REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Maintenance corrective d'un réducteur de vitesse dans le cas de défaillance d'une roue dentée à denture droite ou hélicoïdale

---

Présenté par :

Mohamed AIDI

Proposé et dirigé par :

Dr. Mourad BACHENE — Promoteur

Mohamed BARKI — Copromoteur

Promotion 2019

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو تسهيل مهمة مكتب الدراسات المكلف بالصيانة لإصلاح مخفض السرعة في حالة تسجيل عطب فيه على مستوى عجلة أو عجلتين من مجموعة تروس أسطوانية ذات أسنان مستقيمة أو حلزونية. حيث تم تسطير منهجية مفصلة للقيام بالصيانة التصحيحية لمخفض السرعة، ابتداءً من اكتشاف العطب إلى غاية إعادة تنصيب المخفض في الوسط والبيئة التي يشتغل فيها. كما تم إعداد برنامج بتطبيق " MATLAB 2013 " لغرض إجراء الحساب المعقد لمعايير تصنيع التروس والتي تتطلب عادة عملية تصحيح الأسنان. إضافة إلى هذا، تساهم هذه الدراسة أيضا في ربح الوقت وذلك باستعمال برنامج الحساب حتى من طرف تقني غير محيط بمعارف معمقة بالموضوع.

كلمات مفتاحية: الصيانة التصحيحية، مخفض السرعة، تصحيح الأسنان، المسننات.

Abstract :

The purpose of this work is to facilitate the task of the design office responsible of the maintenance to repair a gearbox in the case of failure of one or two gear wheels from a cylindrical gear train with straight or helical teeth. In fact, a detailed approach is established for corrective maintenance of the gearbox, from the failure detection until it is put back in its operating environment. A program is developed under MATLAB 2013 for the complex calculation of gears cutting parameters generally requiring a tooth correction. This study also offers a considerable gain of time by using this program even by a technician with no in-depth knowledge of the subject.

Key words : corrective maintenance, gearbox, tooth correction, gears.

.

Résumé :

L'objectif de ce travail est de faciliter la tâche du bureau d'étude chargé de la maintenance pour la réparation d'un réducteur de vitesse dans le cas de la défaillance d'une ou deux roues dentées d'un train d'engrenage cylindrique à denture droite ou hélicoïdale. En effet, une démarche détaillée est établie pour une maintenance corrective du réducteur, dès la détection de la panne jusqu'à la remise en place du réducteur dans son milieu de fonctionnement. Un programme est développé sous MATLAB 2013 pour le calcul complexe des paramètres de taillage des roues dentées nécessitant généralement une correction de denture. Cette étude offre également un gain considérable de temps en utilisant ce programme même par un technicien n'ayant pas de connaissances approfondies en la matière.

Mots clés : maintenance corrective, réducteur de vitesse, correction de la denture, engrenages.

Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant, mes remerciements s'adressent tout d'abord à mon encadreur et co-encadreur respectivement, Monsieur BACHENE Mourad, enseignant au sein de l'Université Dr Yahia FARES de Médéa et Monsieur BARKI Mohamed, enseignant à l'Académie Militaire de Cherchell, de m'avoir dirigé et orienter pour accomplir ce travail ; merci pour l'enrichissement scientifique que vous m'avez apporté et pour la confiance que vous m'avez accordée.

Je voudrais exprimer ma gratitude également à tous mes professeurs qui m'ont enseigné durant la 2e année du Master, et qui ont su nous faire découvrir de nouvelles connaissances tant dans le domaine scientifique que dans l'humanisme.

Je tiens à remercier aussi les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire et de leur lecture attentive de mon mémoire ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail.

Cette page ne pourra jamais être tournée sans que je remercie en intégralité tous les étudiants de notre promotion avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

Ces remerciements sont aussi l'occasion pour moi de témoigner tout mon amour à ma famille qui m'a conduit jusque là, et sur qui je sais que je pourrai toujours compter. Merci à mes parents pour leur soutien constant durant toute ma vie. Merci à ma femme qui m'a toujours soutenu dans les moments les plus difficiles.

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études ;

A ma chère famille… ma femme, ma fille Ritedj et mon fils Zaïd ;

A ma chère sœur et chers frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral ;

A tous mes amis pour leurs conseils et leur encouragement ;

A tous ceux qui m'aiment et ceux que j'aime ;

Je dédie ce travail, et qu'il soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible ;

Merci d'être toujours là pour moi.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale et problématique ……..…….. 1

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

I.1. Introduction……...…….…….…….. 3

I.2. L'historique……..……. 3

I.2.1. Evolution de la maintenance……...…… 4

I.3. Définition et différents types de maintenance……... 5

I.3.1. Définition de la maintenance……..... 5

I.3.2.a- La maintenance corrective……..… 6

I.3.2.a-1. Maintenance curative ……..… 6

I.3.2.a-2. Maintenance palliative ……..... 6

I.3.2.b- Maintenance préventive ……..... 6

I.3.2.b-1. Maintenance préventive systématique ……..….. 6

I.3.2.b-2. Maintenance préventive conditionnelle……..… 6

I.3.2.b-3. Maintenance préventive prévisionnelle……... 7

I.4. But de la maintenance préventive……. 7

I.4.1. But de la maintenance préventive systématique…… 8

I.4.2. But de la maintenance préventive prévisionnelle…….. 8

I.4.3. But de la maintenance préventive conditionnelle…….. 8

I.5. Les fonctions de la maintenance……..……. 9

I.5.1. La fonction méthode……..…… 10

I.5.1.a- Le rôle de bureau étude et méthode……..……. 10

I.5.2. La fonction ordonnancement……..….. 10

I.5.2.1. Le rôle de la planification de maintenance préventive……..…. 11

I.5.3. La fonction réalisation……..……...……...… 11

I.6. Les opérations de la maintenance……..…….…….. 12

I.6.1. Le dépannage……..……...……... 12

I.6.2. La réparation……..…… 13

I.6.3. La surveillance……..…….…… 13

I.6.4. Les révisions……..……..…..…… 14

I.7. Conclusion……..……..…….……... 14

Chapitre II : Généralités sur les réducteurs de vitesse et leur maintenance

II.1. Introduction……..……..……..…… 16

II.2. Définition……..……..……..…... 16
II.3. Rôle du réducteur……..……..……..…... 16
II.3.1. Conditions d'entrainement……..……..…. 17
II.3.2. Rapport de réduction ……..……..... 17
II.3.3 Raison d'un réducteur……..……..…… 17
II.4. Différents types de réducteurs……..……..…..…… 17
II.4.1. Réducteurs à roues de friction……..……..…….. 18
II.4.1.a- Avantages et inconvénients……..……..…….. 19
II.4.2. Les Réducteurs à système poulies/courroies……..……. 20
II.4.2.a- Technologies poulie – courroie……..……..…… 20
II.4.2.a- 1. Caractéristiques techniques……..……..….. 21
II.4.2.a- 2. Avantages……..……..……..… 21
II.4.2.a- 3. Inconvénients……..……..……..... 21
II.4.2.a- 4. Principales applications……..……..... 21
II.4.2.b- Technologies pignon-chaine……..…… 21
II.4.2.b- 1. Caractéristiques techniques……..……..... 22
II.4.2.b- 2. Avantages……..……..……... 22
II.4.2.b- 3. Inconvénients……..……..…..……... 22
II.4.2.b- 4. Principales applications……..……..…… 22
II.4.3. Réducteur à engrenages……..……..…… 23
II.4.3.a- Réducteurs à en grenages cylindriques/ à arbres parallèles……...…… 23
II.4.3.a- 1.Caractéristiques techniques ……..……..….... 23
II.4.3.a- 2.Avantages……..……..……..…… 23
II.4.3.a- 3.Inconvénients……..……..……..…… 24
II.4.3.a- 4.Principales applications……..……..….. 24
II.4.3.b- Réducteurs à couple conique……..……..……. 24
II.4.3.b- 1.Caractéristiques techniques……..……..… 24
II.4.3.b- 2.Avantages……..……..……..…. 25
II.4.3.b- 3.Inconvénients……..……..……..... 25
II.4.3.b- 4.Principales applications……..……..…….. 25
II.4.3.c- Réducteur à roue et vis sans fin……..……..……..… 25
II.4.3.c- 1.Caractéristiques techniques……..……..……..… 26
II.4.3.c-2.Avantages……..……..……..…….. 26
II.4.3.c-3.Inconvénients……..……..…..…… 26

II.4.3.c-3.Principales applications……..……...…….. 27
II.4.3.d- Réducteur à train d'engrenages……..……..…… 27
II.4.3.d- 1.Caractéristiques techniques……..…….…… 28
II.4.3.d- 2.Avantages……..……..…….…… 29
II.4.3.d- 3. Inconvénients……..…….. 29
II.4.3.d- 4. Principales applications……..…….…… 29
II.5. Aperçu général sur la maintenance des réducteurs de vitesse à engrenages ……. 29
II.5. 1. Causes de défaillance d'un réducteur à engrenages …….…… 29
II.5. 2. Niveaux de maintenance d'un réducteur de vitesse ……..……. 30
II.5. 3. Outils de détection de défauts……..…….…….. 31
II.5. 3.a- Roulements ……..……..…….…… 31
II.5. 3. b- Engrenages ……..……..……..….. 31
II.5. 3. c- Alésages et arbres ……..……..….. 31
II.5. 4. Plan général d'entretien et maintenance d'un réducteur de vitesse……..….. 32
II.5. 5. Exemple d'un réducteur à deux trains d'engrenage……..……. 33
II.6. Conclusion……..……..…….…….. 35
Chapitre III : Théorie générale sur les engrenages
III.1. Introduction……..……..……..…….. 37
III.2. Définition d'un engrenage ……..……..……. 37
III.3. Avantages et désavantages des engrenages ……..……..……... 38
III.3.1 Avantages des engrenages ……..……..…….. 38
III.3.2 .Désavantages des engrenages ……..……..…… 38
III.4. Géométrie et technologie ……..……..……...… 38
III.5. Fonctionnement des engrenages……..……..……. 39
III.5.1. Ligne d'engrènement ou ligne d'action ……..……... 40
III.5.2. Angle de pression ……..……..…….. 41
III.5.3. Profil des dents ……..……..…….…….. 42
III.5.3.a - Profils conjugués et conditions ……..…… 42
III.5.3.b – Développante de cercle et tracé ……..…….. 43
III.5.3.c – Equation de la développante de cercle ……..…… 43
III.5.4. Interférence ……..……..……..... 44
III.5.4.a - Définition de l'interférence……..……... 44
III.5.4.b - Inconvénients de l'interférence ……..……... 45
III.5.4.c - Condition de non-interférence……..……..… 46

III.5.4.d - Déport de denture sans variation d'entraxe…….…….. 47
III.5.4.e -Limites du déport de denture sans variation d'entraxe……..…….. 48
III.5.5. Fonctionnement avec jeu……..…….…… 48
III.5.6. Entraxe……..……..…….…….. 49
III.6. Caractérisation géométrique des engrenages ……..…..…… 50
III.6.1. Définitions et terminologie……..……...…… 50
III.6.2. Engrenages cylindriques à denture droite……..……...….. 51
III.6.3. Engrenages cylindriques à denture hélicoïdale……...…… 52
III.6.4. Engrenages coniques……..……..….. 53
III.6.5. Engrenages gauches : le système roue - vis sans fin…….. 54
III.7. Obtention des roues dentées……..……. 56
III.7.1. Taillage avec génération……..……... 56
III.7.1.a- Taillage par outil crémaillère……..…… 56
III.7.1.a-1. Usinage avec l'outil crémaillère……..……. 57
III.7.1.a-2. Description de l'outil crémaillère ……. 58
III.7.1.a-3. Taillage de dentures hélicoïdales……..…….. 59
III.7.1.a-4. Avantages et inconvénients……..……... 59
III.7.1.b- Taillage par outil pignon ……..……. 59
III.7.1.b-1. Description de l'outil pignon ……..…….. 60
III.7.1.b-2. Conditions d'usinage ……..…….. 60
III.7.1.b-3. Avantages et inconvénients……..……. 61
III.7.1.c- Taillage par fraise-mère……..…… 61
III.7.1.c- 1. Description de la fraise-mère ……..…… 62
III.7.1.c-2. Mouvements de l'outil et de la roue à tailler ……..…… 62
III.7.1.c-3. Avantages et inconvénients ……..……. 63
III.7.2. Taillage sans génération ……..…….. 63
III.7.2.a- Taillage par fraise-module ……..……... 63
III.7.2.b- Taillage par fraise-disque à grande productivité ……..… 64
III.7.2.c- Taillage par brochage……..……..…….. 64
III.7.2.d- Forgeage ……..……..…… 65
III.7.2.e- Taillage par reproduction……..……. 66
III.7.2.e-1. Outil fixe ……..……..…… 66
III.7.2.e-2. Pièce fixe……..……..……. 66
III.7.2.e-3. Utilisation du procédé ……..…….. 67

III.8. Avarie et détériorations typiques des dentures d'engrenages…… 67
III.9. Conclusion……..……..…….. 70

Chapitre IV : démarche de réparation d'un réducteur –cas de défaillance d'une roue dentée-

IV.1. Introduction ……..……. 72
IV.2. Correction de la denture……..……... 72
IV.2.1. Mécanisme géométrique des corrections de denture…….…… 72
IV.2.1.a- Crémaillère génératrice normalisée …… 72
IV.2.1.b-Denture normalisée……..……..…….. 73
IV.2.1.c-Denture normale ……..…… 73
IV.2.1.d-Denture déportée……..…… 73
IV.2.1.e-Entraxe normal ……..…….. 75
IV.2.2. Dentures déportées sans variation d'entraxe ……..…… 76
IV.2.3. Dentures déportées avec variation d'entraxe ……. 80
IV.2.3.a- Engrenage extérieur à denture droite ……. 80
IV.2.3. b- Méthode de calcul pratique……..…….. 81
IV.2.4. Engrenage extérieur à denture hélicoïdale……..…… 85
IV.2.5. Contrôle par l'écartement sur k dents……..…….. 87
IV.3. Organigramme de calcul des paramètres de taillage des dentures avec ou sans correction……..……..……..…… 89
IV.4. Stratégie de réparation du réducteur……..……. 90
IV.5. Exemples de calcul des paramètres de taillage …….. 96
IV.5.1. Exemple d'un engrenage extérieur à denture droite sans variation d'entraxe et avec denture déportée ……..……..…… 96
IV.5.2. Exemple d'un engrenage extérieur à denture droite avec variation d'entraxe.. 98
IV.5.1. Exemple d'un engrenage extérieur à denture hélicoïdale ……. 101
IV.6. Conclusion……..……..…….. 103
Conclusion générale……..……..…….. 105

Bibliographie ……. 106

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Evolution de la maintenance depuis 1940…….. 4
Figure I.2 : Les déférents types de maintenance ……..……..... 7
Figure I.3 : Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance……..…...….. 9
Figure II.1 : La position du réducteur par rapport au moteur et au récepteur ……..... 17
Figure II.2 : Exemple des réducteurs à roues de friction ……...… 19
Figure II.3 : Réducteur poulie/courroies ……..…...…….. 20
Figure II.4 : Réducteur pignon/chaine……..…….. 23
Figure II.5 : Réducteur à engrenages ……..……... 23
Figure II.6 : Réducteur à roues coniques ……..……...…….. 24
Figure II.7 : Réducteur à roues et vis sans fin …….... 26
Figure II.8 : Réducteur à roues cylindrique……..…….. 27
Figure II.9 : Réducteur à roues cylindriques et coniques……...…… 27
Figure. II.10 : Réducteur planétaire à train épicycloïdal ……..……. 28
Figure. II.11 : Exemple d'un réducteur à deux trains d'engrenage……..……... 33
Figure. III.1 : Classification des différents types d'engrenage selon les axes des deux roues… 37
Figure III.2.1 : Contact externe…….. 38
Figure III.2.2 : Contact interne……... 38
Figure III.3 : Engrenage hélicoïdal……..……... 39
Figure III.4 : Couple de dents en contact…… 40
Figure III.5 : Ligne d'engrènement (ou d'action)…… 40
Figure III.6 : Couple de dents en contact…… 40
Figure III.7 : Angle de pression…….. 41
Figure III.8 : Profil d'une dent, comparaison avec une droite et un arc de cercle……..…… 42
Figure III.9 : Conditions d'engrènement de profils conjugués……..……. 42
Figure III.10 : Tracé d'une dent à partir de développantes de cercle……. 43
Figure III.11 : Paramétrage de la développante de cercle…….……. 44
Figure III.12 : Angle de pression…… 44
Figure.III.13 : Interférence de fonctionnement…….…….. 45
Figure.III.14 : Interférence de taillage…...……. 45
Figure III.16 : Zone d'interférence et de non interférence…….. 46

Figure III.17 : Droite de référence et ligne primitive pour une denture normale et denture déportée…… 47
Figure III.18 : Denture normale et denture déportée…….. 47
Figure III.19.a : Fonctionnement avec jeu……..... 48
Figure III.19.b : Fonctionnement sans jeu…….. 48
Figure III.20 : Entraxe……... 49
Figure III.21 : caractéristiques géométriques d'une roue dentée à denture droite…….. 51
Figure III.22 : Engrenage cylindrique à denture droite……..… 51
Figure III.23 : Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale…….. 52
Figure III.24 : Caractéristiques géométriques d'une roue dentée à denture hélicoïdale…..... 53
Figure III.25 : caractéristiques géométriques d'un engrenage conique……... 53
Figure III.26 : Engrenage conique…….. 54
Figure III.27.a : Caractéristiques géométriques d'un engrenage gauche (roue - vis sans fin)… 55
Figure III.27.b : Engrenage Gauches (roue - vis sans fin)……...……... 55
Figure III.28 : Exemple de taille par outil crémaillère, ……..... 57
Figure III.29 : Mouvements d'engrènement lors du taillage par outil crémaillère. ……...… 57
Figure III.30 : Géométrie de l'outil crémaillère. ……... 58
Figure III.31 : Mouvements lors de l'usinage d'une roue avec un outil-crémaillère…..……..... 58
Figure III.32 : Outil-crémaillère module m = 4 et d'angle de pression α0 20°et son profil….. 59
Figure III.33 : L'outil sur la machine est incliné à droite, la roue usinée est à dentures à gauche……. 59
Figure III.34 : Exemple de taille avec outil pigno., ……..… 60
Figure III.35 : Mouvements lors de l'usinage d'une roue avec un outil pignon……...……. 60
Figure III.36 : Dépouille des dents de l'outil pignon et son profil en développante de cercle……..... 60
Figure III.37 : Usinage de denture intérieure par outil pignon……...…… 61
Figure III.38 : Exemple de taille par fraise-mère ……..… 62
Figure III.39 : Outil fraise-mère et son profil ……... 62
Figure III.40 : Mouvements lors de l'usinage des dents d'une roue avec une fraise-mère…… 63
Figure III.41 : Exemple de taillage d'une roue par fraise-module..……...…. 63
Figure III.42 : Profil de l'outil fraise-module……...….. 64
Figure III.43 : Outil fraise-disque……... 64
Figure III.44 : Outil Augmentation progressive des dents de broche ……...…. 65
Figure III.45 : Usinage par brochage, image BART ……..... 65

Figure III.46 : Roues coniques et pignon droit obtenus par forgeage…….…….. 65
Figure III.47 : Pièces dentées de formes diverses……...……..…….. 65
Figure III.48 : Principe du taillage par reproduction avec outil fixe……..…… 66
Figure IV.1 : Eléments géométriques de la crémaillère génératrice normalisée……..…….. 72
Figure IV.2.a : denture déportée……..….... 73
Figure IV.2.b : Influence du coefficient de déport de denture sur sa forme……..……. 74
Figure IV.3 : Entraxe normal - entraxe de fonctionnement……..…….. 75
Figure IV.4 : déport positif ……..……... 76
Figure IV.5 : déport négatif…….……... 76
Figure IV.6 : Engrenage extérieur à dentures déportées sans variation d'entraxe…….. 77
Figure IV.7 : Condition pour un engrènement correct à l'entraxe normal : $S_1 + S_2 = \pi m_0$ ….. 78
Figure IV.8 : taillage de denture normale et denture corrigée $x_1+x_2= 0$……..... 79
Figure IV.9 : taillage de denture normale et denture corrigée $x_1- x_2= 0$……..… 80
Figure IV.10 : génération de la denture déportée d'un pignon et d'une roue à partir de la même crémaillère génératrice normale……...…… 81
Figure IV.11 : Entraxe normal et entraxe de fonctionnement pour une denture déportée…….. 82
Figure IV.12 : Contrôle par l'écartement sur k dents (k=3)…….…….. 87
Figure IV.13 : Exemple de contrôle la cote entre dents (k=3)……..…….. 88
Figure IV.14 : Organigramme de calcul des paramètres de taillage des dentures avec ou sans correction…….……..... 89
Figure IV.15 : Domaine des coefficients de déport à adopter dans la conception d'engrenages Le domaine est fonction de la somme des nombres de dents.……. 90
Figure IV.16 : Lubrification d'un réducteur de vitesse par barbotage et par injection……... 94
Figure IV.17 : Lubrification d'un réducteur de vitesse par remplissage par trop plein…… 95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Statistiques relatives aux causes de défaillance d'un réducteur de vitesse…..…… 30
Tableau II.2 : Niveaux de maintenance d'un réducteur de vitesse……..…….. 30
Tableau II.3 : Plan général d'entretien et maintenance d'un réducteur de vitesse……..…… 32
Tableau II.3. Exemple de pièces constitutives d'un réducteur de vitesse à deux trains d'engrenage..… 34
Tableau III.1 : Valeurs normalisées du module de taillage…….. 50
Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques et formulations des engrenages cylindriques à denture droite…….……..…….. 51
Tableau III.3 : Caractéristiques géométriques et formulations des engrenages cylindriques à denture hélicoïdale……...……...…… 52
Tableau III.4 : Caractéristiques géométriques et formulations des engrenages coniques…….….. 54
Tableau III.5 : Caractéristiques géométriques et formulation d'un engrenage (roue - vis sans fin)... 55
Tableau IV.1 : caractéristiques des dentures déportées sans variation d'entraxe comparativement avec celles de la denture normale……...……..……..….. 78
Tableau IV.2 : Paramètres de taillage obtenus pour un engrenage extérieur à denture droite sans variation d'entraxe et avec denture déportée……...……...……...…… 98
Tableau IV.3 : Paramètres de taillage obtenus pour un engrenage extérieur à denture droite avec variation d'entraxe .....…….……...… 100
Tableau IV.4 : Paramètres de taillage obtenus pour un engrenage extérieur à denture hélicoïdale……...……...….. 102

Introduction générale et problématique

Introduction générale et problématique :

Les réducteurs de vitesse sont des mécanismes utilisés dans plusieurs branches de la mécanique, on les trouve souvent là où on a besoin de transmettre un couple moteur ou réduire une vitesse de rotation. En effet, leurs domaines d'application sont multiples : les machines-outils, l'aéronautique, les véhicules, l'agroalimentaire, l'industrie, l'urbanisme, etc…

Beaucoup de ces appareils sont dotés d'engrenages. Ces éléments importants sont composés de deux roues dentées ou plus et étant définis selon des exigences techniques spécifiques au milieu de fonctionnement où ils se trouvent.

Considérés comme organes vitaux des réducteurs, les engrenages sont parfois la cause directe de leur défaillance, menant ainsi à l'arrêt soudain de tout un processus mécanique. La réparation du réducteur devient alors immédiate et incontournable.

Quand une roue dentée appartenant au réducteur est défectueuse, on doit procéder à une maintenance corrective par changement de la roue en question, à l'effet de remettre en état le réducteur.

Généralement, le facteur temps joue un rôle important dans l'accomplissement de cette tâche, en raison de l'arrêt total de l'intégralité du système mécanique. Une maintenance corrective serait alors imminente, nécessitant l'acquisition d'une roue dentée identique à celle défectueuse, ce qui n'est pas toujours évident à cause des spécificités techniques et géométriques des roues dentées qui ne sont pas souvent disponibles sur le marché.

Face à cette situation, le bureau d'étude chargé de la maintenance est dans l'obligation de trouver une solution rapide et pratique pour la réparation du réducteur dans des délais très courts. La fabrication de deux roues dentées de l'engrenage défectueux est souvent le refuge le plus approprié et le moins coûteux.

En fait, les secrets de l'industrie globalement et la fabrication des pièces mécaniques particulièrement, demeurent toujours non révélés au grand public. Dans le cas des engrenages, des roues avec des modules non normalisés sont très courants. Leur obtention nous exige une correction de la denture.

Afin de réaliser un engrènement correct, c'est-à-dire sans blocage, le technicien doit tenir compte de l'environnement où fonctionnent les deux roues dentées, à savoir l'entraxe déjà imposé, le module des deux roues, l'angle de l'hélice, le matériau de fabrication, etc…

Ce travail a pour but de déterminer une démarche pour la maintenance du réducteur de vitesse, étape par étape, dès l'identification de la panne, étant la défaillance d'une roue dentée, jusqu'à la remise en place du réducteur dans le système mécanique. Pour cela, on prévoit d'élaborer un programme sous MATLAB 2013 qui facilitera le calcul des paramètres de taillage des roues dentées, nécessitant généralement une correction de la denture.

Nous avons scindé le travail en quatre chapitres : dans le premier, les généralités sur la maintenance ont été abordées. Au deuxième chapitre, les généralités sur les réducteurs et l'aperçu général sur la maintenance des réducteurs ont été exposés.

Etant donné que les engrenages sont les organes sujets de panne dans notre étude, le troisième chapitre est consacré à la théorie générale sur les engrenages.

Enfin, et dans le quatrième et dernier chapitre, une stratégie de maintenance du réducteur de vitesse a été présentée dans le cas de défaillance d'un engrenage cylindrique à denture droite ou hélicoïdale, moyennant pour le calcul complexe des paramètres de taillage, un programme sous MATLAB 2013.

Chapitre I

Généralités sur la maintenance

sommaire

I.1. Introduction

I.2. L'historique

I.3. Définition et différents types de maintenance

I.4. But de la maintenance préventive

I.5. Les fonctions de la maintenance

I.6. Les opérations de la maintenance

I.7. Conclusion

I.1. Introduction :

La maintenance est devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Les actions de maintenance, en garantissant le bon fonctionnement des outils de production (réparation, dépannage, révision…). Dans l'industrie le rôle de la sûreté de fonctionnement c'est maitrisé les risques qui peuvent mettre en cause la fiabilité, la disponibilité et la sécurité d'un matériel ou d'une installation.

L'importance de la maintenance industrielle a incité les entreprises à mettre en place une structure qui s'appelle «service maintenance».

Dans le cadre de ces changements, le personnel de maintenance a également évolué progressivement en combinant des compétences technologiques, organisationnelles et relationnelles.
Dans ce chapitre, nous allons définir la maintenance et ses types, son évolution et ses fonctions.

I.2. L'historique [1] :

a- Le terme « maintenance » tire son origine du vocabulaire militaire, qui veut dire « maintien des unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant ». Dans notre cas il s'agit des unités de production et le combat est surtout économique.

L'apparition du mot « maintenance » dans l'industrie a eu lieu vers 1950 aux USA. En France, il se superpose progressivement à « l'entretien ». En Algérie certaines entreprises emboitent le pas, d'autres suivent loin derrière.

b- Entretien ou maintenance ?

- Entretenir c'est dépanner et réparer un parc matériel, afin d'assurer la continuité de la production. **"Entretenir c'est subir".**
- Maintenir c'est choisir des moyens de prévenir, de corriger ou de rénover le matériel, suivant la criticité économique afin d'optimiser le coût global de possession. **"Maintenir c'est maîtriser".**

I.2.1. Evolution de la maintenance [2] :

Dans le contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement ou l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexe. Depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations. Figure (I.1)

1 ère génération :	***2ème génération :***	***3ème génération :***
Remplacement du composant lorsqu'il est détruit.	Le processus a une disponibilité supérieure. La durée de vie des composants est supérieure. Réflexions sur l'optimisation des coûts.	Augmentation de la disponibilité et de la fiabilité dans une grande sécurité. Meilleur qualité des produits. Réflexion sur les dommages causés à l'environnement. Meilleur rapport coût efficacité.

1940 **1950** **1970** **1980** **2000**

Figure I.1 : *Evolution de la maintenance depuis 1940*

La première génération couvre la période allant jusqu'à la seconde guerre mondiale. Pendant cette période, les temps d'arrêt n'avaient pas beaucoup d'importance. La prévention de la défaillance de l'équipement n'était pas une période dans l'esprit de la pluparts des gestionnaires. La majorité des équipements était techniquement plus simple qu'aujourd'hui.
Durant la deuxième génération, des changements significatifs ont eu lieu. Avec l'arrivée des années 50, on note une augmentation de la demande des marchandises. Dans les années 60, cela consiste principalement à effectuer des révisions à intervalles fixes sur les composants. Les coûts de maintenance commencent à augmenter fortement.

1e génération :

- Remplacement du composant lorsqu'il est détruit.

2e génération :

- Le processus a une disponibilité supérieure.
- La durée de vie des composants est supérieure.
- Réflexions sur l'optimisation des couts.

3e génération :

- Augmentation de la disponibilité et de la fiabilité dans une grande sécurité.
- Meilleur qualité des produits.
- Réflexion sur les dommages causés à l'environnement.
- Meilleur rapport coût efficacité.

La troisième génération commence au milieu des années 70, le processus de changement dans l'industrie rassemble encore plus de dynamique et de remise en cause (nouvelles attentes, nouvelles recherches et nouvelles techniques).

I.3. Définition et différents types de maintenance :

I.3.1. Définition de la maintenance :

Une première définition normative de la maintenance fut donnée par l'AFNOR, en 1994 par la norme NF X 60-010**[3]**, la maintenance se définit comme étant : ‹‹ ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé››. Il devient plus précis en apportant un complément avec le document X 60-000 ‹‹ Bien maintenir, c'est assurer les opérations au coût optimal ››. Depuis 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition, désormais européenne (NF EN 13306 X 60-319) : ‹‹ Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management effectuées durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ››.**[4]**

I.3.2. Les différents types de maintenance :

Il existe deux types de maintenances : la maintenance corrective et la maintenance préventive. La différence entre elles réside au moment d'intervention vis-à-vis de la panne. Le premier type de maintenance est appliqué après l'occurrence de la panne, alors que le deuxième type s'applique avant cette dernière.

