \tan \gamma_A$
Diamètre extérieur	d_a	$d_a = d_A + 2 m_n$
Diamètre intérieur	d_f	$d_f = d_A - 2,5 m_n$
Longueur de la vis	L	$L \approx 5 p_x$
Caractéristiques de la roue B		
Mêmes formules que pour une roue à denture hélicoïdale (§ 73.14) en tenant compte :		- Angle d'hélice $\beta_B = \gamma_A$ et de même sens que pour la vis et la roue - Module apparent de la roue égal au module axial de la vis
Entraxe	a	$a = \frac{d_A + d_B}{2}$

Avantages et désavantages :

Ces engrenages présentent des avantages par rapport aux engrenages cylindriques et coniques :
Leur fonctionnement silencieux et amortissant.
Ils sont moins encombrants et faciles à réaliser.

Parmi les désavantages des engrenages cylindriques et coniques, on peut mentionner :

*Le mouvement de glissement des flancs entraîne une usure importante, une perte de puissance importante et un rendement inférieur. [36]

II.8. Choix des matériaux

Plusieurs matériaux sont employés dans la production des engrenages :

- * Aciers de toutes couleurs.
- * Sources classiques et uniques.
- * Bronzes.
- * Composants synthétiques, et autres.

Le choix est influencé par de nombreux facteurs :

- * Différentes catégories d'engrenages.
- * Fréquences de rotation.
- * Résistances requises à la rupture et à l'usure.

Chapitre II : Les engrenages et leur lubrification

- * Absence de mouvement.
- * Caractéristiques de l'engrenage.
- * Disponible du matériel d'usinage, etc...

Cependant, à l'exception des engrenages à vis sans fin où le bronze est presque le seul matériau possible pour la roue, ce sont les aciers qui sont de loin les plus couramment employés. Ils offrent une sécurité optimale tout en minimisant l'encombrement, ce qui signifie que les problèmes de fonderie, de forge et d'usinage des grandes roues ne sont plus un obstacle dans l'industrie contemporaine. [37]

II.9. Types des engrenages

Six catégories de précision sont mentionnées :

- * Classe 1 à 4 : Précision remarquable et vitesses élevées ($V > 30$ m/s), engrenages étalons, turbines.
- * Les dents de classes 5 et 6 sont rectifiées ou rasées, avec des vitesses élevées ($V < 20$ m/s). Appareil de mesure, turbine, véhicules, équipements industriels.
- * Niveau 7 : Denture parfaitement taillée et rectifiée, excellente qualité en mécanique générale, vitesses ($V < 10$ m/s). Machines de manutention, machines-outils, véhicules, appareils de bureau.
- * Qualité habituelle pour roues trempées non rectifiées, avec des vitesses inférieures à 7 m/s.
- * Catégorie 10 : Méthodes de fabrication courantes, y compris des engrenages en plastique.
- * Catégorie 11 et 12 : Engrenages lents ($V < 2$ m/s) et/ou à modules volumineux. [34]

II.10. Méthode de lubrification des engrenages :

- la lubrification Par brouillard d'huile.
- la lubrification par bain d'huile
- la lubrification par barbotage.
- la lubrification Par circulation d'huile

II.10.1. Lubrification par barbotage

Cette méthode implique que les engrenages trempent directement dans le lubrifiant. En tournant, ils emmènent le lubrifiant vers les zones de contact.

Avantages :

- Efficace pour les engrenages de petite taille ou à vitesse modérée.

Inconvénients :

- Peut entraîner une accumulation de chaleur et une oxydation du lubrifiant si la ventilation est insuffisante.

II.10.2. Lubrification par circulation

Le lubrifiant est pompé à travers un système de canalisations pour atteindre les zones de contact des engrenages avant de retourner à un réservoir pour être refroidi et filtré.

Avantages :

- Contrôle précis du débit de lubrifiant.
- Élimine efficacement la chaleur générée par les engrenages.
- Peut inclure des filtres pour éliminer les contaminants.

Inconvénients :

- Coût élevé de mise en place et de maintenance.
- Nécessite une pompe et un système de filtration.

II.10.3. Lubrification par bain d'huile

Les engrenages sont partiellement immergés dans un bain d'huile. Ce type de lubrification est courant dans les boîtes de vitesses.

Avantages :

- Fournit une lubrification continue et efficace.
- Aide à refroidir les engrenages.

Inconvénients :

- Nécessite un niveau d'huile adéquat.
- Peut provoquer une résistance hydrodynamique à haute vitesse.

II.10.4. Lubrification par brouillard d'huile

Le lubrifiant est atomisé en une fine brume qui est ensuite soufflée sur les engrenages. La brume lubrifie les surfaces avant de se condenser en gouttelettes et de revenir au réservoir.

Avantages :

- Distribution uniforme du lubrifiant.
- Minimise les pertes de lubrifiant.

Inconvénients :

- Coût élevé et complexité du système.
- Nécessite une ventilation adéquate pour éviter les accumulations de brouillard d'huile.

II.10.5. Lubrification par graisse

La graisse est appliquée manuellement ou à l'aide de systèmes automatiques sur les engrenages. Elle est souvent utilisée pour les engrenages exposés ou les petits mécanismes.

Avantages :

- Adhère bien aux surfaces, offrant une protection durable.
- Moins susceptible de fuir que l'huile.

Inconvénients :

- Moins efficace pour le refroidissement des engrenages.
- Peut nécessiter un nettoyage régulier pour éviter l'accumulation de contaminants.

II.11. Les défauts de lubrification dans les engrenages :

La lubrification inadéquate des engrenages va causer plusieurs endommagements de l'outil, ces défauts sont :

- **Sous-lubrification** : Une quantité insuffisante de lubrifiant provoque une augmentation de la friction et de la chaleur, ce qui peut entraîner une usure rapide des dents des

engrenages, des pannes prématurées et, dans les cas extrêmes, le grippage des engrenages.

- **Contamination** : Les lubrifiants peuvent être contaminés par des particules métalliques, de la poussière, de l'eau ou d'autres substances étrangères. La contamination peut causer des rayures, de l'usure abrasive, et des dommages aux surfaces des engrenages, réduisant ainsi leur efficacité et leur durée de vie.
- **Utilisation de mauvais lubrifiants** : L'utilisation d'un lubrifiant inapproprié (par exemple, un lubrifiant avec une viscosité incorrecte ou des propriétés additives inadéquates) peut entraîner une protection insuffisante contre l'usure et la corrosion, ainsi qu'une dissipation thermique inefficace.
- **Oxydation et dégradation du lubrifiant** : Les lubrifiants peuvent se dégrader au fil du temps à cause de l'oxydation, de la chaleur et des réactions chimiques.
- **Évaporation ou perte de lubrifiant** : À des températures élevées, certains lubrifiants peuvent s'évaporer ou se décomposer, réduisant ainsi la quantité de lubrifiant disponible et provoquant une lubrification insuffisante.
- **Mauvaise application** : Une mauvaise application du lubrifiant, telle qu'une application inégale ou une application à des intervalles incorrects,
- **Formation de mousse** : Certains lubrifiants peuvent former de la mousse lorsqu'ils sont soumis à une agitation, ce qui réduit l'efficacité de la lubrification en augmentant la quantité d'air dans le lubrifiant. La formation de mousse peut entraîner une lubrification insuffisante et une usure accrue.
- **Incompatibilité des matériaux** : L'utilisation de lubrifiants incompatibles avec les matériaux des engrenages ou des joints peut provoquer des réactions chimiques indésirables, telles que la corrosion ou la dégradation des joints, compromettant l'intégrité des engrenages.

II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, une recherche bibliographique a été réalisée sur la définition générale des engrenages. Nous avons exposé les différentes catégories d'engrenages, leurs types, ainsi que leurs caractéristiques géométriques et divers paramètres, sans oublier la lubrification de cet outil et les défauts pouvant exister dans cette lubrification qui vont la rendre inadéquate ce qui causera plusieurs dégâts sur l'engrenage.

Chapitre III

Mécanisme

d'endommagements des

engrenages

III.1. Introduction :

Les engrenages sont essentiels dans les machines tournantes industrielles, influençant fortement la durée de vie et la qualité des systèmes mécaniques. Leur bon fonctionnement est crucial, d'où l'importance de l'analyse et du contrôle des sollicitations. Les engrenages peuvent subir diverses avaries dues à des problèmes de lubrification, fabrication, d'assemblage, de matériaux, ou à des demandes excessives. Les conditions de fonctionnement, les déformations élastiques, les défauts de fabrication et de montage, ainsi que la micro géométrie des surfaces en contact affectent la répartition de la charge sur les dents et le risque d'avaries de surface.[38]

III.2. Les différents types de détérioration des dentures d'engrenages :

Les principaux défauts sur un couple d'engrenages sont ceux qui se trouvent répartis sur toutes les dents et ceux qui se trouvent localisés sur certaines dents.[39]

Tableau 10: Origines et localisation des défauts [40]

Origine et localisation des défauts dans les engrenages	
Localisation des défauts	%
Dentures	60
Palier	19
Arbres	10
Carter	07
Autres	04

III.3. Défauts répartis sur toutes les dents :

a) Usure abrasive et adhésive :

Les deux surfaces de contact se glissent, ce qui entraîne une perte de matière. Cette usure se développe en fonction de la charge mécanique à transmettre et de la vitesse de glissement, ainsi que de la présence d'abrasifs dans le lubrifiant.

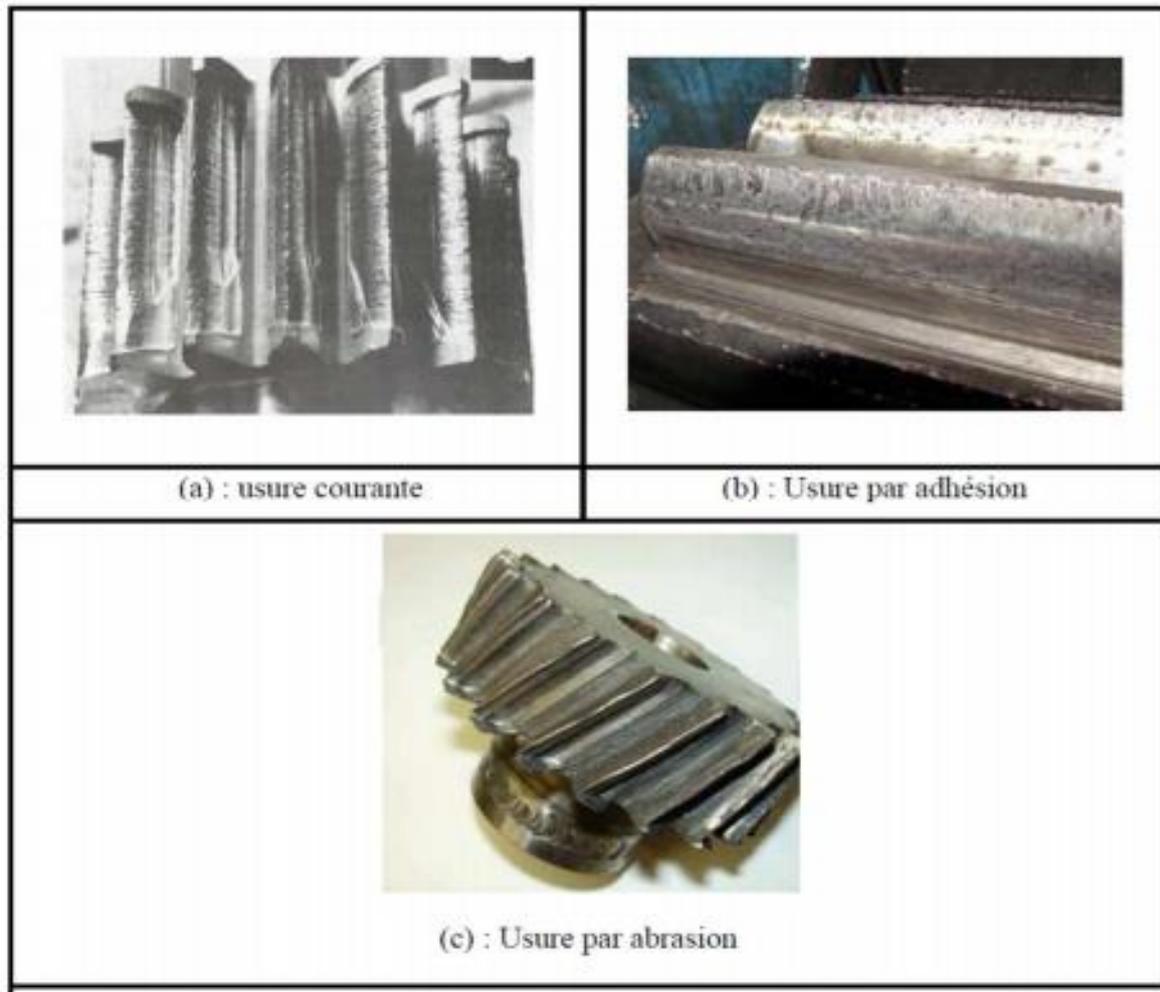


Figure26: Les différents types d'usure : (a) courante, (b) adhésion, (c) abrasion. [41]

b) Pitting (piques) :

Toutes les dents sont touchées par des trous plus ou moins profonds, surtout dans la zone du cercle primitif. La majorité de ces dommages surviennent sur des engrenages en acier de construction relativement solide, ce qui les rend plus vulnérables aux effets cumulatifs de surcontraintes (comme l'apparition de fissures). Lorsque la viscosité du lubrifiant est élevée, on peut moins craindre le pitting, car dans ce cas, le film d'huile qui sépare les surfaces en contact est plus épais.

Par exemple, cette avarie peut survenir suite à de légers désalignements d'axes, en raison de surpression locales.



Figure27: Piqure évolutive. [41]

III.4. Les défauts localisés sur certaines dents :

a) Ecaillage :

Il s'agit aussi de fissures, mais elles sont moins fréquentes. Les altérations résultent de la présence de fatigues en sous-couche, au point de cisaillement maximum. Ce genre d'anomalie se produit dans les engrenages cimentés (contenant une couche superficielle durcie) [35] ; ces engrenages sont largement utilisés en ce moment car ils permettent de passer des couples importants dans des dimensions acceptables. Le principal défaut est l'écaillage qui se transforme rapidement en rupture, sans passer par une phase d'usure.