I.3.2.a- La maintenance corrective :

Selon la norme AFNOR NF 13306 X 60-319, c'est une ‹‹ maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ››. **[5]**

La maintenance corrective peut être :

I.3.2.a-1. Maintenance curative :

La maintenance curative correspond à la remise en état de l'équipement et revêt un caractère définitif. L'équipement concerné par cette maintenance, retrouve après intervention les caractéristiques qu'il avait avant l'apparition du problème. **[6]**

I.3.2.a-2. Maintenance palliative :

C'est une maintenance qui effectue une remise en état provisoire du matériel ayant subi un dysfonctionnement : C'est un dépannage. Cette maintenance est le plus souvent associée à des systèmes ne présentant pas d'impératif de sécurité.**[6]**

I.3.2.b- Maintenance préventive :

Selon la norme AFNOR NF EN 13306 X 60-319, c'est une ‹‹ maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon certains critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ›› **[7]**.

Donc c'est une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différents paramètres en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée. Il existe trois formes principales de la maintenance préventive :

I.3.2.b-1. Maintenance préventive systématique :

C'est une maintenance effectuée suivant un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage (nombre prédéterminé d'unités d'usage).Même si le temps est l'unité la plus répondue, d'autres unités peuvent être retenues telle que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycle effectués.**[8]**

I.3.2.b-2. Maintenance préventive conditionnelle :

Est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état de dégradation du bien. Autrement dit : maintenance subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. **[8]**

I.3.2.b-3. Maintenance préventive prévisionnelle :

Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.**[8]**

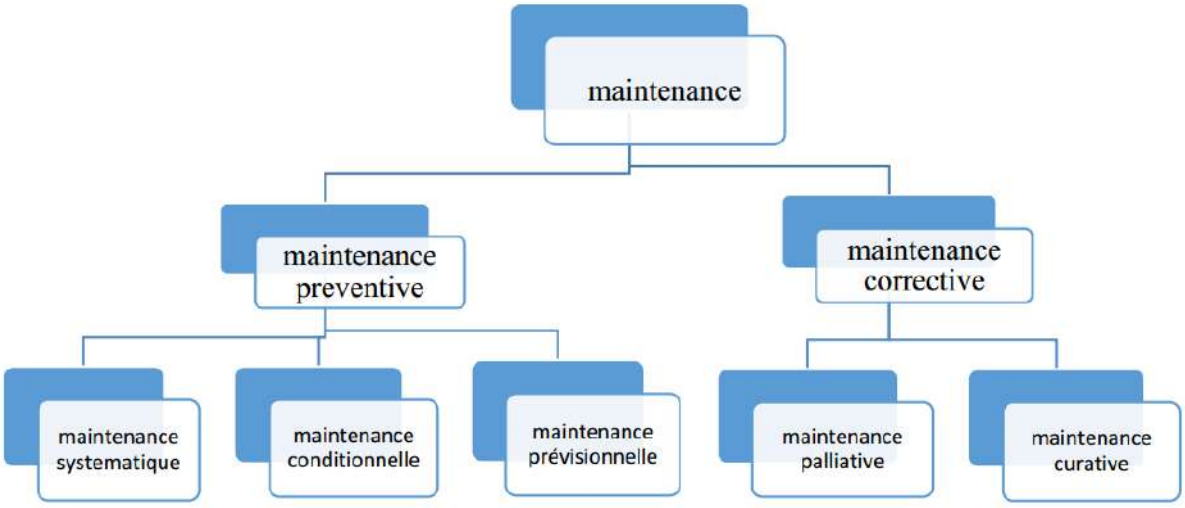


Figure I.2 : *Les déférents types de maintenance [9]*

I.4. But de la maintenance préventive [10] :

Les objectifs visés par la maintenance préventive sont les suivants :

- Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances en service: réduction des coûts de défaillance, amélioration de la disponibilité.
- Augmenter la durée de vie efficace d'un équipement.
- Améliorer l'ordonnancement des travaux, donc les relations avec la production.
- Réduire et régulariser la charge de travail.
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues).
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses).
- Plus globalement, en réduisant la part « d'imprévu », améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours source de tension).

I.4.1. But de la maintenance préventive systématique [10] :

Le but est de maintenir le système dans l'état de ses performances initiales. Pour cela, il est procédé lors ces interventions à différentes opérations qui peuvent être :

Remplacement :

- De l'huile, des réducteurs, etc.
- Des pièces d'usure, de plaquettes.
- Des joints d'étanchéité.
- Des ressorts.

Réglages :

- Des jeux et des glissières.
- Des tensions de courroies.
- Des pressions.

Contrôle :

- Des divers blocages.
- Des niveaux d'huiles
- Etc. ...

I.4.2. But de la maintenance préventive prévisionnelle [11] :

L'objectif de cette maintenance est de contrôler les composants des machines provisionnement avant la défaillance (avant la date de planification) et **diagnostiquer** (faire un résonnement menant à l'indentification de cause d'un problème) avant le déclanchement de **l'intervention** de maintenance afin que cette dernière soit terminée avant que le paramètre étudié ne soit pas dépassés.

I.4.3. But de la maintenance préventive conditionnelle [12] :

Il s'agit pour un équipement donné :

- D'éliminer ou de limiter le risque de panne, l'intervention ayant lieu avant que la dégradation n'atteigne un caractère critique,

- De maintenir la production à un niveau acceptable, tant en quantités fabriquées qu'en qualité du produit,
- De diminuer les temps d'arrêt, par limitation du nombre de pannes, par une meilleure préparation des interventions (efficacité) et utilisation des créneaux horaires ne perturbant pas la production (ordonnancement),
- De réduire les dépenses d'entretien en intervenant à un stade précoce des dégradations, évitant ainsi des remises en état très coûteuses,
- D'intervenir dans les meilleures conditions possibles, sans urgence, au moment choisi, avec la préparation adéquate,
- De ralentir le vieillissement.

I.5. Les fonctions de la maintenance :

Selon la (norme FD X60-000) La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l'outil de production;

C'est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données, pendant une période donnée. Autrement dit, la mission principale de la maintenance est la gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise.**[13]**

La figure suivante représente les principales fonctions de la maintenance

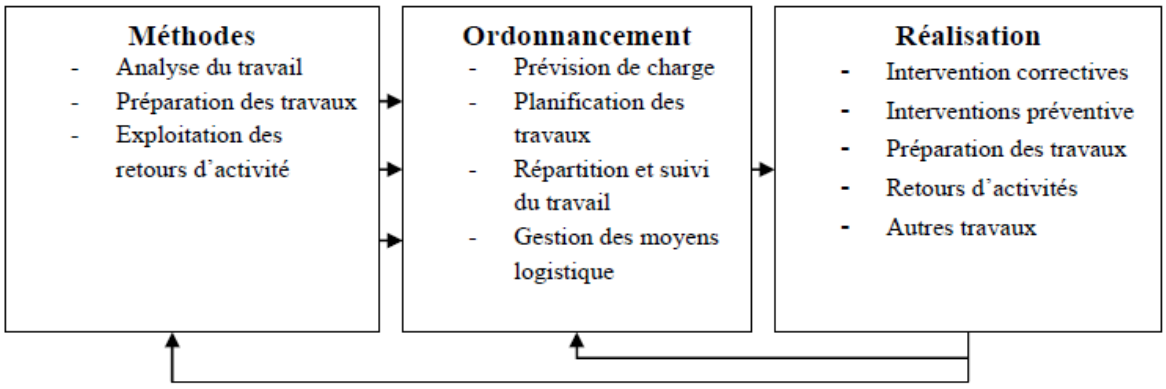


Figure I.3 : *Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance*

I.5.1. La fonction méthode :

La préparation est la vocation première des services méthodes. Pour la maintenance corrective, la préparation passe par l'anticipation des risques encourus, puis par une anticipation des problèmes qui peuvent freiner l'intervenant. Pour la maintenance préventive, elle consiste à définir le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser. Pour la maintenance externalisée, la préparation consiste à définir les règles et les procédures destinées au prestataire choisi, puis «d'accompagner » le prestataire lors de ces travaux sur site **[13]**.D'autres activités sont généralement confiées au service méthode :

- Propositions d'améliorations techniques et/ou organisationnelles,
- Assistance technique sur site - soutien aux intervenants sur site - aide au diagnostic.

Les agents méthodes doivent être en phase avec le terrain et doivent également prendre du recul par rapport à l'évènement instantané, qui était seul pris en compte au temps de l'entretien.

I.5.1.a- Le rôle de bureau étude et méthode :

L'agent des méthodes doit remplir un triple rôle :

- Gestion technique des équipements.
- Préparation des interventions curatives et préventives.
- Analyses des coûts et optimisation des méthodes et moyens.

I.5.2. La fonction ordonnancement :

La fonction ordonnancement est le chef d'orchestre de la maintenance. Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées. Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux, l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux. Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir à l'instant t et un endroit x où un personnel p muni d'un outillage o et des matières m exécutera la tâche M en harmonie avec les autres travaux connexes. La difficulté principale de l'ordonnancement vient du caractère fortuit de la panne : comment intégrer les dépannages à un planning Certains services de maintenance prétextent cette contradiction pour ne pas ordonnancer leurs activités, si 90% de leurs activités sont fortuites, ils ne peuvent guère faire autrement. Mais si grâce à une politique de prévention, ce taux passe à moins de 50% ce fortuit devient programmable **[13]**.

La fonction ordonnancement planifie cette « tâche », c'est-à-dire l'heure H et le jour J où elle doit débuter, et où elle doit finir (début et fin de la tache)

La mission de l'ordonnancement consiste donc à :

- prévoir la chronologie du déroulement des tâches ;
- optimisation l'utilisation des moyens nécessaires, et les rendre disponibles ;
- lancer les travaux au moment choisi ;

Contrôler l'avancement et la fin des tâches, et prendre en compte les écarts entre prévisions et réalisations

I.5.2.1. Le rôle de la planification de maintenance préventive [14]

1. Nettoyer à fond les équipements :

Il est très important de nettoyer tous les équipements de l'entreprise et de faire leur maintenance de haut en bas. En peignant des machines, nous pouvons détecter des problèmes que nous n'avons pas vus sous la saleté.

2. Mettre en valeur les équipements :

Pour le point culminant, il est recommandé d'installer des éléments visuels (affiches, illustrations) qui mettent en évidence les principales caractéristiques de l'équipement à prendre à l'aide de certains dispositifs

3. Évaluer la criticité des équipements :

Toutes les machines devraient normalement avoir un plan de maintenance minimal à réaliser à Intervalles fixes. Chaque machine n'a cependant pas la même importance critique, ou criticité, sur le plan de la maintenance

4. Définir un plan de maintenance :

Une fois identifiés les équipements les plus critiques, on définit le plan de maintenance préventive.

5. Gérer les pièces de rechange :

La gestion des pièces de rechange fait aussi partie de la maintenance préventive. Il faut d'abord s'assurer d'entreposer les pièces dans un lieu adéquat. On doit toujours prendre garde de ne pas surcharger l'entrepôt de pièces de maintenance, car cela prend de l'espace précieux.

6. Améliorer le niveau de maintenance :

Tout système de maintenance passe principalement par l'utilisateur de l'équipement, qui est le mieux placé pour détecter les défaillances. Mais l'amélioration de l'entretien passe aussi par le fabricant. La collaboration entre l'utilisateur et le fabricant favorise la recherche d'améliorations possibles pour les équipements existants et d'idées de conception pour les équipements futurs. L'utilisation d'indicateurs de performance, tels le **TRG**.

7. Suivre la performance globale des équipements (TRG) :

(TRG).Exprimé en pourcentage, cet indicateur simple aide le fabricant à cibler les actions d'amélioration les plus stratégiques. La force du TRG réside dans le fait qu'il tient compte simultanément des trois principaux paramètres de performance manufacturière, soit : la disponibilité, l'efficacité et la qualité.

I.5.3. La fonction réalisation :

La réalisation consiste à mettre en œuvre les moyens définis dans le dossier de préparation dans les règles de l'art, pour atteindre les résultats attendus dans les délais préconisés par l'ordonnancement. **[15]**

I.6. Les opérations de la maintenance :

I.6.1. Le dépannage [16] :

Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires (maintenance palliative) avec des conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation. Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation sont à la base d'un bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps.

Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses. De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Certains indicateurs de maintenance (pour en mesurer son efficacité) prennent en compte le problème du dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

I.6.2. La réparation [16] :

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

N.B : la réparation correspond à une action définitive. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu. Tous les équipements sont concernés.

I.6.3. La surveillance [16] :

(Contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage, cette opération appartient à la maintenance préventive.

- **Les inspections :** activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

- **Les visites :** opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

- **Les contrôles :** vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut :

    - Comporter une activité d'information.
    - Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement.
    - Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

I.6.4. Les révisions [16] :

Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les 2 cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous ensembles.

Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections.

I.7. Conclusion :

Nous venons de présenter au lecteur, dans ce présent chapitre, l'essentiel des concepts actuels attachés à la fonction maintenance en précisant les principaux types associés, ces fonctions, l'analyse approprié pour l'amélioration et son évolution au cours de temps.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à la présentation de l'entreprise, l'état actuel de la maintenance et position de problème.

Chapitre II

sommaire

Généralités sur les réducteurs de vitesse et leur maintenance

II.1. Introduction

II.2. Définition

II.3. Rôle du réducteur

II.4. Différents types de réducteurs

II.5. Aperçu général sur la maintenance des réducteurs de vitesse à engrenages

II.6. Conclusion

II.1. Introduction

Les réducteurs assurent l'entraînement entre un moteur et une machine, et permettent la transmission et la régulation d'un mouvement. Ils permettent de ralentir ou d'accélérer un mouvement, de modifier un rapport de vitesse. Ils servent à transmettre un couple plus important. Lorsqu'un moteur qui crée un mouvement est combiné au réducteur, on parle de motoréducteur. Quand on accélère un mouvement, on parle de multiplicateur.

Dans ce travail nous nous basons sur les réducteurs à engrenages.

Afin de fonctionner parfaitement, les engrenages qu'ils intègrent sont taillés avec une précision d'orfèvre. Les réducteurs sont compacts et permettent d'utiliser des moteurs plus petits : ils autorisent un gain important de poids et de place dans les machines. Grâce à la mécatronique, les réducteurs à engrenages s'adaptent aux conditions d'utilisation. En effet, ceux-ci doivent être robustes afin de résister aux conditions extrêmes : froid, poussière, corrosion, nettoyages, fonctionnement en continu, etc. De plus, ces réducteurs réalisent des économies d'énergie : en réduisant les frottements, ils consomment moins d'énergie.

On trouve des réducteurs à engrenages dans de nombreux domaines d'application : les machines de production (industrie papetière, imprimerie, agroalimentaire, etc.), le tapis-roulant d'aéroport, les remontées mécaniques (la télécabine monte rapidement et ralentit avant l'arrivée grâce à un réducteur associé à un moteur), les panneaux urbains à affichage variable et silencieux, etc.

II.2. Définition :

Le réducteur est un ensemble d'organes mécaniques comprenant un générateur de puissance (moteur), des engrenages, des mécanismes entraînés (accouplements, frein), des structures servant de support (arbres, paliers) généralement incorporés dans un carter. Chacun des composants influe sur le comportement dynamique du réducteur [19].

II.3. Rôle du réducteur :

Un réducteur sert à réduire la vitesse d'un moteur (hydraulique, pneumatique, thermique, électrique) avec transmission de la puissance motrice vers une machine réceptrice en

absorbant moins d'énergie. Il permet aussi d'augmenter le couple moteur afin d'entrainer en rotation un organe récepteur sous l'effet d'un nouveau couple [18].

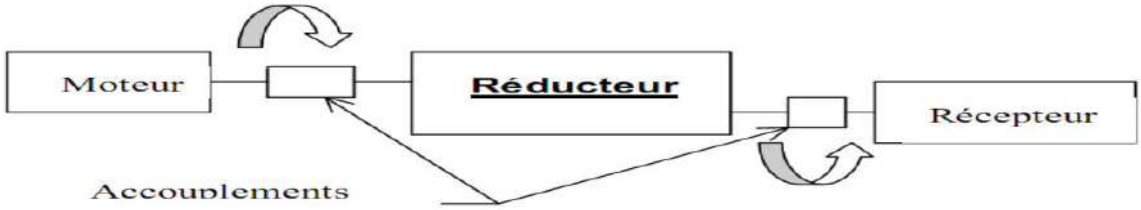


Fig. II.1. La position du réducteur par rapport au moteur et au récepteur [6].

I.3.1. Conditions d'entrainement :

- Puissance motrice : P_m (KW).
- Vitesse motrice : N_m (tr/min).
- Vitesse réceptrice : N_r (tr/min).
- Rendement: $\boldsymbol{\eta}$

I.3.2. Rapport de réduction :

$$\left.\begin{array}{l} K = \dfrac{N_r}{N_m} \\ K = 1 \Rightarrow N_r = N_m \qquad (II.1) \\ K < 1 \Rightarrow N_r < N_m \Rightarrow \text{Réducteur} \\ K > 1 \Rightarrow N_r > N_m \Rightarrow \text{Multiplicateur} \end{array}\right\} \qquad (II.1)$$

II.3.3 Raison d'un réducteur :

$$r = (-1)^n \frac{\prod Z \text{ menantes}}{\prod Z \text{ menées}} \qquad (II.2)$$

n : Nombre de contacts extérieurs.

$\prod$: Produit

Z : Nombre de dents

Si r est positif, même sens de rotation entre l'entée et la sortie.

Si r est négatif, sens contraire de rotation entre l'entrée et la sortie.

NB : l'équation (II.2) ne s'applique que pour les engrenages ou trains d'engrenages cylindriques.

L'utilisation des réducteurs de vitesse touche tous les domaines de la vie courante, on peut citer :

- les micros réducteurs : manutention des volets roulants, lève-vitre auto, essuie glace…
- motoréducteur moyen : ouverture de portail, machines-outils…
- grosses motoréducteur : les ascenseurs, monte-charge, téléphérique...
- propulsion pour aéronefs : réducteur planétaire entre la turbine et l'hélice pour un anion ou entre la turbine et l'arbre des pales pour un hélicoptère [18].

II.4. Différents types de réducteurs :

On peut classer les réducteurs en deux grandes familles vis-à-vis de la technologie employée pour transmettre le mouvement :

- les réducteurs utilisant la transmission par adhérence : roue de friction (dynamo de vélo), système poulie-courroie.
- Les réducteurs utilisant la transmission par obstacle : système à chaine (vélo, moto), système poulie-courroie avec courroies dentées (courroie crantée), système à engrenages (boite de vitesse d'une voiture) [19].

II.4.1. Réducteurs à roues de friction :

Dans le cas général, pour transmettre un mouvement de rotation d'un arbre moteur à un arbre récepteur qui lui est parallèle, on peut intercaler entre les deux arbres de transmission, deux roues cylindriques qui vont s'appuyer l'une contre l'autre suivant une génératrice (contact linéique) avec une force de pression constante entre elles. Pendant qu'une roue sera liée à l'arbre moteur, la deuxième roue sera montée flottante sur l'arbre récepteur, la pression de liaison existante entre ses dernières va assurer le mouvement de rotation entre les deux arbres. Le mécanisme réalisé ainsi est un réducteur à roues de friction .

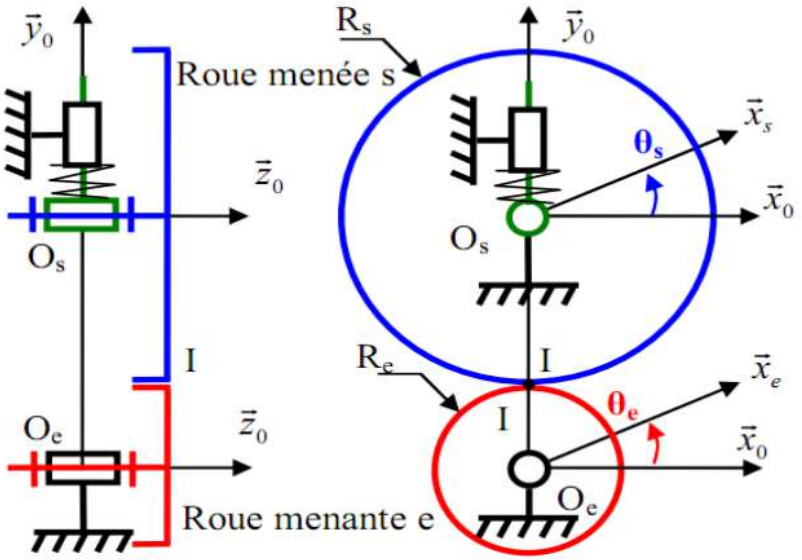


Fig. II.2 : *Exemple des réducteurs à roues de friction* [19]

Le rapport de réduction :

$$K = \frac{\dot{\theta}_s}{\dot{\theta}_e} = -\frac{R_e}{R_s} \qquad \text{(II.3)}$$

Avec :

$\dot{\theta}_e$: vitesse angulaire d'entrée.

$\dot{\theta}_s$: vitesse angulaire de sortie.

R_e : rayon de la roue d'entrée

R_s : rayon de la roue de sortie.

II.4.1.a- Avantages et inconvénients :

La transmission par roues de friction présente des avantages parmi lesquels on pourrait citer :

- Entraînement sans choc.
- Fonctionnement silencieux.
- Possibilité d'un rapport de vitesse considérable.
- Sécurité d'emploi due à l'entraînement par adhérence.
- Glissement relatif important et le couple transmis limité.

En contrepartie, la transmission ne peut se faire qu'entre arbres rapprochés (Somme des rayons des roues égale à leur entraxe).

- La transmission nécessite un effort important entre les deux roues et doit être constante.

II.4.2. Les Réducteurs à système poulies/courroies :

Une poulie est une pièce en forme de roue et servant à la transmission du mouvement. Elle est destinée à être utilisée avec une courroie, une corde, une chaîne ou un câble. Le système poulie/courroie est utile lorsque le moteur à entraîner est trop loin de la poulie. L'entraînement se fait alors par friction. Les différents types de courroies sont les courroies plates, dentées et trapézoïdales .

Rapport de réduction : Le rapport de réduction se calcule ainsi :

$$K = \frac{\omega_S}{\omega_e} = \frac{R_e}{R_s} \qquad \text{(II.4)}$$

Avec :

ω_e : vitesse angulaire d'entrée.

ω_s : vitesse angulaire de sortie.

R_e : rayon de la poulie d'entrée

R_s : rayon de la poulie de sortie.

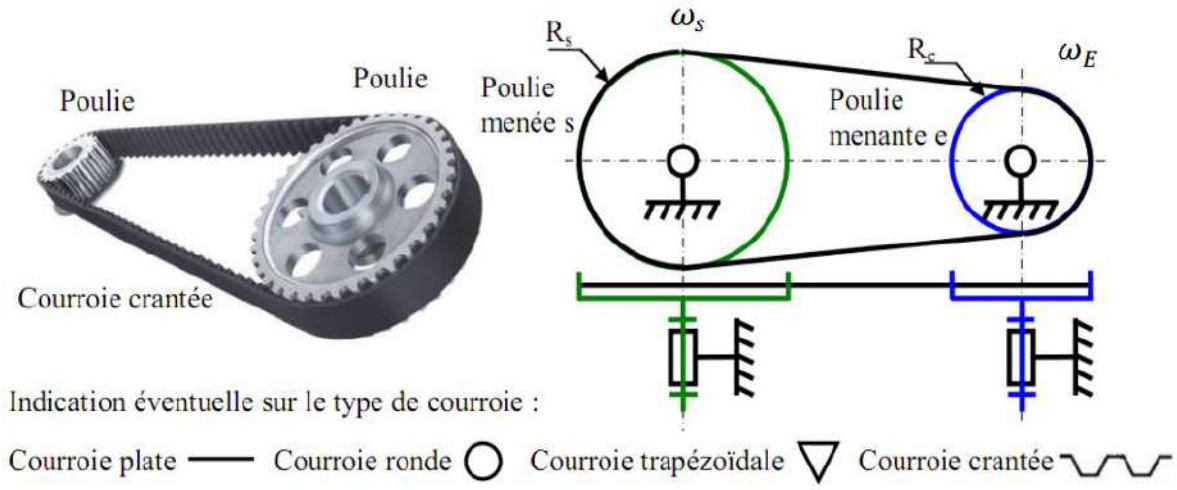


Fig. II.3 : *Réducteur poulie/courroies [19].*

II.4.2.a- Technologies poulie – courroie :

La courroie est une pièce utilisée pour la transmission du mouvement. Elle est construite dans un matériau souple. Par rapport à d'autres systèmes, elle présente l'avantage d'une grande souplesse de conception (le concepteur a une grande liberté pour placer les organes moteur et récepteur), d'être économique, silencieuse et d'amortir les vibrations, chocs et à-coups de la transmission.

II.4.2.a- 1. Caractéristiques techniques :

→ La courroie est utilisée avec des poulies, et parfois avec un galet tendeur.

→ L'entraînement s'effectue par adhérence pour les courroies plates, rondes, trapézoïdales et striées ; ces courroies sont qualifiées d'asynchrones car le glissement et éventuellement le « patinage », ne permettent pas de garantir la position et la vitesse de sortie.

→ L'entraînement s'effectue par obstacle pour les courroies dentées, qui sont également qualifiées de synchrones. Ces dernières permettent une transmission de mouvement avec positionnement : comme par exemple les chaînes et les engrenages.

→ La courroie synchrone de transmission de puissance, de transfert ou de transport reste un élément indispensable à toutes les machines.

II.4.2.a- 2. Avantages :

↗ Adaptée pour les machines fonctionnant sans à-coup, et lorsque l'on veut réduire les vibrations, ce qui augmente la durée de vie de certaines autres pièces,

↗ Adaptée pour une grande plage de vitesses et de couples,

↗ Coût de fabrication initial faible,

↗ Econome en énergie,

↗ Rendement élevé,

↗ Degré de fiabilité extrêmement élevé et nécessite peu de maintenance si ce n'est la vérification de la tension et le changement régulier du fait de l'usure.

II.4.2.a- 3. Inconvénients :

↘ Rapport de réduction parfois limité sur la transmission de puissance.

II.4.2.a- 4. Principales applications :

→ Agro-alimentaire,

→ Le transfert ou le convoyage. La quasi-totalité des courroies peuvent être customisées à la demande.

II.4.2.b- Technologies pignon-chaine :

Ce sont des composants mécaniques destinés à assurer les transmissions de mouvements ou à être intégrés dans des systèmes plus complexes qui servent :

- à transmettre un mouvement permanent pour les chaînes et les courroies,
- à sécuriser le système de transmission en évitant les retours en arrière pour les roues

libres,

- à freiner et à déclencher l'arrêt automatique d'un système pour les freins.

II.4.2.b- 1. Caractéristiques techniques :

Produits et systèmes extrêmement variés pour répondre à la très grande diversité d'utilisations et d'exigences de la transmission de mouvement : des chaînes à rouleaux, des chaînes de levage, des chaînes de manutention, des chaînes de transmission, des pignons et roues, qui sont accompagnées d'un cortège d'accouplements, de roues libres, de limitateurs de couple, de coupleurs, de freins, d'embrayages, de variateurs, de paliers à coussinets et autres courroies.

II.4.2.b- 2. Avantages :

↗ Capacité de travailler dans des conditions très particulaires,

↗ Leur technicité met les opérateurs et les installations à l'abri des possibilités d'accidents,

↗ Rendement élevé,

↗ Puissance transmissible importante,

↗ Longue durée de vie.

II.4.2.b- 3. Inconvénients :

↘ Elles sont essentiellement utilisées pour des vitesses réduites,

↘ Elles sont relativement bruyantes.

II.4.2.b- 4. Principales applications :

→ Tous les secteurs d'activité industriels utilisent des transmissions mécaniques en général, des chaînes et éléments de transmissions en particulier,

→ Agroalimentaire,

→ Aérospatial,

→ Loisirs,

→ Bâtiment et travaux publics.



Figure II.4 : *Réducteur pignon/chaine*

II.4.3. Réducteur à engrenages :

C'est un réducteur ou on utilise seulement des engrenages (roue dentée / pignon) [18].

II.4.3.a- Réducteurs à en grenages cylindriques/ à arbres parallèles :

La fonction de ce réducteur est de relier un arbre moteur et un arbre à entraîner parallèles, en réduisant ou en multipliant la vitesse motrice.

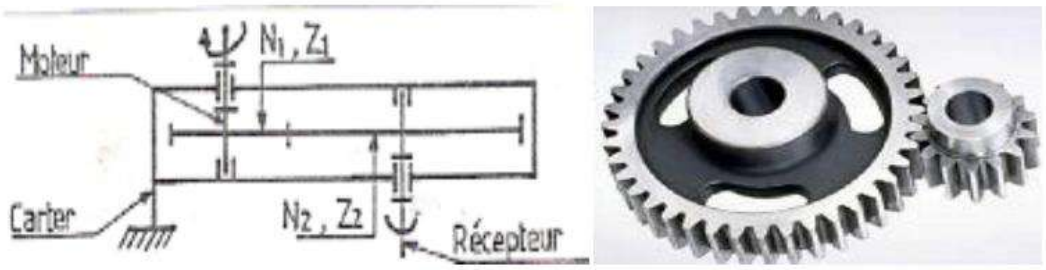


Figure II.5 : *Réducteur à engrenages* [6].

$$K = \frac{N_2}{N_1} \qquad r = (-1)^1 \frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{Z_1}{Z_2} \qquad \text{(II.5)}$$

K : rapport de réduction

II.4.3.a- 1.Caractéristiques techniques :

→ Les arbres d'entrée et de sortie sont parallèles ou coaxiaux,

→ Arbre de sortie plein ou creux traversant (pour les arbres parallèles).

II.4.3.a- 2.Avantages :

↗ Adaptés pour les fortes puissances,

↗ Charge radiale admissible élevée en sortie,

↗ Rendement élevé proche de 1,

↗ Simplicité de la technologie,

↗ Facilité de maintenance.

II.4.3.a- 3.Inconvénients :

↘ Faible rapport de réduction par train.

II.4.3.a- 4.Principales applications :

→ Convoyeurs forte puissance,

→ Cimenterie,

→ Entraînements de compresseurs, d'agitateurs, de pompes. . . .

→ Ferroviaire,

→ Utilisation possible en multiplicateur.

II.4.3.b- Réducteurs à couple conique :

Les réducteurs à couple conique ont un rendement élevé quelques que soient le sens du couple et la vitesse d'entrée. Ils sont peu gourmands en énergie et nécessite peu d'entretien. D'une utilisation universelle, ils ont une grande longévité grâce à la robustesse de leur denture qui leur confère puissance et résistance à l'usure, tant avec des moteurs asynchrones triphasés qu'avec des servomoteurs asynchrones ou synchrones.