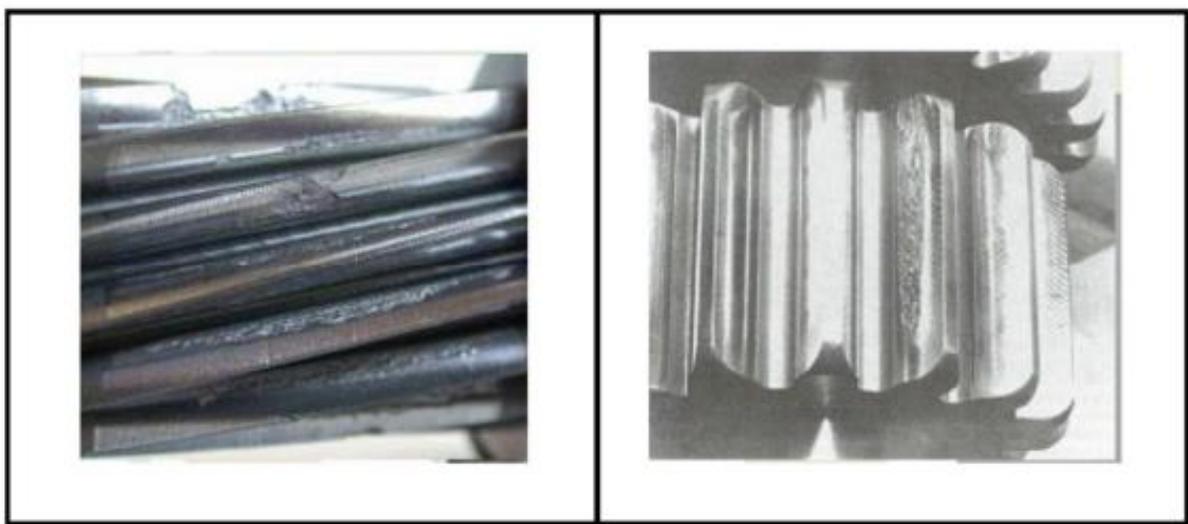


Figure28: Écaillage. [41]

b) Le grippage :

C'est directement le résultat de la destruction brutale du film d'huile, causée par la température due à un frottement sous pression. Les vitesses élevées, les gros modules et le faible nombre de dents en contact favorisent principalement le grippage. Les conditions de mise en service et l'état physico-chimique du lubrifiant ont un impact sur la probabilité de grippage.



Figure29: Défaut de grippage. [41]

b.1. Grippage à chaud :

Le phénomène d'usure décrit est causé par la rupture du film d'huile due à une surchauffe excessive lors de l'engrènement, entraînant un contact métal-métal entre les plaques dentaires. Cela provoque des soudures et des déchirements successifs, arrachant des particules métalliques des dents et modifiant leur profil. Les marques de grippage apparaissent comme des stries ou raies rugueuses, souvent regroupées en bandes de différentes profondeurs et largeurs. Elles sont particulièrement visibles dans les zones à fort glissement, notamment au sommet et au pied des dents. Le grippage à chaud résulte de l'interaction entre une pression élevée, des vitesses de glissement élevées, et une température de contact excessive, dégradant le film d'huile entre les dents. Ces informations sont issues d'une publication du CETIM par le département d'Analyse et d'Expertise des Défaillances (ADE).



Figure30; Grippage modéré sur les flancs d'un engrenage cémenté trempé [42]

Les stries sont visibles en bandes, plus ou moins marquées sur le profil. Ce grippage n'a pas de conséquences néfastes car il ne modifie pas significativement le profil. Cet engrenage sera à nouveau en état de marche après une période de rodage et de réparation.

Conditions de lubrification et de charge pendant le fonctionnement.

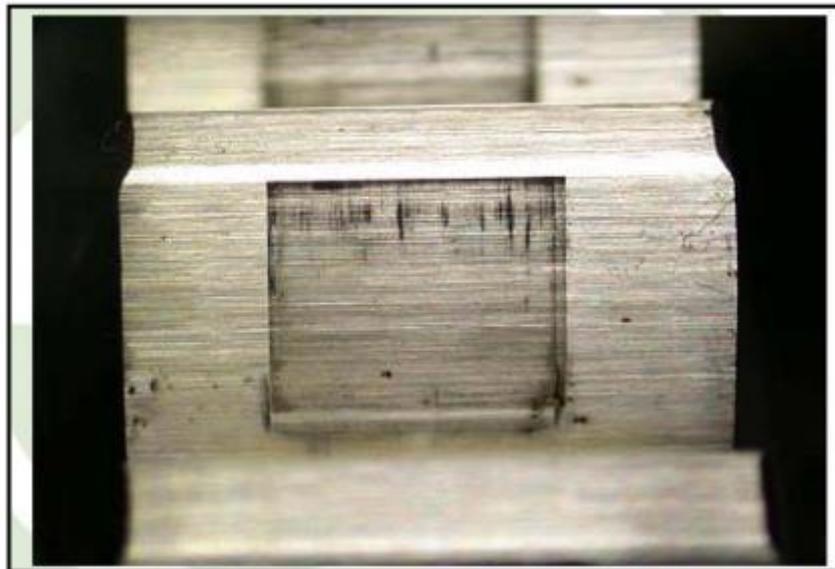


Figure31: Grippage généralisé et destructif d'une roue d'engrenage [42]

b.2. Grippage à froid :

L'usure résulte de la rupture du film lubrifiant sous une pression excessive pendant l'engrènement, provoquant un contact métallique entre les bords des dents. Ce phénomène est

Chapitre III : Mécanisme d'endommagements des engrenages

similaire au grippage à chaud, impliquant une soudure suivie de déchirement sous : forte pression et faible vitesse de glissement (environ 4 m/s de vitesse périphérique). Ce grippage débute souvent par des arrachements localisés sur les dents, se propageant progressivement. La vitesse de propagation dépend du lubrifiant utilisé, du type de denture et de la dureté des matériaux. Le grippage à froid survient brusquement pour ces engrenages, entraînant souvent leur mise hors service rapide. Les causes peuvent inclure une lubrification insuffisante ou une surcharge prolongée, parfois combinées.

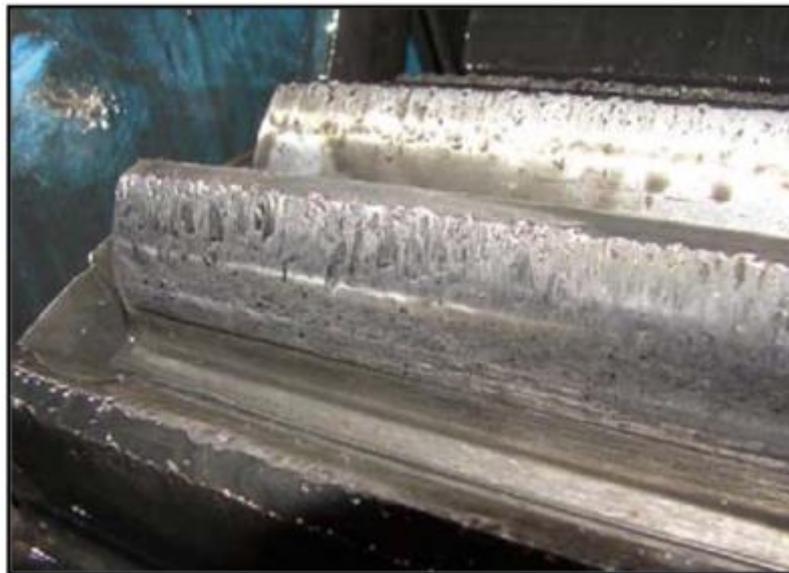


Figure32: Traces de grippage à froid sur les dents d'une couronne de treuil [43]

c) Fissure :

À chaque prise en charge, elle évolue et se trouve en position de pied de dent [44]. Elle se manifeste sur des matériaux aciers fins et durcis, qui sont exposés aux contraintes concentrationnaires. Ils se manifestent lorsque la limite élastique en contrainte au pied de la dent du côté de la dent en traction est dépassée.



Figure33: Fissuration au pied de la dent.

c.1. Initiation des fissures :

Pour analyser la propagation de fissures, il est essentiel de prendre en compte la configuration initiale de celles-ci (largeur, orientation et position). Selon Lewicki (2002), en fonction de la configuration des roues, il a été démontré que ces paramètres jouaient un rôle crucial dans la propagation.[46]

c.2. Rupture par surcharge :

Le plus souvent, ces ruptures se produisent d'un seul coup, c'est-à-dire en une seule fois lors de la prise en charge de la dent.

- Les zones granuleuses et brillantes, connues sous le nom de "Zone de rupture fragile", où le métal s'est brisé en raison des contraintes de traction subies ;
- Les zones avec des arrachements ou même des bourrelets lisses, connues sous le nom de (Zone de rupture ductile), peuvent alors présenter l'un des deux modes de rupture mentionnés précédemment. [47].

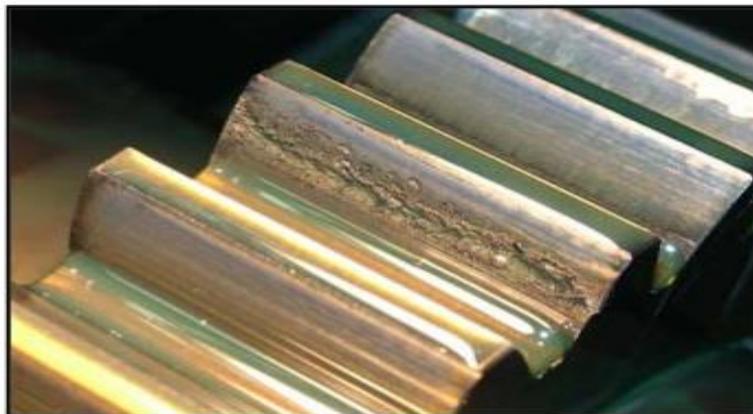


Figure34: Rupture par surcharge

c.3. Rupture par fatigue :

On sait que lorsque la contrainte dépasse une valeur limite appelée fatigue, il y aura une rupture après plusieurs cycles.

À chaque mise en charge, ce mode de rupture change à partir d'un point initial situé.

Au pied de la dent, la section d'encastrement est affaiblie jusqu'au point où la rupture se manifeste. [48]

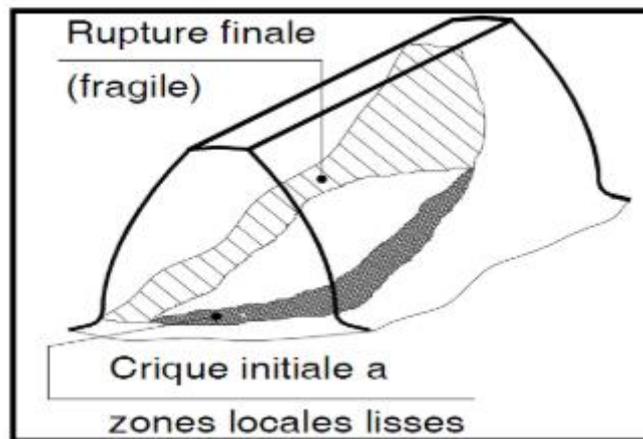


Figure35: Rupture par fatigue

d) Fatigue des engrenages :

Selon Alban (1985), les trois types de défaillance les plus courants sont la fatigue, les impacts et l'usure. De manière spécifique, la rupture en fatigue des systèmes d'engrenage peut présenter diverses formes :

- La détérioration lors de la flexion ;
- La détérioration du contact par glissement (Slidding) ;
- La détérioration du contact par roulement (Rolling) ;
- La détérioration thermique ;
- La détérioration des autres éléments du système de transmission (arbre, roulement, ...).

Selon Alban (1984), une étude sur 1500 défaillances d'engrenage a révélé que la fatigue en flexion est la plus courante, représentant 32% des cas. Toutefois, dans certains cas, le contact peut prendre une importance supérieure à la flexion (Kader, Nigam et Grover, 1998). [49]

III.5. Les types d'usures :

L'usure des dents d'engrenage est une dégradation lente et régulière influencée par des facteurs mécaniques et environnementaux. Elle est analysée à travers l'intensité des phénomènes et leurs modalités d'action, permettant de quantifier et caractériser les différents aspects de surface affectés. Il existe différentes usures :

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

III.5.1. Usure normale :

Cette usure très lente n'affecte pas la durée d'utilisation normale de l'engrenage et ne nécessite généralement pas de contrôle spécifique, surtout pour les dentures traitées superficiellement ou les engrenages peu sollicités. Dans certains cas, elle peut modifier la forme du profil de l'engrenage, particulièrement aux endroits où le glissement est nul.[50]

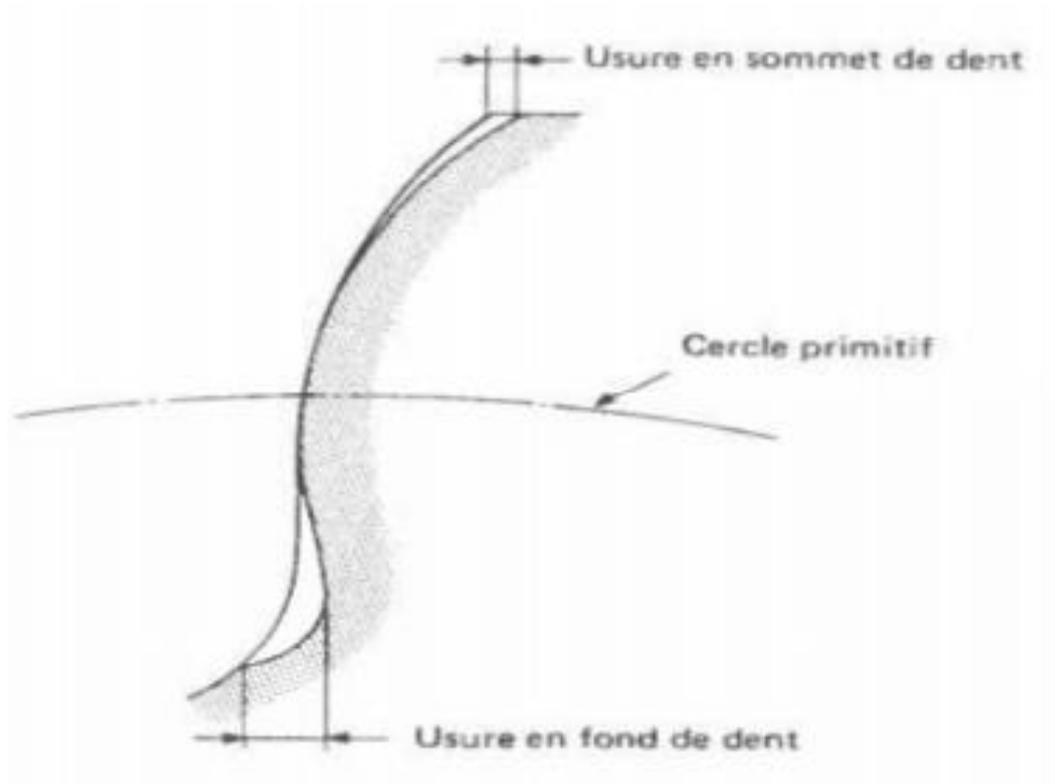


Figure36: Aspect caractéristique de la déformation du profil d'une dent sous

Si l'usure est faible, ce genre de changement de forme du profil dentaire est avantageux pour l'engrenage car il favorise une meilleure absorption des impacts des dents lors de leur engagement. Ainsi, il est fréquent de constater la disparition progressive des stries en sommet ou en pied de dent, qui apparaissent parfois à peu près lors de la mise en marche d'un engrenage (c'est le cas généralement des dentures chargées à une vitesse faible ou moyenne).

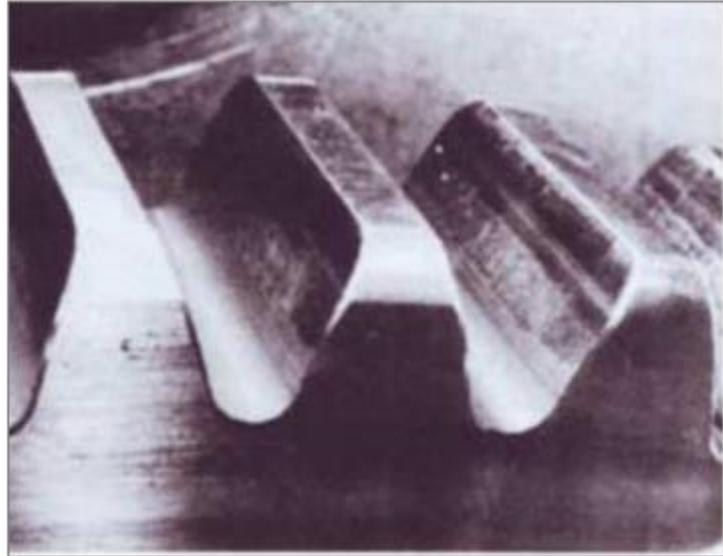


Figure37: Usure normale. [43]

Les flancs d'une denture d'engrenages présentent un aspect normal [42]. Quelques marques de passages de corps étrangers sont observées entre les dents et quelques petites piqures sans gravité.

III.5.2. L'usure anormale :

Cette détérioration survient lorsque le lubrifiant est contaminé par des particules abrasives ou corrosives, ce qui entraîne une usure irrégulière des surfaces actives des dents et perturbe le bon fonctionnement de l'engrenage. L'usure des dents est proportionnelle au glissement spécifique et à la contrainte de compression au contact des surfaces. Les racines et les sommets des dents sont les zones les plus affectées. Les centres instantanés de rotation offrent une résistance à l'usure, car les profils ne glissent pas dans cette zone.

III.5.3. Usure modérée :

À ce stade d'usure, il est facile de constater une perte de matière au niveau de la saillie et du creux sous les dents de la denture. Une ligne continue de faible épaisseur, représentant la trace primitive de surface de fonctionnement, est visible sans aucun signe d'usure ou d'enlèvement. L'usure modérée entraîne des pertes de matière plus rapides le long des profils, surtout lorsque les engrenages fonctionnent à leur limite de régime. Cela se produit souvent lorsque la viscosité de l'huile est limitée, comme lors de démarrages à froid sans préchauffage. Cette usure est fréquente dans les engrenages très sollicités tournant à basse vitesse et fabriqués en acier traité dans la masse, conduisant parfois à l'émergence de piqures sur les profils dentaires. [42]

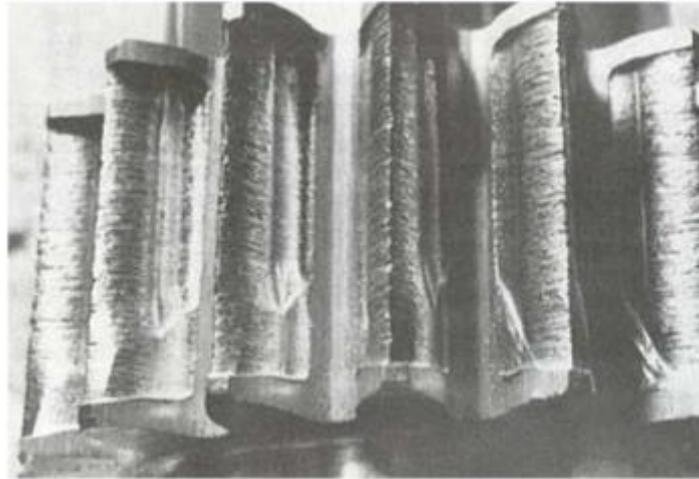


Figure38: Usure modérée. [42]

III.5.4. Usure excessive et destructive :

Ce type d'usure est considéré comme une anomalie, souvent conduisant à la mise hors service de l'engrenage ou indiquant sa fin imminente. Elle se caractérise par une modification significative de la forme des dents, généralement accompagnée d'une réduction considérable de leur épaisseur. Dans les zones d'engrènement, cette usure due au grippage à froid entraîne une diminution notable de l'épaisseur des dents, avec l'apparition de sillons profonds dans le sens du mouvement, une ligne au niveau du primitif et des dents pointues. Dans ces conditions, le pignon concerné n'est plus utilisable.[42]

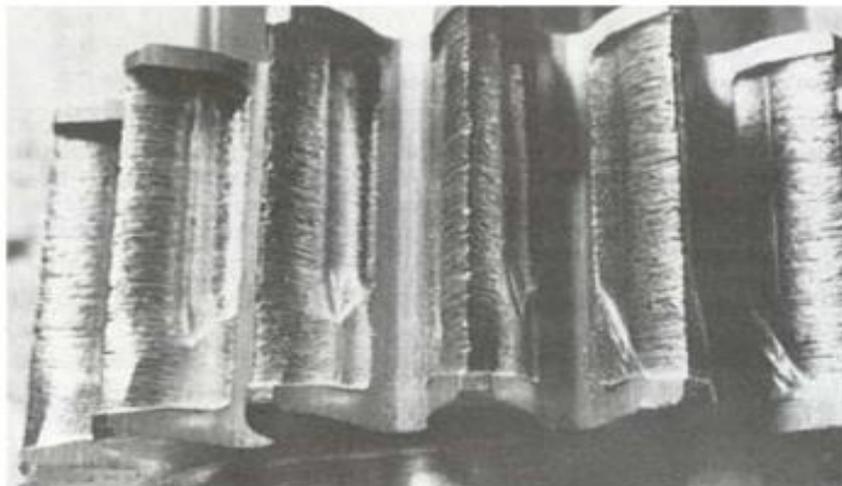


Figure39: Usure excessive d'un pignon. [42]

III.5.5. Le rodage :

L'usure des dents modifie le profil, augmente la charge dynamique et affaiblit la racine des dents. Au début de la transmission, les rugosités sur les surfaces de contact causent une usure visible des dents jusqu'à ce que les surfaces deviennent lisses, processus appelé rodage. Pour réduire l'usure, il faut diminuer le mouvement spécifique et les contraintes de compression lors du contact des dents, et améliorer la résistance à l'usure des surfaces actives. L'investigation des origines de l'usure excessive implique l'étude du lubrifiant, de la filtration, du refroidissement, de l'étanchéité du carter, ainsi que des matériaux, du traitement, de la qualité du taillage et de la déformation des arbres. [51]

III.5.2. Les mécanismes d'usure :

On distingue trois principaux modes d'usure :

III.5.2.1. Usure par abrasion :

Elle se distingue par la présence d'une surface rugueuse dans le contact ou par l'infiltration de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou liés à la pollution de l'environnement dans le matériau le plus tendre. Ce processus de dégradation qui implique au départ uniquement les corps opposés, se transforme rapidement en une usure à trois corps.

Les dentures des engrenages sont souvent soumises à ce type d'usure, qui peut être associée à la vitesse de glissement et à la pression de contact.

III.5.2.2. Usure par transfert ou adhésion :

L'usure des dents d'engrenage dégrade leur profil, accroît la charge dynamique et fragilise leur racine. Elle est souvent due à des rugosités initiales des surfaces de contact, provoquant un rodage. Pour minimiser cette usure, il est crucial de réduire le mouvement spécifique et les contraintes de compression lors du contact des dents, tout en augmentant la résistance à l'usure des surfaces actives. L'analyse des causes d'usure excessive comprend l'examen du lubrifiant, de la filtration, du refroidissement, et la correction des défauts de conception ou de fabrication.

III.5.2.3. Usure par fatigues :

L'usure peut être expliquée par un mouvement cyclique et la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par le frottement. Les signes de l'usure par fatigue comprennent des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique. Les réactions à ce processus varient selon le matériau. Par exemple, la rupture par fissuration se produit en sous-couche, parallèlement à la surface de frottement, là où les contraintes de cisaillement sont les plus fortes, pour les matériaux ductiles comme les métaux

ou les polymères. La répartition des contraintes de cisaillement en sous-couche est estimée à l'aide de la théorie de Hertz.

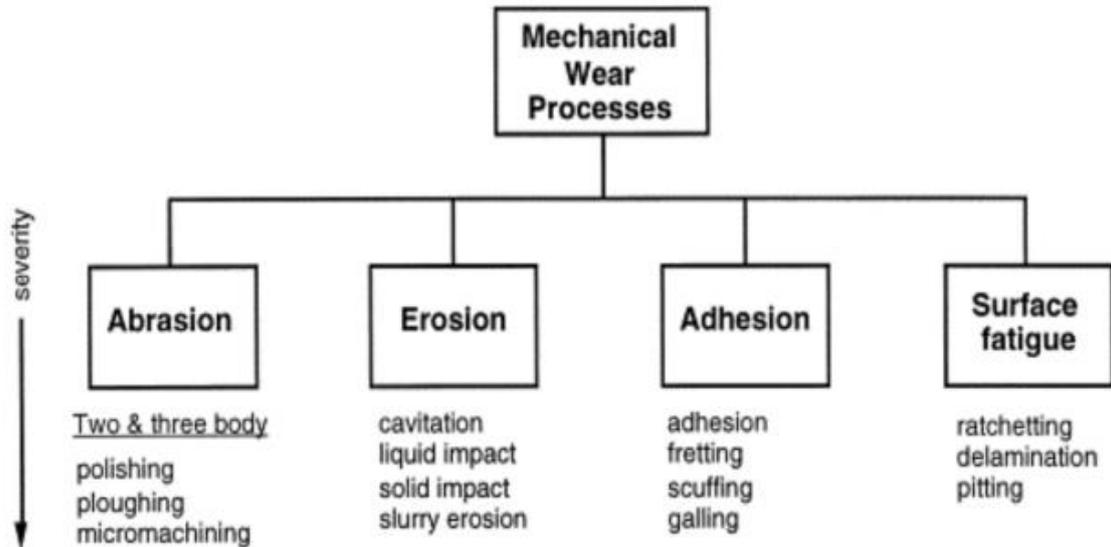


Figure40: La classification de modes d'usure. [36]

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a exploré les divers mécanismes d'endommagement des engrenages, mettant en lumière les principales causes de dégradation. L'usure, le rodage, le grippage, et les pitting sont parmi les dommages les plus courants qui peuvent affecter les engrenages, chacun ayant des effets spécifiques sur leur performance et leur durabilité. La compréhension de ces mécanismes est cruciale pour analyser les failles potentielles et améliorer la conception des engrenages afin de minimiser les risques d'endommagement.

Chapitre IV

**Étude de cas Simulation d'un
engrenage avec le logiciel**

Ansys Workbench

IV.1 Introduction :

Les systèmes mécaniques sont fréquemment exposés à des sollicitations variables au fil du temps et à d'autres conditions d'utilisation telles que le moment appliqué, une mauvaise lubrification ou des problèmes de vibration. En particulier, les engrenages ou les surfaces dentaires sont exposées à des conditions de fonctionnement excessives, ce qui entraîne la détérioration des surfaces dentaires et l'apparition des endommagements de la pièce mécanique, dans notre cas ses avaries sont causer par une lubrification qui est inadéquate.

L'objectif de cette étude consiste à examiner les contraintes et les déformations des mécanismes d'endommagements de l'engrenage pour connaître sa durée de vie et localiser les dégâts.

IV.2. Description du logiciel :

ANSYS est un logiciel de résolution numérique d'éléments finis destiné à résoudre une grande diversité de problèmes physiques en général et mécaniques en particulier. Parmi ces problèmes, on retrouve notamment :

L'analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire), le transfert de chaleur, la dynamique des fluides, l'acoustique et l'électromagnétique.

Il existe de nombreuses possibilités offertes par de tels programmes :

- Évaluation linéaire ou non linéaire d'un système physique contenu ;
- Évaluation statique ou dynamique ;
- Intégration de lois de comportement complexes ;

Prendre en considération différents phénomènes (élasticité, thermique, électromagnétique, de plasticité, d'écoulement,) qui peuvent être combinés ;

- solutions pour optimiser, etc.