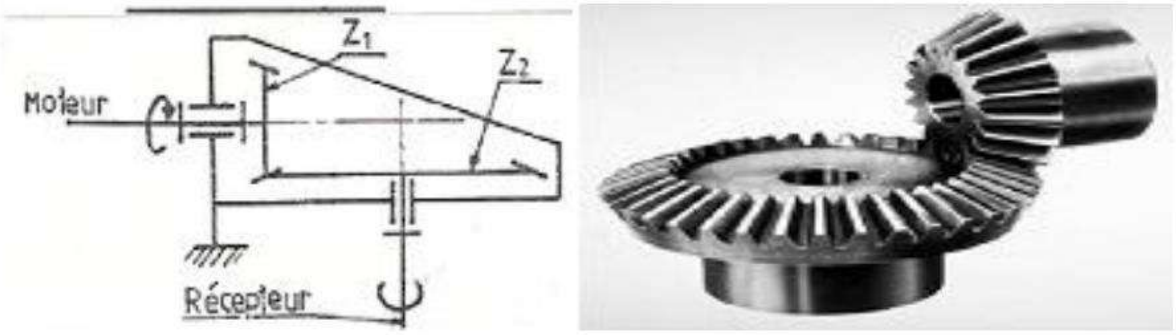


Figure II.6. *Réducteur à roues coniques* [18].

$$K = \frac{N_2}{N_1} \quad ; \qquad r = \frac{Z_1}{Z_2}$$

II.4.3.b- 1.Caractéristiques techniques :

→ Souvent constitué d'un couple conique et d'une autre technologie d'engrenages,

→ Les arbres d'entrée et de sortie sont perpendiculaires,

→ Rapport de réduction compris entre 1 et 5 du couple conique,

→ Rapport de réduction global composé, avec un ou plusieurs trains à engrenages cylindriques,

→ Arbre de sortie plein ou creux traversant.

II.4.3.b- 2.Avantages :

↗ Renvoi d'angle,

↗ Adaptés également pour les fortes puissances,

↗ Charge radiale admissible élevée en sortie,

↗ Rendement élevé,

↗ Utilisation de ce type de réducteurs pour les applications les plus sévères : inversion de charge, cadences de démarrage/freinage élevées.

II.4.3.b- 3.Inconvénients :

↘ Technologie plus onéreuse,

↘ Maintenance délicate (réglage couple conique).

II.4.3.b- 4.Principales applications :

→ Convoyeurs forte puissance,

→ Agitation,

→ Engins mobiles : Travaux Publics, Machinisme Agricole.

II.4.3.c- Réducteur à roue et vis sans fin :

C'est un réducteur à engrenages hélicoïdaux dont les axes sont orthogonaux et non concourants. La transmission par ce type d'engrenage donne une solution simple pour les grands rapports de réduction, avec un fonctionnement peu bruyant. La poussée de la vis est forte surtout si la démultiplication est grande. On utilise alors une butée à billes ou à rouleaux ou encore des roulements à contact obliquent pour réaliser la liaison pivot avec le support.

Lorsque l'inclinaison des filets est faible (vis à un filet), la transmission est irréversible, ce qui est souvent utile, car le réducteur s'oppose à toute rotation commandée par la machine réceptrice (exemple : appareils de levage). Toutefois, le rendement est alors faible, et de plus le couple de démarrage est beaucoup plus fort que le couple à vitesse de régime. Le frottement est important et donne un rendement médiocre, mais suffisant dans le cas de faible puissance [18].

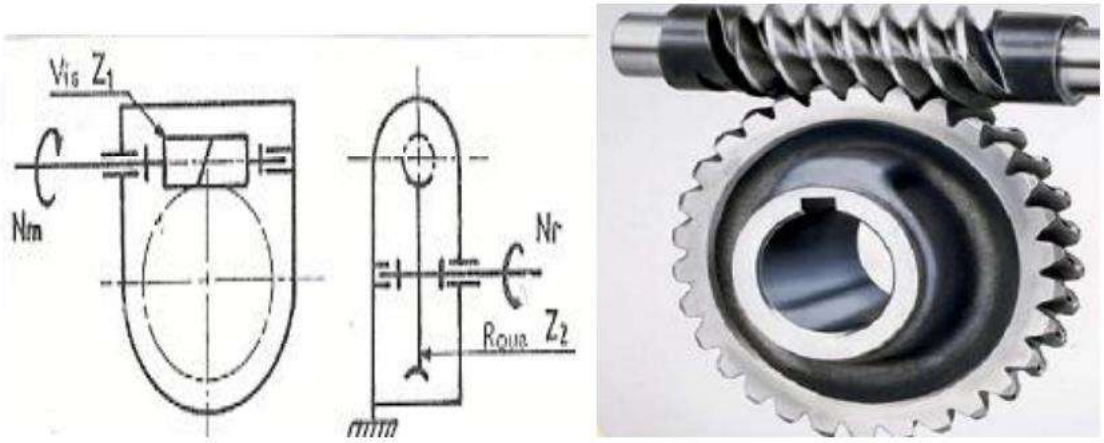


Figure II.7 : *Réducteur à roues et vis sans fin* [18].

$$K = \frac{N_r}{N_m} = \frac{Z_{1\,vis}}{Z_2} \qquad \text{(II.6)}$$

$Z_{1\,vis}$: nombre de filets de la vis

II.4.3.c- 1.Caractéristiques techniques :

→ Les arbres d'entrée et de sortie sont perpendiculaires,

→ Rapport de réduction compris pouvant aller jusqu'à 1/30.

→ Arbre de sortie plein ou creux traversant,

→ Irréversibilité pour les rapports élevés.

II.4.3.c-2.Avantages :

↗ Compacité notamment pour les rapports élevés,

↗ Niveau sonore réduit, exempt de vibration, donnant une bonne qualité d'entraînement,

↗ Charge radiale admissible élevée en sortie,

↗ Rapport performance/prix intéressant,

↗ Bonne capacité d'absorption des surcouples,

↗ Peut être utilisé en combiné - double roue vis – pour des grands rapports de réduction (vitesse très faible),

↗ De plus en plus utilisés en combinaison avec d'autres réducteurs d'une part, et d'autres trains d'autre part afin d'améliorer le rendement.

II.4.3.c-3.Inconvénients :

↘ Rendement variable en fonction du rapport de réduction et de la vitesse,

↘ Échauffement plus important que dans d'autres technologies,

↘ Roue bronze pouvant engendrer une usure.

II.4.3.c-3.Principales applications :

→ Convoyeurs, notamment les petits,

→ Manutention,

→ Treuils,

→ Applications à vitesse lente (par exemple : ponts racleurs de station d'épuration. . .),

II.4.3.d- Réducteur à train d'engrenages :

Définition d'un train d'engrenages :

Un train d'engrenage est une suite d'engrenage destiné à transmettre une puissance d'un arbre d'entrée vers un arbre de sortie avec ou sans modification de la vitesse ou de sens de rotation en absorbant le moins possible d'énergie [18].

On distingue deux familles de train

d'engrenages sont :

- Les trains simples ou ordinaires.
- Les trains épicycloïdaux ou planétaires.

1) Les réducteurs à train simple :

a) À roues cylindriques :

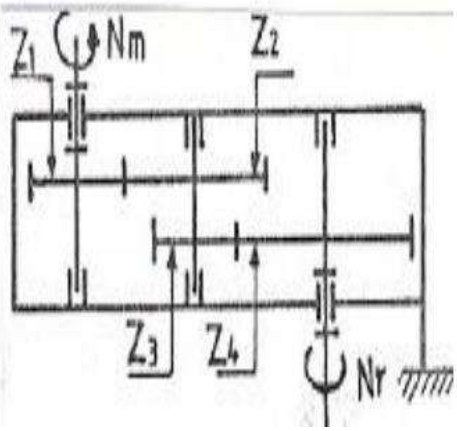


Figure II.8 : *Réducteur à roues cylindriques*

b) À roues cylindriques et coniques :

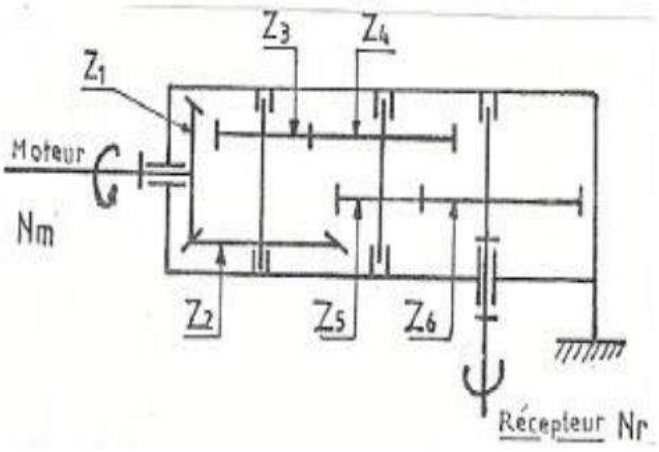


Figure II.9 : *Réducteur à roues cylindriques et coniques[6]*

$$K = \frac{N_4}{N_1}\ , \quad r = (-1)^2\ \frac{Z_1.Z_3}{Z_2.Z_4} \qquad \text{(II.7)}\ ;$$

$$K = \frac{N_6}{N_1}\ ,\ r = (-1)^2\ \frac{Z_1.Z_3.Z_5}{Z_2.Z_4.Z_6} \qquad \text{(II.8)}$$

2) Les réducteurs à train épicycloïdal (planétaire):

Il s'agit d'une disposition d'engrenage dont l'intérêt est de transmettre pour un encombrement donné des couples supérieurs à ceux transmissibles par un train simple. D'autre part, les rapports de réduction que l'on peut obtenir sont intéressants vis-à-vis d'un critère d'encombrement axial, d'autant qu'avec un même système, on peut obtenir différents rapports de réductions. C'est une solution technique souvent utilisée. On la trouve par exemple dans toutes les boites de vitesse de voitures dite : automatique [9].

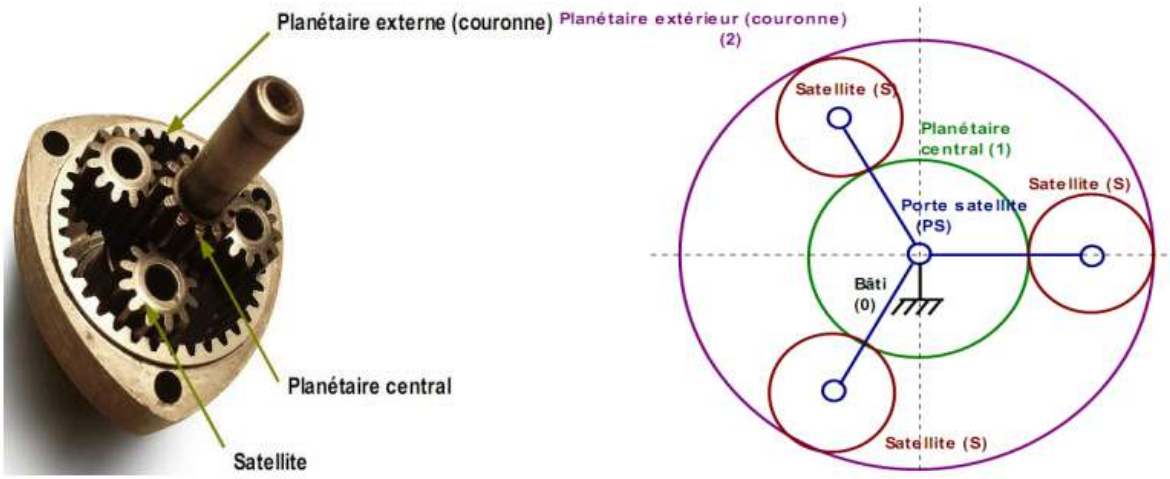


Fig. II.10 : *Réducteur planétaire à train épicycloïdal [21].*

Formule de WILLIS :

$$\frac{(\Omega_{(2/ps)})}{(\Omega_{(1/ps)})} = (-1)^n \frac{(\prod \boldsymbol{Z\ menantes})}{(\prod \boldsymbol{Z\ menées})} = \boldsymbol{r}$$

$$\Leftrightarrow \frac{(\Omega_{(2/0)} - \Omega_{(ps/0)})}{(\Omega_{(1/0)} - \Omega_{(ps/0)})} = (-1)^n \frac{(\prod \boldsymbol{Z\ menantes})}{(\prod \boldsymbol{Z\ menées})} = \boldsymbol{r} \qquad \text{(II.9)}$$

Ω : Fréquence de rotation.

PS : Porte satellite.

Z : Nombre de dents.

n : Nombre de contacts extérieurs.

II.4.3.d- 1.Caractéristiques techniques :

→ Epicycloïdaux,

→ Coaxial,

→ Rapport par train : 3 à 10,

→ Souvent plusieurs trains,

→ Possibilité de carter tournant,

→ Possibilité d'arbre creux.

II.4.3.d- 2.Avantages :

↗ Compacité : rapport puissance/dimension très favorable,

↗ Adaptés également pour les fortes puissances,

↗ Rendement élevé,

↗ Faible inertie des éléments tournants.

II.4.3.d- 3. Inconvénients :

↘ Technologie élaborée,

↘ Maintenance plus spécialisée,

↘ Échauffement dû à la compacité.

II.4.3.d- 4. Principales applications :

→ Engins mobiles : Travaux Publics, Machinisme Agricole,

→ Cimenterie,

→ Énergie,

→ Robotisation et automatisation,

→ Machines-Outils,

→ Applications avec couples élevés et vitesses lentes : sécheurs, fours, rotatifs industriels,

→ Applications dynamiques : robotiques, motion.

II.5. Aperçu général sur la maintenance des réducteurs de vitesse à engrenages [23]:

II.5. 1. Causes de défaillance d'un réducteur à engrenages :

D'après des statistiques communiquées par la société CMD , leader français sur le marché de la transmission de puissance mécanique, notamment dans la réparation des systèmes de transmission de mouvement et de puissance, lors d'un colloque ayant regroupé les plus grandes firmes françaises spécialistes en la matière , les causes de défaillance d'un réducteur à engrenages se résument comme suit :

Cause	**%**
Niveau d'huile insuffisant	**28%**
Défaillance d'engrenages	**24%**
Huile polluée ou inadéquate	**22%**
Défaillance de roulements	**13%**
Autres éléments	**12%**

Tableau II.1 : *Statistiques relatives aux causes de défaillance d'un réducteur de vitesse.*

II.5. 2. Niveaux de maintenance d'un réducteur de vitesse :

Niveau	personnel	Type de travail	Exemples
1	Personnel de production	Simple réglage	Passage d'un filtre à un autre (filtre double)
2	Technicien qualifié	Réparation par changement d'un composant standard du groupe de commande	Remplacement de composant de la centrale de lubrification Changement de joint Changement d'accouplement
3	Technicien spécialisé	Recherche de l'origine d'un problème. Remplacement de composants fonctionnels	Analyse de dégradation Remplacement des roulements
4	Equipe dirigée par un technicien spécialisé	Travaux importants pour maintenance corrective ou préventive	Remplacement des engrenages
5	Equipe complète spécialisée + atelier	Rénovation Réparation importante	Remplacement des engrenages et réparation carter

II.5. 3. Outils de détection de défauts :

II.5. 3.a- Roulements :

Analyse d'huile :

- Détecte la présence de fer, chrome, cuivre ou nickel.

Analyse vibratoire :

- Analyse à haute fréquence

Inspection visuelle :

- Inspection de l'aspect
- Mesure du jeu radial et axial des roulements et comparaison avec les valeurs théoriques.

II.5. 3. b- Engrenages :

Analyse d'huile :

- Présence de fer, chrome, mais pas aussi efficace que les autres méthodes.

Analyse vibratoire :

- Analyse dans le domaine fréquentiel [10-1000 HZ].

Inspection visuelle :

- Aspect des dentures.
- Contrôle de la marque de portée.

II.5. 3. c- Alésages et arbres :

Inspection des alésages :

- Inspection visuelle par la mesure du jeu entre roulements et alésages

Inspection des arbres

- Inspection visuelles des portées de roulements, mesure du voile et faux rond.
- Contrôle par Ultra Son.

II.5. 4. Plan général d'entretien et maintenance d'un réducteur de vitesse :

Périodicité	Opération	Remarque
Quotidienne	Inspection visuelle	- Contrôle des fuites - Contrôle de bruit - Contrôle des paramètres de fonctionnement (T°, pression et débit
Hebdomadaire	- Niveau d'huile - Mesure du niveau vibratoire global	Refaire le niveau si nécessaire
2 fois par mois	- Nettoyage du carter et de la centrale de lubrification - Nettoyage des filtres	Changement des filtres si nécessaire Inspection du reniflard
Toutes les 6000 heures ou chaque année	- Examen dentures par spécialiste - Contrôle des jeux roulements et roulements/alésages - Contrôle des lignages	
Toutes les 50 000 heures ou chaque 5 ans	- Inspection carter ouvert - Inspection des alésages et dimensionnel - Contrôle par magnétoscopie des dentures	
Toutes les 50 000 heures ou 100 000 heures en fonction de la durée de vie de conception	Remplacement de tous les roulements	

Tableau II.3 : *Plan général d'entretien et maintenance d'un réducteur de vitesse.* [23]

II.5. 5. Exemple d'un réducteur à deux trains d'engrenage [24]:

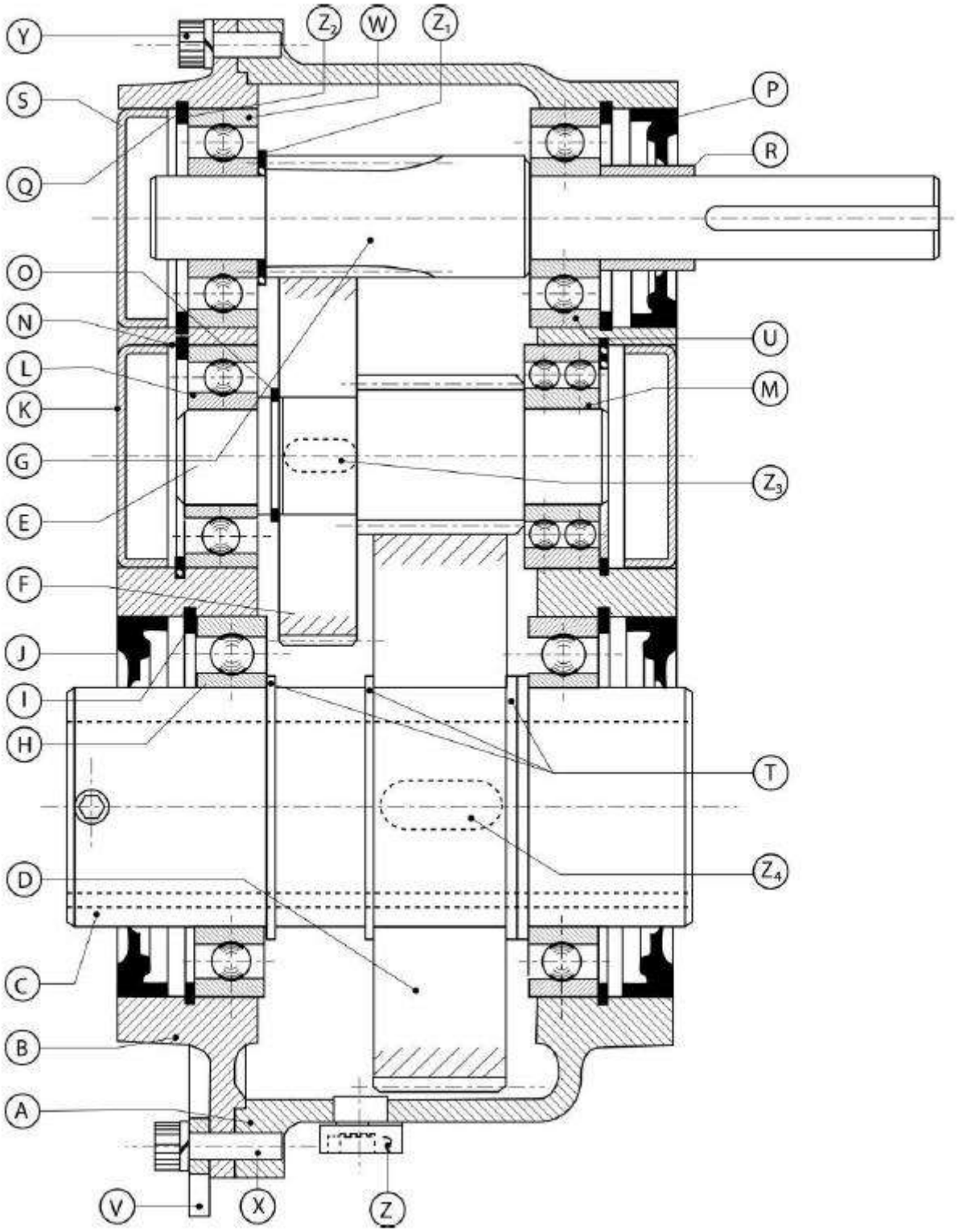


Fig. II.11: *Exemple d'un réducteur à deux trains d'engrenage*

Symbole	Désignation	Nombre
Z_4	CLAVETTE	1
Z_3	CLAVETTE	1
Z_2	CALES CLINQUANTS	
Z_1	CIRCLIPS EXTERIEURS	1
Z	BOUCHONS DE VIDANGE	6
Y	VIS S.P.C	
X	VIS S.P.C	2
W	ROULEMENT	1
V	TRIANGLE D'ANCRAGE	1
U	ROULEMENT	1
T	CIRCLIPS EXTERIEURS	4
S	CAPOT EMBOUTI	1
R	BAGUE D'EPAULEMENT	1
Q	CIRCLIPS INTERIEURS	2
P	JOINT	1
O	CIRCLIPS EXTERIEURS	1
N	CIRCLIPS INTERIEURS	2
M	ROULEMENT INTERMEDIAIRE	1
L	ROULEMENT INTERMEDIAIRE	1
K	CAPOTS EMBOUTIS	2
J	JOINTS	2
I	CIRCLIPS INTERIEURS	2
H	ROULEMENTS	2
G	PIGNON	1
F	ROUE INTERMEDIAIRE	1
E	PIGNON ARBRE INTERMEDIAIRE	1
D	ROUE	1
C	ARBRE CREUX	1
B	COUVERCLE	1
A	CARTER	1

Tableau II.3. *Exemple de pièces constitutives d'un réducteur de vitesse à deux trains d'engrenage*

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on vient de présenter au lecteur un aperçu général sur les réducteurs de vitesse, les types de ces réducteurs, les avantages et inconvénients de chacun, leurs domaines d'application respectifs dans les branches de la mécanique ainsi qu'un résumé sur leur entretien et leur maintenance.

Le chapitre suivant sera consacré à la théorie générale sur les engrenages.

Chapitre III

Théorie générale sur les engrenages

sommaire

III.1. Introduction

III.2. Définition d'un engrenage

III.3. Avantages et désavantages des engrenages

III.4. Géométrie et technologie

III.5. Fonctionnement des engrenages

III.6. Caractérisation géométrique des engrenages

III.7. Obtention des roues dentées

III.8. Avarie et détériorations typiques des dentures d'engrenage

III.9. Conclusion

III.1 Introduction :

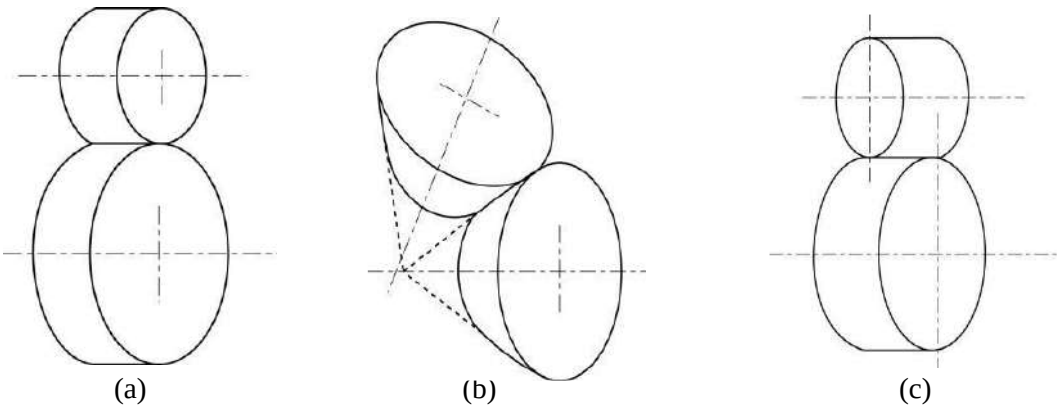
Les engrenages sont utilisés dans toutes les branches de la mécanique et constituent des organes de transmission et de puissance les plus répandus dans les domaines les plus variés de la construction mécanique, à savoir les divers appareils et machines tels que les machines-outils, les véhicules, les appareils de levage, etc....

Faisant partie des mécanismes principaux et auxiliaires, les engrenages transmettent le mouvement avec un très bon rendement énergétique. La variation de vitesse obtenue entre l'entrée et la sortie ne dépend que du nombre de dents des pièces en contact.

III.2 Définition d'un engrenage :

Un engrenage est un mécanisme composé de deux roues dentées mobiles autour d'axes de position fixes et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact et on dit que les deux roues sont conjuguées. La plus petite roue est appelée pignon, la plus grande est la roue. Suivant la position relative des axes des deux roues, on distingue différents types d'engrenages (Fig III.1).

Les engrenages sont utilisés dans toutes les branches de la mécanique pour transmettre des mouvements, de l'horlogerie jusqu'au réducteur de l'industrie lourde. La transmission se fait avec un très bon rendement énergétique. La variation de vitesse obtenue entre l'entrée et la sortie ne dépend que du nombre de dents des pièces en contact.



(a) : Engrenages parallèles : engranges dont les axes sont parallèles.
(b) : Engrenages concourants : engrenages dont les axes sont concourants
(c) : Engrenages gauches : dont les axes ne sont pas dans un même plan.

Fig III.1 : *Classification des différents types d'engrenage selon les axes des deux roues.* [23]

III.3 Avantages et désavantages des engrenages :

III.3.1 Avantages des engrenages :

- Transmission des plus petites aux plus grandes machines ;
- Rapport constant des vitesses quelle que soit la charge ;
- Disposition quelconque des axes des roues, même si les axes parallèles sont la meilleure solution;
- Sécurité de service et durée de vie élevée;
- Entretien restreint;
- Compacité et encombrement faible;

III.3.2 Désavantages des engrenages :

- Prix de revient relativement élevé (par rapport à d'autres solutions) ;
- Niveau sonore parfois gênant (dépend du type d'engrenages) ;
- Transmission rigide entre les arbres ;
- Amortissement peu efficaces des à-coups et des vibrations ;
- Interchangeabilité limitée (même module nécessaire) ;

III.4 Géométrie et technologie :

La géométrie et la technologie d'obtention diffèrent d'une roue dentée à une autre. Par exemple dans le cas des roues à denture droite, les surfaces primitives sont des cylindres droits d'axes parallèles. Aussi, les surfaces des dentures sont des cylindres dont les génératrices sont parallèles aux axes. Les roues dentées peuvent être à contact externe (figure III.2.1) ou contact interne (figure III.2.2).

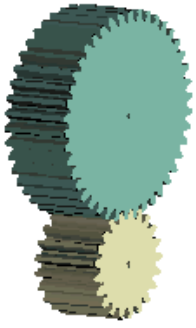


Figure III.2.1: *Contact externe*

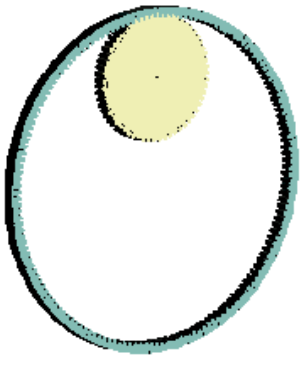


Figure III.2.2 : *Contact interne*

Le transfert de la charge d'une dent à l'autre dépend beaucoup de la distribution des erreurs et des déformations sur l'ensemble de la géométrie des dents. Souvent, un transfert brutal, ne peut être empêché. Ce dernier étant un générateur de surcharges dynamiques, de vibrations, de bruit et en conséquence d'usure et de fractures prématurées, principalement sur les roues à denture droites. Pour pallier à cet inconvénient, l'utilisation de la denture hélicoïdale "rallonge" l'action de la dent .



Figure III.3 : *Engrenage hélicoïdal*

III.5 Fonctionnement des engrenages :

Pendant le fonctionnement d'une transmission, le contact d'une dent de la roue menante avec une dent de la roue menée s'amorce au pied de la dent menante et au sommet de la dent menée [19]. L'engrènement s'effectue sur toute la largeur des dents à la fois (engrenage à dentures droites) .Pour que la transmission de la rotation à l'arbre mené soit continue, l'attaque du couple de dents suivant doit se produire avant la fin de prise du couple précédent.

Dans les sections perpendiculaires aux axes des roues hélicoïdales, le contact s'établit de la même façon que dans le cas des roues à dentures droites, mais du fait que les dents des roues hélicoïdales sont disposées suivant les hélices, la phase de leur engrènement varie dans les sections parallèles, contrairement aux engrenages à dentures droites où cette phase est la même sur toute la largeur des roues. A la différence d'un engrenage droit, dans un engrenage hélicoïdal le contact des dents s'établit non pas simultanément sur toute leur largeur, mais progressivement. L'engrènement d'un couple de dents s'amorce à la racine de la dent menante et sur l'arête de la dent menée.

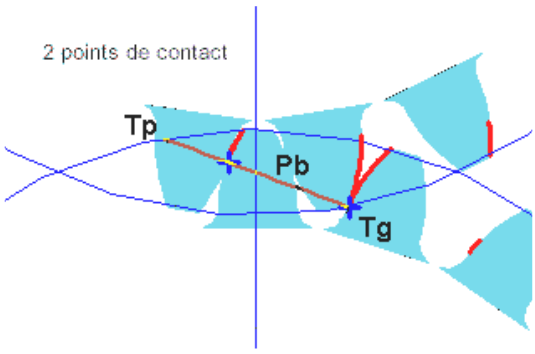


Figure III.4 : *Couple de dents en contact*

III.5.1 Ligne d'engrènement ou ligne d'action :

L'approche se définit comme étant la phase où le point de contact C entre une paire de dents sur la ligne d'action se déplace de T_1 à O (fig III.5), soit du début du contact jusqu'au point primitif. La retraite se définit comme étant la phase où le point de contact C entre une paire de dents sur la ligne d'engrènement se déplace de O à T_2 (fig III.5), soit du point primitif jusqu'à la fin du contact.

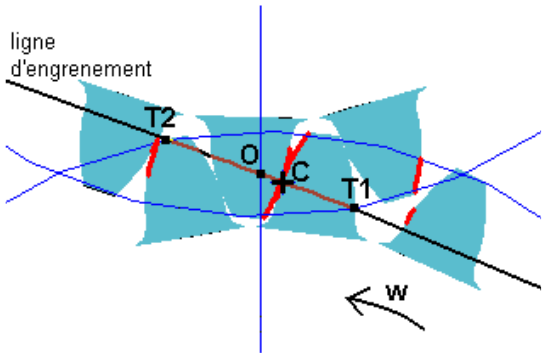


Figure III.5 : *Ligne d'engrènement (ou d'action)*

Pour assurer une transmission continue du mouvement, il est nécessaire qu'un nouveau couple de dents soit en approche avant que le couple précédent termine sa retraite. Il faut, qu'il y ait au moins un couple de dent qui soit toujours en prise (fig III.6).