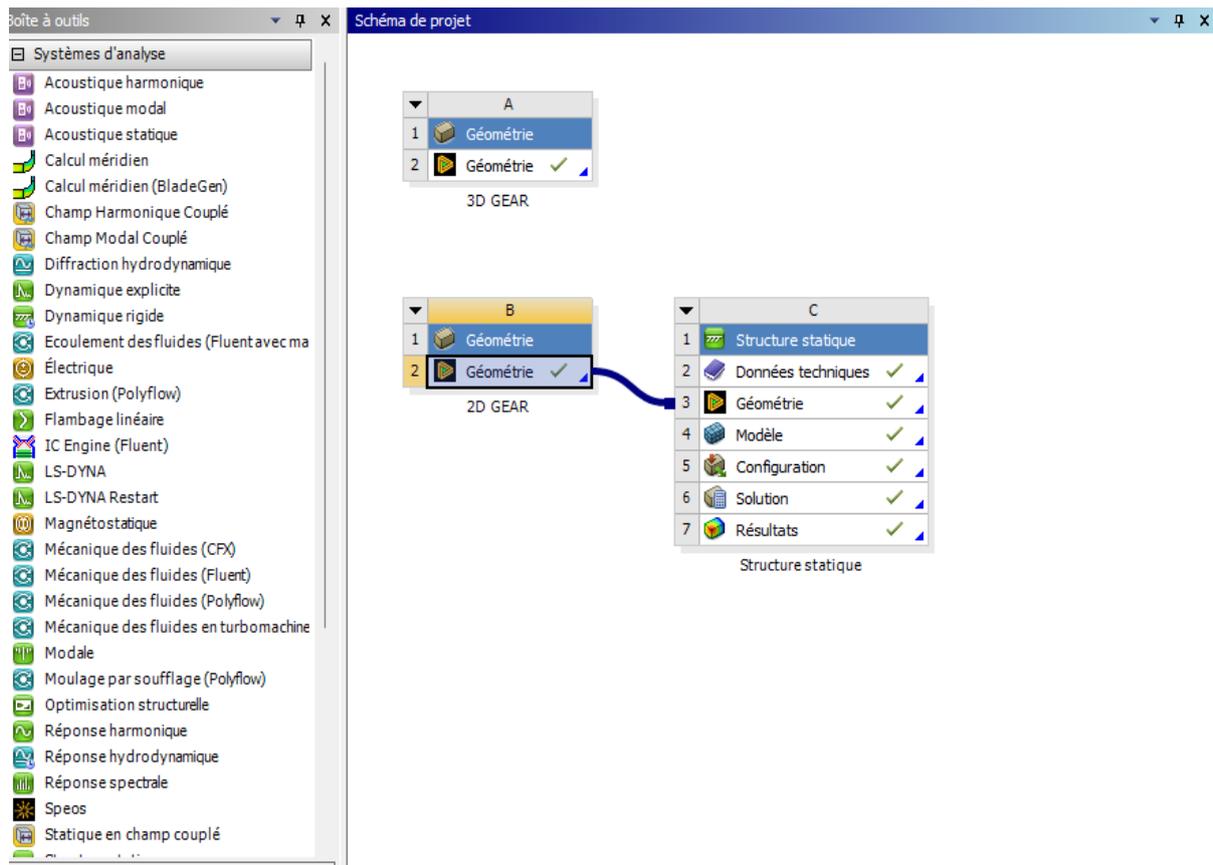


Figure41: Logiciel Ansys workbench

IV.3. Type d'analyse :

Dans cette recherche, on utilise le logiciel Ansys workbench pour effectuer une simulation sur une paire de pignons droits engrenant. Un couple de $1,6^{06}$ N.mm (15 000 lb-in, moment) est appliqué sur le pignon supérieur alors que les deux pignons sont à l'arrêt, avec une lubrification absente.

L'objectif est d'évaluer la contrainte maximale lors de la transmission du couple. Normalement, la contrainte maximale se produit au contact ou à la racine d'une dent en raison de la flexion de la dent.

IV.4. Géométrie :

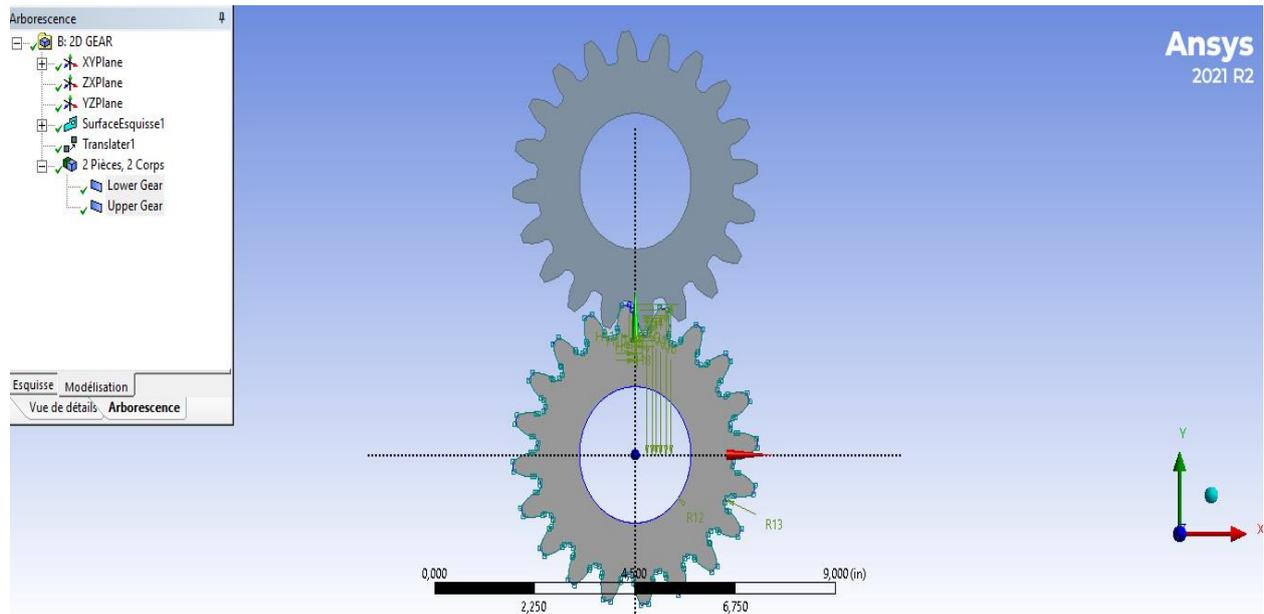


Figure42: Conception de la géométrie.

IV.5. Données du matériau :

Un acier standard est utilisé pour cette étude

Tableau 11: Caractéristiques de l'engrenage.

Nom de l'objet	<i>Lower Gear</i>	<i>Upper Gear</i>
Etat	Maillé	
Propriétés graphiques		
Visible	Oui	
Transparence	1	
Définition		
Comportement de raideur	Flexible	
Epaisseur	25,4 mm	
Matériau		

Chapitre IV : Etude de cas Simulation d'un engrenage avec le logiciel Ansys Workbench

Affectation	Acier standard	
Effets non linéaires	Oui	
Effets de déformation thermique	Oui	
Boîte englobante		
Longueur suivant X	139,55 mm	
Longueur suivant Y	139,55 mm	
Propriétés		
Volume	2,3593e+005 mm ³	
Masse	1,8521 kg	
Nombre de dent	20	
Module	1.5	
Diamètre primitif	30	
Moment d'inertie Ip1	2376,4 kg·mm ²	
Moment d'inertie Ip2	2376,4 kg·mm ²	
Moment d'inertie Ip3	4752,8 kg·mm ²	
Aire (approx.)	9288,8 mm ²	
Moment d'inertie Ip1		2376,4 kg·mm ²
Moment d'inertie Ip2		2376,4 kg·mm ²
Moment d'inertie Ip3		4752,8 kg·mm ²

Statistiques		
Nœuds	7938	7873
Eléments	2486	2463

IV.6. Maillage de la dent :

Le maillage est effectué automatiquement dans le logiciel ANSYS, qui inclut un mailleur intégré. En utilisant les options disponibles, on peut faire des choix libres sur les surfaces et les volumes.

Un dimensionnement des arrêtes est effectué dans la zone de contact résultant a un maillage concentré sur les dents en contact.

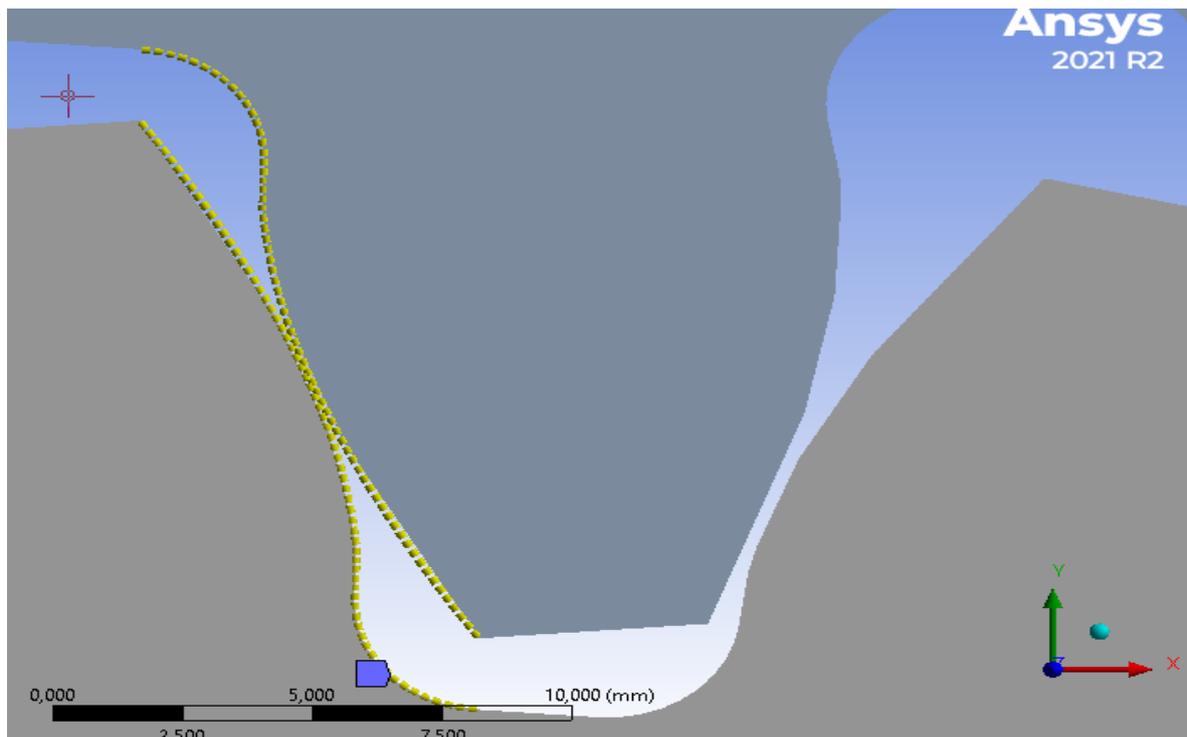


Figure43: Dimensionnement des arrêtes

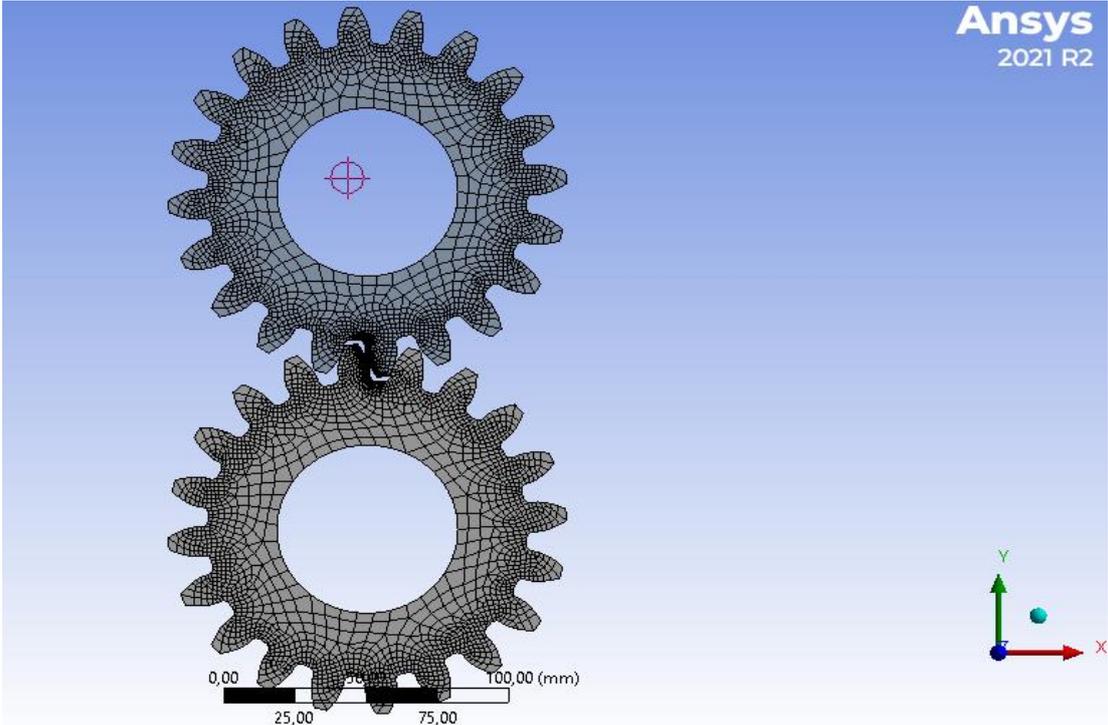


Figure44: Maillage après dimensionnement au point de contact des arrêtes

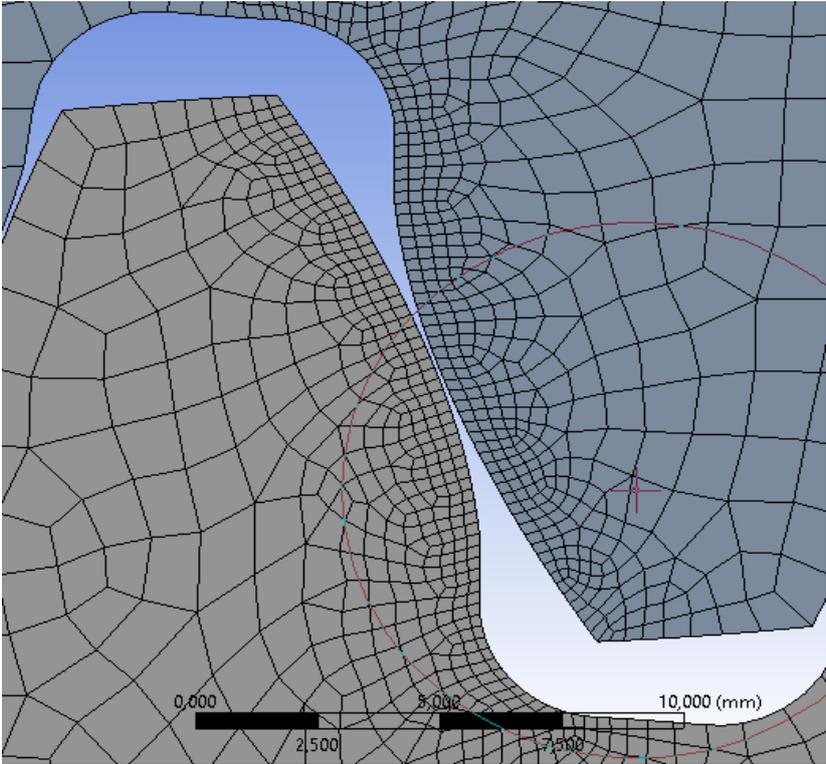


Figure45: Maillage après dimensionnement au point de contact (Image rapprochée)