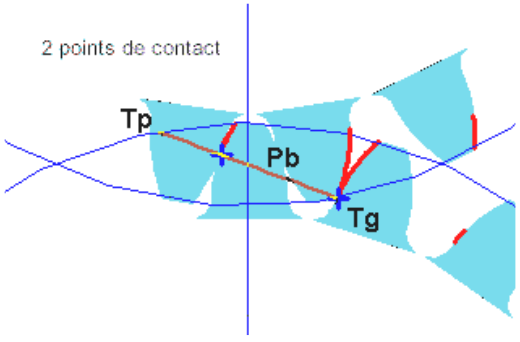


Figure III.6 : *Couple de dents en contact*

Cette condition s'écrit :

$\overline{TpTg} > Pb$.

$\overline{TpTg}$: Distance entre le point Tp et le point Tg le long de la ligne d'engrènement.

Pb : Pas de base : distance entre deux dents consécutives le long de la ligne d'engrènement.

III.5.2 Angle de pression :

L'engrènement est réalisé à partir de deux profils en développante de cercle conjugués bâtis sur les solides S_1et S_2.

- ✓ La droite (D) roule sans glisser sur les cercles de base CB1et CB2
- ✓ T_1 (resp. T_2) est le centre instantané de rotation du mouvement de la droite (D) sur CB1 (resp. CB2)
- ✓ (T_1T_2) est appelée ligne d'action
- ✓ Les profils générés à partir de CB1et CB2 sont en contact en M
- ✓ M décrit un segment de la droite (T_1T_2) au cours du mouvement de 2/1
- ✓ I est le point de contact entre les deux cercles primitifs C_1 et C_2
- ✓ I est le centre instantané de rotation du mouvement de 2/1

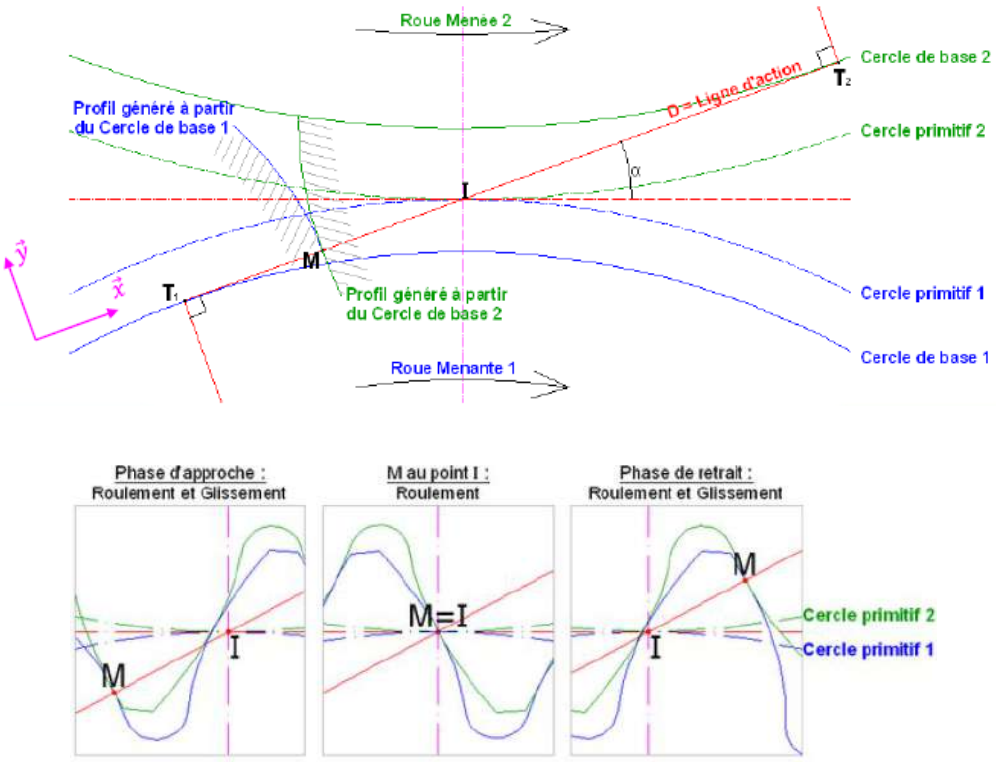


Figure III.7 : *Angle de pression* [24]

La ligne d'action est inclinée d'un angle α par rapport au plan tangent en I. Cette ligne passe par I. L'angle α, appelé angle de pression, peut être différent entre le taillage et le fonctionnement. L'angle de pression de taillage vaut généralement 20° et noté α_0.

III.5.3 Profil des dents [29]:

Les dents doivent permettre de toujours maintenir les deux roues en contact, d'assurer une rotation continue d'une roue par rapport à l'autre et de ne pas bloquer le fonctionnement de l'engrenage. Le profil d'une dent de roue dentée n'est ni une droite ni un arc de cercle (fig. III.8).

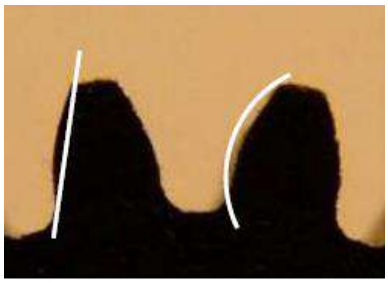
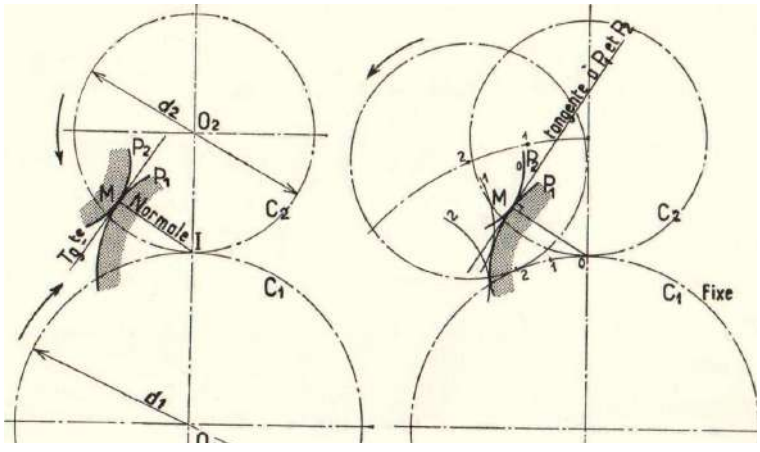


Figure III.8 : *Profil d'une dent, comparaison avec une droite et un arc de cercle*

III.5.3.a - Profils conjugués et conditions :

Deux profils sont dits conjugués lorsque les profils restent constamment tangents durant le temps où les surfaces de denture en contact assurent la transmission. Si les profils de deux roues dentées engrenant ensemble sont constamment tangents (fig.III.9a) alors les deux profils ont à chaque instant une normale commune. Si le rapport des vitesses est constant et égal au rapport inverse des diamètres primitifs alors la normale commune passe à chaque instant par le centre instantané de rotation du mouvement de l'une des circonférences primitives par rapport à l'autre supposée fixe (fig.III.9). Ce point, point de contact *I* des deux circonférences primitives, est appelé point primitif.



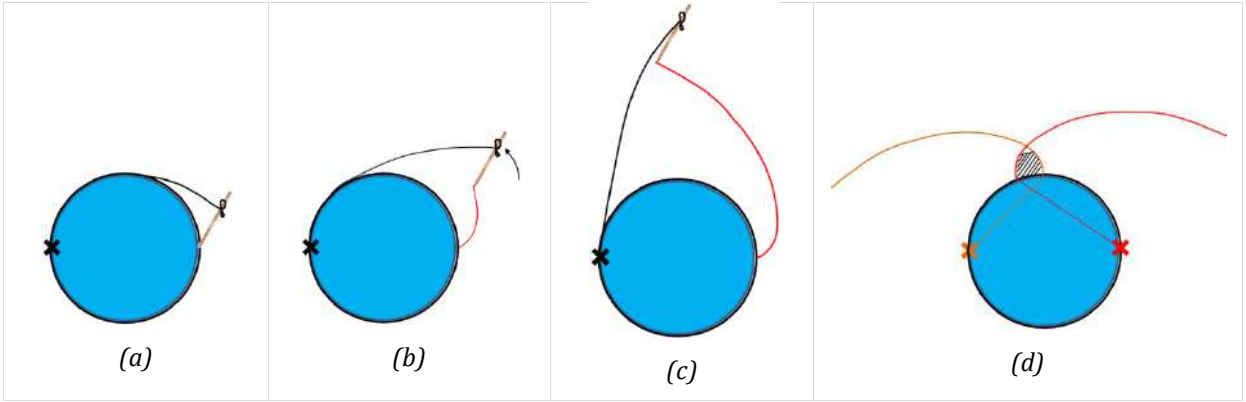
(a) (b)

Figure III.9 : *Conditions d'engrènement de profils conjugués*

III.5.3.b – Développante de cercle et tracé [29]:

Le profil des dents suit une courbe géométrique nommée développante de cercle qui se trace selon la méthode suivante (figure 4) :

- Tracer un cercle support de la développante (figure 4a),
- Tracer un diamètre assimilé à une corde fixée en ✖, enroulée autour du cercle et un crayon fixé à l'extrémité libre (figure 4a),
- Dérouler la corde avec le crayon traçant la courbe rouge (figures 4b et 4c) : la développante de cercle,
- Une dent est définie à partir de deux développantes de cercle (figure 4d).



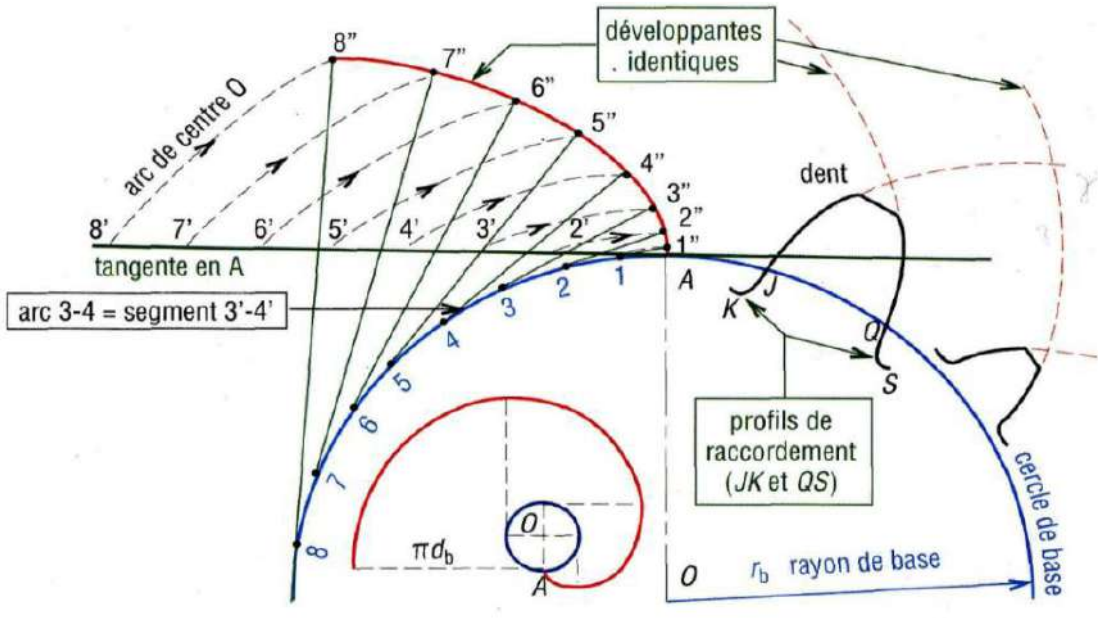


Figure III.10 : *Tracé d'une dent à partir de développantes de cercle*

III.5.3.c – Equation de la développante de cercle :

Une développante de cercle est une courbe définie par l'ensemble des points *M* tels que, en coordonnées polaires (fig.III.11) :

$$\overline{TM} = arc(TP)$$

Le cercle de base C_b de rayon r_b définit la développante de cercle.

$$r_b \tan\alpha = r_b(\theta + \alpha)$$

$$\rho = r_b/\cos\alpha$$

$$\theta = \tan\alpha - \alpha$$

$\theta = \text{inv}\,\alpha_r$ et $\text{inv}\,20° = 0{,}0149043839$

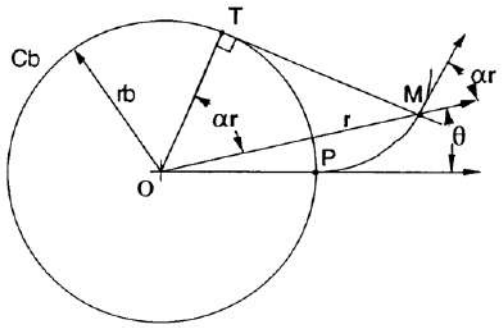


Figure III.11 : *Paramétrage de la développante de cercle.*

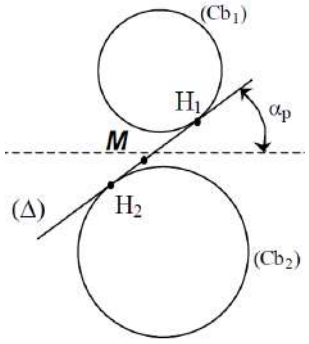


Figure III.12 : *Angle de pression.*

Les profils des dents en développante de cercle d'un engrenage (ensemble de deux roues dentées en contact) sont conjuguées : les développantes de cercle des deux roues sont tangentes en *M*. La direction de la résultante des efforts dus au contact entre les dents est portée par l'axe Δ d'angle α_p , angle de pression. Cette direction constante lors de l'engrènement, permet un comportement dynamique intéressant limitant les vibrations.

III.5.4. Interférence :

III.5.4.a - Définition de l'interférence.

a) Interférence de fonctionnement :

Lorsqu'un pignon de faible nombre de dents (donc de creux de denture étroit) engrène avec une roue de grand nombre de dents (donc de sommet de dent large) le fonctionnement peut se révéler impossible si le sommet des dents de la roue ne peut se déplacer dans le creux de denture du pignon. Dans ce cas on dit qu'il y a **interférence de fonctionnement** ou **interférence d'engrènement.**

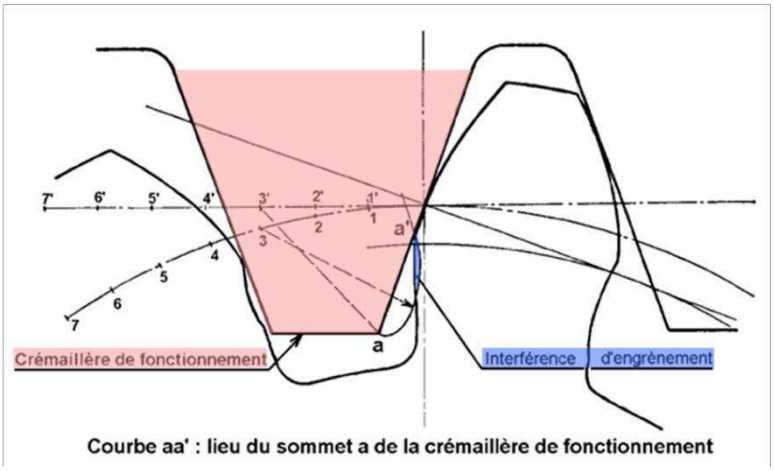


Fig.III.13: *Interférence de fonctionnement.*

b) Interférence de taillage :

Lorsqu'un pignon de faible nombre de dents est taillé avec un outil crémaillère, il peut arriver que lors de l'usinage, le profil de denture du pignon soit tronqué au pied de la dent et présente un point anguleux. Dans ce cas on dit qu'il y a **interférence de taillage**.

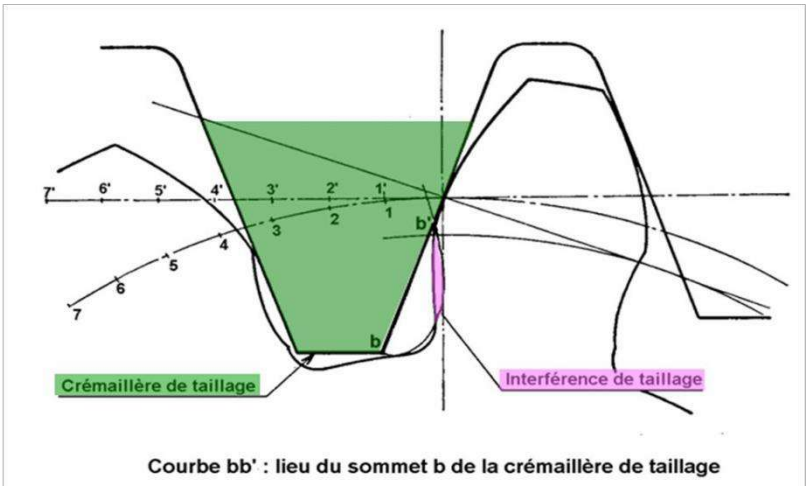


Fig.III.14 : *Interférence de taillage.*

D'une manière générale : Interférence de taillage > Interférence de fonctionnement

III.5.4.b - Inconvénients de l'interférence :

- **Interférence de taillage :** affaiblissement de la dent à la base et concentration de contraintes diminuent la résistance de la dent.
- **Interférence de fonctionnement** : génère usure, vibrations, rendement faible, et souvent impossibilité de fonctionnement (blocage). Elle doit être évitée.

III.5.4.c - Condition de non-interférence.

Détermination graphique de l'interférence de fonctionnement :

Si $\overline{IA} > \overline{IT_1}$ alors il y a interférence de fonctionnement

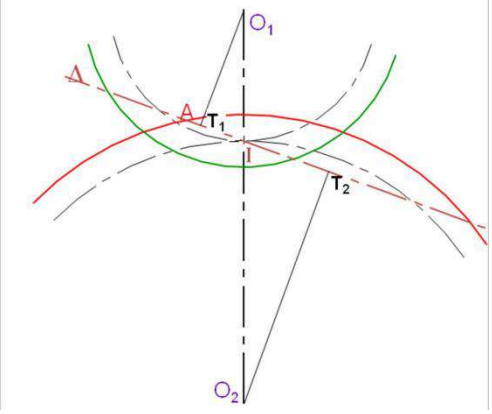


Figure III.15 : *Condition de non-interférence*

Détermination analytique de l'interférence de fonctionnement :

$$z_1 \geq \frac{4 - 0,117\, z_2^2}{0,234\ z_2 - 4}$$

$z_1 \geq 17$ **jamais d'interférence**

$z_1 < 13$ **toujours inteférence**

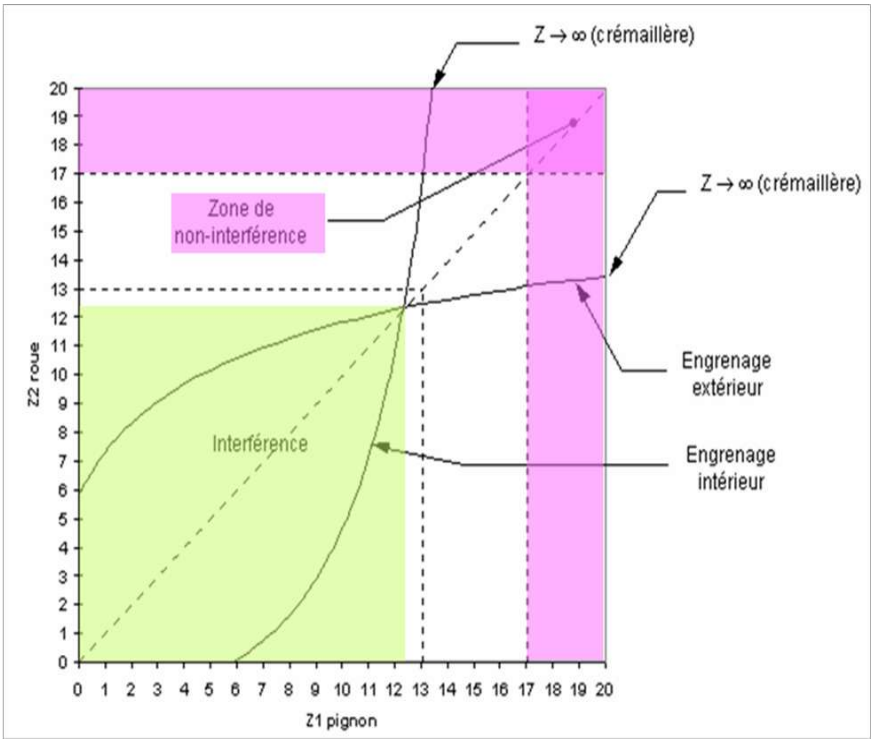


Figure III.16 : *Zone d'interférence et de non interférence*

Comment supprimer l'interférence ?

- **augmenter l'angle de pression α** : peu utilisé car cela nécessite un outillage spécial pour le taillage des dents et aussi on diminue le rapport de conduite Cα.

- **réduire la hauteur de saillie** : peu utilisé car on diminue également rapport de

conduite Cα.

- **par déport de denture** (avec ou sans variation d'entraxe) : c'est la méthode couramment utilisée pour résoudre les problèmes d'interférence.

III.5.4.d - Déport de denture sans variation d'entraxe:

On définit le déport de denture v = m . x (m : module ; x : coefficient de déport)

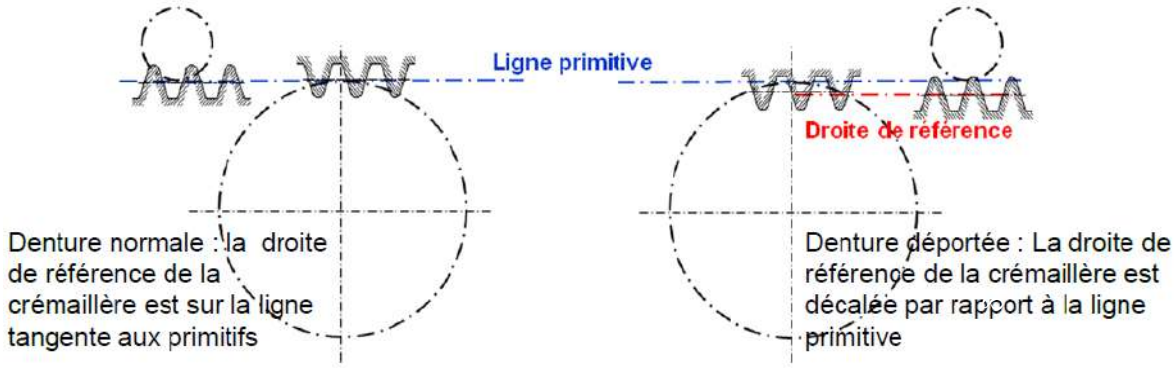


Figure III.17 : *Droite de référence et ligne primitive pour une denture normale et denture déportée*

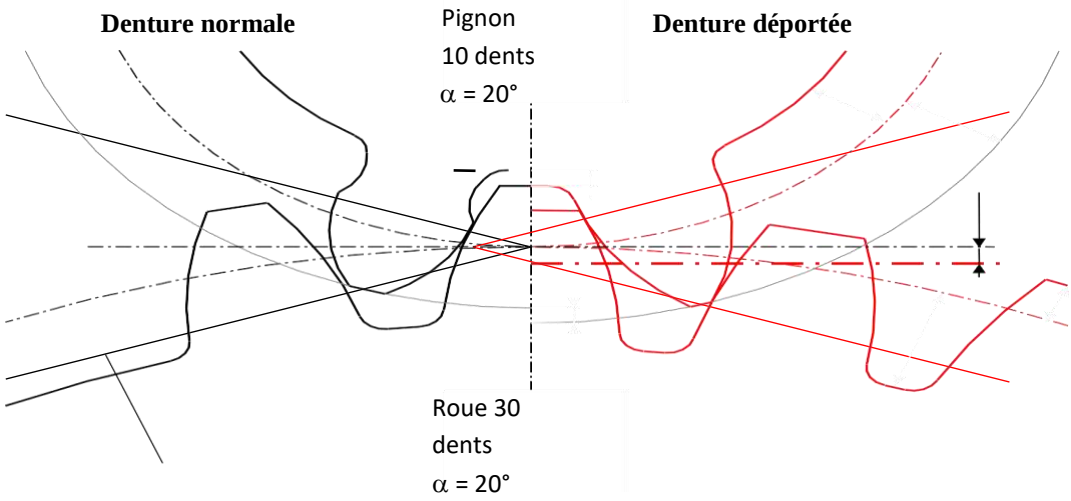


Figure III.18 : *Denture normale et denture déportée*

Les diamètres de tête et de pied ont changé.

Pignon	$h_{a1} = h_a + v = m + v$	$h_{f1} = h_f - v = 1{,}25.m - v$
Roue	$h'_{a1} = h_a - v = m - v$	$h'_{f1} = h_f + v = 1{,}25.m + v$

Si x > 0, la denture est déportée positivement → la crémaillère s'éloigne du pignon.

Si x < 0, la denture est déportée négativement → la crémaillère se rapproche du pignon.

Si $x_1 + x_2 = 0$, le déport de denture est réalisé sans variation d'entraxe.

III.5.4.e -Limites du déport de denture sans variation d'entraxe :

La crémaillère de taillage s'enfonçant moins dans le pignon, elle devra s'enfoncer plus sur la roue. L'opération est possible tant que l'on ne reporte pas l'interférence sur la roue, Pour éviter de reporter l'interférence sur la roue, on devra respecter la condition suivante :

$Z_1+Z_2 \geq 34$ (pour $\alpha = 20°$)

Dans le cas où $Z_1+Z_2 < 34$, il faudra envisager un déport de denture avec variation d'entraxe.

III.5.5 Fonctionnement avec jeu :

Le jeu B est nécessaire pour le bon fonctionnement des engrenages. Il permet :

- Une bonne lubrification.
- Evite le blocage en cas de dilatation due à une variation de température.

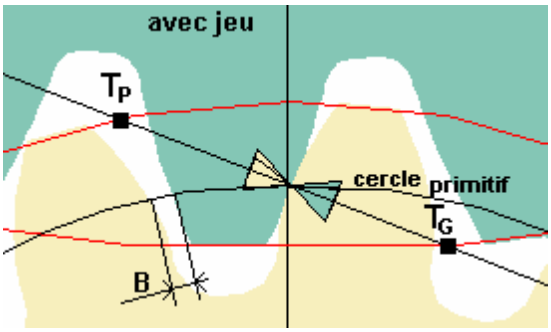


Figure III.19.a : *Fonctionnement avec jeu*

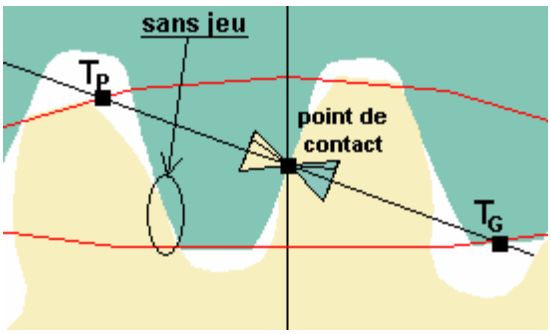


Figure III.19.b: *Fonctionnement sans jeu*

Le jeu peut être contrôlé par une modification d'entraxe (fig.III.20), un déport de fabrication ou une modification de l'épaisseur des dents de l'outil à taillage.

III.5.6. Entraxe :

L'entraxe *a* (fig.III.20) représente la distance entre les centres du pignon et de la roue.

En fonctionnement normal, sa valeur est égale à la demi-somme des rayons primitifs du pignon et de la roue.

L'entraxe peut varier en fonction de la température du boîtier et des engrenages et particulièrement lorsque les matériaux des engrenages et du boîtier sont différents. Pour avoir un bon fonctionnement de l'engrenage, il faut assurer un jeu entre une paire de dents. Il permet une lubrification efficace et d'avoir une marge de manœuvre en cas de dilatation due à une variation de température.

Une diminution d'entraxe entraîne une diminution du jeu. La variation d'entraxe peut donc servir à contrôler le jeu.

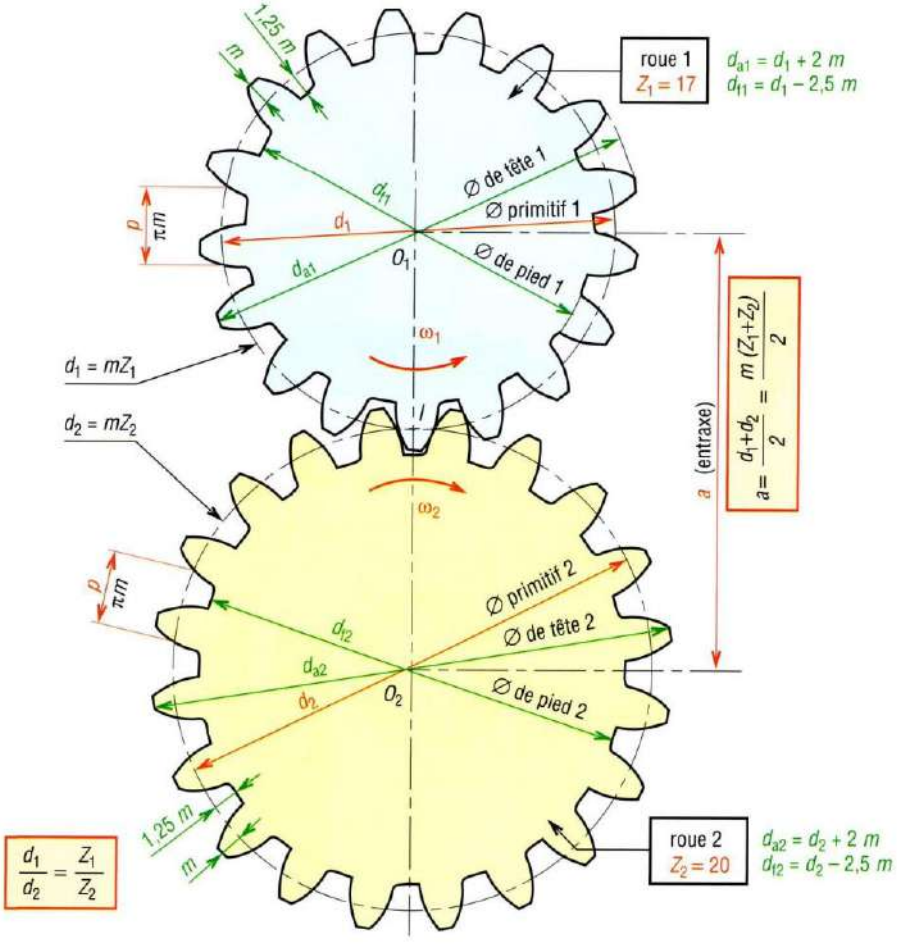


Figure III.20: *Entraxe*

Dans le cas d'un engrenage extérieur est donné par : $a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m\,(Z_1+Z_2)}{2}$

Remarque :

Pour le calcul de l'entraxe ***a*****,** on utilise :

- le signe pour un engrenage à denture externe.

- le signe - pour un engrenage à denture interne.

III.6. Caractérisation géométrique des engrenages

III.6.1. Définitions et terminologie [23]:

- **Roue cylindrique :** Roue dont la surface primitive est cylindrique.
- **Engrenage cylindrique :** Engrenage constitué de deux roues cylindriques conjuguées.
- **Roue cylindrique droite :** Roue cylindrique dont les lignes de flanc sont des génératrices du cylindre primitif de référence.
- **Roue cylindrique hélicoïdale :** Roue cylindrique dont les lignes de flancs sont des hélices.
- **Cylindre primitif :** Cylindre de roues de friction donnant le même rapport de vitesse que celui de l'engrenage considéré.
- **Cercle primitif :** Section droite du cylindre primitif.
- **Circonférence primitive :** Les circonférences primitives de deux roues conjuguées sont tangentes pendant le mouvement de rotation.
- **Diamètre primitif :** Diamètre du cercle primitif.
- **Module :** Quotient du pas exprimé en millimètres . Les modules sont normalisés en mm, par l'ISO. Il est donné par la relation: $m = p \cdot \pi$

  Ainsi, en fonctionnement : $d = m \cdot Z$; et au taillage: $d_0 = m_0 \cdot Z$

Valeurs normalisées du module de taillage m_0									
Valeurs principales en mm					Valeurs secondaires en mm				
0,06	0,25	1,25	5	20	0,07	0,28	1,125	5,5	22
0,08	0,30	1,5	6	25	0,09	0,35	1,375	7	28
0,10	0,40	2	8	32	0,11	0,45	1,75	9	36
0,12	0,50	2,5	10	40	0,14	0,55	2,75	11	45
0,15	0,75	3	12	50	0,18	0,7	3,5	14	55
0,20	1,0	4	16	60	0,22	0,9	4,5	18	70

Tableau III.1 : *Valeurs normalisées du module de taillage* [24]

- **Saillie (a) :** Distance radiale à partir du cercle primitif jusqu'au sommet de la dent.
- **Creux :** Distance radiale à partir du cercle primitif jusqu'au fond de chaque entredent.
- **Diamètre de tête :** Diamètre du cercle passant par les sommets des dents.
- **Diamètre de pied :** Diamètre du cercle passant par le fond de chaque entre-dent.

- **Hauteur de dent :** Hauteur totale de la dent. Elle se compose de la saillie et du creux.
- **Épaisseur circulaire ou épaisseur :** Longueur de l'arc du cercle primitif compris entre les deux profils d'une dent
- **Flanc :** Portion de la surface latérale d'une dent comprise entre le cylindre de tête et le cylindre de pied.

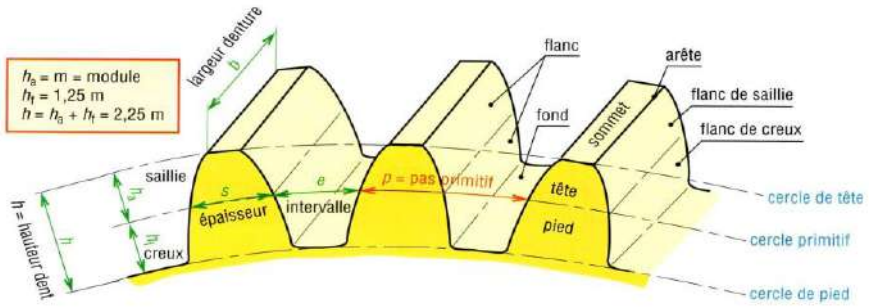


Figure III.21 : *caractéristiques géométriques d'une roue dentée à denture droite*

III.6.2. Engrenages cylindriques à denture droite :

C'est le type de denture le plus courant. Il est utilisé dans toutes les applications de mécanique générale. C'est le système qui permet de transmettre le maximum d'effort, mais son principal défaut est d'être bruyant.

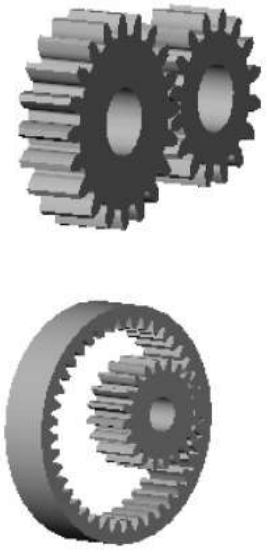


Figure III.22 : *Engrenage cylindrique à denture droite*

Désignation	**Symbole**	**Formule**
Module	m	*Par calcul de la RDM*
Nombre de dents	Z	*Par un rapport de vitesse*
Diamètre primitif	d	$d = mZ$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2{,}5\ m$
Saillie	h_a	$h_a = m$
Creux	h_f	$h_f = 1.25\ m$
Hauteur de dent	h	$h = 2.25\ m$
Pas	P	$P = \pi\ m$
Largeur de denture	b	$b = k\ m \quad (5 \leq k \leq 16)$
Entraxe	a	$a = (d_1+d_2)/2$

Tableau III.2 : *Caractéristiques géométriques et formulations des engrenages cylindrique à denture droite*

III.6.3. Engrenages cylindriques à denture hélicoïdale :

Les engrenages à denture hélicoïdale permettent une transmission plus souple, plus progressive et moins bruyante que les engrenages à dentures droite, La transmission des efforts est plus importante (nombres de dents en contacts plus élevés), y compris aux vitesses élevées, ils sont notamment utilisés dans les boites de vitesses d'automobiles, les réducteurs et les multiplicateurs de vitesses. Les inconvénients de ce type d'engrenage sont :

- Des efforts supplémentaires dus à l'angle d'hélice (force axiale sur les paliers et augmentation des efforts de flexion).
- Rendement un peu moins bon.
- Utilisation impossible en montage "baladeur" (ces engrenages doivent rester en contact permanent).



Figure III.23 : *Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale*

Désignation	**Symbole**	**Formule**
Module réel	m_n	Par un calcul de RDM
Nombre de dents	Z	Par un rapport de vitesse
Angle d'hélice	β	Entre 20° et 30°
Module apparent	m_t	$m_t = \frac{m_n}{\cos\beta}$
Pas réel	p_n	$p_n = \pi\, m_n$
Pas apparent	p_t	$p_t = \frac{p_n}{\cos\beta}$
Diamètre primitif	d	$d = m_t Z$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2\, m_n$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2{,}5\, m_n$
Saillie	h_a	$h_a = m_n$
Creux	h_f	$h_f = 1{,}25\, m_n$
Hauteur de dent	h	$h = 2{,}25\, m_n$
Largeur de denture	b	$b \geq \frac{\pi\, m_n}{\sin\beta}$
Entraxe	a	$a = (d_1+d_2)/2$

Tableau III.3 : *Caractéristiques géométriques et formulations des engrenages cylindrique à denture hélicoïdale*

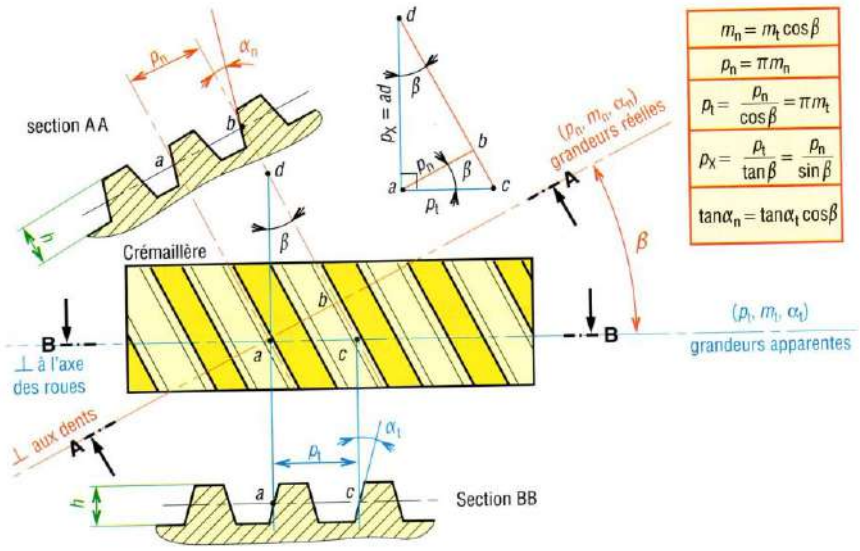


Figure III.24 : *Caractéristiques géométriques d'une roue dentée à denture hélicoïdale*

III.6.4. Engrenages coniques :

Les roues de ces engrenages ne sont pas des cylindres, mais des cônes. Il existe des roues dentées coniques à denture droite et des roues dentées coniques à dents obliques et à dents spirales. Tous ces engrenages servent à transmettre la rotation entre des arbres dont les axes sont concourants, avec un rapport de vitesse rigoureux. Ceux à dents spirales, c'est-à-dire dont les dents ont la forme d'un arc de cercle, sont les plus utilisés, car ils sont plus silencieux

.

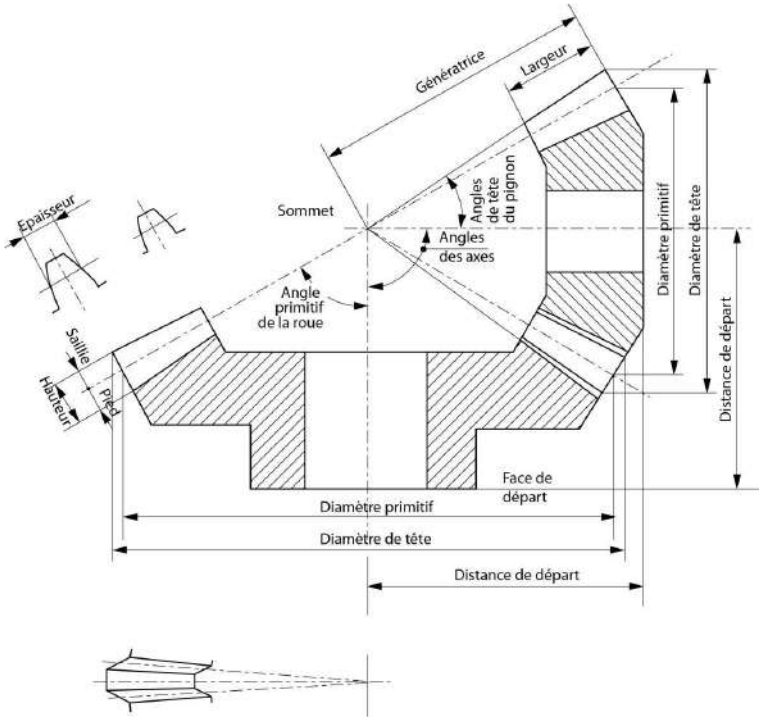


Figure III.25 : *caractéristiques géométriques d'un engrenage conique*



Figure III.26 : *Engrenage conique*

Désignation	**Symbole**	**Formule**
Module	m	Par un calcul de RDM
Nombre de dents	Z	Par un rapport de vitesse
Angle primitif	δ	$\tan\delta_1 = Z_1/Z_2$
Diamètre primitif	d	$d = m\ Z$
Largeur de denture	b	$b = k\ m \quad (5 \leq k \leq 16)$
Diamètre de tête	d_a	$d_{a1} = d_1 + 2\ m \cos\delta_1$
Diamètre de pied	d_f	$d_{f1} = d_1 - 2{,}5\ m \cos\delta_1$
Saillie	h_a	$h_a = m$
Creux	h_f	$h_f = 1{,}25\ m$
Hauteur de dent	h	$h = 2{,}25\ m$
Angle de saillie	θ_a	$\theta_a = m/L$
Angle de creux	θ_f	$\theta_f = 1{,}25\ m/L$
Angle de tête	δ_a	$\delta_{a1} = \delta_1 + \theta_a$
Angle de pied	δ_f	$\delta_{f1} = \delta_1 - \theta_f$

Tableau III.4 : *Caractéristiques géométriques et formulations des engrenages coniques*

III.6.5. Engrenages gauches : le système roue - vis sans fin :

La vis sans fin est constituée d'un long cylindre étroit, présentant une denture hélicoïdale continue, analogue au filetage d'une vis cylindrique, se mettant en prise avec une roue à denture hélicoïdale. Les engrenages à vis sans fin diffèrent des engrenages à roues à denture hélicoïdale. En effet, les dents de la vis sans fin s'engagent continûment en glissant sur celles de la roue menée, mais ne leur appliquent pas directement un effort de rotation. Les vis sans

fin servent principalement à transmettre une rotation, avec une forte réduction de vitesse, entre deux arbres orthogonaux.

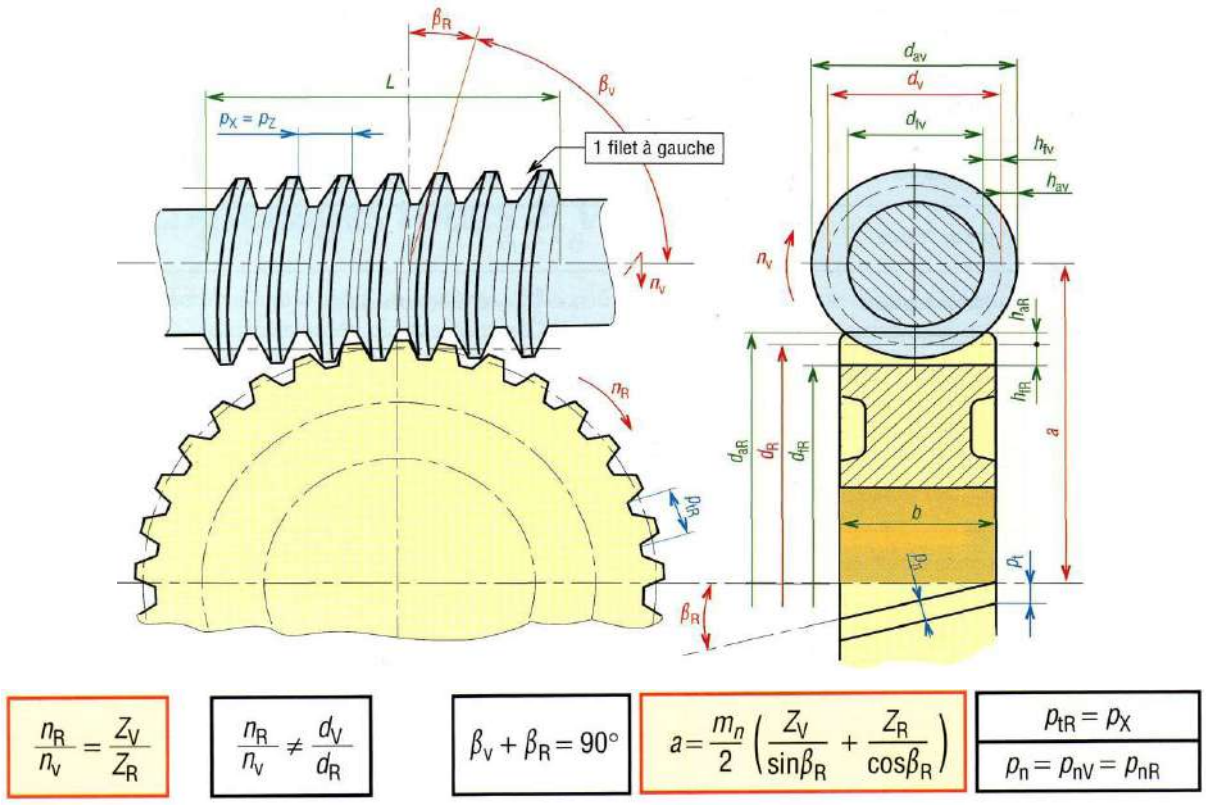


Figure III.27.a : *Caractéristiques géométriques d'un engrenage gauche (roue - vis sans fin)*



Figure III.28.b : *Engrenage Gauches (roue - vis sans fin)*

Désignation	**Symbole**	**Formule**
Module réel	m_n	Par un calcul de la RDM
Nombre de filets	Z	Par un rapport de vitesse
Angle d'hélice	β	Déterminé pour l'irréversibilité $\gamma < 5°;\ \beta + \gamma = 90°$
Module axial	m_x	$m_x = \frac{m_n}{\cos\gamma}$
Pas axial	p_x	$p_x = \frac{p_n}{\cos\gamma}$
Pas réel	p_n	$p_n = \pi\, m_n$
Pas de l'hélice	p_z	$p_z = p_x\, Z$
Diamètre primitif	d	$d = \frac{p_z}{\pi \tan\gamma}$
Diamètre extérieur	d_a	$d_a = d + 2\, m_n$
Diamètre intérieur	d_f	$d_f = d - 2{,}5\, m_n$
Longueur de la vis	L	$4\, p_x < L < 6\, p_x$

Tableau III.5 : *Caractéristiques géométriques et formulation d'un engrenage (roue - vis sans fin)*

III.7. Obtention des roues dentées [29]

Les dentures des roues sont dotées d'un profil complexe. Les moyens d'obtenir ces formes sont divers. Le module conditionne la forme des outils et beaucoup d'outils ne sont conçus que la fabrication d'une seule forme de denture donc d'un unique module normalisé. Le taillage par génération est le procédé d'usinage de dentures le plus utilisé. Il nécessite une machine spéciale rentabilisée par des fabrications en grandes séries. Les outils utilisés sont :

- L'outil crémaillère;
- L'outil pignon;
- La fraise-mère;

Il existe d'autres procédés :

- L'usinage par fraise-disque;
- Le forgeage;
- Le brochage;
- Le frittage.

Lors du taillage par génération, les dentures sont réalisées par enlèvement de matière. L'usinage consiste à simuler entre un outil (pignon, crémaillère, ou fraise) et la roue à tailler, un engrènement : le module de denture est imposé par l'outillage. Le mouvement d'engrènement contribue au mouvement d'avance dans l'opération d'usinage, et le mouvement de coupe dépend du procédé.

III.7.1. Taillage avec génération :

III.7.1.a- Taillage par outil crémaillère :

Les machines utilisées sont des mortaiseuses dont l'outil est une crémaillère ; chaque dent de l'outil crémaillère est un outil de rabotage. La roue à tailler est montée sur un axe de façon que le cercle primitif soit tangent à la droite primitive de la crémaillère. La roue et la crémaillère se déplacent comme si elles engrenaient : l'outil taille une denture engrenant avec un module précis qui se conjugue avec toutes les roues de même module. La roue à tailler peut être montée sur un axe horizontal (fig.III.) ou vertical.



Figure III.28 : *Exemple de taille par outil crémaillère*

III.7.1.a-1. Usinage avec l'outil crémaillère:

L'obtention du profil en développante de cercle se fait en générant un mouvement équivalent à du roulement sans glissement entre la crémaillère et la roue à tailler. Pour cela, il est possible par exemple de donner un mouvement de rotation à la pièce usinée, et de translation à l'outil crémaillère (fig.III.31).

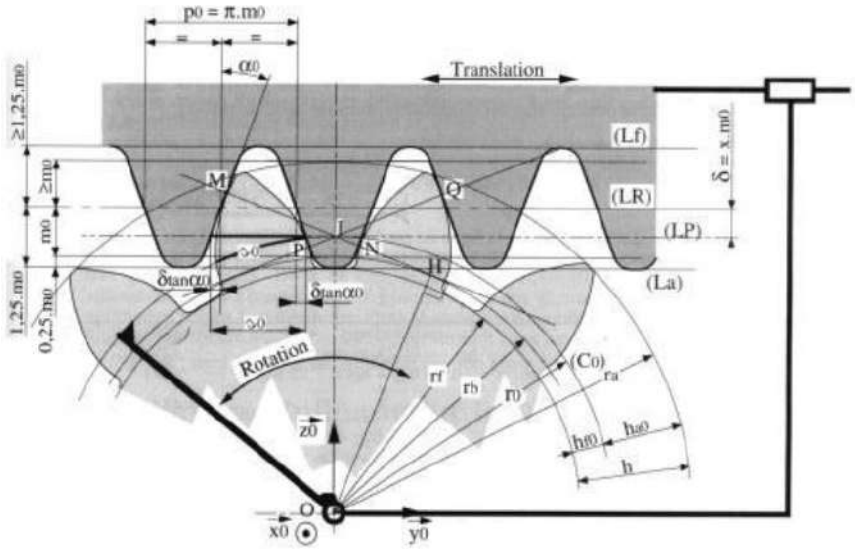


Figure III.29 : *Mouvements d'engrènement lors du taillage par outil crémaillère*

Il est usuel que les deux mouvements de translation et rotation soient effectués par la roue à usiner. Au cours de ce mouvement, l'enveloppe des flancs de crémaillère est une développante de cercle. La crémaillère utilisée est une crémaillère normalisée. Sa forme est définie en particulier par sa ligne de référence (LR). Pour tailler un engrenage sans déport de denture, cette ligne est placée tangente au cercle primitif du pignon à tailler (cercle défini par $r_0 = 1/2.m_0.Z$).

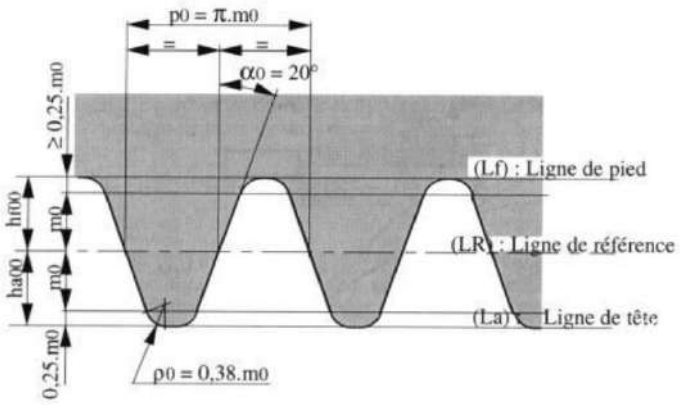


Figure III.30 : *Géométrie de l'outil crémaillère*

Lors de l'usinage avec un outil crémaillère la vitesse de coupe est très faible (de l'ordre de 15 à 20 m/min) et la lubrification doit être abondante. Le mouvement d'aller-retour de l'outil crémaillère synchronisé avec la rotation relative par rapport à la roue à tailler génère le profil en développante de cercle (fig.III.31).

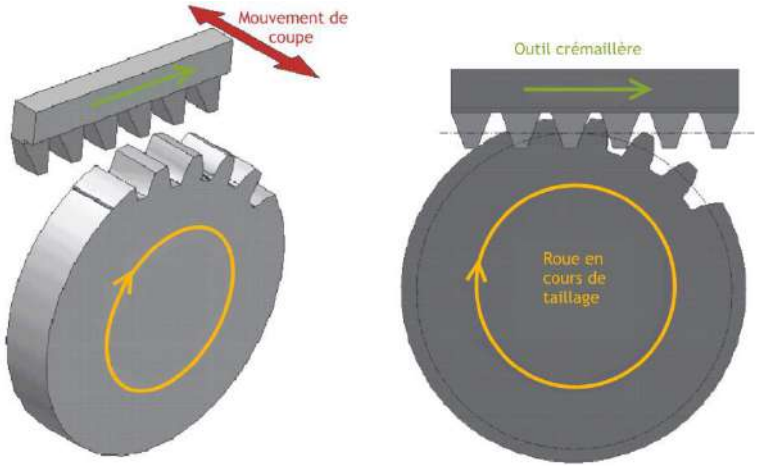


Figure III.31 : *Mouvements lors de l'usinage d'une roue avec un outil-crémaillère*

III.7.1.a-2. Description de l'outil crémaillère :

Un outil-crémaillère possède des dents dépouillées pour obtenir des arêtes de coupe et une dépouille. Les dents de l'outil crémaillère (fig.III.32) n'ont pas un profil en développante de cercle, il s'agit de droites. Cet outil de géométrie relativement simple est facilement affûtable. On retrouve sur les arêtes coupantes un angle de dépouille (fig.III.32). Les longueurs des outils crémaillères sont variables et dépendent des applications.

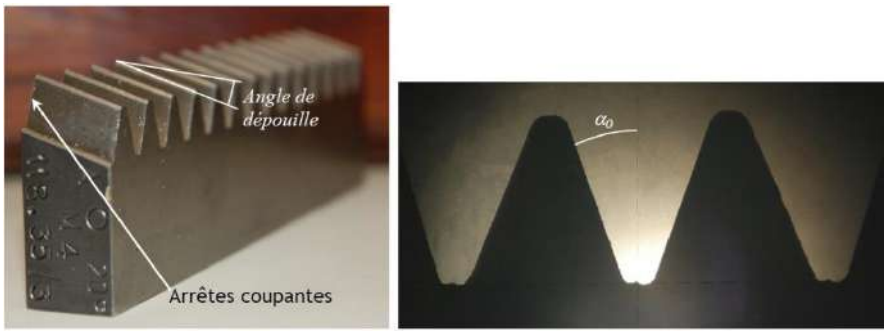


Figure III.32: *Outil-crémaillère module m = 4 et d'angle de pression α0 20°et son profil.*

Chaque outil est caractérisé par son module et son angle de pression ; toutes les roues taillées auront ces caractéristiques.

III.7.1.a-3. Taillage de dentures hélicoïdales :

L'usinage des dentures hélicoïdales se fait en inclinant l'outil crémaillère et en imposant un mouvement de rotation à la roue à tailler. L'inclinaison de l'outil à droite génère des dentures inclinées à gauche (fig.III.33).



Figure III.33: *L'outil sur la machine est incliné à droite, la roue usinée est à dentures à gauche*

III.7.1.a-4. Avantages et inconvénients :

Ce procédé est lent et n'est applicable que pour de petites séries. Il nécessite des opérateurs qualifiés sur des machines spécifiques, cependant assez rapide à mettre en œuvre. Le taillage par outil crémaillère permet la réalisation de dentures hélicoïdales (figure 6) ainsi que la réalisation de module important et de pièces de grandes dimensions (figure 7). Les outils sont de géométrie simple il est donc facile d'obtenir des profils non normalisés pour des applications particulières

III.7.1.b- Taillage par outil pignon :

Les machines utilisées sont des mortaiseuses dont l'outil est un pignon. Le taillage est effectué par l'engrènement de l'outil pignon avec la roue à tailler. La roue à tailler est montée sur un axe et tourne dans un rapport de vitesse fonction du nombre de dents à tailler. L'outil

pignon, dont les dents sont dotées d'arêtes coupantes, est animé d'un mouvement rectiligne alternatif combiné avec sa rotation (fig.III.35). Il s'agit d'une génération continue de 1 à Z dents.

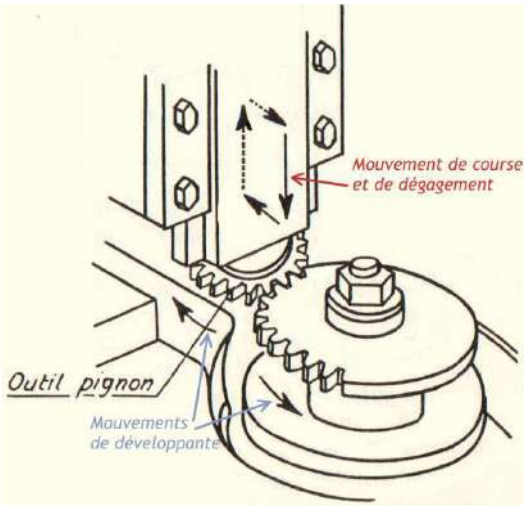


Figure III.34 : *Exemple de taille avec outil pignon*



Figure III.35 : *Mouvements lors de l'usinage d'une roue avec un outil pignon*

III.7.1.b-1. Description de l'outil pignon

Un outil pignon n'est pas une simple roue dentée, il est doté de dents coupantes avec dépouille (fig.III.36). Le déport de denture de l'outil est une caractéristique dépendant de son affûtage.





Figure III.36*: Dépouille des dents de l'outil pignon et son profil en développante de cercle*

Les outils pignons ne permettent d'obtenir qu'un module par outil.

III.7.1.b-2. Conditions d'usinage :

Un outil pignon ne peut pas être doté d'un mouvement rapide, la vitesse de coupe est donc faible (20 m/min). Il y a des risques d'adhésion de l'outil sur la matière, la lubrification doit être abondante pour éviter de coller l'outil pignon à la pièce (fig.III.36).



Figure III.37: *Usinage de denture intérieure par outil pignon*

Pour usiner des pignons à denture hélicoïdale, l'outil pignon est animé d'un mouvement de rotation autour de son axe lors de sa descente. Il doit accomplir le mouvement inverse lors de la remontée pour ne pas abîmer le profil généré.

III.7.1.b-3. Avantages et inconvénients

Ce procédé est lent et n'est applicable que pour de petites séries. Il nécessite des opérateurs qualifiés sur des machines spécifiques cependant assez rapides à mettre en œuvre.

L'outil pignon est peu encombrant et ne requiert qu'un faible dégagement pour passer. On ne peut pas usiner des dents de grand module avec des outils pignons car ceci nécessite de très nombreuses passes d'usinage et prend donc beaucoup de temps.

L'usinage de dentures hélicoïdales est réalisable. C'est l'un des rares procédés à pouvoir usiner des dentures intérieures.

NB : Le taillage des engrenages par génération avec l'outil crémaillère comme avec l'outil pignon n'est utilisé que pour de petites séries, le procédé est lent.

III.7.1.c- Taillage par fraise-mère :

Le taillage par fraise-mère est actuellement le procédé le plus utilisé. Il est plus rapide que les procédés de taillage par outil crémaillère et outil pignon, l'usinage se faisant en continu sans allers retours d'outil générant des pertes de temps.

Ce procédé est extrêmement utilisé dans le secteur automobile qui nécessite de nombreux pignons, notamment pour les boîtes de vitesses.



Figure III.38: *Exemple de taille par fraise-mère*

III.7.1.c- 1. Description de la fraise-mère :

L'outil fraise-mère a l'apparence d'une vis sans fin entaillée de gorges longitudinales pour aménager des arêtes tranchantes (fig.III.39). Chaque rangée de dents a le profil d'une crémaillère, les dents ne sont pas en développante de cercle. Le paragraphe 3 étudie les caractéristiques de la fraise-mère et le paragraphe 4 les différentes possibilités de sa réalisation.



Figure III.39: *Outil fraise-mère et son profil*

III.7.1.c-2. Mouvements de l'outil et de la roue à tailler :

Ce procédé nécessite plusieurs mouvements coordonnés afin d'obtenir sur la roue usinée le profil en développante de cercle. L'outil fraise-mère et la roue à tailler constituent un engrenage gauche dont les tangentes à l'hélice primitive de l'outil et de la roue restent constamment confondues. La fraise est animée d'un mouvement de rotation sur son axe (mouvement de coupe) ainsi que d'une translation parallèle à l'axe de la pièce (mouvement d'avance) à faible vitesse (fig.III.40) ; une translation radiale de l'outil assure la profondeur de passe. Les mouvements de rotation de la roue à tailler et de l'outil fraise-mère sont nécessairement liés, comme pour tous les taillages par génération. L'accroissement de la durée de vie de l'outil est assuré par une usure uniforme de toute la

longueur active de l'outil : on réalise un déplacement de la fraise de long de son axe lors du taillage d'un grand nombre de pièces identiques, ce procédé s'appelle le shifting.