IV.7. Conditions aux limites :

Afin de résoudre le problème par élément finis, il est nécessaire de définir les conditions aux limites et les efforts requis. Un moment et un support sans frottement ont été appliqués sur l'upper gear. Figure IV.6 et IV.7

Un support fixe est appliqué sur the lower gear. Figure IV. 8.

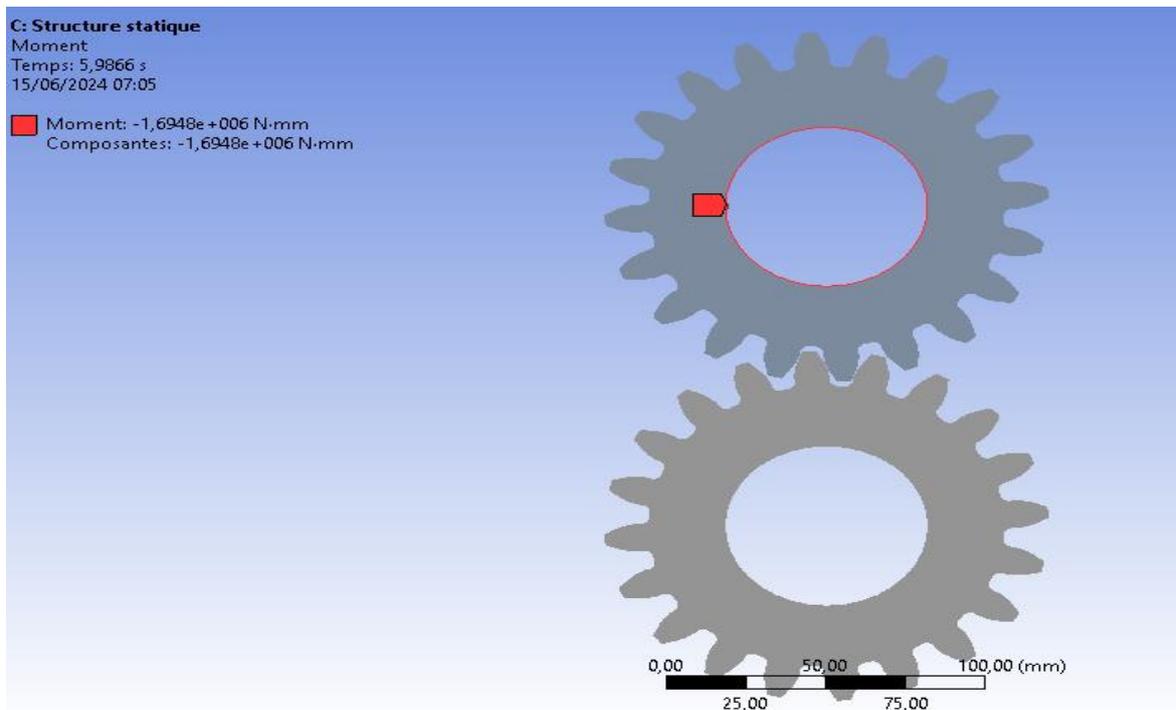


Figure46: Structure statique, moment appliqué sur la face intérieure.

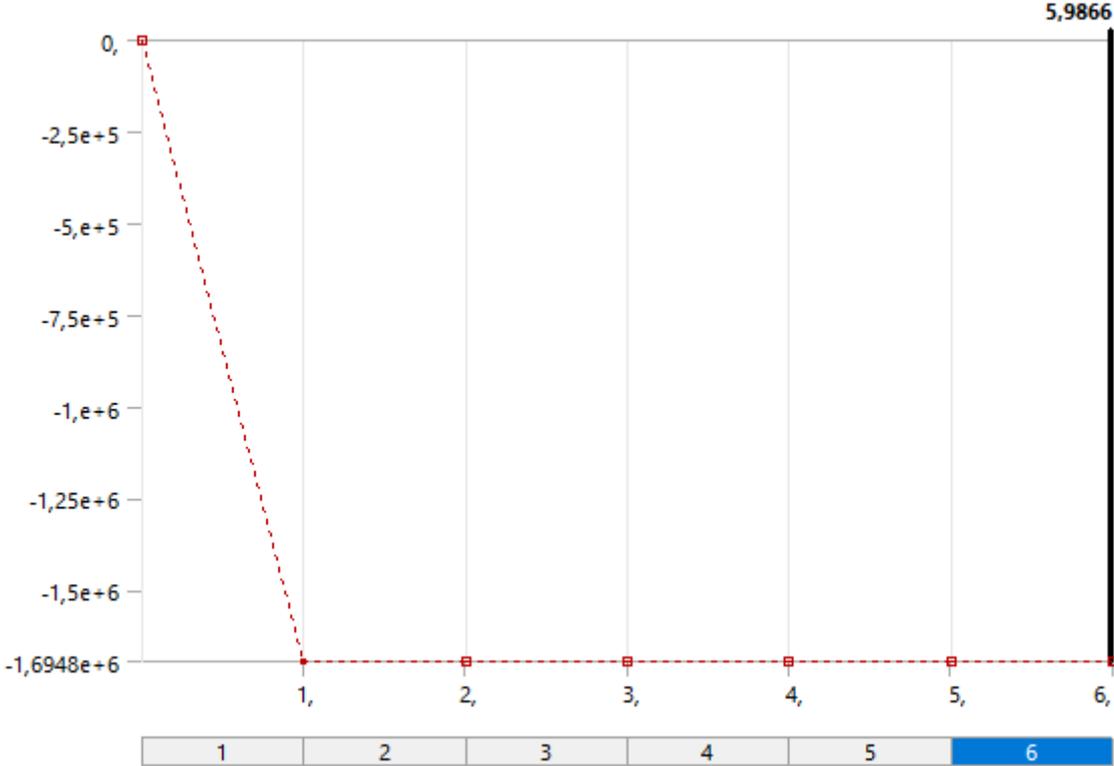


Figure47: Graphe moment N.mm/S

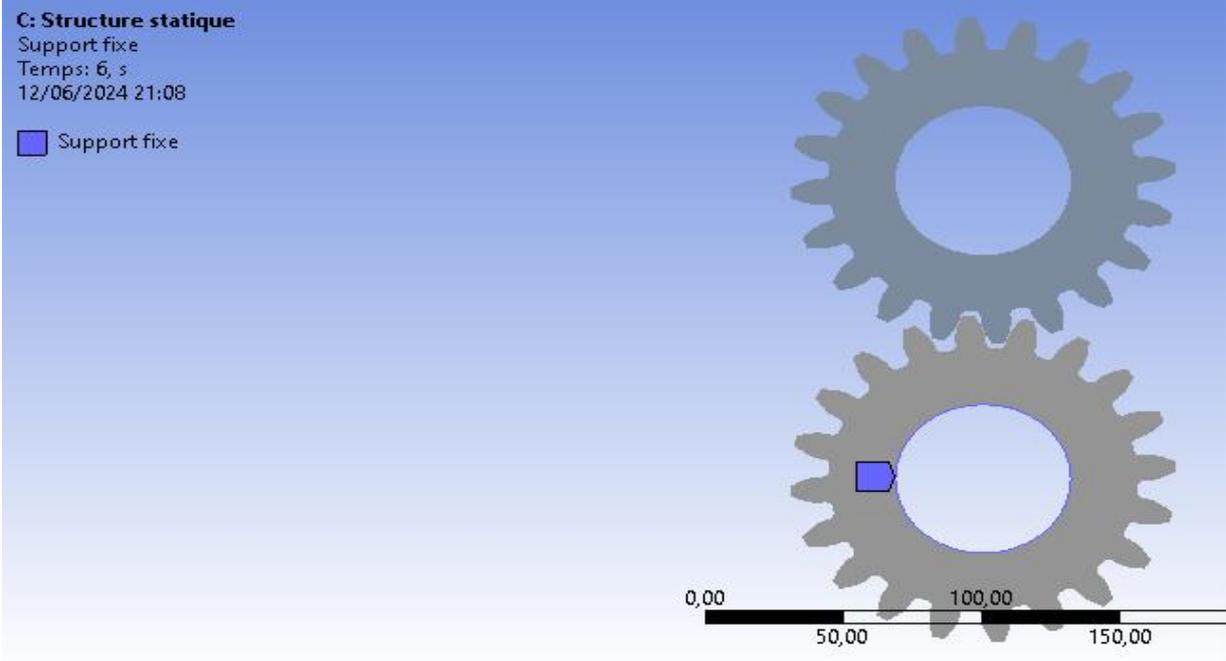


Figure48: Structure statique support fixe applique sur la face intérieure (lower gear)

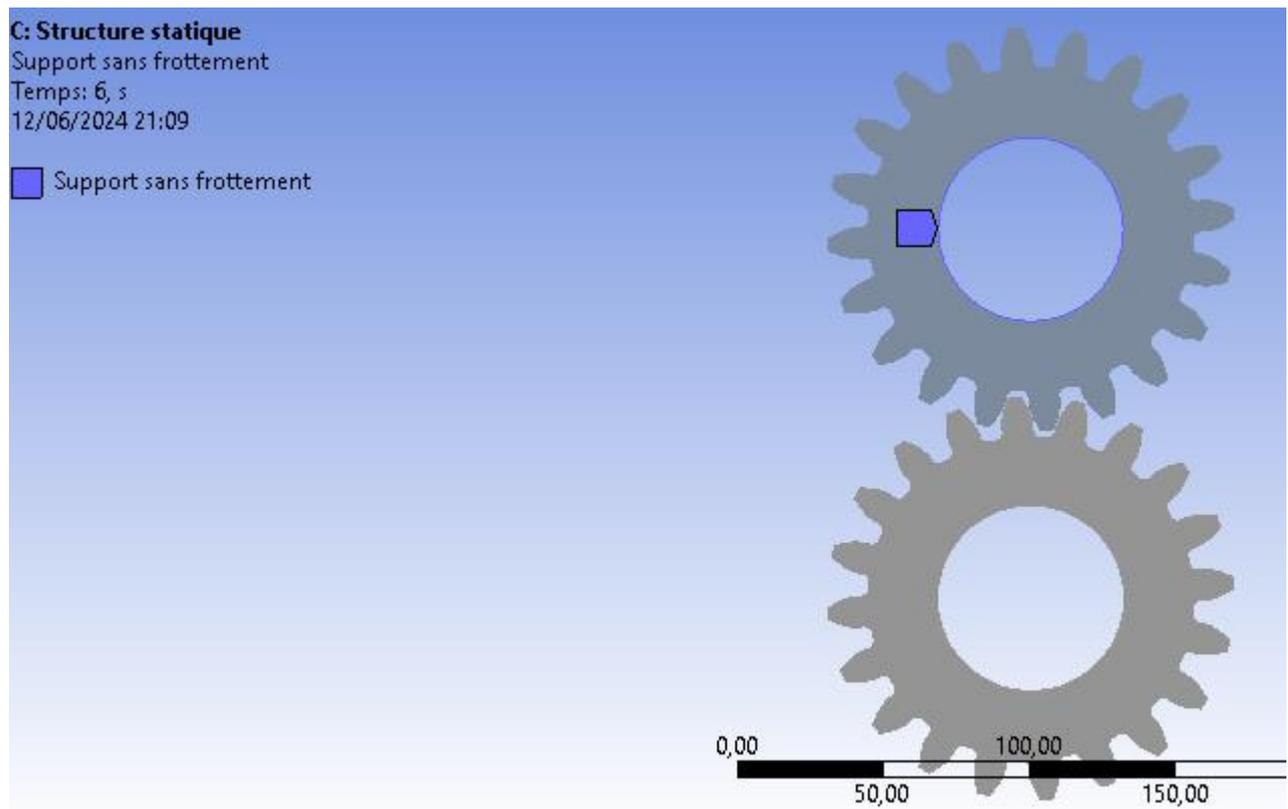


Figure49: Structure statique support sans frottement applique sur la face intérieure (upper gear)

IV.8. Résultats et discussion :

Les analyses d'endommagement des engrenages ont été réalisées aux endroits où se produisent les contraintes maximales de Von Mises, c'est-à-dire au point de contact ou dans la zone de contact des dents d'engrenage. Bien que les contraintes maximales de cet outil soient moins concentrées sur les racines des dents, l'augmentation des contraintes après chaque cycle finit par affecter les racines, menant ainsi à la rupture ou à d'autres avaries. Toutefois, le point le plus sollicité reste le contact des arrêtes. Notre objectif était d'analyser l'état des contraintes dans les engrenages à denture droite et de prédire les endommagements ainsi que la durée de vie de ces engrenages. Cette étude de cas a permis d'examiner en profondeur les contraintes et les déformations des engrenages soumis à des conditions de lubrification inadéquates à l'aide du logiciel ANSYS Workbench. Les résultats montrent que sous un couple de 1.6^{e6} N.mm (15 000 lb-in), les contraintes maximales atteignent des valeurs critiques aux points de contact des dents. Les zones adjacentes subissent également des déformations importantes, confirmant leur vulnérabilité. La simulation a mis en évidence l'importance de ces zones critiques pour la prévision de l'endommagement et a fourni des indications précieuses pour la maintenance préventive. L'analyse a démontré que des conditions de lubrification inadéquates augmentent

Chapitre IV : Etude de cas Simulation d'un engrenage avec le logiciel Ansys Workbench

significativement les risques de défaillance en accélérant l'usure et la propagation des fissures dans les zones de contrainte maximale. Les résultats ont également permis d'avoir une idée sur la durée de vie totale des engrenages, indiquant une réduction notable par rapport à des engrenages correctement lubrifiés. En utilisant des éléments tétraédriques tridimensionnels pour le maillage, nous avons pu modéliser avec précision les zones critiques, notamment le pied et les arrêtes des dents d'engrenage, où les contraintes sont maximales.