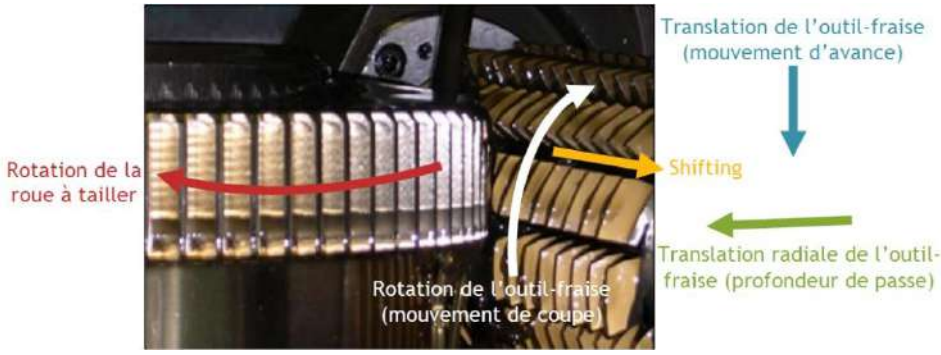


Figure III.40 : *Mouvements lors de l'usinage des dents d'une roue avec une fraise-mère*

III.7.1.c-3. Avantages et inconvénients :

Ce procédé est rapide et très performant. Il nécessite des machines spécifiques et des opérateurs qualifiés. Les outils sont complexes et coûteux.

Il est impossible de réaliser des dentures intérieures, et d'utiliser le taillage par fraise-mère pour de gros pignons (il faudrait des fraises importantes).

III.7.2. Taillage sans génération :

III.7.2.a- Taillage par fraise-module :

Le principe de cet usinage repose sur l'utilisation d'une fraise-module, outil de forme, qui permet la reproduction de la forme des dents. La fraise-module est une fraise-disque à profil constant dans tous les plans d'affûtage passant par l'axe.

Il existe une standardisation de ces fraises-modules. L'outil est spécifique à chaque module et le profil varie suivant le nombre de dents (une fraise-module couvre une plage d'un nombre de dents de l'engrenage à tailler).



Figure III.41 : *Exemple de taillage d'une roue par fraise-module*

Les machines à tailler sont de simples fraiseuses, dont la broche est verticale ou horizontale pour l'usinage de denture droite. Lors de l'usinage de dentures hélicoïdales, l'axe est incliné à gauche ou à droite suivant l'angle de l'hélice.

Dans le cas du taillage d'une denture droite, l'usinage de fait par division de la broche porte-pièce selon le nombre de dents souhaité. Le profil de la fraise-module est exactement celui de l'entredent à tailler (fig.III.42).

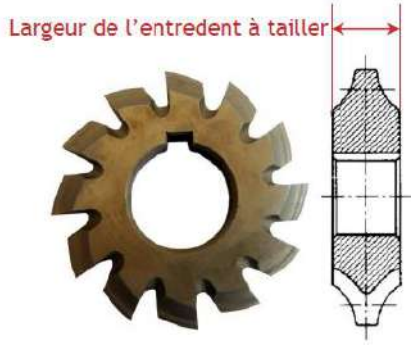


Figure III.42 : *Profil de l'outil fraise-module*

III.7.2.b- Taillage par fraise-disque à grande productivité :

Les fraises-disques montées sur des fraiseuses, servent principalement à l'ébauche et permettent d'obtenir, par grands enlèvements de copeaux, des profils satisfaisants. Pour des applications nécessitant des vitesses de rotation lentes des engrenages, la qualité peut être suffisante.



Figure III.43 : *Outil fraise-disque*

III.7.2.c- Taillage par brochage :

Le brochage se réalise à l'aide d'un outil broche, pièce en acier muni de dents qui permet l'obtention de formes intérieures ; il est nécessaire que la géométrie de la pièce permette le passage de l'outil de part et d'autre de la pièce à brocher.

Pour tailler une forme, la broche se compose de plusieurs outils (dents) dont la dimension augmente depuis la première dent d'ébauche jusqu'à la dernière dent de finition.

Ce procédé est réservé à d'obtention de dentures intérieures de petites dimensions.

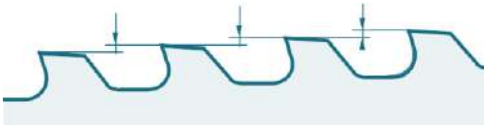


Figure III.44 : *Outil Augmentation progressive des dents de broche*



Figure III.45 : *Usinage par brochage*

III.7.2.d- Forgeage :

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur une barre de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme.



Figure III.46 : *Roues coniques et pignon droit obtenus par forgeage*

III.7.2.e- Frittage

Le frittage permet d'obtenir directement par compression la géométrie des dents ; les engrenages réalisés peuvent être d'une grande variété de dimensions et de formes (fig.III.47). Des poutres métalliques sont fortement comprimées et mises en forme dans une matrice, sous l'action d'un ou de plusieurs poinçons. Les pressions atteignent communément plusieurs milliers de bars.



Figure III.47 : *Pièces dentées de formes diverses*

Après démoulage, on obtient des préformes plus ou moins fragiles qui sont ensuite chauffées sous vide ou dans une atmosphère contrôlée, à une température inférieure à la température de fusion de l'élément principal. C'est la phase de frittage proprement dite. Sous l'effet de la chaleur, les matériaux diffusent les uns dans les autres et les grains de poudre se lient de façon relativement solide, suffisamment pour obtenir des composants mécaniques utilisables.

III.7.2.e- Taillage par reproduction

C'est un procédé rare. Les dents sont fabriquées une à une en faisant suivre la développante de cercle à un outil coupant. On maintient immobile soit la roue à tailler soit l'outil, l'autre élément est doté d'un mouvement guidé par une came reproduisant la développante de cercle au niveau de la dent. La partie mobile (outil ou roue) est animée d'un mouvement de translation conjugué avec un mouvement de rotation.

III.7.2.e-1. Outil fixe :

Pour générer le profil, la roue à tailler se déplace en translation avec le chariot et une came contrôle son mouvement de rotation (fig.III.48). La rotation est liée à la translation du chariot.

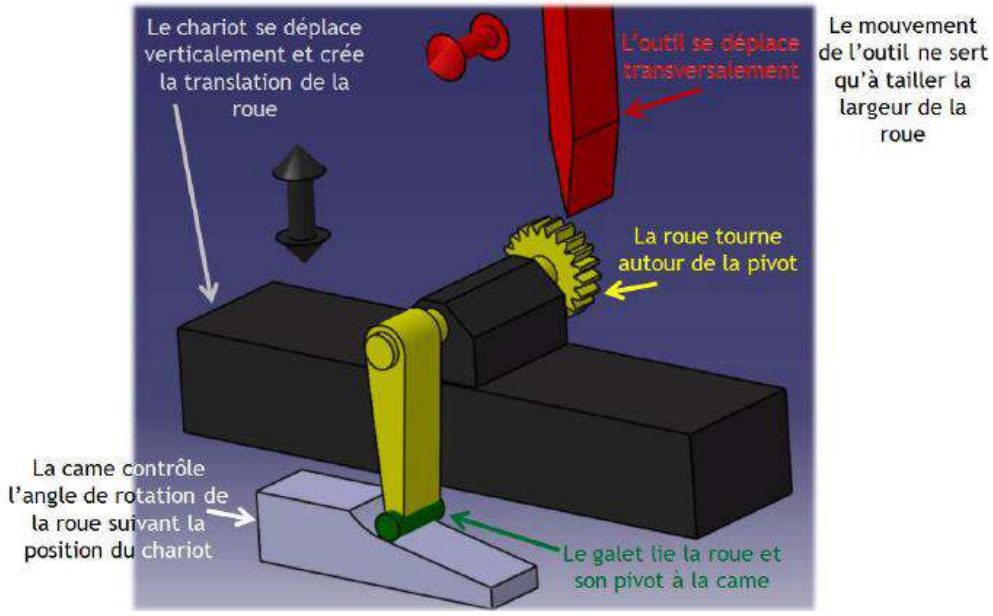


Figure III.48 : *Principe du taillage par reproduction avec outil fixe*

III.7.2.e-2. Pièce fixe :

Lorsque la roue est de grande taille, et qu'il devient difficile de la mettre en mouvement, elle est alors maintenue immobile et l'outil se déplace pour créer le profil. Le principe est

très proche du précédent à la différence que la came guide l'outil et non la roue. La roue ne tourne que lorsqu'un profil est fini afin de passer au suivant.

III.7.2.e-3. Utilisation du procédé :

Ce procédé est relativement lent car on ne génère qu'une dent à la fois et il faut de nombreux passages pour réaliser une développante de cercle ; industriellement le taillage par reproduction n'est utilisé que pour les roues de très grandes dimensions. Le taillage par outil fixe peut être adapté sans grande difficulté à des machines standard de type mortaiseuse par exemple. Il suffit de créer l'outillage adéquat et de posséder le mouvement alternatif et transversal de l'outil.

NB : Ces procédés très différents (fraise-module, forgeage, frittage …) permettent de façonner des dentures d'engrenages sans génération, c'est-à-dire sans utiliser un usinage reprenant les mouvements d'engrènement entre un outil et la roue. Une opération de finition des dents peut compléter le travail des procédés avec ou sans génération en fonction du besoin et de l'utilisation telle que la rectification en utilisant des roues coniques ou bien le rasage (shaving).

III.8. Avarie et détériorations typiques des dentures d'engrenages [23] :

Durant la vie d'un engrenage en fonction, on constate qu'il existe plusieurs types de détérioration des roues dentées que l'on peut citer ci après (tableau III.3)

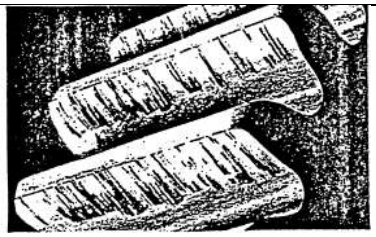
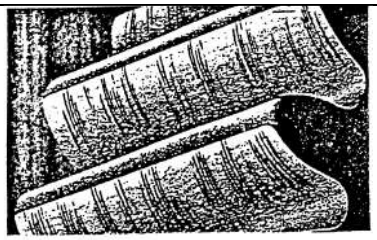
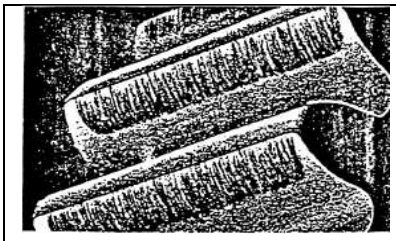
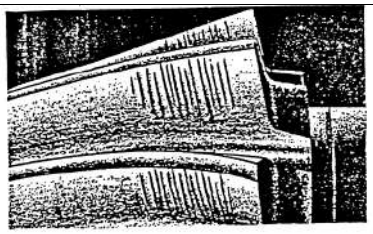
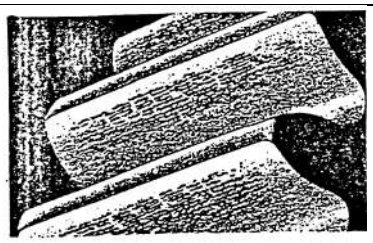
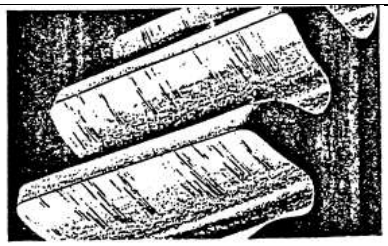
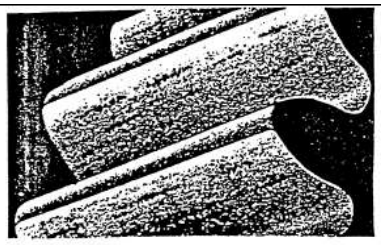
- **Usure normale :** Caractérisée par un lissage ou polissage progressif des surfaces. Résulte de l'action de glissement et de roulement des dents. Un lubrifiant approprié doit réduire cette usure après la période de rodage.
- **Usure par abrasion :** Caractérisée par une usure rapide et uniforme des dents, avec présence de minuscules rayures réparties sur toute la surface. Résulte généralement de la présence dans le lubrifiant de particules abrasives (poussières, sable, etc.). Un graissage insuffisant peut accélérer le phénomène.
- **Rayures :** Avarie caractérisée par des rayures semblables à celles causées par l'abrasion, mais plus profondes et nettement séparées les unes des autres. Résulte de la présence dans l'huile d'impuretés de grandes dimensions. Le lubrifiant n'en est pas la cause.
- **Usure par surcharge :** Caractérisée par la présence simultanée de minuscules cavités et de rayures à la surface des dents. Les cavités sont dues à un micro-écaillage par fatigue du métal et les rayures à l'arrachement du métal par les écailles détachées des

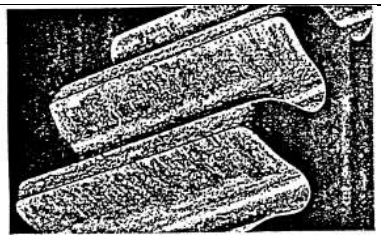
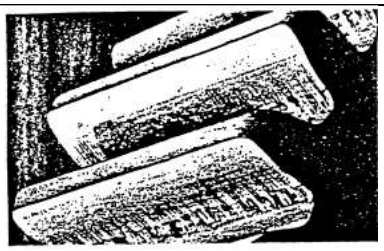
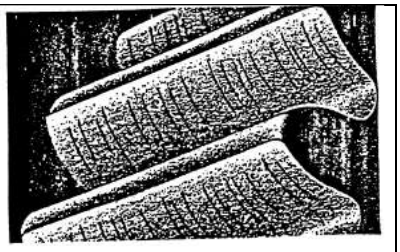
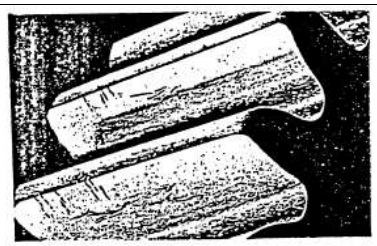
dents. Résulte d'une pression trop élevée. Ce phénomène est indépendant de la qualité de l'huile, mais une huile trop fluide le favorise.

- **Crêtes :** Avarie caractérisée par des crêtes et des rayures orientées dans la direction du glissement sur des pignons hypoïdes travaillant sous fortes charges. Résulte de défauts d'origine métallurgique ou d'un traitement thermique non approprié. Le lubrifiant peut être en cause. Des additifs E.P. peuvent éviter cette avarie.
- **Laminage et matage** : Avarie caractérisée par la formation d'une arête faisant saillie sur la tête des dents. Peut être accompagnée ou non de rayures. Résulte d'un fluage superficiel du métal sous l'action de charges permanentes excessives (laminage) ou de chocs fréquents (matage). Le lubrifiant n'est pas en cause.
- **Rides** : Avarie caractérisée par la formation d'ondes, parallèles entre elles et perpendiculaires à la direction du roulement, rappelant les ondes de sable sur la plage. Résulte d'un fluage superficiel du métal sous l'action de charges supérieures à la limite d'élasticité. Le lubrifiant n'est pas en cause.
- **Grippage superficiel** : Avarie caractérisée par des rayures et griffes perpendiculaires au diamètre primitif et comportant habituellement une petite cavité à l'extrémité de la rayure dans le flanc des dents. Résulte de contact métal/métal provoqué par des conditions opératoires anormales. Un lubrifiant plus efficace, E.P. par exemple, pourra l'éliminer lorsqu'elle est prise à son stade initial.
- **Usure par corrosion :** Caractérisée par des cratères peu profonds mais allongés dans le sens de la longueur de la dent. Résulte de l'attaque du métal par les acides présents dans les huiles usées. La présence d'eau peut accélérer l'attaque. Le lubrifiant est en cause et doit être immédiatement remplacé.
- **Brunissage :** Avarie caractérisée par la coloration de la surface des dents. Résulte de hautes températures dues à une trop grande vitesse, une charge excessive, un graissage défectueux. La dureté du métal s'en trouve généralement réduite. La viscosité et la classe du lubrifiant peuvent être en cause.
- **Interférence** Avarie caractérisée par un arrachement de métal à la base de la dent du pignon. Le même phénomène peut se présenter dans un engrenage à v. s. f. Résulte d'une interférence entre le flanc du pignon et l'extrémité de la dent de la roue. Le lubrifiant n'est pas en cause.
- **Critiques de rectification :** Avarie caractérisée par de légères criques perpendiculaires au diamètre primitif. Elles ne sont généralement pas décelables avant un certain temps de fonctionnement. Résulte d'une rectification défectueuse ou d'un traitement thermique impropre. Le lubrifiant n'est pas en cause.

- **Rupture par surcharge :** Caractérisée par une cassure franche de la dent sans présence de criques autour de la fracture. Résulte d'un choc ou d'une surcharge brutale et subite. Le lubrifiant n'est pas en cause.
- **Rupture par fatigue :** Caractérisée par la formation de craquelures sur une plage très réduite, craquelures qui s'étendent en longueur et en profondeur jusqu'à la rupture de la dent. Résulte de surcharges répétées ou alternées. Le lubrifiant n'est pas en cause.
- **Criques :** Avarie caractérisée par la présence de petites failles réparties au hasard sur la surface des dents. Elles ne donneront pas forcément des avaries graves. Résulte des conditions de charge ou d'un graissage défectueux causant des variations de température excessives. Le choix du lubrifiant est éventuellement à revoir.
- **Tapure de trempe :** Avarie caractérisée après un certain temps de fonctionnement par de fines craquelures qui se dirigent dans toutes les directions. Résulte d'une trempe défectueuse. Les tapures conduisent rapidement à un écaillage de la surface des dents. Le lubrifiant n'est pas en cause.

Le tableau ci-dessous montre les différents types de détérioration des roues dentées.

		
Usure normale	**Usure par abrasion**	**Rayures**
		
Usure par surcharge	**Crêtes**	**Laminage et matage**
		

Rides	Grippage superficiel	Usure par corrosion
		
Brunissage	**Interférence**	**Critiques de rectification**
		
Rupture par surcharge	**Rupture par fatigue**	**Criques**

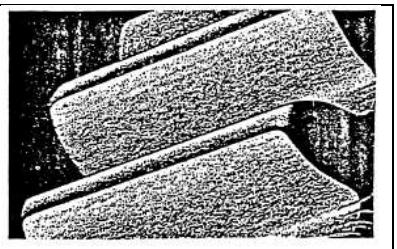

Tapure de trempe

Tableau III.6 : *Détériorations typiques des dentures d'engrenages*.

III.9. Conclusion :

Nous venons de présenter dans ce chapitre les définitions de base concernant les engrenages, leurs différents types, les caractéristiques géométriques pour leur bon fonctionnement, les procédés d'usinage pour l'obtention de ces derniers, ainsi que les détériorations typiques des roues dentées rencontrées dans la pratique.

Le chapitre suivant, sera dédié à l'explication de la démarche à suivre, étape par étape, pour réparer un réducteur de vitesse, dans le cas de défaillance d'une roue dentée d'un train d'engrenage.

Chapitre IV

Démarches de réparation d'un réducteur -cas de défaillance d'une roue dentée-

sommaire

IV.1. Introduction

IV.2. Correction de la denture

IV.3. Organigramme de calcul des paramètres de taillage des dentures avec ou sans correction

IV.4. Stratégie de réparation du réducteur

IV.5. Exemples de calcul des paramètres de taillage

IV.6. Conclusion

IV.1. Introduction :

Les réducteurs de vitesse sont des mécanismes très répandus dans la mécanique, ce qui mène l'ingénieur travaillant dans le domaine de la mécanique, où se trouvent généralement des réducteurs de vitesses, à acquérir des connaissances sur leurs modes de fonctionnement, leur entretien et leur maintenance.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons particulièrement au cas de la défaillance d'une roue dentée du réducteur. Pour cela, on va tracer une démarche détaillée, étape par étape, dès l'identification de la panne, jusqu'à la remise en place du réducteur dans le système mécanique. Pour cela, on prévoit d'élaborer un programme sous MATLAB 2013 qui facilitera le calcul des paramètres de taillage des roues dentées, nécessitant généralement une correction de la denture.

IV.2. Correction de la denture [27] :

IV.2.1. Mécanisme géométrique des corrections de denture :

IV.2.1.a- Crémaillère génératrice normalisée :

La figure IV.l définit les éléments géométriques de la crémaillère génératrice normalisée.

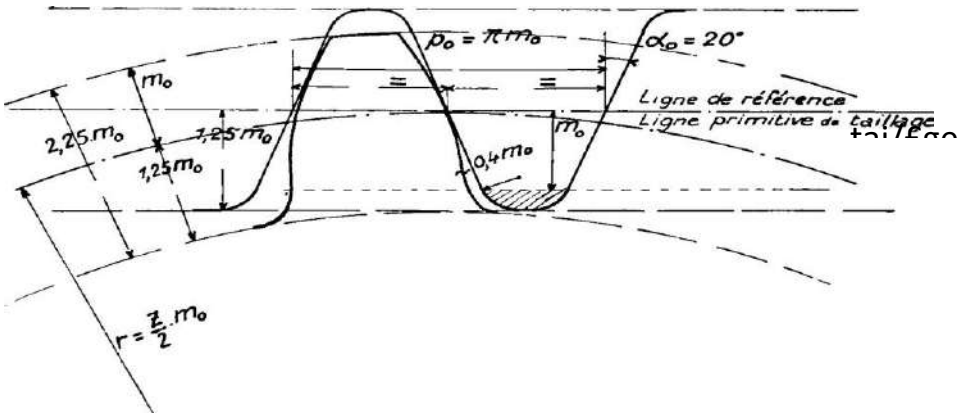


Figure IV.1 : *Eléments géométriques de la crémaillère génératrice normalisée.*

Sur la ligne de référence, nous avons :

épaisseur = intervalle = $\frac{\text{Pas}}{2} = \frac{\pi m_0}{2}$

m_0 : module de la crémaillère génératrice

angle de pression : $\alpha_0 = 20°$

saillie : 1,25 m_0

Arrondi au sommet , il commence à une distance de la ligne de référence égale au module, soit une valeur du rayon d'environ 0,4 m_0.

IV.2.1.b-Denture normalisée :

Une denture sera dite normalisée si elle peut être engendrée à partir de la crémaillère génératrice normalisée.

IV.2.1.c-Denture normale :

Une denture normale est une denture normalisée pendant la génération de laquelle la ligne primitive de taillage (ou de génération) de la crémaillère génératrice est confondue avec la ligne de référence (fig. N-I).

Nous avons ainsi :

Sur le cercle primitif de taillage de la roue, de rayon :

$$r = \frac{Z}{2} m_0$$

épaisseur = intervalle $= \frac{\pi m_0}{2}$

saillie = m_0

creux = 1,25 m_0

hauteur de denture = 2,25 m_0

IV.2.1.d-Denture déportée :

Une denture normalisée est dite déportée lorsque la ligne primitive de taillage de la crémaillère génératrice n'est plus confondue avec la ligne de référence (fig. IV.2.a).

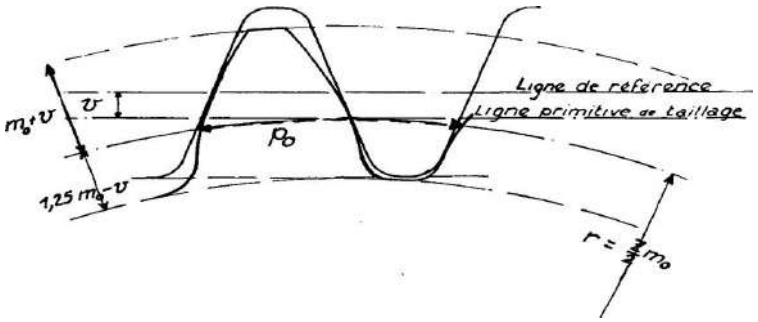


Figure IV.2.a : *denture déportée.*

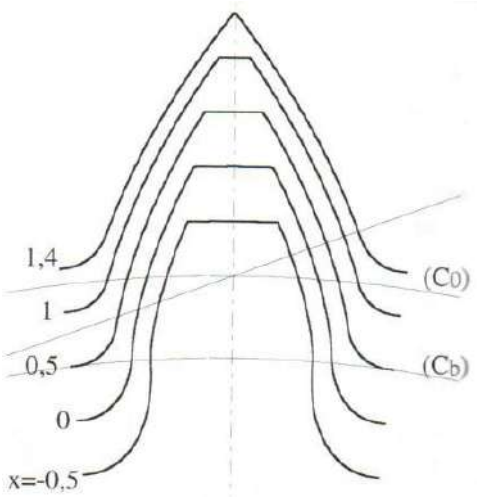


Figure IV.2.b : *Influence du coefficient de déport de denture sur sa forme*

Sur le cercle primitif de taillage, dont le rayon a la même valeur :

$$r = \frac{Z}{2} m_0$$

nous avons maintenant :

épaisseur ≠ intervalle ;

épaisseur + intervalle = $\pi\ m_0$;

saillie ≠ m_0 ;

creux ≠ 1,25 m_0 ;

saillie + creux = 2,25 m_0 ;

IV.2.1.e-Entraxe normal :

Nous avons déjà défini l'entraxe normal a. C'est la somme des rayons primitifs de taillage des deux organes d'un engrenage, soit : $a = m_0 \left(\frac{Z_1+Z_2}{2}\right)$

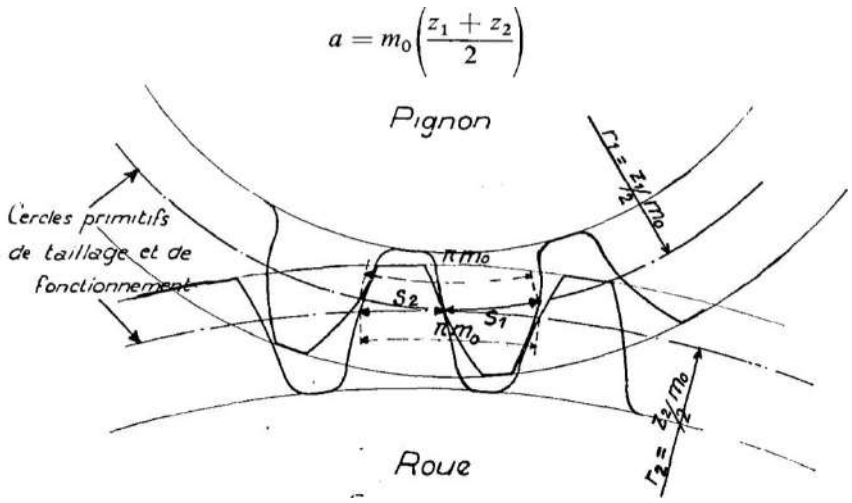


Figure IV.3 : *Entraxe normal - entraxe de fonctionnement*

Lorsque l'entraxe de fonctionnement d'un engrenage est égal à l'entraxe normal, les cercles primitifs de fonctionnement sont alors confondus avec les cercles primitifs de taillage. Il est évident que pour avoir un fonctionnement correct à l'entraxe normal, les épaisseurs S_1 et S_2 des dents des deux organes sur les cercles primitifs de taillage respectifs doivent satisfaire la relation suivante :

$$S_1 + S_2 = S'_1 + S'_2 = \pi\, m_0 \qquad \text{(IV.1)}$$

Nous désignerons d'une manière générale :

S'_1 et S'_2 : épaisseurs sur les cercles primitifs de fonctionnement ;

S_1 et S_2 : épaisseurs sur les cercles primitifs de taillage.

Chaque fois que $S_1 + S_2$ sera différent de $\pi\, m_0$, l'entraxe de fonctionnement de l'engrenage sera différent de l'entraxe normal.

Si les deux roues d'un engrenage sont à denture normale, il est évident que l'entraxe sera normal.

Par contre, si les roues sont à denture déportée, il peut se présenter deux cas :

a) l'entraxe de fonctionnement peut être égal à l'entraxe normal : nous avons alors des dentures déportées sans variation d'entraxe ;

b) l'entraxe de fonctionnement peut être différent de l'entraxe normal : les dentures sont dites déportées avec variation d'entraxe.

IV.2.2. Dentures déportées sans variation d'entraxe :

Cas de l'engrenage extérieur : Par convention, nous dirons que le déport de denture est positif lorsque la ligne de référence de la crémaillère génératrice est extérieure au cercle primitif de taillage de la roue (fig. IV.4). Cette convention également valable pour la denture intérieure (la crémaillère génératrice ne pouvant être qu'imaginaire).

Dans le cas contraire, le déport sera dit négatif (fig. IV-5).

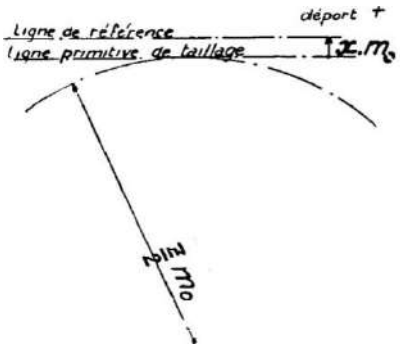


Figure IV.4 : *déport positif*

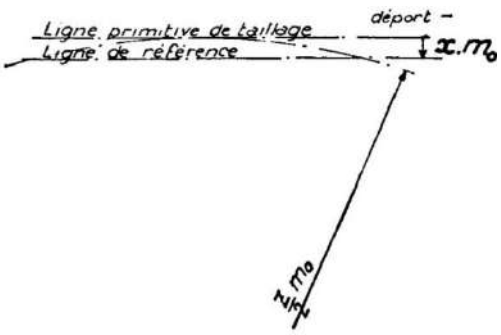


Figure IV.5 : *déport négatif*

Le déplacement de profil (v) est le décalage de la ligne de référence de la crémaillère génératrice par rapport à la ligne primitive de taillage.

Le coefficient de déport (x), ou plus simplement le déport, est le quotient du déplacement de profil par le module m_0 .

$$x = \frac{v}{m_0}$$

Pour fonctionner à l'entraxe normal, la somme des déports des deux organes doit être nulle (déports pris en valeur algébrique) :

$$x_2 = -x_1$$
$$x_1 + x_2 = 0 \qquad \text{(IV.2)}$$

La figure (IV.6) représente un engrenage extérieur à dentures déportées sans variation d'entraxe; le pignon est taillé avec un déport x positif et la roue avec le même déport x mais négatif. C_l et C_2 sont les deux cercles primitifs de taillage et de fonctionnement.

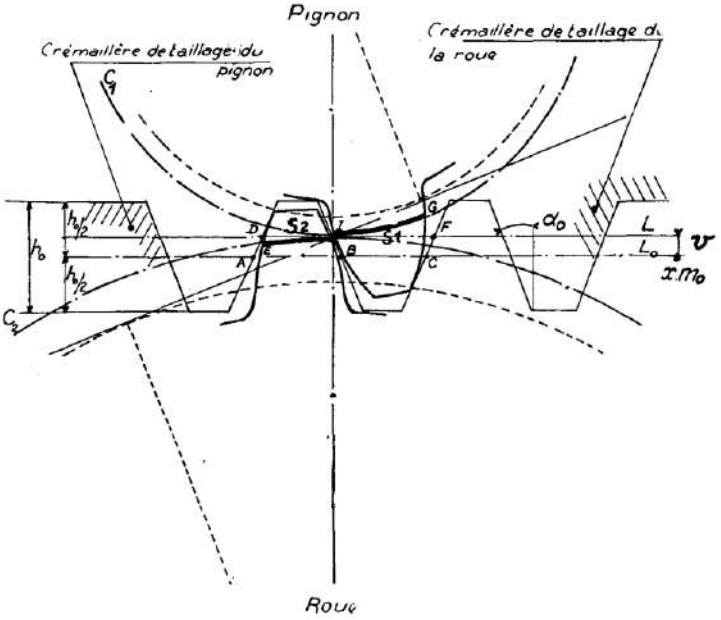


Figure IV.6 : *Engrenage extérieur à dentures déportées sans variation d'entraxe*

La ligne de référence L_0 de la crémaillère génératrice est décalée par rapport à la ligne primitive de taillage L, du déplacement de profil $v = x \cdot m_0$

L'épaisseur S_1 ou S'_1 des dents du pignon sur le cercle primitif de taillage C_l (soit IG) est égale à l'intervalle de la crémaillère sur la ligne primitive de taillage (soit IF) : en effet, ces deux éléments primitifs roulent sans glisser l'un sur l'autre. Nous avons alors :

$$S_1 = \frac{\pi m_0}{2} + 2\,x\,m_0\,\tan\alpha_0 = m_0\left(\frac{\pi}{2} + 2\,x\,\tan\alpha_0\right) \qquad \text{(IV.3)}$$

(x pris en valeur algébrique, c'est-à-dire positif).

En ce qui concerne la roue, nous obtenons de même : soit :

$$S_2 = IE = ID$$

$$S_2 = \frac{\pi m_0}{2} - 2\,|x\,m_0|\,\tan\alpha_0 = m_0\left(\frac{\pi}{2} + 2\,x\,\tan\alpha_0\right) \qquad \text{(IV.4)}$$

(x pris en valeur algébrique, c'est-à-dire négatif).

.Nous vérifions que nous obtenons bien, avec : $x_1 + x_2 = 0$

$$S_1 + S_2 = \pi\, m_0 \qquad \text{(IV.5)}$$

Condition pour un engrènement correct à l'entraxe normal (fig. IV.7)

.

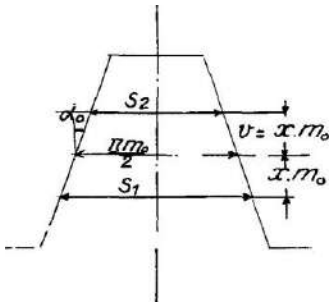


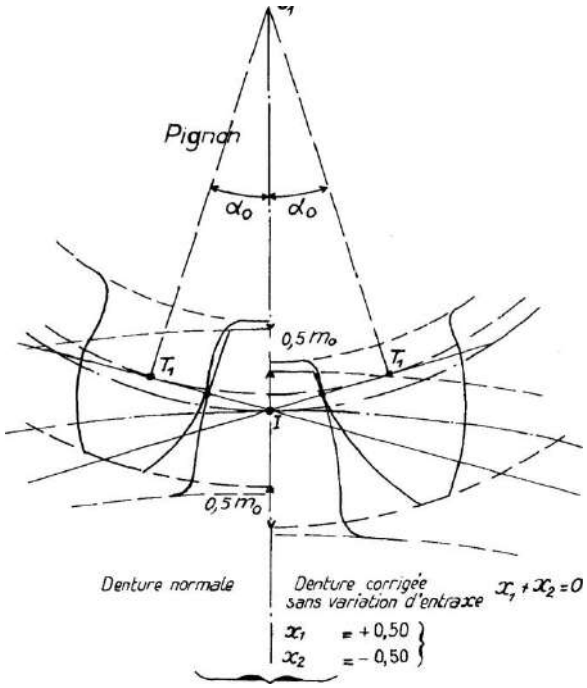
Figure IV.7 : *Condition pour un engrènement correct à l'entraxe normal :* $S_1 + S_2 = \pi\, m_0$

Voici un tableau résumant les caractéristiques des dentures déportées sans variation d'entraxe comparativement avec celles de la denture normale.

Denture normale	**Dentures déportées**	
Pignon et roue	**Pignon**	**Roue**
Saillie : $\mathbf{h_a = m_0}$ Creux : $\mathbf{h_f = 1,25\ m_0}$ Hauteur : $\mathbf{h = 2,25\ m_0}$	$h_{a1} = m_0 + v$ $h_{f1} = 1{,}25\ m_0 - v$ $h_1 = 2{,}25\ m_0$	$h_{a2} = m_0 - v$ $h_{f2} = 1{,}25\ m_0 + v$ $h_2 = 2{,}25\ m_0$
	v déplacement de profil (valeur absolue)	
Entraxe : $\boldsymbol{a = m_0\left(\frac{Z_1+Z_2}{2}\right)}$ Angle de pression : $\boldsymbol{\alpha_0}$	Entraxe : $a_0 = m_0\left(\frac{Z_1+Z_2}{2}\right)$ Angle de pression : α_0	

Tableau IV.1 : *caractéristiques des dentures déportées sans variation d'entraxe comparativement avec celles de la denture normale.*

Nous verrons ultérieurement les propriétés très intéressantes de ces dentures déportées. Retenons notamment qu'elles peuvent être obtenues aussi simplement que les dentures normales, avec les outils normaux.



entraxe normal $\mathbf{m_0}\left(\frac{\mathbf{Z_1+Z_2}}{\mathbf{2}}\right)$

Figure IV.8 : *taillage de denture normale et denture corrigée* $x_1+x_2= 0$

La hauteur de denture est conservée.

L'épaisseur des dents mesurées sur les cercles primitifs de taillage se trouve modifiée de la quantité : $2 \text{ x } m_0 \tan \alpha_0$.

Cette variation d'épaisseur, mesurée normalement au profil, c'est-à-dire la variation de l'épaisseur sur le cercle de base, est égale à :

$(2 \text{ x } m_0 \tan \alpha_0) \cos \alpha_0 = 2 \text{ x } m_0 \sin \alpha_0$

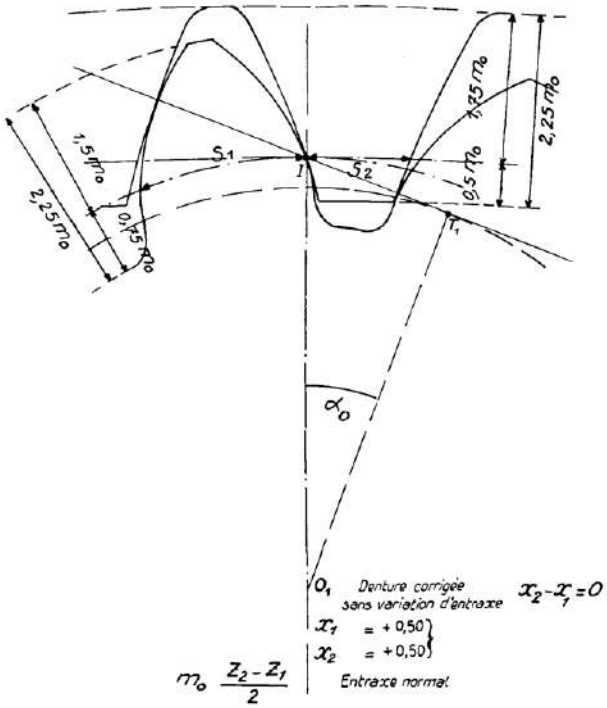


Figure IV.9 : *taillage de denture normale et denture corrigée* $x_1 - x_2 = 0$

La cote de contrôle tangentiel, que nous avons appelée « écartement sur k dents » est ainsi donnée par la relation générale suivante :

$$W\,(\text{denture déportée}) = W\,(\text{denture normale}) + 2\,x\,m_0\,\sin\alpha_0 \qquad (IV.6)$$

x étant positif ou négatif.

Dans le cas de la denture hélicoïdale, nous avons de même :

$$W_n\,(\text{denture déportée}) = W_n\,(\text{denture normale}) + 2\,x\,m_0\,\sin\alpha_0 \qquad (IV.7)$$

le module m_0 et l'angle de pression de l'outil correspondant au module réel et à l'angle de pression réel de la crémaillère génératrice.

$$x = \frac{\text{déplacement de profil}}{m_0}$$

IV.2.3. Dentures déportées avec variation d'entraxe :

IV.2.3.a- Engrenage extérieur à denture droite :

Nous verrons que, dans certains cas, on est amené à abandonner le système de dentures déportées sans variation d'entraxe.

On peut être conduit à adopter les déports x_1 et x_2 pour le pignon et la roue, tels que leur somme algébrique soit différente de zéro.

En se reportant aux formules (IV.3) et (IV.4), nous voyons immédiatement que si :

$$x_1 + x_2 > 0 ; \qquad S_1 + S_2 > \pi\, m_0 \tag{IV.8}$$

L'entraxe de fonctionnement a' est obligatoirement plus grand que l'entraxe normal a ;

si :

$$x_1 + x_2 < 0 ; \qquad S_1 + S_2 < \pi\, m_0 , \tag{IV.9}$$

l'entraxe de fonctionnement a' est obligatoirement plus petit que l'entraxe normal a.

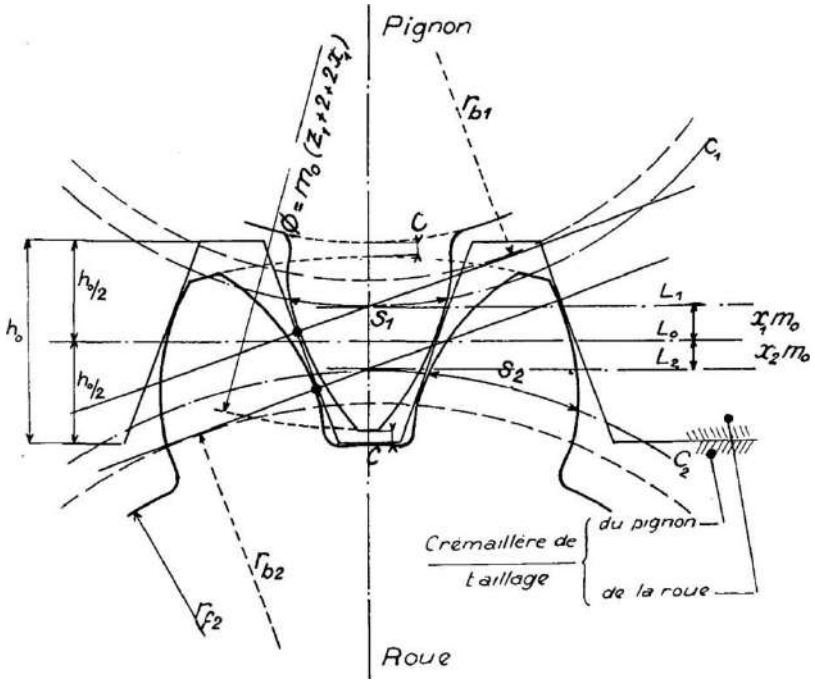


Figure IV.10 : *génération de la denture déportée d'un pignon et d'une roue à partir de la même crémaillère génératrice normale*

La figure IV.10 schématise la génération de la denture déportée d'un pignon et d'une roue à partir de la même crémaillère génératrice normale. Dans cet exemple les deux déports x_1 et x_2 sont positifs; nous arrivons ainsi obligatoirement à un entraxe de fonctionnement a' du pignon et de la roue plus grand que l'entraxe normal a. (Le déport de la roue a été choisi également positif uniquement pour la clarté de la figure)

Appelons : m_0 et α_0 le module et l'angle de pression de la crémaillère génératrice.

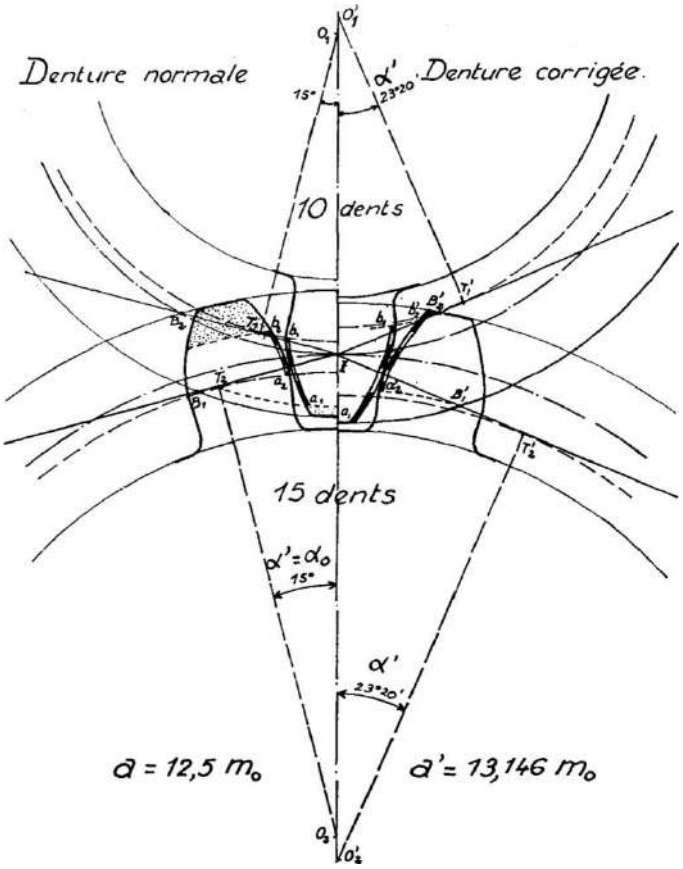


Figure IV.11 : *Entraxe normal et entraxe de fonctionnement pour une denture déportée*

a) **Pour le pignon** : rayon du cercle primitif de taillage C_1 :

$$r_1 = \frac{Z_1}{2}\, m_0$$

Ligne primitive de taillage L_1 de la crémaillère, déportée de la quantité ($x_1 m_0$) par rapport à la ligne de référence :

$$S_1 = m_0 \left(\frac{\pi}{2} + 2\, x_1 m_0 \tan \alpha_0\right)$$

b) **Pour la roue** : rayon du cercle primitif de taillage C_2 :

$$r_2 = \frac{Z_2}{2}\, m_0$$

Déplacement de profil $x_2 m_0$:

$$S_2 = m_0 \left(\frac{\pi}{2} + 2\, x_2 \tan \alpha_0\right)$$

l'entraxe réalisé sur la figure IV-10 est égal à :

$$a_1 = r_1 + r_2 + x_1 m_0 + x_2 m_0$$

$$a_1 = a + (x_1 + x_2)m_0$$

Avec cet entraxe, nous constatons que le contact du pignon et de la roue n'est pas établi. Il est nécessaire de rapprocher les deux éléments jusqu'à un certain entraxe que nous adopterons comme entraxe de fonctionnement a'. Nous pouvons ainsi énoncer la propriété importante suivante :

La différence entre l'entraxe de fonctionnement et l'entraxe normal, c'est-à-dire la modification d'entraxe, est toujours plus petite que la somme des déplacements de profil effectués sur le pignon et sur la roue :

$$a' - a < (x_1 + x_2)m_0 \qquad \text{(IV.10)}$$

Déterminons l'entraxe de fonctionnement obtenu en partant de certaines valeurs des déports x_1 et x_2.

A cet entraxe, les rayons primitifs de fonctionnement et l'angle de pression .de fonctionnement ont des valeurs déterminées :

$$r'_1, r'_2 \text{ et } \alpha'$$

Nous avons déjà déterminé la relation suivante :

$$a' = a\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'} \qquad \text{(IV.11)}$$

d'où le module de fonctionnement :

$$m' = m_0\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'}$$

Les formules suivantes permettent de déterminer les épaisseurs S'_1 et S'_2 sur les cercles primitifs de fonctionnement, en fonction des épaisseurs S_1et S_2.

$$S'_1 = r'_1\left[\frac{S_1}{r_1} + 2(\text{inv}\,\alpha_0 - \text{inv}\,\alpha')\right]$$

$$S'_2 = r'_2\left[\frac{S_2}{r_2} + 2(\text{inv}\,\alpha_0 - \text{inv}\,\alpha')\right]$$

Nous devons avoir également :

$$S'_1 + S'_2 = \pi\, m' = \pi\, m_0\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'}$$

En remplaçant S_1, S_2, r_1 et r_2 par leurs valeurs, il vient, après simplification :

$$\pi\, m_0\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'} = m_0\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'}[\pi + 2\tan\alpha_0(x_1 + x_2) + (z_1 + z_2)(\text{inv}\,\alpha_0 - \text{inv}\,\alpha')]$$

soit :

$$2\tan\alpha_0(x_1 + x_2) + (z_1 + z_2)(\text{inv}\,\alpha_0 - \text{inv}\,\alpha')\ ;$$

ou :

$$\text{inv}\,\alpha' = \text{inv}\,\alpha_0 + 2\tan\alpha_0 \frac{x_1+x_2}{z_1+z_2} \quad \text{(IV.12)}$$

Cette formule permet de calculer α', puis l'entraxe a' (formule (IV.11))

IV.2.3. b- Méthode de calcul pratique

Les entraxes a, a_1 et a' ayant été définis précédemment, nous avons :

$$a_1 - a = (x_1 + x_2)m_0$$

Comme :

$$m_0 = \frac{2a}{z_1 + z_2}$$

Nous tirons :

$$a_1 - a = a\frac{2(x_1 + x_2)}{z_1 + z_2}$$

Appelons B la quantité suivante :

$$B = 2\frac{(x_1 + x_2)}{z_1 + z_2} \quad \text{(IV.13)}$$

Il vient :

$$a_1 - a = B \cdot a$$

Nous avons déjà déterminé :

$$a' = a\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'}$$

soit :

$$a' - a = a\left(\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'} - 1\right)$$

Appelons B_v la quantité suivante :

$$B_v = \frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha'} - 1 \quad \text{(IV.14)}$$

Nous avons :

$$a' - a = a \cdot B_v$$

soit :

$$a' = a(1 + B_v) \quad \text{(IV.15)}$$

Il est intéressant de calculer maintenant la différence entre l'entraxe a_1 de la figure IV.10 et l'entraxe de fonctionnement a' :

$$a_1 - a = a\,(\mathrm{B} + \mathrm{B_v}) = \mathrm{K} \cdot \mathrm{m_0}$$

En appelant K la quantité :

$$\mathrm{K} = \frac{z_1 + z_2}{2}(\mathrm{B} - \mathrm{B_v}) \qquad \text{(IV.16)}$$

Remarquons maintenant que la quantité $a_1 - a' = \mathrm{K} \cdot \mathrm{m_0}$ correspond à la quantité dont il faut diminuer la saillie des deux organes de l'engrenage si l'on veut conserver le jeu normal au fond des dents, soit $0{,}25m_0$.

Les diamètres de tête d_{a1} et d_{a2} ont donc comme valeur :

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{d_{a1}} &= \mathrm{m_0}(z_1 + 2 + 2x_1 - 2\mathrm{K}) \\ \mathrm{d_{a2}} &= \mathrm{m_0}(z_2 + 2 + 2x_2 - 2\mathrm{K}) \end{aligned}\right\} \qquad \text{(IV.17)}$$

(x_1 et x_2 considérés en valeur algébrique).

La nouvelle hauteur de denture est égale à :

$$\mathrm{h} = \mathrm{m_0}(2{,}25 - \mathrm{K}) \qquad \text{(IV.18)}$$

Problème pratique inverse : nous venons de traiter le problème direct : nous sommes partis des déports x_1 et x_2 à effectuer pour améliorer certaines caractéristiques de l'engrènement et nous avons déterminé l'entraxe de fonctionnement correspondant.

Dans beaucoup de cas, nous avons à traiter le problème inverse : nous partons d'un entraxe imposé et d'une gamme d'outils existante, et il s'agit de déterminer les déports x_1 et x_2.

IV.2.4. Engrenage extérieur à denture hélicoïdale

Appelons α_{t0} l'angle de pression apparent de taillage α_t et l'angle de pression apparent de fonctionnement. De même, a sera l'entraxe normal, et a' l'entraxe de fonctionnement. Nous avons toujours (en nous plaçant dans .un plan normal aux axes) :

$$a' = a\frac{\cos\alpha_{t0}}{\cos\alpha'_t}$$

$$a' = a(1 + \mathrm{B_v})$$

avec :

$$\mathrm{B_v} = \frac{\cos\alpha_{t0}}{\cos\alpha'_t} - 1$$

Les déports x_1 et x_2 sont définis par rapport au module réel de taillage qui est généralement le module d'outil m_0. De même, l'angle de pression réel de taillage correspond à l'angle de pression d'outil α_0.

Appelons β_0 l'angle d'inclinaison primitive de taillage (inclinaison de la tête de la machine).

Ramenés au module apparent de taillage, les déports ont les valeurs suivantes :

$$x_1 \cos\beta_0$$

$$x_2 \cos\beta_0$$

Nous pouvons alors appliquer la formule générale (IV.12) en nous plaçant dans un plan perpendiculaire aux axes :

$$\text{inv}\,\alpha'_t = \text{inv}\,\alpha_{t0} + 2\tan\alpha_{t0}\frac{(x_1 + x_2)\cos\beta_0}{z_1 + z_2}$$

et comme :

$$\tan\alpha_{t0}\ \cos\beta_0 = \tan\alpha_0$$

$$\text{inv}\,\alpha'_t = \text{inv}\,\alpha_{t0} + 2\tan\alpha_0\frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \qquad \text{(IV.19)}$$

Connaissant par exemple x_1 et x_2 , le calcul se conduira de la façon suivante :

$$B = 2\frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2}$$

Pour la détermination du facteur K de réduction de saillie et de hauteur de dent, il suffit de raisonner comme pour la denture droite.

$$a_1 = m_0\left[\frac{z_1 + z_2}{2\cos\beta_0} + (x_1 + x_2)\right]$$

$$a' = m_0\left[\frac{z_1 + z_2}{2\cos\beta_0}\ \frac{\cos\alpha_{t0}}{\cos\alpha'_t}\right]$$

$$K = \frac{a_1 - a'}{m_0} = (x_1 + x_2) - \frac{z_1 + z_2}{2\cos\beta_0}\left(\frac{\cos\alpha_{t0}}{\cos\alpha'_t} - 1\right)$$

soit :

$$K = B\ \frac{z_1 + z_2}{2} - B_v\frac{z_1 + z_2}{2\cos\beta_0}$$

$$K = \frac{z_1 + z_2}{2}\left(B - \frac{B_v}{\cos\beta_0}\right) \qquad \text{(IV.20)}$$

L'angle d'inclinaison de fonctionnement β se calcule facilement :

β_0 : inclinaison sur les cylindres primitifs de génération de rayons :

$$r_1 = \frac{z_1 \cdot m_0}{2\cos\beta_0}$$

$$r_2 = \frac{z_2 \cdot m_0}{2 \cos \beta_0}$$

β : inclinaison sur les cylindres primitifs de fonctionnement de rayons : r_1' et r_2', soit :

$$\tan \beta = \tan \beta_0 \frac{r_1'}{r_1} = \tan \beta_0 \frac{r_2'}{r_2} \quad \text{(IV.21)}$$

IV.2.5. Contrôle par l'écartement sur k dents :

Après taillage le contrôle est obligatoire. Le paramètre essentiel doit être contrôlé et la côte entre dent W_k ou le contrôle par (l'écartement sur k dents). (IV.21)

Les deux droites parallèle T_1 et T_2 (Fig :15), matérialisées par exemple par les becs d'un pied à coulisse ou d'un palmer à plateaux, sont tangentes à deux profils anti- homologues P_1 et P_2.

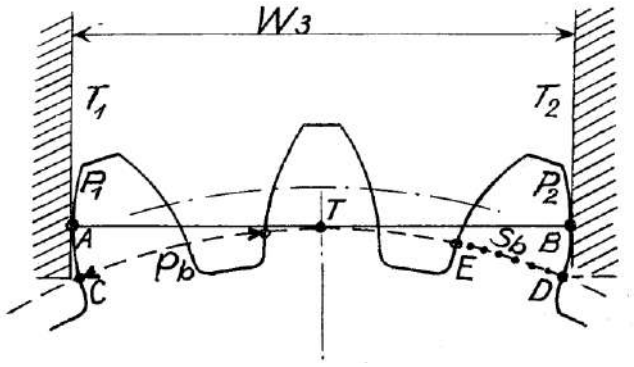


Figure IV.12 : *Contrôle par l'écartement sur k dents (k=3)*

En A et B, la droite A et B, normale commune aux tangentes T_1 et T_2, est évidemment tangente au cercle de base, en T.

W_k=TA+TB=$\widehat{TC}$+$\widehat{TD}$=$\widehat{CD}$

Il faut choisir le nombre de dents k de telle sorte que le contact soit tangentiel sur P_1 et P_2 :

W_k=$\widehat{CE}$+$\widehat{ED}$ et W_k= (k-1) P_b+S_b

En remplaçant $P_b$et S_b par leurs valeurs en fonction de l'épaisseur primitive s, du module m, de l'angle de pression α_0, nous obtenons :w_k= m.cos α_0 ((k-1) π+$\frac{s}{m}$+z.inv α_0)

Avec une denture normale, s = $\frac{\pi m}{2}$

W_k=m.cos α_0 ((k-0,5) π+z.inv (α_0)

Avec une denture corrigée, de déport x il faut ajouter à cette valeur :

$2x.m_0.\sin \alpha_0$

Dans le manuel pratique des engrenages le lecteur trouvera des tableaux donnant directement, en fonction de l'angle de pression, du nombre de dents z de la roue contrôlée :

- Le nombre de dents k,
- La cote W_k pour le module m = normalisée

A titre indicatif, disons que la cote W_k doit être voisine de la valeur : d.sin α,

Pour avoir les points de tangence A et B voisins du primitif.

En rapprochant cette valeur de celle donnant $w_k$pour la denture normale, il est possible de déterminer le nombre k pour un angle de pression donné ; ainsi, pour α_0=20°, on trouve aisément :

$$k = 0.111\ z\ + 0{,}5 \qquad \text{(IV.22)}$$

La figure indique le contrôle de l'écartement réel sur k dents (symbole W_{nk}) à l'aide d'un palmer à plateaux

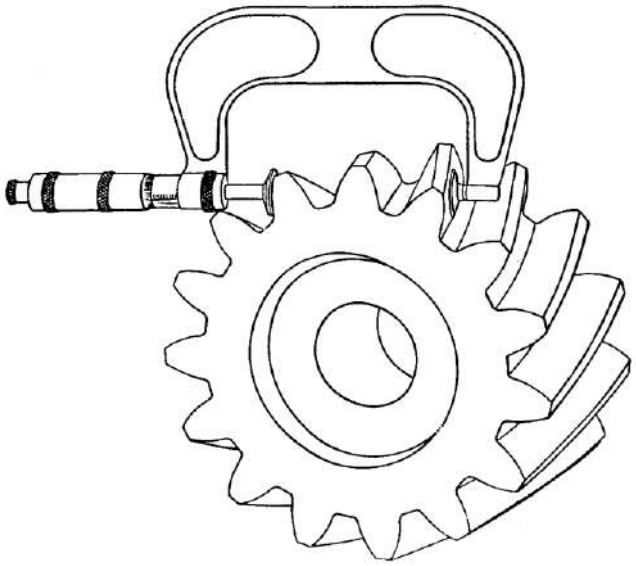


Figure IV.13: *Exemple de contrôle la cote entre dents (k=3)*

IV.3. Organigramme de calcul des paramètres de taillage des dentures avec ou sans correction

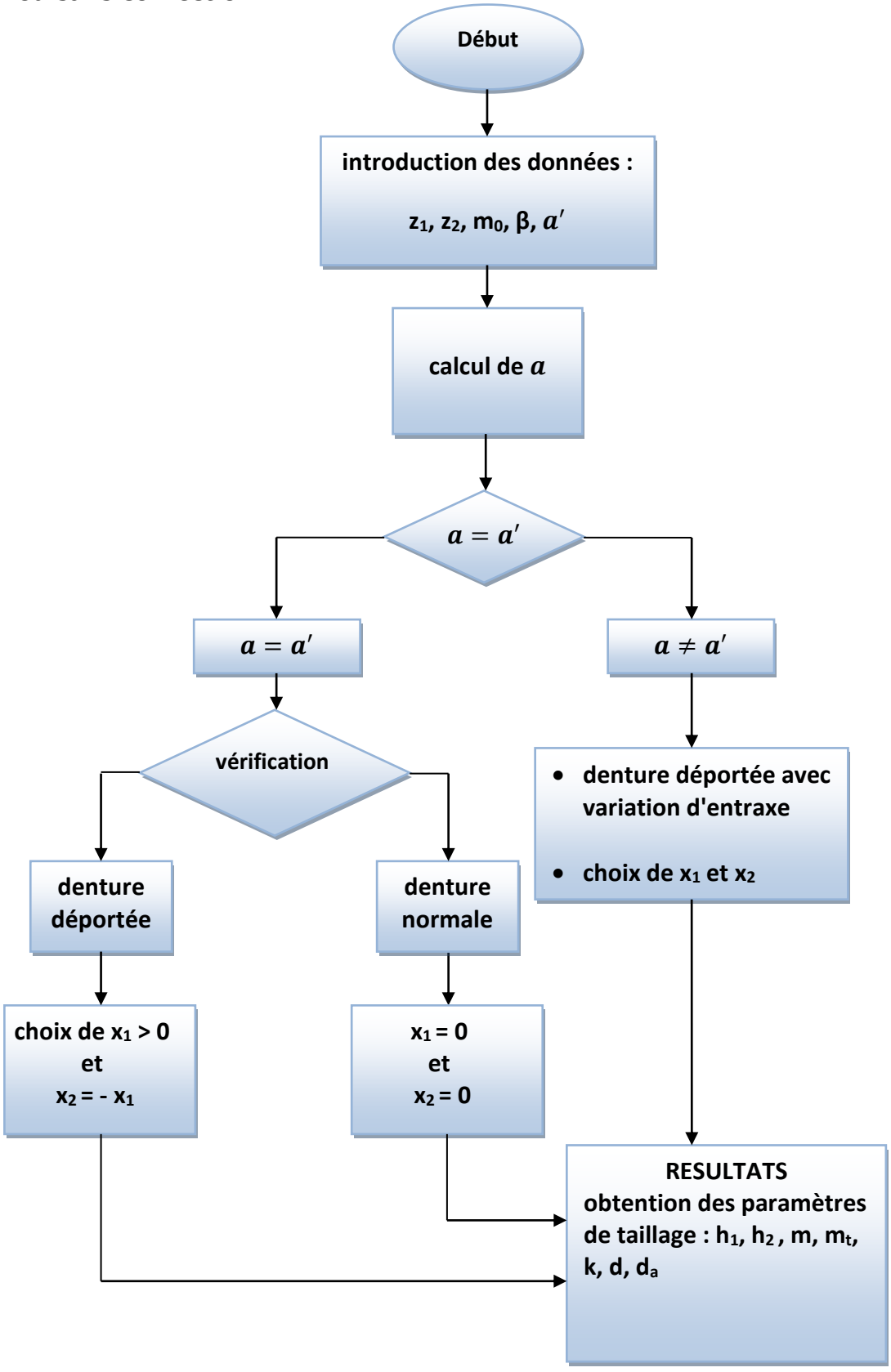


Figure IV.14 : *Organigramme de calcul des paramètres de taillage des dentures avec ou sans correction*

Choix du déport x_1+x_2 [28]

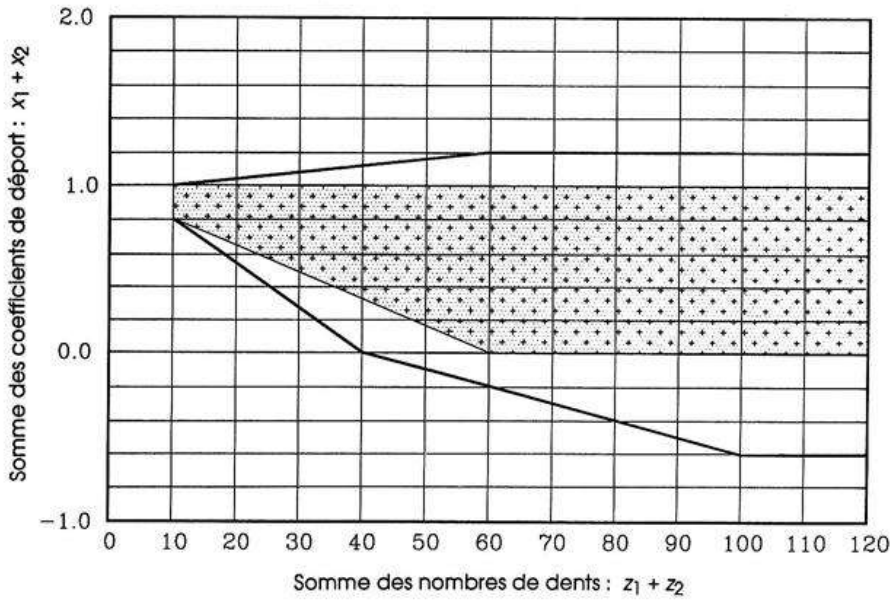


Figure IV.15: *Domaine des coefficients de déport à adopter dans la conception d'engrenages*
Le domaine est fonction de la somme des nombres de dents

IV.4. Stratégie de réparation du réducteur :

Nous allons présenter ci-dessous la stratégie de réparation du réducteur de vitesse défectueux à cause d'une panne au niveau d'un train d'engrenage. Cette stratégie explique les étapes à suivre pour la maintenance du réducteur, dès l'identification de la panne jusqu'au montage du réducteur réparé dans son milieu de fonctionnement et sa remise en service.