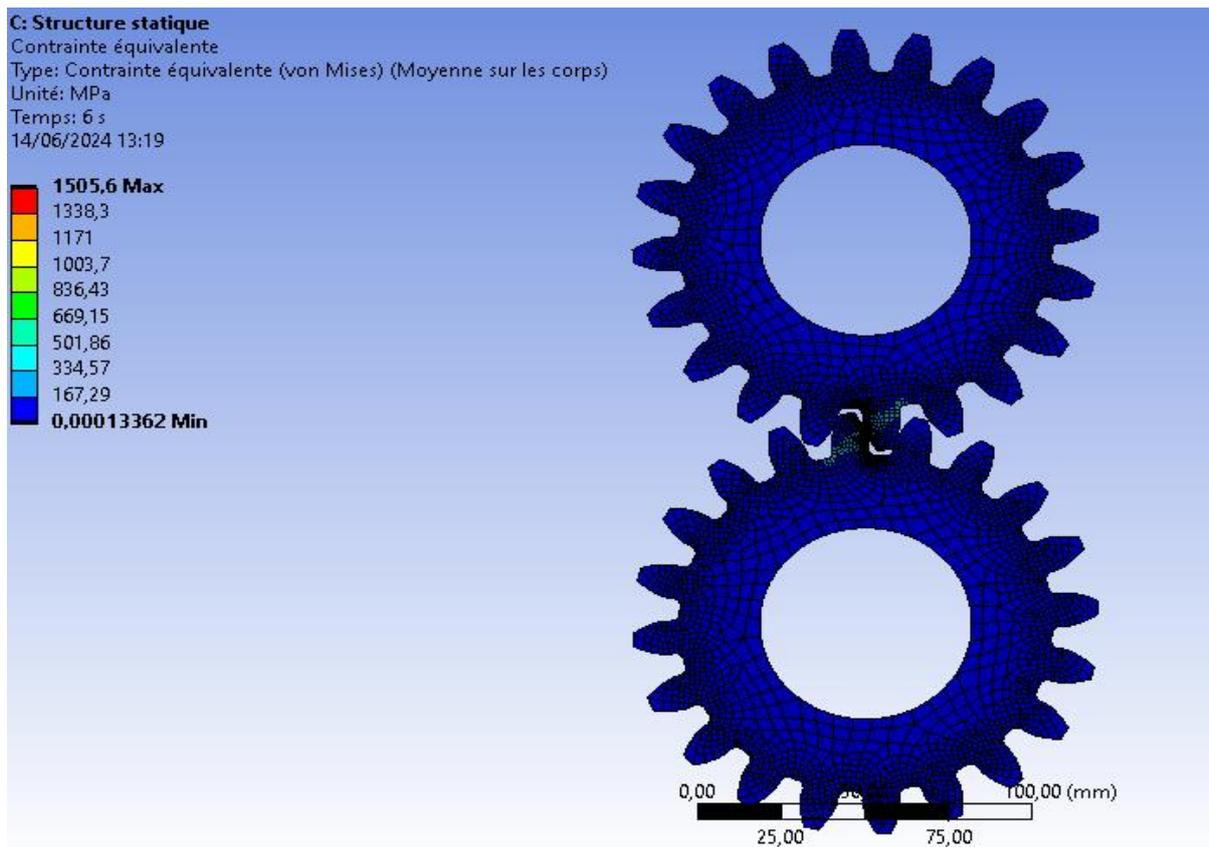


Figure50: Concentration contrainte équivalente Von Mises

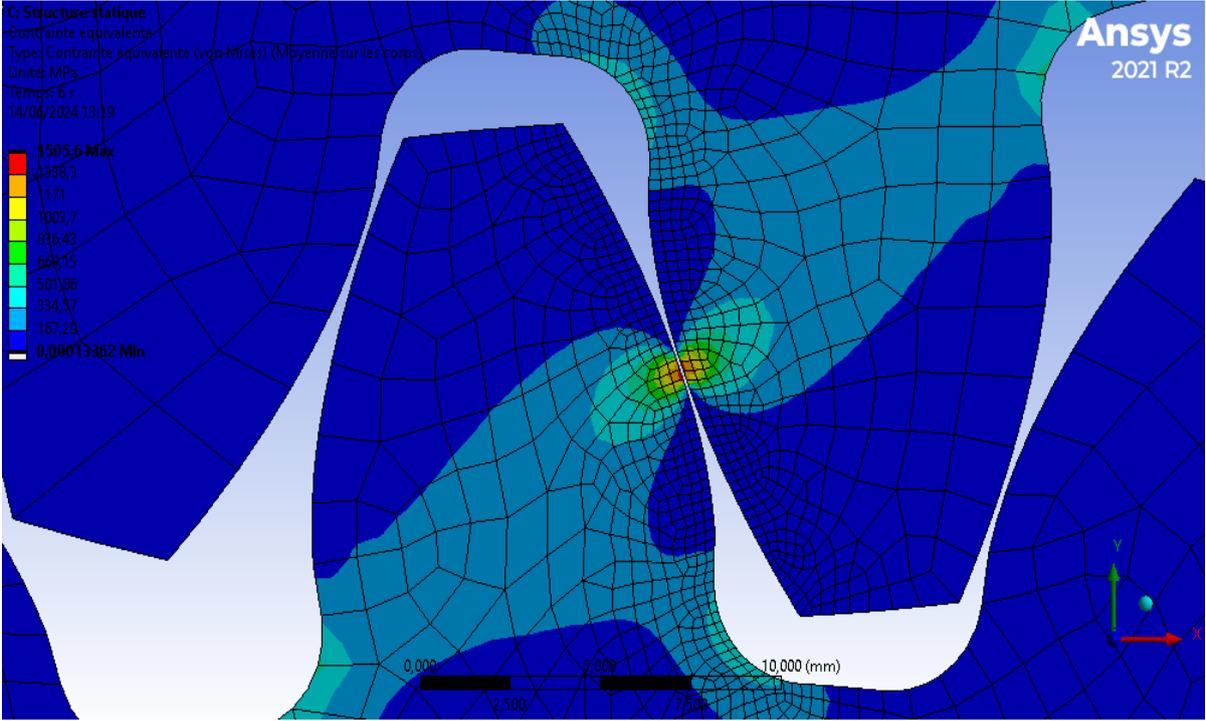


Figure51: Concentration contrainte équivalente Von Mises (image rapprochée)

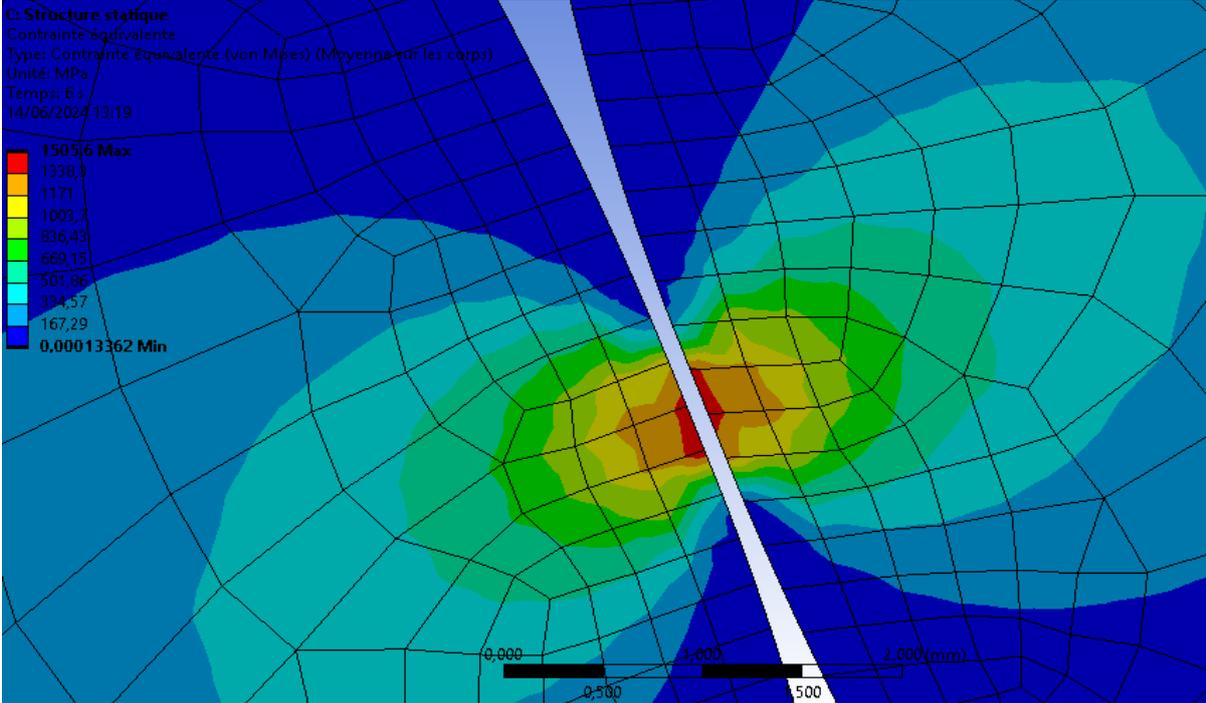


Figure52: Concentration contrainte équivalente von mises (image rapprochée)

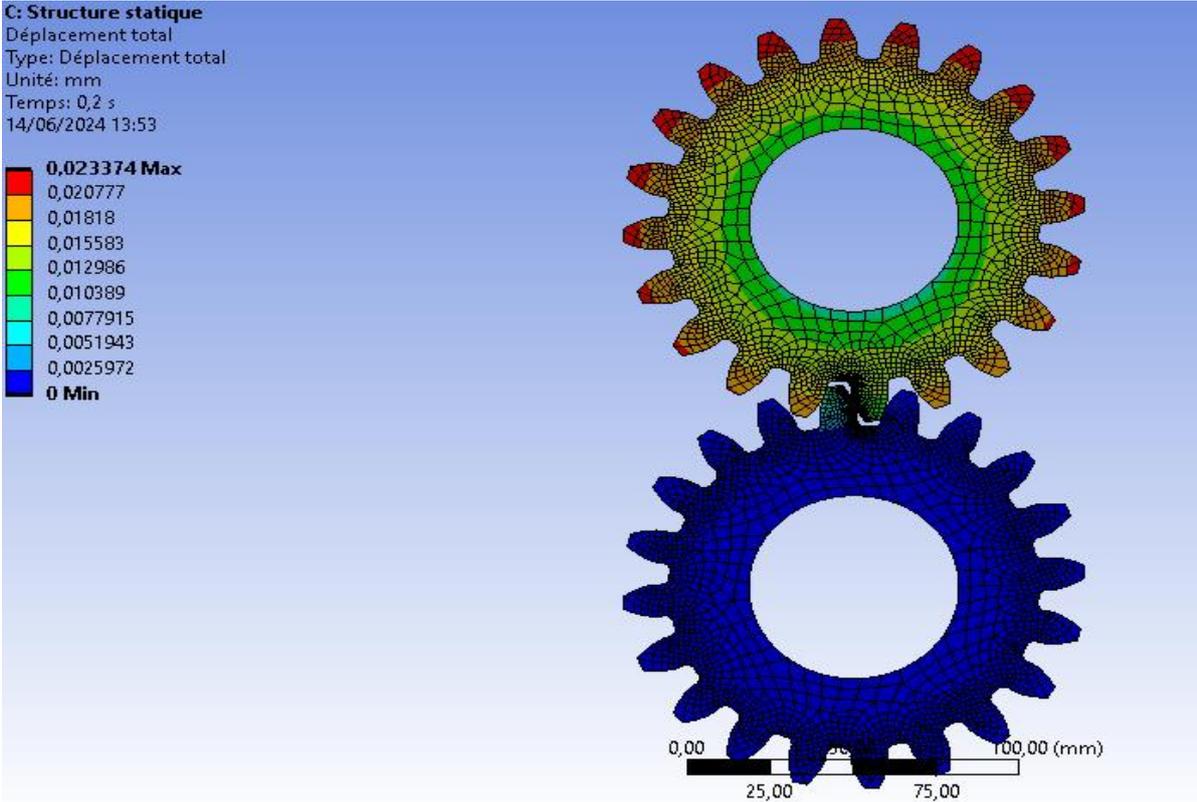


Figure53: Déplacement totale.

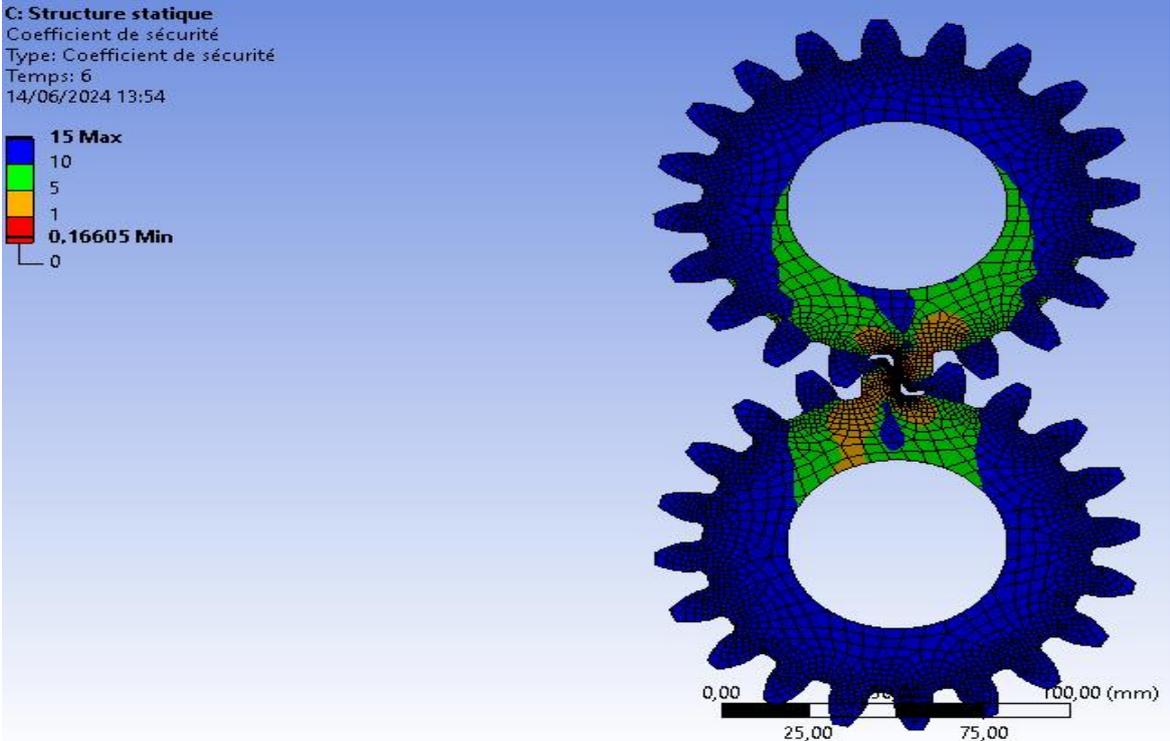


Figure54: Coefficient de sécurité outil de contact.

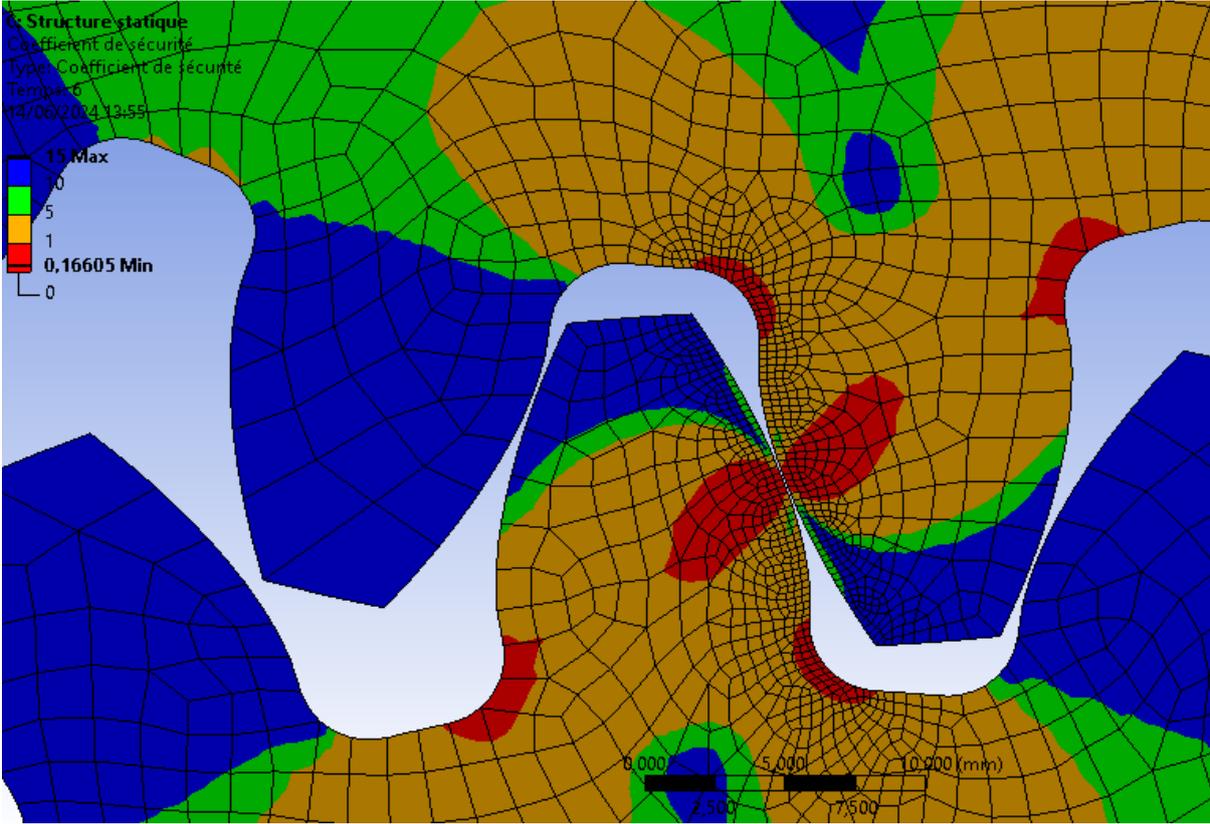


Figure55: Coefficient de sécurité outil de contact.

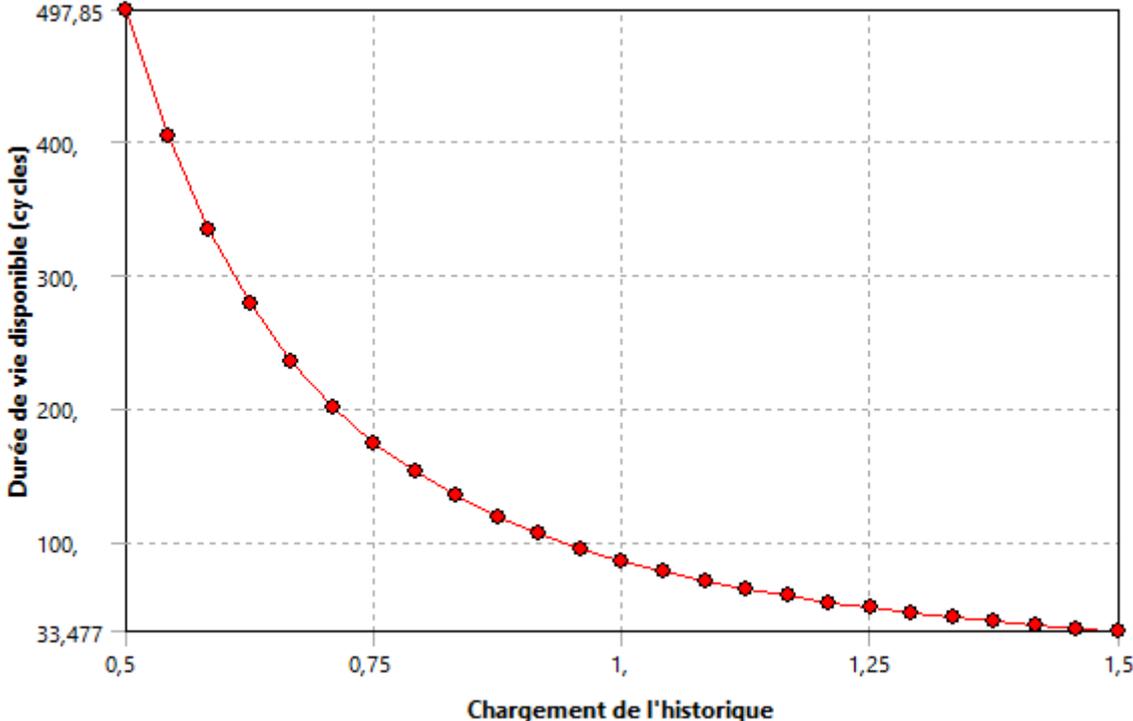


Figure56: Structure statique outil fatigue sensibilité

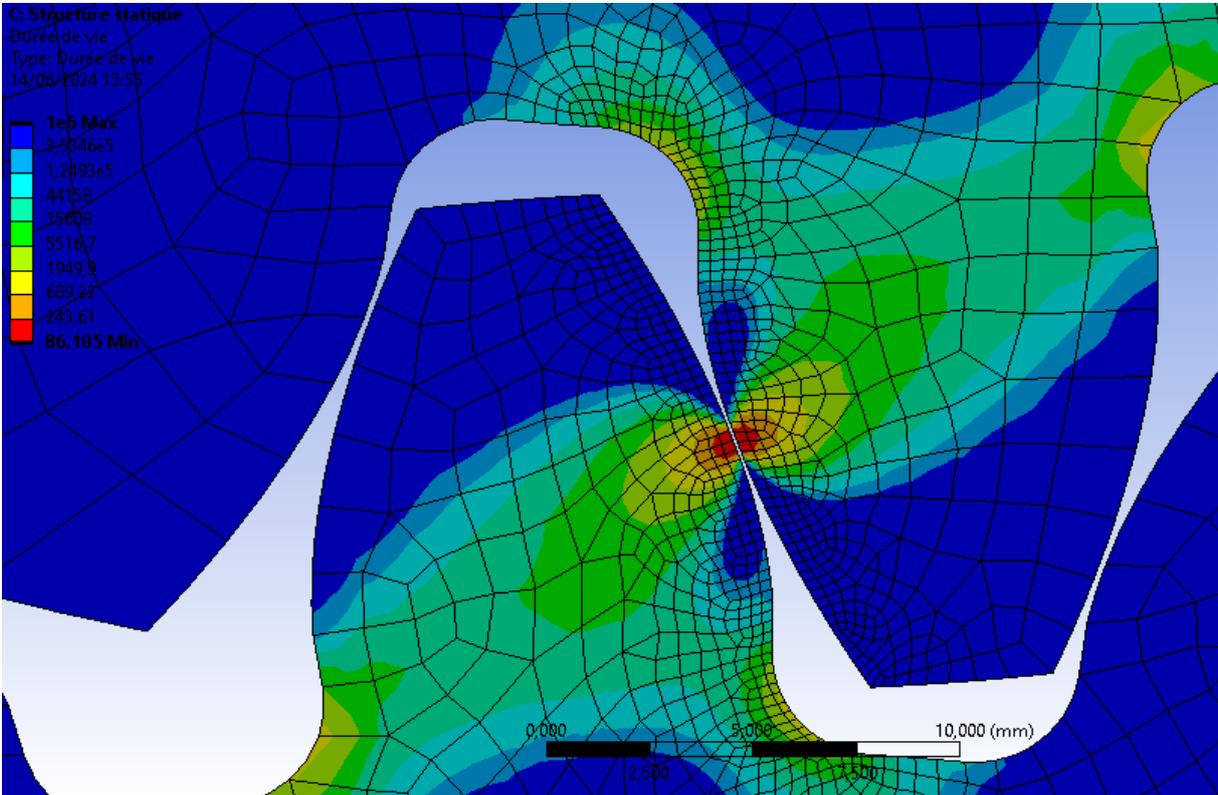


Figure57: Duré de vie

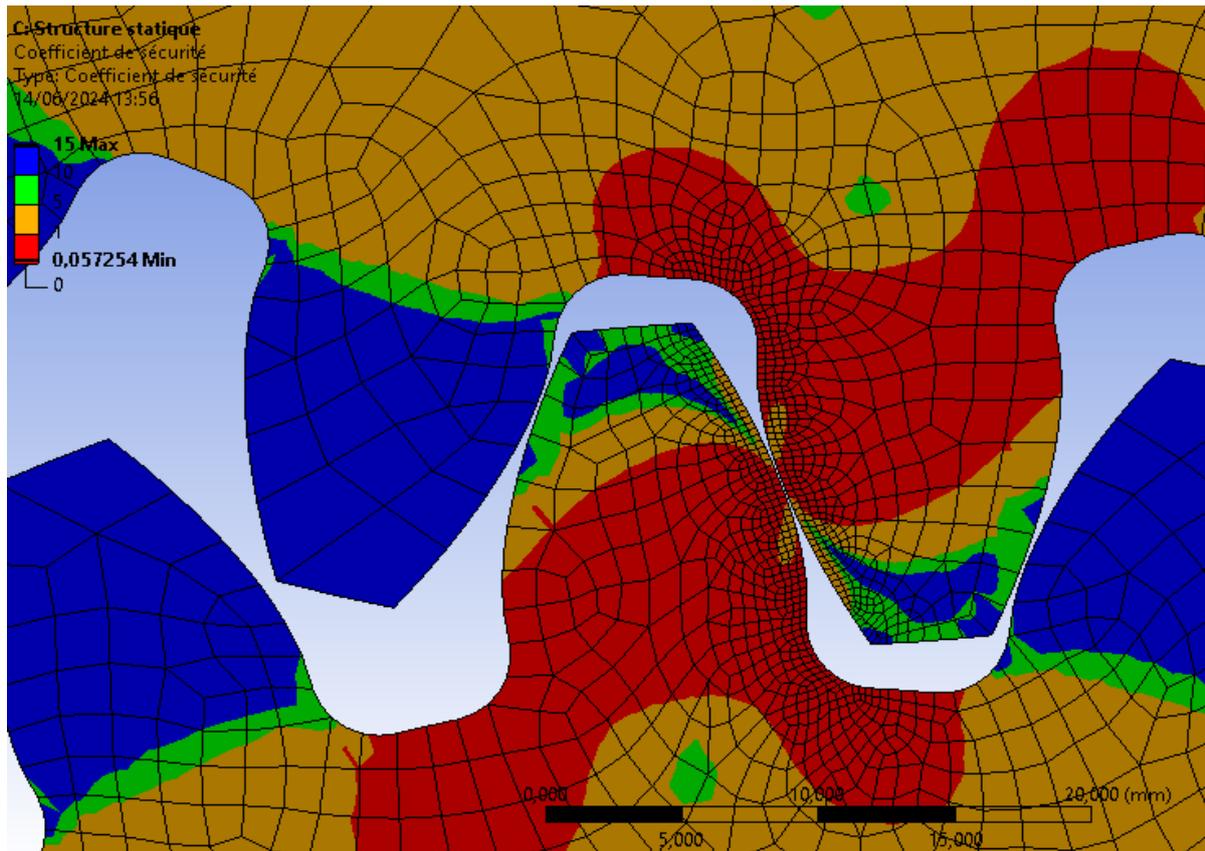


Figure58: Coefficient de sécurité outil de fatigue

IV.9. Plan de maintenance :

La meilleure stratégie de maintenance à proposer visant à prédire les dommages d'un engrenage liés à une lubrification inadéquate serait une approche proactive intégrant une analyse de la fiabilité. Cette stratégie impliquerait l'utilisation de données historiques pour identifier les modèles de défaillance, le développement de modèles de prédiction des défaillances basés sur des techniques analytiques et statistiques, ainsi que la mise en place d'un système de surveillance des paramètres de fonctionnement critiques pour détecter les signes précurseurs de dommages potentiels. En combinant ces éléments, il serait possible de mettre en œuvre des actions de maintenance préventive ciblées pour prévenir les défaillances dues à une lubrification inadéquate, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les coûts de réparation.