- ✓ Identification de la panne ;
- ✓ Démontage de l'organe défectueux ;
- ✓ Comptage de z_1 et z_2 ;
- ✓ Evaluation de l'entraxe réel de fonctionnement a' ;
- ✓ Evaluation du module m' ;
- ✓ Détermination de l'angle de l'hélice β ;
- ✓ Calcul des paramètres de taillage ;
- ✓ Taillage des deux roues dentées ;
- ✓ Traitement thermique des roues dentées ;
- ✓ Montage des roues dentées dans le réducteur de vitesses ;
- ✓ Remontage du réducteur de vitesse ;

- ✓ Lubrification ;
- ✓ Mise en route ;
- ✓ Contrôle de la lubrification.

On va expliquer maintenant les étapes ci-dessus énumérées, étape par étape :

1- Identification de la panne :

Dans notre cas, on suppose qu'on a une défaillance d'un engrenage du réducteur.

2- Démontage de l'organe défectueux :

Dans le cas présent, il s'agit d'une roue dentée, alors on doit démonter les deux roues dentées engrenées à dentures droites ou hélicoïdales.

3- Comptage de z_1 et z_2 :

On compte z_1 et z_2, nombre de dents du pignon et de la roue respectivement de l'engrenage défectueux,

4- Evaluation de a' :

L'évaluation de l'entraxe a' de fonctionnement de l'engrenage défectueux par un mesurage rigoureux de métrologie, à l'aide d'un appareil de mesure ou d'une machine à mesurer tridimensionnelle (pied à coulisse, MMT …) ;

5- Evaluation du module m' :

On suppose que m' est le module réel de la roue dentée, qui est probablement différent des modules normalisés de la série.

Méthode d'évaluation du module m':

On sait que si $m' \neq m_0$, on a une denture déportée.

Alors m' s'écrit :

$$m' = 2\frac{a'}{z_1 + z_2}$$

On peut déterminer m' avec une autre façon, telle que :

$$m' = \frac{d_{ext}}{z + 2}$$

Si $a' = a$, on est en présence de deux cas possibles :

$$m' = m_0$$

ou bien :

$$m' \neq m_0$$

alors on doit vérifier si $m' = m_0$,

Pour se faire, on fait recours à l'outillage de taillage dont on possède à l'atelier.

On peut accomplir cette tâche à l'aide d'une fraise mère ou d'un outil crémaillère ayant le module de taillage m_0 en les faisant tourner avec engrènement autour de la roue dentée;

Si l'engrènement se fait correctement, c'est-à-dire jusqu'à la $k^{ème}$ dent de la roue sans blocage, ont peut dire que $m' = m_0$ (denture normale).

Dans le cas contraire, où on a pas d'engrènement correct $(m' \neq m_0)$, on a une denture déportée.

Le choix du module peut être fait facilement par un technicien qualifié.

<u>NB :</u> si $m' \neq m_0$ on aurait donc: $a' \neq a$, alors on est obligé de procéder à une correction de denture (correction obligatoire)

6- Détermination de l'angle de l'hélice β :

La détermination de l'angle de l'hélice β dans le cas d'un engrenage hélicoïdal, après un dessin sur papier en traçant des droites suivant la largeur d'une dent (flanc) de la roue défectueuse ou bien en utilisant des tiges normalisées.

On pose derniers la tige entre les flancs de deux dents, suite à cela on mesure l'angle d'inclinaison β par des appareils de métrologie.

7- Calcul des paramètres de taillage :

L'obtention des paramètres de taillage peut être faite par le calcul des formules théoriques démontrées précédemment. Cette opération nécessite des connaissances approfondies dans ce domaine, et peut prendre beaucoup de temps.

A cet effet, nous avons établi un programme sous MATLAB 2013 ayant pour but, à la fois, d'abréger le temps (ainsi que dans le choix de l'angle β pour les engrenages hélicoïdales qui demandent un tâtonnement) de calcul et de faciliter la tâche au bureau d'études chargé de la maintenance.

8- Taillage des deux roues dentées :

On peut établir le taillage des roues dentées une fois toutes les conditions de fabrication sont réunies, à savoir la disponibilité des paramètres de taillage, des machines pour la réalisation des engrenages ainsi que l'outillage nécessaire. Cette opération peut être effectuée, selon les exigences techniques de fonctionnement et le matériel disponible au niveau de l'atelier, par l'un des procédés de taillage cités dans le chapitre précédant.

L'ordre logique d'élaboration d'un engrenage étant :

- ✓ L'usinage du corps de chaque roue
- ✓ L'exécution de la denture de chaque roue

Le montage des deux roues dentées dans les conditions de fonctionnement.

Il est normal d'effectuer les contrôles successifs dans un ordre correspondant :

- ✓ Contrôle du corps de chaque roue
- ✓ Contrôle de la denture de chaque roue
- ✓ Contrôle des conditions de montage de l'engrenage.

9- Traitement thermique des roues dentées

Nous distinguons deux grandes classes de traitements thermiques des engrenages:

- ✓ Les traitements thermiques complets
- ✓ Les traitements de durcissement superficiel tels que la cémentation, la carbonitruration, etc…. la cémentation est la plus utilisée en maintenance.

10- Montage des roues dentées dans le réducteur de vitesses

Après avoir effectué un traitement thermique, on procède maintenant au montage des roues dentées en respectant les normes techniques d'engrènement afin d'éviter tout

montage incorrect qui nous causera par la suite l'usure rapide des dentures des deux roues.

11- Remontage du réducteur de vitesse :

La fixation doit être assurée de façon rigide sur un massif avec interposition de plots noyés ou sur une ossature métallique. Le montage des organes de liaison (poulie, accouplement, etc.) sur l'arbre d'entrée ou sur l'arbre de sortie se fera sans chocs. Lors de la mise en place du réducteur, les arbres seront soigneusement alignés par rapport à la machine. Les tolérances d'alignement tiendront compte du type d'accouplement. Il convient de contrôler que la fixation ne déforme pas le réducteur.

12- Lubrification :

Une fois le remontage est déjà accompli, on doit obligatoirement verser l'huile nécessaire au bon fonctionnement. La quantité et la qualité du lubrifiant sont communiquées par le constructeur. Souvent, il indiquera des types d'huile de différentes marques.

La lubrification des engrenages peut être assurée par le barbotage dans le bain d'huile formé dans la partie inférieure du carter ou par injection dans les dentures au moyen d'une pompe de circulation. Les roulements peuvent être lubrifiés automatiquement par des projections d'huiles des engrenages et par des ruissellements sur les parois ou dérivations du circuit d'huile. Dans certains cas, un ou plusieurs roulements peuvent être isolés des projections et lubrifiés à la graisse.

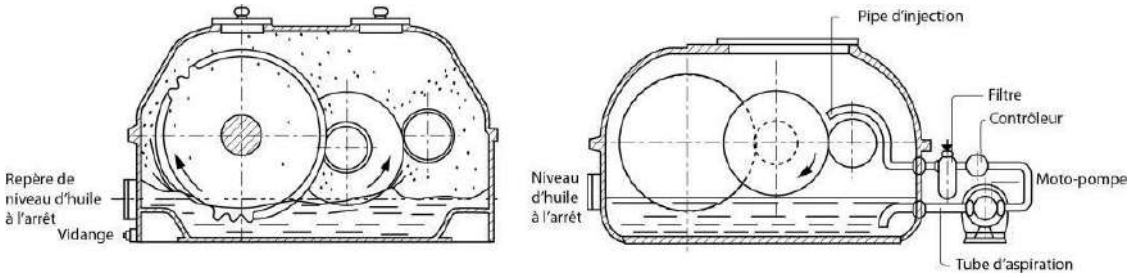


Figure IV.16 : *Lubrification d'un réducteur de vitesse par barbotage et par injection*

Le remplissage s'effectue par un orifice spécialement prévu à cet effet ou par un couvercle de visite situé dans la partie supérieure. Avant chaque démontage de ce couvercle, celui-ci sera nettoyé afin de ne pas introduire de corps étrangers à l'intérieur de carter.

Au remontage, s'assurer du bon état des surfaces et éventuellement refaire le joint. Lorsque le carter est cloisonné pour former plusieurs bacs de niveaux différents, le lubrifiant sera versé dans celui où le niveau est le plus élevé. Il remplira les autres compartiments par débordement.

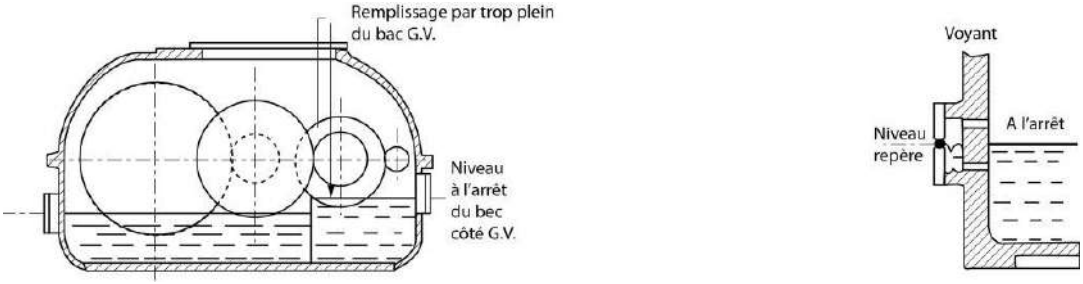


Figure IV.17 : *Lubrification d'un réducteur de vitesse par remplissage par trop plein*

Le plein est obtenu lorsque l'huile atteint le niveau repéré sur la juge ou sur le voyant. Le niveau indiqué doit être respecté. Un excès d'huile n'ajoute rien à l'efficacité du graissage mais produit un échauffement anormal et des fuites d'huile par les sorties d'arbres.

13- Mise en route :

La mise en route de toute installation nécessite généralement une période de mise au point qui est mise à profit pour assurer une mise en charge progressive de l'appareil. Vérifier éventuellement le fonctionnement de la pompe au moyen du dispositif de contrôle incorporé dans le circuit d'huile.

14- Contrôle de la lubrification

Le contrôle du niveau d'huile se fera, comme il a été dit plus haut, au moyen d'une jauge ou au travers d'un voyant. La circulation de l'huile pourra être vérifiée au travers d'un voyant, parfois équipé d'une petite hélice que fait tourner un jet d'huile.

Certains contrôleurs de lubrification comportent des contacts électriques qui permettent d'assurer l'asservissement du démarrage du moteur principal à celui du moteur de la pompe. Ils peuvent également signaler, par témoins ou par avertisseur sonore, un manque de débit d'huile.

IV.5. Exemples de calcul des paramètres de taillage :

IV.5.1. Exemple d'un engrenage extérieur à denture droite sans variation d'entraxe et avec denture déportée :

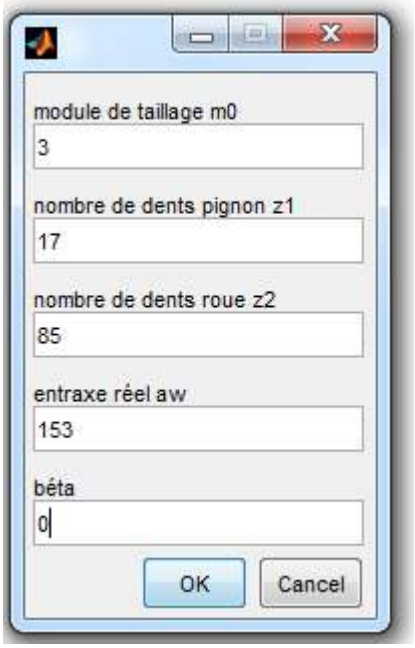
On va prendre l'exemple d'un pignon défectueux de 17 dents, la roue conjuguée ayant un nombre de dents de 85 dents.

L'entraxe mesuré est de 153 mm.

Le module vaut $m_0 = 3$.

On exécute le programme établi sous MATLAB 2013 pour les valeurs citées ci-dessus.

On va obtenir l'interface graphique suivante :



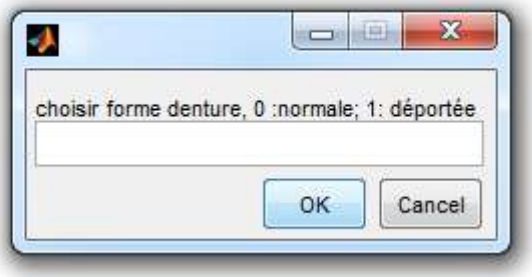
Après introduction des données et validation on aura la fenêtre suivante :

```
evlotalphatw =

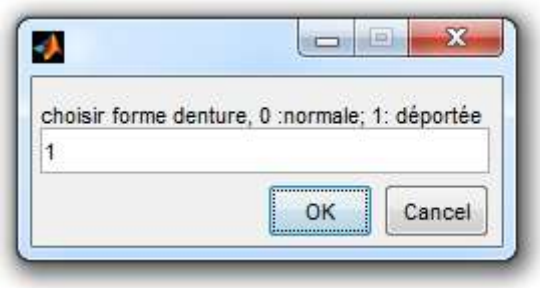
    0.0149


depor =

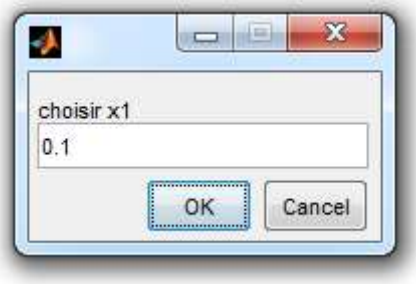
     0
```



Dans ce premier exemple on choisit une denture déportée, alors on va taper 1.



Ensuite, on choisit le coefficient de déport dans l'intervalle donné par l'abaque.



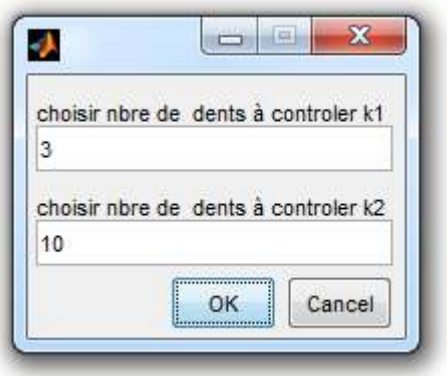
Après validation on doit choisir le nombre de dent à contrôler pour les deux roues dentées qui sont des nombres entiers.

```
k1 =

    2.3889

k2 =

    9.9444
```



Et finalement on obtient les paramètres de taillage pour les deux dents :

```
RESULTACOUPLE =

    3.0000    3.0000
    3.0000    3.0000
         0         0
  153.0000  153.0000
   17.0000   85.0000
   51.0000  255.0000
   57.0000  261.0000
    0.1000   -0.1000
    6.7500    6.7500
         0         0
    3.0000   10.0000
   23.0605   87.5019
```

Paramètre	Pignon	Roue
module de taillage m_0	3.0000	3.0000
angle d'inclinaison	0	0
entraxe réel ou de fonctionnement	153.0000	153.0000
nombre de dents	17.0000	85.0000
diamètre primitif	51.0000	255.0000
diamètre extérieur	57.0000	261.0000
coefficient de déport	0.1000	-0.1000
hauteur de la dent	6.7500	6.7500
correction de la tête	0	0
nombre de dents à contrôler	3.0000	10.0000
cote entre dents	23.0605	87.5019

Tableau IV.2 : *Paramètres de taillage obtenus pour un engrenage extérieur à denture droite sans variation d'entraxe et avec denture déportée*

IV.5.2. Exemple d'un engrenage extérieur à denture droite avec variation d'entraxe :

On va prendre même exemple déjà présenté, mais cette fois-ci, on a engrenage avec variation d'entraxe ($a' \neq a$) ; c'est-à-dire :

Le pignon défectueux ayant 17 dents,

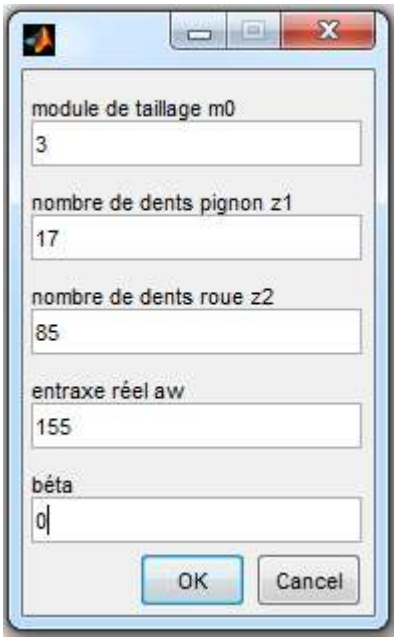
La roue conjuguée ayant un nombre de dents de 85 dents

L'entraxe mesuré est de 153 mm.

Le module vaut $m_0 = 3$.

On exécute le programme établi pour les valeurs citées ci-dessus.

On va obtenir l'interface graphique suivante :



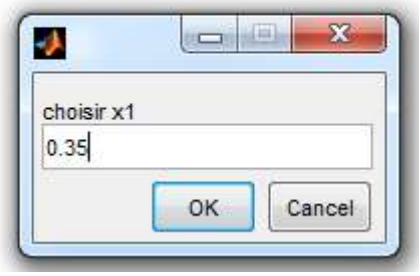
Après introduction des données et validation, on aura la fenêtre suivante :

```
X =

    0.6982


depor =

    0.6982
```



On a choisi le coefficient de déport $x_1 = 0{,}35$.

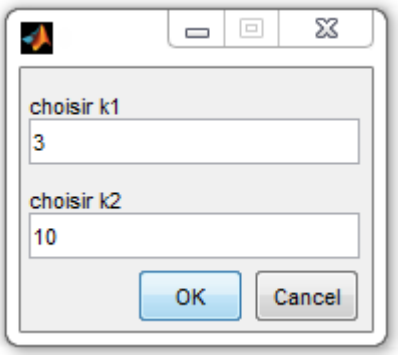
Après validation, on doit choisir le nombre de dent à contrôler pour les deux roues dentées qui sont des nombres entiers.

```
k1 =

    2.3889

k2 =

    9.9444
```



Enfin, on obtient les paramètres de taillage pour les deux dents :

```
RESULTACOUPLE =

    3.0000    3.0000
    3.0000    3.0000
         0         0
  155.0000  155.0000
  153.0000  153.0000
   17.0000   85.0000
   51.0000  255.0000
   58.9111  262.9000
    0.3500    0.3482
    6.5375    6.5375
    0.0945    0.0945
    3.0000   10.0000
   23.5735   88.4216
```

Paramètre	Pignon	Roue
module de taillage m_0	3.0000	3.0000
angle d'inclinaison	0	0
entraxe réel ou de fonctionnement	155.0000	155.0000
Entraxe théorique	153.0000	153.0000
nombre de dents	17.0000	85.0000
diamètre primitif	51.0000	255.0000
diamètre extérieur	58.9111	262.9000
coefficient de déport	0.3500	0.3482
hauteur de la dent	6.5375	6.5375
correction de la tête	0.0945	0.0945
nombre de dents à contrôler	3.0000	10.0000
cote entre dents	23.5735	88.4216

Tableau IV.3 : *Paramètres de taillage obtenus pour un engrenage extérieur à denture droite avec variation d'entraxe*

IV.5.1. Exemple d'un engrenage extérieur à denture hélicoïdale :

Maintenant, on va prendre l'exemple d'un pignon défectueux de 20 dents, et la roue conjuguée ayant un nombre de dents de 40.

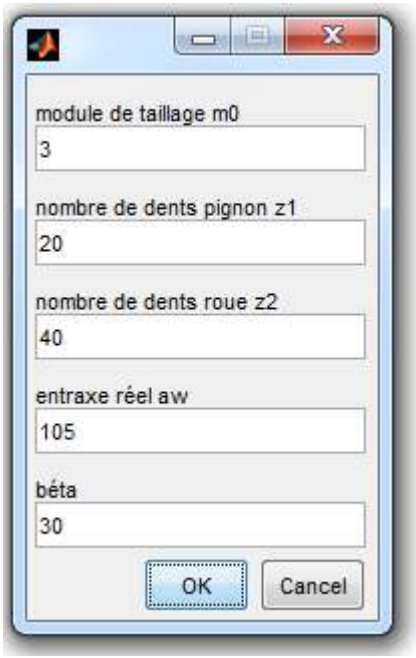
L'entraxe mesuré est de 105 mm.

Le module vaut $m_0 = 3$.

L'angle de l'hélice $\beta = 30°$.

On exécute le programme établi sous MATLAB 2013 pour les valeurs citées ci-dessus.

On va obtenir l'interface graphique suivante :



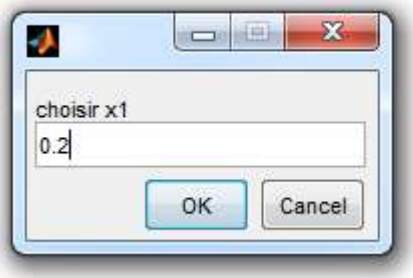
Après introduction des données et validation, on aura la fenêtre suivante :

```
X =

    0.3692


depor =

    0.3692
```



On a choisi le coefficient de déport $x_1 = 0{,}2$.

Après validation, on doit choisir le nombre de dent à contrôler pour les deux roues dentées qui sont des nombres entiers.

```
k1 =

    3.9213

k2 =

    7.3427
```



Enfin, on obtient les paramètres de taillage pour les deux dents :

```
RESULTACOUPLE =

    3.0000    3.0000
    3.4641    3.4641
   30.0000   30.0000
  105.0000  105.0000
  103.9230  103.9230
   20.0000   40.0000
   69.2820  138.5641
   76.4207  145.5180
    0.2000    0.1692
    6.6809    6.6809
    0.0307    0.0307
    4.0000    8.0000
   32.6715   69.2976
```

Paramètre	Pignon	Roue
module de taillage m_0	3.0000	3.0000
module tangentiel	3.4641	3.4641
angle d'inclinaison	30.0000	30.0000
entraxe réel ou de fonctionnement	105.0000	105.0000
Entraxe théorique	103.0000	103.0000
nombre de dents	20.0000	40.0000
diamètre primitif	69.2820	138.5641
diamètre extérieur	76.4207	145.5180
coefficient de déport	0.2000	0.0.1692
hauteur de la dent	6.6809	6.6809
correction de la tête	0.0307	0.0307
nombre de dents à contrôler	4.0000	8.0000
cote entre dents	32.6715	69.2976

Tableau IV.4 : *Paramètres de taillage obtenus pour un engrenage extérieur à denture hélicoïdale*

IV.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la démarche à suivre dans le cas de la défaillance d'une roue dentée du réducteur de vitesse, dès l'identification de la panne, étant la défaillance d'une roue dentée, jusqu'à la remise en place du réducteur dans le système mécanique. Pour cela, nous avons utilisé un programme sous MATLAB 2013 qui facilite le calcul des paramètres de taillage des roues dentées, nécessitant généralement une correction de la denture.

Des exemples montrant trois différents cas pour le calcul des paramètres de taillage ont été présentés.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La maintenance d'un réducteur de vitesse ayant comme panne la défaillance d'un train d'engrenage est souvent compliquée, par rapport aux pannes des autres éléments constitutifs d'un réducteur tels que les roulements et les arbres, vu la difficulté dans l'obtention d'un engrènement correct des deux roues du train.

Le marché n'étant pas une solution pratique pour le remplacement de la roue défectueuse, par l'indisponibilité des roues ayant un module non normalisé, on fait alors recours à la fabrication de deux roues dentées avec correction de la denture.

Les méthodes classiques de calcul des engrenages qui demandent beaucoup de temps, nécessitent un technicien connaisseur, et de la théorie des engrenages, notamment la correction des dentures, et des procédés d'obtention des engrenages.

Ce travail, que nous venons d'exposer, est élaboré afin de faciliter la tâche du bureau d'étude chargé de la maintenance dans le cas d'une des pires pannes qu'on peut rencontrer sur un réducteur de vitesse , à savoir, la détérioration d'une ou deux roues dentées d'un train d'engrenage. En effet, une démarche détaillée est établie dès la détection de la panne jusqu'au remontage du réducteur dans son milieu de fonctionnement, moyennant l'outil informatique pour le calcul des paramètres de taillages des roues dentées.

Cette étude, offre un gain considérable du temps grâce au programme développé sous MATLAB, que peut utiliser même le technicien n'ayant pas de connaissances approfondies en la matière.

Faute de temps, nous nous sommes limités, dans le présent travail, sur les engrenages cylindriques extérieurs, à dentures droite et hélicoïdale, fréquemment utilisés en mécanique. Nous souhaiterions, que dans l'avenir, cette étude sera complétée pour d'autres types d'engrenages extérieurs et intérieurs, à axes parallèles, concourants et gauches.

BIBLIOGRAPHIE

[1] R. Laggoune ,cours : généralité sur la maintenance, Université du Bejaia département de génie mécanique, 2016/2017.

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

[3] 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

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

[5] V. Zille, Modélisation et évolution des stratèges de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants, Thèse de doctorat. Université de technologie de Troyes- Institute Charles Delaunay, janvier 2009

[6] 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

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

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

[9] F. Monchy, Maintenance, Méthodes et organisation » Edition DUNOD, Coll. L'usine Nouvelle série gestion industrielle (2eme édition), Paris, 2003.

[10] E. Deloux: politiques de maintenance conditionnelle pour un
système à dégradation continue soumis a un environnement stressant.Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 7/10/ 2008.

[11] B. Moukrane : « maintenance préventive (on ligne) » https: // fr.slideshare.net. 20/03/2019.

[12] B. Oueld Mohamed Lamine.: « cours Méthodes de Maintenance ».Institut Supérieur d'Enseignement Technologique de Rosso. 2008/2009.

[13] H. Djamel, Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines Dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures , Thèse de Doctorat, Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2014.

[14] Méthode de planification de plan de maintenance : https://planonsoftware.com

[15] A. Belhomme : BTS Maintenance industrielle « Cours de stratégie de maintenance»

http://btsmiforges.free.fr, année 2010/2011.

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

[17] Robert le Borzec ; Techniques de l'ingénieur ; Réducteurs de vitesse à engrenages.

[18] Cours de construction mécanique ; Lycée technique Ahmadou Bamba Diourbel.

[19] Florestan Mathurin ; Eléments de transmission mécanique - partie 1- ; Lycée Bellevue Toulouse.

[20] Jean-Louis Fanchon ; Guide des sciences et Technologies industrielles ; AFNOR Tour Europe. Cedex792049 Paris-la défense.

[21] Transmission de puissances (engrenages) ; www.meca-mad.net (consulté le 1/03/2019).

[22] Michel Pasquier Société CMD; Maintenance des réducteurs industriels, Colloque national de la performance industrielle. France

[23] Brigitte Remacle, mécanique générale : roulements - engrenages –réducteurs ; édition septembre 2018.

[24] Mathieu Rossat, cours : Les Engrenages, Conception des transmissions de puissance, Septembre 2014.

[26] M. Aublin et co-auteurs, Systèmes mécaniques (Théorie et dimensionnement) Edition Dunod 1998.

[27] G. Henriot, Traité pratique et théorique des engrenage, Tome 1, Edition Dunod.

[28] G.R Nicolet, Conception et calcul des éléments de machine, Volume 3, Juin 2006.

[29] B. Anglade et H. Horsin Molarino, Cours taillage des engrenages, Ecole normale supérieure de Paris, édité le 30/10/2017.