Pour assurer la longévité de l'engrenage, une lubrification adéquate est essentielle. En utilisant le lubrifiant recommandé et en suivant un programme de maintenance régulier, les risques de défaillance seront réduits. Un suivi attentif des conditions de fonctionnement permet de détecter les signes précurseurs de problèmes. Investir dans des pratiques de maintenance préventive garantit une performance optimale sur le long terme.

IV.10. Conclusion :

Cette étude de cas a démontré l'efficacité du logiciel ANSYS Workbench dans la simulation des contraintes et des déformations des engrenages sous lubrification inadéquate. Grâce à un maillage précis utilisant des éléments tétraédriques, nous avons identifié que les points de contact des dents subissent les contraintes maximales, particulièrement aux arrêtes. Ces concentrations de contraintes critiques sont les principaux facteurs de dégradation. L'analyse permet de prédire avec précision les zones à risque et la durée de vie de l'engrenage. La mise en place d'un plan de maintenance proactive, basé sur ces résultats, peut prévenir les défaillances, réduisant ainsi les coûts de réparation et les temps d'arrêt.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, ce mémoire a exploré de manière exhaustive les mécanismes d'endommagement des engrenages liés à une lubrification inadéquate, en mettant en lumière l'importance cruciale de la maintenance et de la lubrification dans le maintien de la performance et de la longévité des systèmes mécaniques. Les engrenages, en tant que composants essentiels dans de nombreuses applications industrielles, nécessitent une attention particulière pour prévenir les défauts et les dommages.

Ce mémoire a mis en évidence les défis associés à la lubrification des engrenages. Les perspectives futures de ce travail incluent le développement de nouvelles stratégies de lubrification et l'optimisation continue des pratiques de maintenance, afin de garantir des performances optimales et une durabilité accrue des engrenages dans diverses applications industrielles.

En somme, l'amélioration de la lubrification et de la maintenance des engrenages représente un levier essentiel pour renforcer la fiabilité et l'efficacité des systèmes mécaniques, contribuant ainsi à la réduction des coûts de maintenance et à l'augmentation de la durée de vie des équipements industriels.

Bibliographie :

[1] A. Wahiba << le problème conjoint de l'ordonnancement de la production et de planification de la maintenance : cas du flow shop flexible >>. Mémoire de magister.

Université M'HAMED BOUGARA BOUMARDAS.2014

[2] Norme AFNOR FD X 60-000, << Maintenance industrielle – fonction maintenance >>. Edition afnor. Paris. www.afnor.fr . Mai 2002.

[4] «génération d'indication de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne », thèse de doctorat du l'université d'Orléans, 2010.

[6] V. Zille << Modélisation et évolution des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants >>. Thèse de doctorat. Université de technologie de TroyesInstitute Charles Delaunay, janvier 2009

[7] G.Mathieu<< Modélisation des couts de cycle de vie : présentation des coûts de la maintenance et de fiabilité, application à l'aéronautique >>. Thèse de Doctorat. L'école centrale de Lyon, janvier 2005

[8] INGEXPERT « Conseil, Accompagnement du Management de la Maintenance Industrielle, tertiaire, BTP, transport et biomédicale, Fiabilisation des équipements » www.ingexpert.com – 17 F bd Jean Duplessis 13014 Marseille, Ed 2008.

[9] B. Meryem « AMDEC appliquée à la STEP d'Ain El Houtz »thème de master, université du Tlemcen, département d'Hydraulique, 2014/2015.

[10] E. Deloux: « POLITIQUES DE MAINTENANCECONDITIONNELLE POUR UN SYSTEME A DEGRADATION CONTINUE SOUMIS

A UN ENVIRONNEMENT STRESSANT ».Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes7/10/ 2008.

[11] H. Djamel « Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines Dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures » Thèse de Doctorat, Université M'HAMED

Bibliographie :

BOUGARA-BOUMERDES, 2014.

[12] Méthode de planification de plan de maintenance : <https://planonsoftware.com>

[13] A. BELHOMME : BTS Maintenance industrielle « Cours de stratégie de maintenance » <http://btsmiforges.free.fr>, année 2010/2011.

[14] B. DANIEL, C. HAZARD. Guide de maintenance. ISBN (2-09-181580-2). Paris. Nathan.1987.

[16] LAIB. L, Etude de la stabilité à l'oxydation des huiles lubrifiantes algériennes (pour moteurs à essence). Mémoire de magister, Université de Boumerdes, 2010.

[17] Djamel Mazari cour chapitre V lubrification, univ-Tiaret.

[20] Kh.NEJJAR, Etude de la réactivité thermique d'une huile de lubrification des moteurs Diesel.Thèse de doctorat, Université Mohammed V- Agdal-Maroc, 2011.

[22] V.Stepina and V.Vesely, "Lubricants and special fluids".Tribology series, 23, Czecho Slovakia, 1992.

[23] BENLALLI.Y, Modélisation numérique du comportement dynamique d'un film d'huile dans un roulement à billes.Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2008.

[25] R. Keith Mobley, "Maintenance fundamentals", 2-Edition, USA, 2004.

[26] Thierry GUERTIN, Mesure expérimentale de l'erreur de transmission cinématique d'engrenages spiro-coniques et hypoïdes, Université Laval, 1999, pp 1-2.

[27] LARBI Mohamed Seif El Islem et HALIMI Wahid MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES Sciences et Technologie Spécialité : Maintenance industrielle ANALYSE VIBROACOUSTIQUE DES DEFAUTS D'ENGRENAGES 2020/2021-univ-Tiaret.

[28] G. HENRIOT, Traité Pratique et Théorique des engrenages, tome 2, Edition Dunod.

[29] Jardin_Nicolas Hervé (TERMINALE S.T.I)/ Transmission de puissance –

American LES ENGRENAGES – Construction

[30] G. Lenormand, R. Mignée, J. Tinel, Foucher, Construction mécanique, tome 3, Jan. /Feb. 1988, pp. 38-43.

[32] G. Lenormand, R. Mignée, J. Tinel, Foucher, Construction mécanique, tome 3, Jan. /Feb. 1988, pp. 50-58.

Bibliographie :

- [33] G. HENRIOT, « Traité théorique et pratique des engrenages », tome 1, Dunod, Paris, 1968.
- [34] Cours des engrenages/Michel Delaboure : <http://www.cours-et-exercices.com/2016/03/cours-des-engrenages.html>
- [35] R. LEBORZEC, « Etude générale de l'engrenage », (polycopie de cours), ENSAM, 1989, Lille, France. p.248-255.
- [36] Mme Gharbi née Djebbar Nadira, automatisation du calcul des dents d'engrenage dans une transmission composée, Mémoire Magister en Génie mécanique construction Université Mentouri Constantine, 2015,90p.
- [38] Osman, T., "Simulation de l'usure et d'avaries sur des dentures d'engrenages
- [39] [L.FAURE] – Aspect des dentures d'engrenages après fonctionnement, Senlis (Oise), CETIM, 1993, pp128
- [40] Orém Redon/ cours de construction_ les engrenages.
- [41] [Cetim]2 – Principaux aspects des dentures des engrenages – Document pédagogique – Cetim 2008,formation N70, pp1-10
- [42] Stewart, R.M. The specification and development of a standard gearbox monitoring. 2nd International Conference on Vibration in Rotating Machines, - 99 –
- [43] Jardin_Nicolas Hervé (TERMINALE S.T.I)/ Transmission de puissance – American LES ENGRENAGES – Construction
- [44] [C.Breneur] – Élément de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et roulements – Thèse doctorat, INSA- Lyon, 2002
- Cambridge, 1980, p. 353-358.
- [45] Höhn, B.R., Michaelis, K. Influence of oil temperature on gear failures. Tribology International, 2004, Vol. 37, p. 103–109.

Bibliographie :

- [46] Lewicki, D.G. (2002). "Gear Crack Propagation Path Studies: Guidelines for Ultra-Safe Design." *Journal of the American Helicopter Society*, 47(1), 64-72.
doi:10.4050/JAHS.47.64.
- [47] "ASM International. (2002). "Mechanisms and Appearances of Ductile and Brittle Fracture in Metals." In *ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention*. ASM International. Disponible à: [ASM Digital Library](<https://dl.asminternational.org/handbooks/edited->
- [48] Marini, M., Pahl, W., & Benedetti, M. (2019). "Tooth Root Bending Fatigue Strength of High-Density Sintered Small-Module Spur Gears: The Effect of Porosity and Microstructure." *Metals*, 9(5), 599.
- [49] Alban, L. E. (1985). *Systematic Analysis of Gear Failures*. ASM International.
- cyindriques - Influence sur le comportement statique et dynamique de transmissions par engrenages", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 225 p, 2012.
- [51] Archard, J.F. "Contact and rubbing of flat surfaces". *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, p. 981-988, 1953
2008..

Webographie

- [3] https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/574/1/Cours_FRIHI_Djamel.pdf
- [5] https://elearning.centre-univ-mila.dz/a2024/pluginfile.php/98667/mod_resource/content/1/chap2-v2.pdf
- [15] <https://www.univ-soukahras.dz/wpuploads/eprints/2015-1949-06f9e.pdf>
- [18] https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/Policopi_lubrification.pdf
- [19] J.-L.LIGIER lubrifications des paliers moteurs [19]
https://www.google.dz/books/edition/Lubrification_des_palier/AprZnHne_oC?hl=fr&gbpv=1&dq=courbe+de+stribeck&pg=PA60&printsec=frontcover

Bibliographie :

- [21] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/18243/memoire%20choix%20d%27une%20huile%20e%20t%20mode%20de%20lubrification%20pour%20un%20r%C3%A9ducteur%20de%20vitesse%20%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] https://www.mei-msma.fr/wa_files/M21A-La_20lubrification_20_201_E2_80_99huile.pdf
- [37] <http://www.tandwiel.info/algemene-werktuigbouwkunde/assen/>
- [50] Les différents types des efforts sur la dent engrenage - Bing images

Résumé

Ce mémoire explore en profondeur les mécanismes d'endommagement des engrenages liés à une lubrification inadéquate, soulignant l'importance cruciale de la maintenance et de la lubrification pour garantir la performance et la durabilité des systèmes mécaniques. À travers une analyse approfondie des défauts potentiels et des stratégies de prévention, cette étude propose des solutions pratiques pour optimiser la lubrification des engrenages et assurer leur fiabilité dans diverses applications industrielles. De plus, cette recherche présente une exploration complète des aspects liés aux engrenages et à leurs défauts dans le cadre de la maintenance, ainsi qu'une introduction à leur modélisation. L'étude de cas démontre l'efficacité de la Méthode des Éléments Finis (MEF) pour identifier les différents types de défauts dans les engrenages, mettant en avant ses avantages par rapport aux autres méthodes disponibles.

ABSTRACT

This thesis delves deep into the mechanisms of gear damage caused by inadequate lubrication, highlighting the critical importance of maintenance and lubrication for ensuring the performance and durability of mechanical systems. Through a detailed analysis of potential defects and preventive strategies, this study offers practical solutions to optimize gear lubrication and enhance their reliability in various industrial applications. Furthermore, the research thoroughly explores the aspects of gears and their defects within the context of maintenance, along with an introduction to their modeling. The case study demonstrates the effectiveness of Finite Element Method (FEM) in identifying different types of gear defects, emphasizing its advantages over other available methods.

ملخص

يستعرض هذا البحث بعمق آليات تلف التروس الناتجة عن التشحيم غير الكافي، مسلطاً الضوء على الأهمية الكبيرة للصيانة والتشحيم في ضمان أداء الأنظمة الميكانيكية ومثابقتها. من خلال تحليل مفصل للعيوب المحتملة واستراتيجيات

Résumé

الوقاية، تقدم الدراسة حلاً عملياً لتحسين تشحيم التروس وضمان موثوقيتها في مختلف التطبيقات الصناعية. بالإضافة إلى ذلك، يتناول البحث جوانب التروس وعيوبها في سياق الصيانة، مع تقديم مقدمة حول نمذجتها. توضح دراسة الحالة فعالية في تحديد أنواع مختلفة من عيوب التروس، مبرزةً فوائد هذه الطريقة مقارنة بالطرق الأخرى طريقة العناصر المحددة المتاحة.